

**Faculté des bioingénieurs**

# **Évaluation de la vulnérabilité de systèmes agricoles soumis à des retombées de téphra**

**Cas d'étude : Volcan Taal, Philippines**

Auteur : Roxane Baudouin  
Promoteur(s) : Pierre Delmelle (SST/ELI/LIE)  
Sophie Malherbe (SST/ELI/LIE)  
Lecteur(s) : Pierre Bertin (SST/ELI/LIE)  
Richard Lambert (SST/ELI/LIE)  
Année académique 2023-2024

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

## Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier mon promoteur, Pierre Delmelle, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur ce sujet captivant et pour m'avoir permis de réaliser la mission de terrain aux Philippines, qui fut une expérience particulièrement enrichissante. Je le remercie également pour ses conseils précieux, ainsi que pour ses relectures attentives.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers ma co-promotrice, Sophie Malherbe. Son encadrement attentionné et son organisation ont non seulement assuré le bon déroulement de la mission de terrain, mais ont aussi permis de rendre l'expérience enrichissante. Je la remercie également pour le temps qu'elle m'a consacré, pour ses vérifications minutieuses, ainsi que pour ses réponses et conseils précis tout au long de l'année.

Ensuite, je souhaite remercier Fabien Stark, pour ses conseils avisés. Son expertise a contribué à enrichir et perfectionner ce travail.

Merci aux professeurs Pierre Bertin et Richard Lambert d'avoir accepté de faire partie de mon jury en tant que lecteurs.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont joué un rôle crucial dans la réussite de la mission de terrain. Un grand merci à Juliette Glorieux pour son implication et sa rigueur dans la collecte des données. Je souhaite également à remercier chaleureusement Jamoralin Suyin, Tejome Jhana, Talens Virginia, et Hermosa Marice pour leur accompagnement et leur aide précieuse sur place.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, dont le soutien a été essentiel tout au long de mon parcours. Je suis infiniment reconnaissante qu'ils m'aient permis de réaliser ces études. Un merci tout particulier à ma maman, dont le soutien indéfectible et les encouragements constants ont été une source de réconfort dans les moments de doute. Sa disponibilité pour la relecture et ses conseils ont été des piliers dans l'achèvement de ce mémoire. Je tiens également à remercier chaleureusement ma mamy pour ses mots réconfortants depuis toujours. Merci à Lucien pour sa présence et son soutien mais également à tous mes amis, qui ont contribué à rendre ces années d'études absolument incroyables.

## Table des matières

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduction .....</b>                                                                                               | <b>1</b>  |
| <b>2. État de l'art .....</b>                                                                                              | <b>2</b>  |
| 2.1. Le volcanisme.....                                                                                                    | 2         |
| 2.2. Les volcans et l'agriculture.....                                                                                     | 7         |
| 2.3. Les sols volcaniques .....                                                                                            | 8         |
| 2.4. Impact des chutes de téphra sur l'agriculture .....                                                                   | 10        |
| 2.5. Vulnérabilité des systèmes agricoles face aux chutes de téphra .....                                                  | 16        |
| 2.5.1. La notion de risque, de vulnérabilité et de résilience .....                                                        | 17        |
| 2.5.2. Quantification de la vulnérabilité – fonctions de fragilité.....                                                    | 18        |
| <b>3. Objectifs du travail .....</b>                                                                                       | <b>22</b> |
| <b>4. Matériel et méthodes.....</b>                                                                                        | <b>23</b> |
| 4.1. Site d'étude : le volcan Taal, Philippines .....                                                                      | 23        |
| 4.2. Collecte des données.....                                                                                             | 26        |
| 4.3. Analyse qualitative.....                                                                                              | 27        |
| 4.4. Analyse quantitative .....                                                                                            | 30        |
| 4.5. Quantification des pertes face à des dépôts de 5 et 50 mm de téphra .....                                             | 30        |
| 4.5.1. Détermination des coefficients de perte de production – cultures .....                                              | 31        |
| 4.5.2. Détermination des coefficients de perte de production – élevage .....                                               | 32        |
| 4.5.3. Détermination des coefficients de saisonnalité .....                                                                | 34        |
| 4.5.4. Détermination des coefficients de perte sur les actifs .....                                                        | 35        |
| 4.6. Détermination des pertes de production et des pertes économiques liées aux dépôts de téphra.....                      | 36        |
| <b>5. Résultats .....</b>                                                                                                  | <b>38</b> |
| 5.1. Représentation conceptuelle et analyse du fonctionnement économique hors éruption des exploitations interviewées..... | 38        |
| 5.1.1. Exploitation n°1 .....                                                                                              | 38        |
| 5.1.2. Exploitation n°2.....                                                                                               | 41        |
| 5.1.3. Exploitation n°3.....                                                                                               | 42        |
| 5.1.4. Exploitation n°4.....                                                                                               | 45        |
| 5.1.5. Exploitation n°5.....                                                                                               | 46        |
| 5.1.6. Comparaison des différentes exploitations .....                                                                     | 49        |
| 5.2. Quantification de la vulnérabilité face à une éruption : Simulation sur deux exploitations choisies .....             | 50        |
| 5.2.1. Précisions et détails du fonctionnement de l'exploitation n°4 .....                                                 | 50        |
| 5.2.2. Détermination des pertes face à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm – Exploitation n°4 .....                           | 51        |
| 5.2.3. Précisions et détails du fonctionnement de l'exploitation n°5 .....                                                 | 53        |

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.4. Détermination des pertes face à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm – Exploitation n°5 ..... | 54        |
| <b>6. Discussion .....</b>                                                                       | <b>60</b> |
| 6.1. Interprétation des résultats – Exploitation n° 4 .....                                      | 60        |
| 6.2. Interprétation des résultats – Exploitation n°5 .....                                       | 62        |
| 6.2.1. Pertes associées à un dépôt de 5 mm de téphra .....                                       | 62        |
| 6.2.2. Pertes associées à un dépôt de 50 mm de téphra .....                                      | 65        |
| 6.3. Comparaison des résultats pour les deux exploitations agricoles .....                       | 68        |
| 6.4. Confrontation aux données de terrains : perceptions des exploitants agricoles .....         | 70        |
| 6.4.1. Exploitation n°4 .....                                                                    | 70        |
| 6.4.2. Exploitation n°5 .....                                                                    | 71        |
| 6.5. Utilisation d'une approche systémique .....                                                 | 71        |
| 6.6. Limites de l'étude .....                                                                    | 72        |
| 6.7. Perspectives de l'étude .....                                                               | 74        |
| <b>7. Conclusion .....</b>                                                                       | <b>75</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>                                                         | <b>76</b> |
| <b>Annexes .....</b>                                                                             | <b>83</b> |
| A. Questionnaire utilisé pour les interviews sur le terrain .....                                | 83        |
| B. Fonctions de fragilité utilisées pour déterminer les coefficients de pertes .....             | 95        |
| C. Analyse économique des différentes exploitations en situation normale .....                   | 98        |
| C1. Exploitation n°1 .....                                                                       | 98        |
| C2. Exploitation n°2 .....                                                                       | 99        |
| C3. Exploitation n°3 .....                                                                       | 100       |
| C4. Exploitation n°4 .....                                                                       | 101       |
| C5. Exploitation n°5 .....                                                                       | 102       |
| D. Calendriers de production .....                                                               | 103       |
| D1. Exploitation n°5 .....                                                                       | 103       |
| D2. Exploitation n°6 .....                                                                       | 103       |
| E. Analyse économique post-éruption - Exploitation n°4.....                                      | 105       |
| F. Analyse économique post-éruption – Exploitation n°5 .....                                     | 107       |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 – Illustration des processus de la tectonique des plaques (Siebert et al., 2010)                                                                                                                                                | 2  |
| Figure 2 - Exemples de particules de téphra (extrait de Wilson et al, 2015).....                                                                                                                                                         | 4  |
| Figure 3 - Ascension verticale et expansion latérale de la colonne éruptive pour un panache fort et faible (Bonadonna et al., 2015) .....                                                                                                | 6  |
| Figure 4 - Cartes d'isopaques et d'isoplèthes (taille maximale des particules en cm) représentant les dépôts de téphra lors de l'éruption du volcan Taal aux Philippines du 12 au 13 janvier 2020 (Balangue-Tarriela et al., 2022) ..... | 7  |
| Figure 5 - Modèle simplifié décrivant l'effet des conditions de lixiviation du silicium et de l'aluminium sur la formation de minéraux secondaires (Delmelle et al., 2015) .....                                                         | 9  |
| Figure 6 - Représentation des interactions possibles dans le cas d'un système agricole mixte (Fortier et al, 2021) .....                                                                                                                 | 10 |
| Figure 7- Rupture des tiges d'une cultures de maïs sous le poids du téphra suite à l'éruption du volcan Tungurahua en 2007 (Équateur) (USGS, 2015b) .....                                                                                | 11 |
| Figure 8 - Accumulation et cimentation de dépôts de téphra sur des feuilles après l'éruption du volcan Dukuno en 2009 (Indonésie) (Ayrís & Delmelle, 2012) .....                                                                         | 12 |
| Figure 9 - Dépôt de téphra sur les aiguilles de conifères après l'éruption du Mt St. Helens, 1980 (Ayrís & Delmelle, 2012) .....                                                                                                         | 12 |
| Figure 10 - Impacts du téphra sur le bétail .....                                                                                                                                                                                        | 14 |
| Figure 11 - Relations entre l'impact du téphra, les mesures d'intensité des risques et les caractéristiques de vulnérabilité du sol, de la végétation et des animaux (Craig, 2015). .....                                                | 16 |
| Figure 12 - Illustration des concepts de vulnérabilité et de résilience, repris de (Urruty et al., 2016).....                                                                                                                            | 17 |
| Figure 13 - Diagramme de la relation entre les évaluations d'impacts et de risques et leurs entrées et sorties associées (Craig, 2015) .....                                                                                             | 19 |
| Figure 14 - Fonction de fragilité représentant la perte de productions horticoles selon l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson & Kaye, 2007) .....                                                                                       | 20 |
| Figure 15 - Localisation du volcan Taal (Manila Observatory, 2020) .....                                                                                                                                                                 | 23 |
| Figure 16 – Retombées de téphra suite à l'éruption de janvier 2020, à Lemery dans la province de Batangas (Global Volcanism Program, 2020) .....                                                                                         | 24 |
| Figure 17 – Localisation des cinq exploitations étudiées à proximité du volcan Taal, Philippines .....                                                                                                                                   | 26 |
| Figure 18 - Modèle conceptuel global d'un système agricole .....                                                                                                                                                                         | 29 |
| Figure 19 - Modèle conceptuel de l'exploitation n° 1 .....                                                                                                                                                                               | 39 |
| Figure 20 - Modèle conceptuel de l'exploitation n° 2 .....                                                                                                                                                                               | 41 |
| Figure 21 - Modèle conceptuel de l'exploitation n° 3 .....                                                                                                                                                                               | 43 |
| Figure 22 - Modèle conceptuel de l'exploitation n°4 pour une année lissée.....                                                                                                                                                           | 45 |
| Figure 23 - Modèle conceptuel de l'exploitation n°5.....                                                                                                                                                                                 | 47 |

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 24 - Comparaison des revenus annuels nets, bruts et des coûts annuels de l'exploitation n°4 pour les différentes périodes du cycle de la monoculture et pour une année lissée .....                          | 50  |
| Figure 25 – Pourcentages de perte de revenu annuel net de l'exploitation n°4 pour les années avec et sans renouvellement des plants, en fonction du mois de l'éruption, pour un dépôt de 5 et 50 mm de téphra ..... | 52  |
| Figure 26 – Contribution des différentes catégories de production au revenu annuel net et aux coûts annuels de l'exploitation n°5 .....                                                                             | 53  |
| Figure 27 - Pertes de revenus annuels nets pour l'exploitation n°5 en fonction du mois de l'éruption pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra .....                                                                  | 54  |
| Figure 28 - Valeur annuelle brute des différentes cultures de l'exploitation n°5 en situation normale et pour 5 et 50 mm de téphra en juillet et en mai .....                                                       | 57  |
| Figure 29 – Pertes de production des différentes cultures de l'exploitation n°5 pour le scénario d'éruption de 5 et 50 mm de téphra en juillet et en mai .....                                                      | 58  |
| Figure 30 - Pourcentages de perte de revenu annuel brut pour les différents élevages de l'exploitation n°5 pour le scénario d'éruption de 5 et 50 mm de téphra en juillet et en mai .....                           | 58  |
| Figure 31 - Apport des différents élevages au revenu annuel brut du compartiment animal de l'exploitation n°5 pour le scénario d'éruption de 5 et 50 mm de téphra en mai .....                                      | 59  |
| Figure 32 - Fonctions de fragilité spécifiques aux actifs agricoles (Wilson & Kaye, 2007) .....                                                                                                                     | 95  |
| Figure 33 - Fonctions de fragilité pour différents types de productions horticoles (Wilson & Kaye, 2007) .....                                                                                                      | 96  |
| Figure 34 - Fonctions de fragilité pour différents types d'élevage (Wilson & Kaye, 2007) .....                                                                                                                      | 96  |
| Figure 35 - Fonctions de fragilité pour des cultures spécifiques et qui intègre l'influence des stades phénologiques (Ligot, et al., 2023).....                                                                     | 97  |
| Figure 36 - Calendrier de culture de la canne à sucre pour l'exploitation n°5 – Année de semis.....                                                                                                                 | 103 |
| Figure 37 - Calendrier de culture de l'exploitation n°6.....                                                                                                                                                        | 103 |
| Figure 38 - Estimation du cycle annuel de fonctionnement de l'élevage caprin de l'exploitation n°6 sur base des données récoltées .....                                                                             | 104 |
| Figure 39 - Estimation du cycle annuel de fonctionnement de l'élevage porcin de l'exploitation n°6 sur base des données récoltées .....                                                                             | 104 |
| Figure 40 - Estimation du cycle annuel de fonctionnement de l'élevage de volailles de l'exploitation n°6 sur base des données récoltées .....                                                                       | 105 |
| Figure 41 - Pourcentages de perte de revenu annuel net de l'exploitation n°5 pour une année lissée en fonction du mois de l'éruption pour un dépôt de 5 et 50 mm de téphra .....                                    | 105 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1 - Échelle d'explosivité des éruptions volcaniques (Newhall & Self, 1982) .....                                                                                   | 3   |
| Tableau 2 - Impacts physiques et chimiques rapportés sur la santé animale selon l'épaisseur de dépôt de téphra, adapté de (Craig et al., 2016; Jenkins et al., 2015) ..... | 15  |
| Tableau 3 - Coefficients de pertes de production par type de culture et pour un dépôt de 5 et 50 mm .....                                                                  | 32  |
| Tableau 4 - Coefficients de perte pour le bétail pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra (Wilson & Kaye, 2007).....                                                        | 33  |
| Tableau 5 - Coefficients de saisonnalité associés aux stade de développement des cultures (Wilson & Kaye, 2007) .....                                                      | 34  |
| Tableau 6 - Coefficients de perte de production liés à la saisonnalité pour un dépôt de 5 mm de téphra.....                                                                | 35  |
| Tableau 7 - Coefficients de perte de production liés à la saisonnalité pour un dépôt de 50 mm de téphra .....                                                              | 35  |
| Tableau 8 - Coefficients de perte sur les actifs pour les cultures arboricoles pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra .....                                               | 36  |
| Tableau 9 - Temps de renouvellement des cultures pérennes étudiées .....                                                                                                   | 36  |
| Tableau 10 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°1 .....                                                                                                       | 40  |
| Tableau 11 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°2.....                                                                                                        | 42  |
| Tableau 12 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°3.....                                                                                                        | 44  |
| Tableau 13 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°4 (année lissée) .....                                                                                        | 46  |
| Tableau 14 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°5.....                                                                                                        | 48  |
| Tableau 15 - Comparaisons des différents caractéristiques principales des cinq exploitations .....                                                                         | 49  |
| Tableau 16 - Impacts sur les flux entrants en PHP/an et en % de l'exploitation n°5 pour 5 mm de téphra en juillet et 50 mm en mai .....                                    | 55  |
| Tableau 17 - Impacts sur les flux sortants de l'exploitation n°5 en PHP/an et en % pour 5 mm de téphra en juillet et 50 mm en mai .....                                    | 56  |
| Tableau 18 - Pertes en PHP/an et en pourcents à l'échelle du système agricole n°5 pour 5 mm de téphra en juillet et 50 mm en mai.....                                      | 56  |
| Tableau 19 – Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°1 et récapitulatif global .....                                                              | 98  |
| Tableau 20 – Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°2 et récapitulatif global .....                                                              | 99  |
| Tableau 21 - Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°3 et récapitulatif global .....                                                              | 100 |
| Tableau 22 - Évaluation économique de l'exploitation n°4 et récapitulatif global .....                                                                                     | 101 |
| Tableau 23 - Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°5 et récapitulatif global .....                                                              | 102 |

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 24 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°4 pour les deux scénarios de dépôt - Année lissée .....                 | 106 |
| Tableau 25 - Revenus annuels nets de l'exploitation n° 4 pour les deux scénarios de dépôts – Année sans renouvellement .....  | 106 |
| Tableau 26 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°4 pour les deux scénarios de dépôts - Année de semis.....               | 107 |
| Tableau 27 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°5 pour les deux scénarios et les pourcentages de pertes associées ..... | 107 |

## 1. Introduction

L'agriculture est un secteur économique crucial dans la plupart des régions volcaniques, principalement en raison de la grande fertilité des sols. Celle-ci résulte de l'altération des matériaux volcaniques, notamment des dépôts de téphra issus des éruptions explosives (Craig et al., 2016; Shoji et al., 1993). Cette fertilité a historiquement bénéficié à l'agriculture, incitant ainsi les populations à s'installer dans ces régions et entraînant une densité de population élevée. En effet, environ 11% de la population mondiale vit dans un rayon de 100 km autour de volcans ayant été actifs durant l'holocène (Siebert et al., 2010).

Toutefois, cette proximité avec les zones d'activité volcanique expose l'agriculture et les populations qui en dépendent aux retombées de téphra. Les éruptions volcaniques explosives génèrent du téphra, des particules fines projetées dans la colonne éruptive et ensuite transportées par les vents dominants, pouvant retomber sur des zones s'étendant sur des centaines, voire des milliers de kilomètres carrés (Brown et al., 2015). L'agriculture et ses sous-secteurs sont particulièrement vulnérables aux effets physiques et chimiques des dépôts de téphra, avec des impacts notables sur la végétation, les sols, ainsi que la santé animale et humaine, sans oublier et les infrastructures (Wilson et al., 2011). Même un dépôt de quelques millimètres de téphra peut entraîner des pertes économiques substantielles, affectant non seulement la subsistance alimentaire, en réduisant la production agricole et menaçant la sécurité alimentaire, mais aussi la subsistance monétaire, en générant des coûts importants pour les systèmes agricoles et en impactant les revenus des communautés locales.

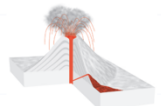
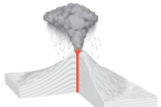
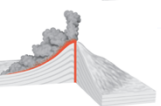
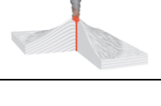
Compte tenu de l'exposition importante et les conséquences potentielles, l'évaluation des impacts des retombées de téphra sur le secteur agricole apparaît comme essentielle, notamment pour l'élaboration de stratégies de prévention et de réduction des risques afin de limiter les pertes dans ce secteur. Cependant, la majorité des études actuelles ne quantifient que de l'impact des dépôts de téphra sur certaines cultures ou types d'animaux spécifiques, sans prendre en compte l'effet sur les systèmes agricoles dans leur ensemble, négligeant ainsi les interactions au sein de ceux-ci.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, qui vise à évaluer la vulnérabilité des systèmes agricoles en adoptant une approche systémique, considérant les exploitations agricoles comme des systèmes intégrés. Cette étude cherche à contribuer à une meilleure compréhension de la vulnérabilité de ces exploitations face aux retombées de téphra, dans le but de soutenir le développement futur d'approches de réduction des risques. Ainsi, ce travail se concentre sur cinq systèmes agricoles de la région avoisinant le volcan actif du Taal aux Philippines.



décrits dans le Tableau 1. Le VEI est exprimé sur une échelle logarithmique de 0 à 8, et ne s'applique qu'aux éruptions avec une composante explosive, alors que l'échelle de magnitude est plus générale, incluant les produits effusifs (lave) et explosifs.

Tableau 1 - Échelle d'explosivité des éruptions volcaniques (Newhall & Self, 1982)

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

Plus le VEI est élevé, plus le volume de téphra éjecté est important. L'étendue de la dispersion du téphra dépend de nombreux facteurs tels que la puissance de l'explosion, l'altitude maximale atteinte par la colonne de téphra dans l'atmosphère, les conditions climatiques et la taille des particules de téphra éjectées. Les éruptions avec un faible VEI sont plus fréquentes, et elles peuvent également disperser les particules de téphra de plus faibles tailles sur de longues distances, impactant également de manière significative l'environnement. Les travaux de Ligot et al. décrivent notamment la réduction des rendements de culture suite au dépôt d'une fine pellicule de téphra sur les feuilles des plantes, inhibant leur photosynthèse (Ligot, 2022; Ligot et al., 2023; Ligot et al., 2024).

### 2.1.2. Le téphra

Le téphra est le nom générique donné aux fragments de roches volcaniques produits par les éruptions explosives (Wilson et al., 2015), lesquels peuvent varier en tailles. On distingue ainsi les blocs et bombes (>64mm) du lapilli (2-64mm) et les cendres (<2 mm), comme illustré à la Figure 2. Les cendres volcaniques peuvent elles-mêmes être

classifiées en : grossières (de 100 à 2000  $\mu\text{m}$ ), fines (de 63 à 100  $\mu\text{m}$ ) et très fines (< 63  $\mu\text{m}$ ) (Rose & Durant, 2009).



Figure 2 - Exemples de particules de téphra (extrait de Wilson et al, 2015)

Les blocs et les bombes sont généralement déposés dans un rayon de 5 km autour du volcan, tandis que les lapilli et les cendres sont propulsées au sein de la colonne éruptive, puis dispersées par les vents dominants. Les particules les plus fines peuvent être transportées sur plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres (Thompson et al., 2017).

Plus le VEI de l'éruption est élevé, plus la fragmentation du magma est importante et plus la taille des grains de téphra sera plus fine (<1 mm) (Zimanowski & Büttner, 2003). La taille des particules détermine leur surface spécifique, laquelle influe sur leur potentiel de réactivité chimique. Une surface spécifique accrue signifie davantage de superficie disponible par unité de masse pour les réactions chimiques dans le milieu de dépôt (Ayrès & Delmelle, 2012). La granulométrie des téphra joue un rôle important sur le temps de résidence du téphra dans l'atmosphère, dans l'eau ainsi qu'à la surface du sol et des végétaux.

Les dépôts de téphra comportent des proportions variables de particules vitreuses (non cristallines) et de minéraux magmatiques cristallin, ces derniers étant souvent abrasifs car très durs et angulaires (Wilson et al., 2015). Outre la taille des particules, la couleur et la composition chimique de surface sont les principales propriétés physico-chimiques du téphra qui vont influencer leurs interactions avec l'environnement (Ayrès & Delmelle, 2012).

Le téphra peut avoir différentes compositions chimiques selon la teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de mafique ( $\leq 57\%$  de  $\text{SiO}_2$ ) à silicique ( $\geq 77\%$  de  $\text{SiO}_2$ ), en fonction du magma et des roches dont il dérive (Le Maitre et al., 2004). Ayrès et Delmelle (2012) rapportent la présence de Fe et d'oxydes de Fe et de Ti, en proportions variables. Dans certains cas, le téphra peut aussi contenir des sels de sulfates ( $\text{CaSO}_4$ ), de chlorures ( $\text{NaCl}$ ) et parfois de fluorures ( $\text{NaF}$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , etc.). Ces composés peuvent provenir du système hydrothermal affecté pendant l'éruption ou résulter des réactions à haute température dans le

panache entre les gaz volcaniques et la surface du téphra (Delmelle et al., 2007). Plus de 55 composés solubles ont été analysés dans les cendres volcaniques, dont certains potentiellement toxiques, comme les fluorures (Wilson et al., 2015). Si des sulfures de fer d'origine hydrothermale sont présents dans les téphra qui composent le dépôt, ces minéraux s'oxydent au contact de l'eau et produisent de l'acide sulfurique.

La couleur définit particulièrement les propriétés radiatives du téphra (c'est-à-dire sa capacité à transmettre et/ou absorber les radiations électromagnétiques) et elle est fonction de la concentration en certains métaux comme le fer ou le titane, qui absorbent plus ou moins la lumière. Le téphra riche en silice réfléchit plus les radiations solaires que celui riche en fer, donnant potentiellement des valeurs d'albédo<sup>1</sup> significativement supérieures pour le téphra comparé aux sols terrestres. Ces valeurs peuvent néanmoins être impactées par l'humidité du téphra (Ayrès & Delmelle, 2012).

### 2.1.3. Facteurs influençant la dispersion et le dépôt de téphra

Selon la nature chimique et physique du magma en éruption et du vent environnant (sec ou humide), le mode d'éruption varie largement. Le mode d'éruption et les conditions météorologiques sont les principaux facteurs contrôlant le transport et la dispersion du téphra (Kobayashi & Okuno, 2002).

Une éruption se produit lorsque le magma liquide migre vers la surface, aidé par la baisse rapide de sa densité en raison de l'exsolution des gaz dissous et l'expansion des bulles de gaz au sein du magma. Pendant une éruption volcanique explosive, les gaz et les débris pyroclastiques sont propulsés dans l'atmosphère à l'intérieur d'une colonne éruptive, souvent appelée panache volcanique. La température dans la colonne étant supérieure à celle de l'atmosphère environnant, la densité est plus faible et la colonne s'élève, jusqu'à atteindre un niveau de flottabilité neutre lorsque les densités du panache et de l'air finissent par s'équilibrer. Le panache est alors pris par les vents dominants et va se disperser latéralement dans l'atmosphère (Bonadonna et al., 2015). Généralement, les cendres volcaniques peuvent être propulsées à des altitudes allant de quelques kilomètres (typiquement de 4 à 10 km), jusqu'à plus de 40 km au-dessus du niveau de la mer. La hauteur à laquelle les cendres volcaniques sont injectées dans l'atmosphère est un paramètre critique car il détermine la dispersion et l'impact global du nuage de cendres. A haute altitude, les particules de téphra peuvent se disperser sur de vastes distances et rester dans l'atmosphère sur de plus longues périodes. La vitesse et la direction du vent, ainsi que les conditions atmosphériques (turbulences, variables selon les saisons) détermineront la distance et la direction vers laquelle le téphra sera transporté (Figure 3).

---

<sup>1</sup> Quantité de rayonnement solaire réfléchi par une surface ; plus la surface est claire, plus elle réfléchit une grande quantité de rayons (Gueymard et al., 2019)

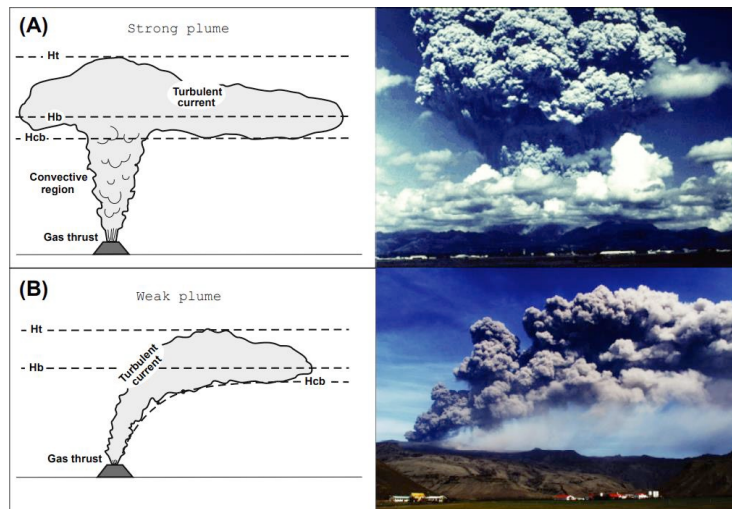


Figure 3 - Ascension verticale et expansion latérale de la colonne éruptive pour un panache fort et faible (Bonadonna et al., 2015)

La distribution spatiale du dépôt de téphra (principalement l'épaisseur et la distribution granulométrique) est influencée par des facteurs tels que le style éruptif, l'explosivité, et les conditions de vent. Les particules de téphra les plus larges et les plus denses se déposent à proximité du volcan, tandis que les particules les plus fines ( $< 100 \mu\text{m}$ ) peuvent être transportées sur de longues distances par les vents (Pyle, 1989; Wilson et al., 2011).

À mesure que le panache de téphra se disperse sous le vent, la concentration des particules dans celui-ci diminue, ce qui entraînera une réduction de l'épaisseur du dépôt de téphra. Des modèles intégrant la configuration des vents et les paramètres des sources d'éruption (ESP), tels que la hauteur de la colonne éruptive, la masse éjectée, le taux d'éruption de la masse et la distribution granulométrique du téphra permettent de décrire la dispersion atmosphérique et la sédimentation des particules de téphra (Bonadonna et al., 2015).

Sur base des observations de terrain sur les dépôts de téphra, il est possible de représenter spatialement les informations sur des cartes de type : (i) d'isopaques basées sur les mesures de l'épaisseur du dépôt de téphra (Figure 4a), (ii) d'isomasses basées sur des mesures de charge massique de téphra et, (iii) d'isoplèthes sur la base de mesures de granulométrie maximale ou moyenne (Figure 4b).

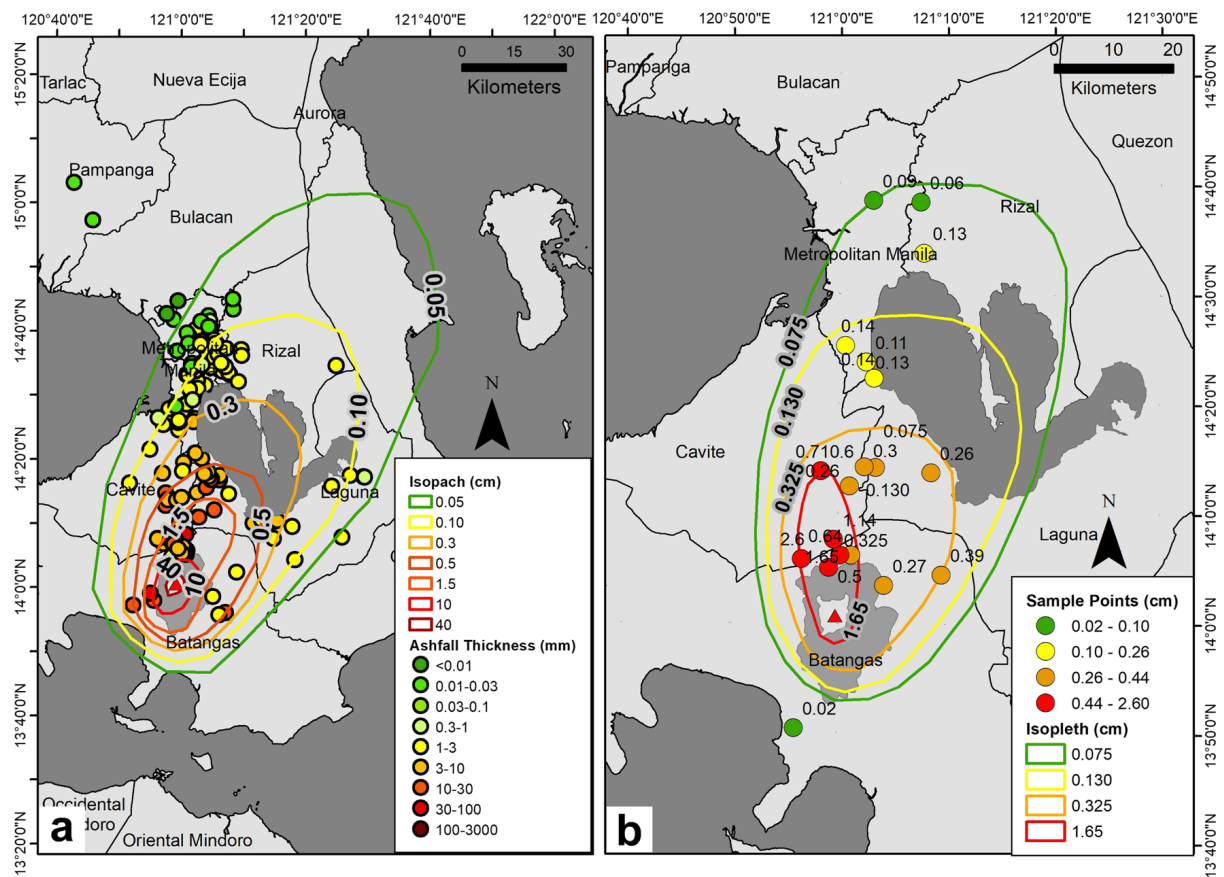


Figure 4 - Cartes d'isopaques et d'isoplèthes (taille maximale des particules en cm) représentant les dépôts de téphra lors de l'éruption du volcan Taal aux Philippines du 12 au 13 janvier 2020 (Balangue-Tarriela et al., 2022)

## 2.2. Les volcans et l'agriculture

Le terme « sol volcanique » désigne les sols formés par les dépôts volcaniques, incluant la lave et les retombées de téphra (Mcdaniel et al., 2012). Leur fertilité permettant le développement d'une flore dense et d'une faune variée, a de tout temps bénéficié à l'agriculture, permettant la subsistance de nombreuses grandes civilisations. On peut citer en exemple, les Mayas de la région de l'actuel San Salvador, pour laquelle on estime que l'éruption du volcan Ilopango aux alentours de 400 après JC a complètement dévasté la région de l'El Salvador, ainsi que les régions adjacentes du Guatemala et du Honduras, conduisant à l'effondrement de la civilisation (Dull et al., 2001).

Néanmoins, malgré les risques, certaines régions volcaniques sont densément peuplées. En 2010, Siebert et al. estiment que plus de 47 millions de personnes résident dans un rayon  $VPI_5^2$  d'environ 1300 volcans holocènes, les personnes vivant à cette distance étant soumises potentiellement à des effets volcaniques mortels, même en cas d'éruptions de taille moyenne (VEI 2-3). En cas d'éruption, ces personnes doivent

<sup>2</sup>  $VPI_5$ : Volcano Population Index, calculant la densité de population autour des volcans dans un rayon de 5 km (de la même manière,  $VPI_{10}$ ,  $VPI_{15}$ ,  $VPI_{30}$  et  $VPI_{100}$  correspondent à 10, 15, 30 et 100 km (Siebert et al., 2010).

souvent être évacuées. Plus de 200 millions de personnes résident dans un rayon  $VPI_{30}$  et sont soumises à la menace d'accumulation de téphra et d'écoulements pyroclastiques. Enfin, plus de 11% de la population mondiale vit dans un rayon  $VPI_{100}$  avec un impact important de potentielles accumulations de téphra en cas d'éruptions de plus grande ampleur (VEI 5-6) (Siebert et al., 2010). Les régions volcaniques avec les plus hautes concentrations de population ( $VPI_5$  et  $VPI_{10}$ ) se trouvent au Mexique/Amérique centrale et du Sud, alors que celles présentant les  $VPI_{30}$  et  $VPI_{100}$  les plus élevés se trouvent en Indonésie. (Siebert et al., 2010).

Les fortes densités de population autour des volcans peuvent être attribuées à différents facteurs tels que les ressources géothermiques, la richesse du sous-sol (par exemple, l'exploitation des matériaux volcaniques, des pierres précieuses) ou le développement du tourisme (Kelman & Mather, 2008). Toutefois, la richesse des sols volcaniques est la principale raison poussant les personnes à s'installer à proximité de volcans actifs. Avec des répercussions qui peuvent être dramatiques en cas d'éruption. En effet, sur la période 2006-2016, les pertes subies par l'agriculture et ses sous-secteurs suite à l'activité volcanique ont atteint jusqu'à 30% des pertes totales comparativement aux autres secteurs économiques (FAO, 2018).

### 2.3. Les sols volcaniques

La particularité des sols volcaniques est leurs propriétés physiques et chimiques qui leur confèrent généralement une excellente fertilité et un potentiel agronomique élevé. La majorité des sols volcaniques sont classés comme « Andisols<sup>3</sup> », caractérisés par une faible densité apparente et une importante capacité de rétention d'eau (Delmelle et al., 2015). Ils contiennent une fraction argileuse ( $< 2\mu m$ ) dont les propriétés sont liées à la présence de minéraux peu et non cristallins. Ceux-ci permettent la stabilisation de la matière organique et une bonne agrégation. Ces facteurs conduisent à une rétention d'eau adéquate et à une conductivité hydraulique élevée (Shoji et al., 1993 ; Dahlgren et al., 2004 ; Mcdaniel et al., 2012).

La formation des sols s'effectue par l'altération d'un matériau parental, sous l'interaction de différentes variables environnementales telles que le climat, la végétation et la topographie. Le téphra s'altère rapidement, par altération des particules vitreuses, permettant la libération de nutriments importants pour les végétaux tels que le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium. Parallèlement, l'altération chimique du verre volcanique présent dans le téphra libère de la silice, de l'aluminium et du fer en solution à des concentrations qui conduisent à une sursaturation de phases solides secondaires (Delmelle et al., 2015). Le modèle de la Figure 5 résume la formation

---

<sup>3</sup> Les Andisols sont un groupe de sol de référence tel que repris par le « World Reference Base for Soil Resources », (FAO Soils Portal, s. d.)

des différentes phases solides secondaires lors de l'altération chimique des téphra en fonction des conditions de drainage (pluie) et de lixiviation.

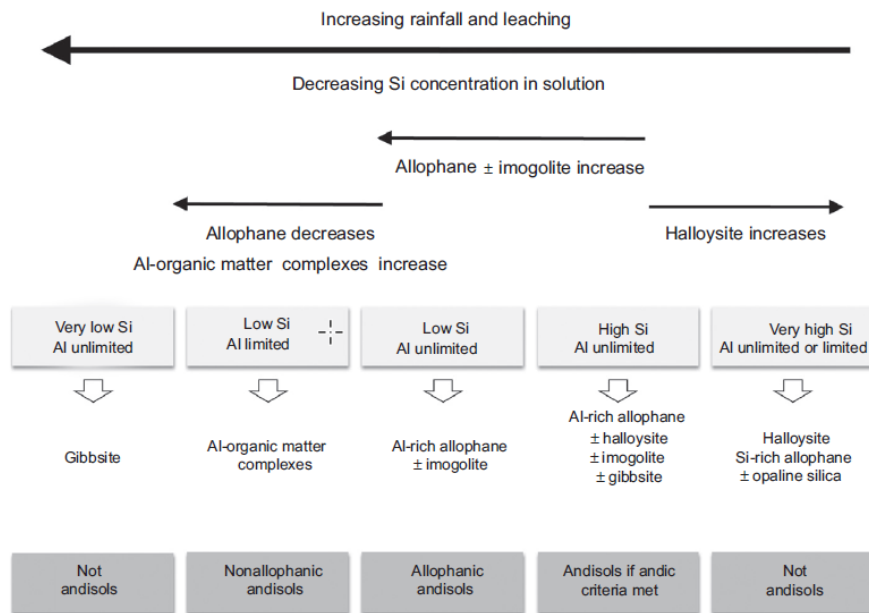


Figure 5 - Modèle simplifié décrivant l'effet des conditions de lixiviation du silicium et de l'aluminium sur la formation de minéraux secondaires (Delmelle et al., 2015)

Les matières organiques présentes dans le sol sont généralement chargées négativement sur une large gamme de pH, mais peuvent devenir encore plus négatives si le pH augmente. Les sols volcaniques peuvent avoir des charges de surface variables, affectant le comportement des ions et notamment les nutriments. Ces sols retiennent généralement les cations à des valeurs de pH plus élevées, et à l'inverse, des anions si le pH devient plus acide. Le phosphore notamment peut être disponible pour les plantes s'il se présente sous forme d'anion phosphate. Il est présent en grandes quantités dans les matières organiques présentes dans les sols. Cependant, dans beaucoup de sols volcaniques, il y a une forte rétention d'anions sur les surfaces minérales chargées positivement, rendant le phosphate non disponible pour les racines des plantes, nécessitant une large application de fertilisants phosphorés. De la même manière, certains sols volcaniques sont déficients en soufre (Delmelle et al., 2015).

D'autres carences ont été décrites dans les sols volcaniques, par exemple des déficiences en cobalt et en sélénium, pouvant affecter négativement le bétail élevé sur ces sols. L'azote, absent du matériau parental, sera fourni à partir de la minéralisation de la matière organique amenée au sol. En cas de fortes retombées de téphra (environ 30 à 50 cm), le dépôt peut enfouir le sol de surface pré-existant et l'isoler de la plupart des processus de pédogénèse du sol (Ligot, 2022). Dans ce cas, un nouveau sol volcanique se formera à partir du dépôt de téphra. Ainsi, les sols volcaniques sont souvent des sols polygénétiques.

## 2.4. Impact des chutes de téphra sur l'agriculture

### 2.4.1. Définitions

Une exploitation agricole désigne, en économie rurale ; une entreprise (ou une partie d'une entreprise) vouée à la production agricole et caractérisée par une gestion unique et des moyens de production propres (« Exploitation agricole », 2024). Cette définition comprend plusieurs caractéristiques clés, telles que :

- i. L'exploitation est administrée sous une direction unique, même si les parcelles se situent en différents lieux
- ii. L'activité principale est la production de produits agricoles (culture de plantes, élevage d'animaux, production de produits dérivés comme le lait ou le miel, la sylviculture)
- iii. L'exploitation gère ses méthodes de production et ses infrastructures, et assure sa gestion financière (investissements, rendements...)

Lorsque l'on considère les interactions entre les différentes composantes d'une exploitation agricole, on parle alors de système agricole. Il intègre à la fois les cultures, l'élevage, ainsi que les processus de gestion des ressources (telles que l'eau, le sol ou la biodiversité), les techniques agricoles et les méthodes de commercialisation des produits (Figure 6). Par exemple, on parle de systèmes agricoles mixtes lorsque cultures et élevages sont combinés permettant des synergies entre les deux, comme l'utilisation du fumier pour fertiliser les cultures (Fortier et al, 2021)

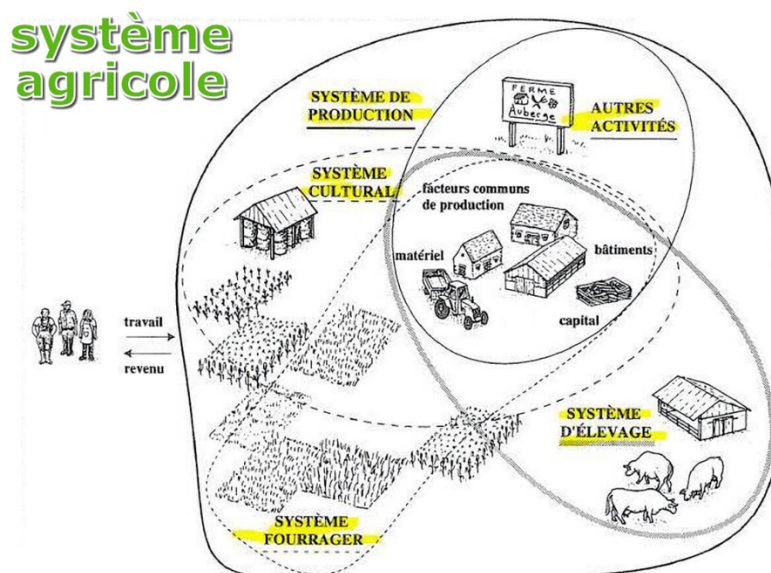


Figure 6 - Représentation des interactions possibles dans le cas d'un système agricole mixte (Fortier et al, 2021)

Un système agricole est donc une organisation complexe, dont le fonctionnement ne peut être décrit que par une approche globale. Notamment, dans le cadre de l'évaluation de l'impact des retombées de téphra sur les systèmes agricoles, il faut pouvoir tenir compte de tous les éléments interdépendants, dont la disparition d'un élément peut perturber la production d'autres éléments. Pour cela, une approche systémique est recommandée : cette démarche appréhende les phénomènes complexes dans leur globalité, en tenant compte des multiples interactions qui les animent, sans pour autant renier l'utilité préalable de la démarche analytique (GAP EcoGes, 2017).

#### 2.4.2. Impact des chutes de téphra sur les cultures

Les exploitations agricoles exposées au danger représenté par les chutes de téphra bénéficient, hors éruption, de la fertilité des sols volcaniques qui eux-mêmes dérivent des téphra. Cependant, en cas d'éruption, les retombées de téphra provoquent des dommages directs ou indirects et plus ou moins graves aux cultures (Ligot, 2022). Le type et la sévérité des impacts sur les systèmes agricoles dépendent à la fois de l'intensité du risque (épaisseur et taille des grains de téphra), des conditions météorologiques (vent, précipitations, humidité) et de la vulnérabilité des exploitations agricoles exposées (types de culture, morphologie des plantes et stade de développement ou encore leur taille) (Craig, 2015).

Les dépôts de téphra peuvent avoir toute une gamme d'effets physiques, chimiques et biologiques sur l'environnement, immédiatement après l'éruption mais également sur le long terme (Ayrís & Delmelle, 2012). Les effets physiques et mécaniques du téphra sur les plantes résultent du dépôt de particules, affectant les cultures par leur charge. Selon l'épaisseur du téphra, les dommages peuvent aller jusqu'à l'étouffement ou l'enfouissement des plantes (si l'épaisseur de téphra est supérieure à la hauteur des plantes (herbes, arbustes)) ou encore à la rupture des tiges, des fruits et des feuilles en raison du poids supplémentaire (Cook et al., 1981) (Figure 7).



*Figure 7- Rupture des tiges d'une cultures de maïs sous le poids du téphra suite à l'éruption du volcan Tungurahua en 2007 (Équateur) (USGS, 2015b)*

Les plantes les plus proches des volcans sont généralement les plus affectées, car l'épaisseur de téphra y est plus importante. A la suite de l'éruption de 1943 du volcan Parícutín (Mexique), le déclin voire la mort de la végétation a été attribué à quatre causes : (i) enfouissement complet des plantes ; (ii) enfouissement partiel, restreignant l'oxygénation des racines ; (iii) défoliation et absence prolongée de feuilles ; (iv) recouvrement de la surface des feuilles par le téphra, obstruant les stomates et bloquant le rayonnement incident du soleil (Rees, 1979).

Des dégâts mineurs ont aussi été observés, comme des meurtrissures aux tissus par suite du frottement avec les particules, favorisant la croissance de champignons ou de pathogènes (Rees, 1979). Le vent peut éliminer le téphra des plantes et diminuer ainsi son temps de résidence, mais il peut aussi avoir un effet néfaste en augmentant la friction. Ce phénomène peut aussi être observé sur du moyen-long terme, causé par la remobilisation du téphra par le vent (Lebon, 2009), ralentissant la recolonisation des milieux par la végétation naturelle ou par les cultures. En effet, les plants les plus jeunes et de plus petite taille sont les plus vulnérables à l'abrasion (Rees, 1979). Enfin, la pollinisation est également affectée par la présence de téphra sur les fleurs, réduisant l'accès pour les abeilles et autres insectes pollinisateurs et limitant le transfert du pollen de plantes en plantes (Lebon, 2009).

Dans d'autres circonstances, par exemple, en cas de pluie, les dépôts peuvent aussi être lessivés (selon l'intensité des pluies) mais aussi augmenter le poids sur les plantes. La charge d'un dépôt de téphra saturé en eau peut être presque deux fois plus grande que la même épaisseur de téphra sec (Macedonio & Costa, 2012). Les dépôts peuvent aussi s'encroûter ou se cimenter (Figure 8), empêchant alors la réapparition de la végétation, comme cela a été observé après l'éruption du Mont St Helens en 1980 (Seymour et al., 1983) (Figure 9).



*Figure 8 - Accumulation et cimentation de dépôts de téphra sur des feuilles après l'éruption du volcan Dukuno en 2009 (Indonésie) (Ayrís & Delmelle, 2012)*



*Figure 9 - Dépôt de téphra sur les aiguilles de conifères après l'éruption du Mt St. Helens, 1980 (Ayrís & Delmelle, 2012)*

Le temps de résidence du téphra sur les plantes sera également dépendant de la morphologie des plantes : une surface rugueuse sur les feuilles augmente la rétention du

téphra, alors que les feuilles lisses et cireuses seront plus sensibles à l'exposition au vent et à l'eau, réduisant le temps de résidence du téphra (Cook et al., 1981).

Les effets physiques sont responsables des pertes les plus importantes pour l'agriculture (Craig, 2015). Il est à noter également que les impacts pour une épaisseur de téphra donnée dépendront aussi du type de plantes concernées, ainsi que de leur état physiologique au moment de l'éruption (Lebon, 2009; Zobel & Antos, 1987).

Parmi les effets néfastes provoqués par les composés chimiques du téphra sur les cultures, des chloroses, des nécroses, de la dessiccation, des flétrissements et des brûlures, ont été rapportées, impactant considérablement la photosynthèse des plantes (Ayrís & Delmelle, 2012; Cook et al., 1981; Le Guern et al., 1980; Ligot, 2022). Elles peuvent être causées par le contact avec des solutions à concentrations anormales en halogénures, chlorures, fluorures ou encore par la libération d'acide sulfurique suite à l'oxydation de la pyrite,  $\text{FeS}_2$  (Ayrís & Delmelle, 2012). Les principaux facteurs déterminant l'intensité de ces effets sont la composition de la surface du téphra, le flux d'eau qui nettoie le dépôt, ainsi que la sensibilité de la plante à l'acidité et aux sels, dépendant de l'espèce (Mariage, 2024).

#### 2.4.3 Impact des chutes de téphra sur le bétail

Les retombées de téphra peuvent aussi affecter négativement le bétail, qu'il soit élevé en pâture ou sous abri, impactant la disponibilité de la nourriture et la qualité de l'eau (Figure 10b). Les facteurs contribuant à la vulnérabilité du bétail au téphra sont, outre l'épaisseur (ou la charge du téphra), la toxicité du téphra, la composition (minéraux, particules vitreuses) et la consistance du téphra (taille, forme angulaire ou plus arrondie), les conditions climatiques (par exemple, une pluie juste après un dépôt de téphra peut contribuer à lessiver la fine couche de téphra sur les plantes), l'état de santé, l'âge et le type de bétail au moment de l'éruption (les jeunes animaux étant plus sensibles que les animaux adultes) (Huertas, 2022; USGS, 2015a; Wilson et al., 2011).

En théorie, jusqu'à 5 mm de dépôt de téphra, les troupeaux peuvent continuer à pâturer et boire l'eau, dont les niveaux de contamination en cendres n'affecteront pas directement leur système digestif (Huertas, 2022). L'irritation des yeux et de la peau peut être observée (Craig, 2015).

Pour des épaisseurs de téphra plus importantes, les animaux de pâturage comme les bovins et les ovins peuvent ingérer de larges quantités de téphra causant des problèmes digestifs, allant jusqu'au blocage du rumen et conduisant à la famine (Craig, 2015). L'abrasion des dents peut être également importante induisant des difficultés à se nourrir, ce phénomène pouvant être exacerbé lors de la remobilisation des particules de

téphra par les vents, recouvrant continuellement la végétation d'une fine couche ( Wilson et al., 2011).

Lorsque les retombées de téphra sont importantes, l'eau contaminée peut conduire à la déshydratation du bétail, souffrant également de la dessiccation de la végétation suite à l'abrasion constante, ainsi que cela a été observé au Chili, après l'éruption du volcan Hudson en 1991. Dans cette région, il a été également observé que le poids des cendres sur le bétail peut également engendrer un stress supplémentaire. En effet, la laine des moutons peut retenir de larges quantités de cendres fines, comme illustré à la Figure 10a, jusqu'à 10 kg supplémentaire, entravant leur mouvement et pouvant conduire à leur chute, voire leur mort ( Wilson et al., 2011).



a. Moutons recouverts de cendres à Villa La Angostura dans le sud de l'Argentine suite à l'éruption du Puyehue en 2011 au Chili (USGS, 2015a)



b. Cendres recouvrant les pâturages réduisant l'accès à la nourriture à Futaleufu après l'éruption du Chaiten en 2008 (USGS, 2015b)

*Figure 10 - Impacts du téphra sur le bétail*

Certaines cendres présentent des concentrations élevées en éléments solubles toxiques, comme le fluorure, qui peut être relargué sur des périodes relativement longues (Craig, 2015). Différents symptômes ont été rapportés comme des lésions dentaires, des excroissances osseuses et la calcification des tendons (Suttle, 2010).

Les effets des dépôts de téphra peuvent être atténués en amenant de la nourriture non contaminée et en restaurant la qualité de l'eau. Néanmoins, la contamination des barrages et les dommages aux pompes par les particules abrasives compliquent la situation. Si les retombées de téphra sont importantes, l'évacuation du cheptel peut être nécessaire, pour autant que la logistique le permette, notamment pour des gros troupeaux (Neild et al., 1998; Thompson et al., 2017; Wilson & Kaye, 2007).

Le Tableau 2 résume les observations de Craig et Jenkins (Craig et al., 2016; Jenkins et al., 2015) :

*Tableau 2 - Impacts physiques et chimiques rapportés sur la santé animale selon l'épaisseur de dépôt de téphra, adapté de (Craig et al., 2016; Jenkins et al., 2015)*

| Impacts physiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Impacts chimiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>A. Fines couches de cendres (0-10 mm)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Les effets sur le bétail devraient être mineurs mais l'irritation des yeux et de la peau peut survenir. Les animaux peuvent ingérer des cendres en faible quantité avec leur nourriture.                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Abrasion des dents conduisant à des troubles pour le pâturage et un vieillissement prématuré.                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Faible risque de fluorose <sup>4</sup> (peu probable à ces épaisseurs).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <i>B. Couches de cendres modérées à épaisses (10-500 mm)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Idem que pour les fines couches de cendres.<br>Blocages du rumen menant à la famine et/ou blessures internes.<br>Accès à l'eau et à la nourriture devenant gênant voire inaccessible.<br>Possible malnutrition du bétail du fait de la nourriture peu attractive par la présence de cendres. Le bétail a besoin de rations alimentaires supplémentaires.<br>Le téphra colmate la toison des moutons | Le téphra avec des concentrations modérées à élevées de fluorure peut causer des symptômes aigus de fluorose chez les animaux en pâture.<br>Risque plus important pour les animaux en gestation ou en mauvaise santé.<br>Polioencéphalomalacie <sup>5</sup> chez les bovins et les ovins en cas d'excès de soufre. Symptômes : lésions cérébrales, cécité et spasmes musculaires<br>Le téphra peut aussi relarguer de l'aluminium, réduisant l'absorption de phosphore. Toutefois, en faible quantité, il peut protéger contre la fluorose. |
| <i>C. Couches de cendres très épaisses (&gt; 500 mm)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Idem que pour les couches modérées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Idem que pour les couches modérées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Lorsque les animaux sont gardés à l'intérieur des bâtiments de ferme, ils sont moins affectés par les retombées de téphra, pour autant que les bâtiments soient fermés. Des bâches en plastique peuvent être utilisées pour empêcher les cendres et les gaz volcaniques de pénétrer dans les hangars. Par ailleurs, les infrastructures peuvent être endommagées : si la charge pondérale est trop importante, certains bâtiments peuvent s'effondrer en tout ou en partie (toitures, ...), conduisant à la perte de nourriture ou blessant les animaux qui y sont gardés.(Huertas, 2022)

Pour les petits agriculteurs dépendant de leur bétail comme source de protéines animales (lait, viande et œufs), ou comme force de traction et de transport, l'impact d'une éruption volcanique peut être dévastatrice, le bétail représentant aussi une réserve de capital et de revenu convertible (Huertas, 2022).

<sup>4</sup> Maladie due à une intoxication chronique par le fluor (Larousse, s. d.)

<sup>5</sup> Polioencéphalomalacie ou nécrose cérébrocorticale, se traduit par une atteinte de la matière grise du cerveau (Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, s. d.)

## 2.5. Vulnérabilité des systèmes agricoles face aux chutes de téphra

Les chutes de téphra peuvent entraîner des conséquences directes aux cultures et aux élevages, comme décrit précédemment de manière individualisée. Toutefois, dans les systèmes agricoles, il peut exister de nombreuses interactions entre les cultures et le bétail ou encore entre les exploitations et leur environnement. Parmi les conséquences indirectes du téphra, on peut citer d'éventuelles coupures de courant ou des dégâts aux transports ou encore au réseau de distribution d'eau. L'importance des possibles conséquences des chutes de téphra pour l'agriculture implique la compréhension des impacts pour chacun des éléments (probabilité, ampleur, durée) mais également l'effet sur les éventuelles interactions entre ces éléments (Figure 11). Bien qu'essentielles pour l'élaboration de stratégies visant à réduire les risques et à renforcer la résilience des systèmes agricoles dans les régions volcaniques actives (Craig, 2015), il n'existe que peu d'études appréhendant les exploitations agricoles prises dans leur ensemble.

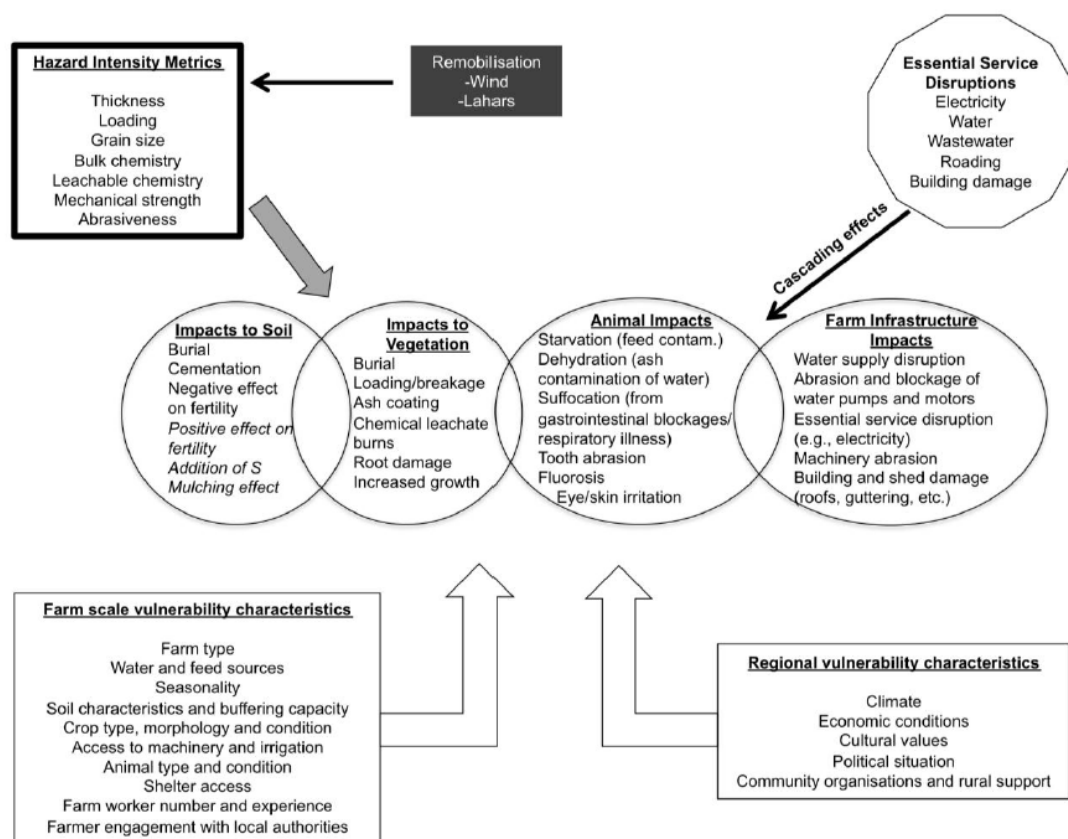


Figure 11 - Relations entre l'impact du téphra, les mesures d'intensité des risques et les caractéristiques de vulnérabilité du sol, de la végétation et des animaux (Craig, 2015).

### 2.5.1. La notion de risque, de vulnérabilité et de résilience

Un processus ou un événement naturel ou induit par l'homme susceptible de créer une perte est un *danger*, tandis que l'exposition d'un objet (auquel on attribue une valeur) à un danger constitue un *risque*, souvent considéré comme la combinaison de la probabilité et de la perte (Proag, 2014). La notion de *risque* est définie comme « la perte attendue pour un élément donné ou un ensemble d'éléments résultant de la survenue d'un phénomène naturel d'une certaine magnitude » (Lirer & Vitelli, 1998) .

La *vulnérabilité* est définie comme le degré auquel un système, ou une partie de celui-ci, peut réagir négativement à la survenance d'un événement dangereux (Ligot, 2022). Ce concept de vulnérabilité implique une mesure du risque associé aux aspects physiques, sociaux et économiques et des implications résultant de la capacité du système à faire face aux conséquences (Figure 12).

L'UN/ISDR (2004)<sup>6</sup> définit la *résilience* comme la capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société potentiellement exposée à des risques à s'adapter, à résister ou changer pour atteindre et maintenir un niveau acceptable de fonctionnement et de structure. Appliquée aux systèmes agricoles, la résilience est principalement utilisée pour discuter des facteurs qui étendent leur capacité à répondre aux changements, à réorganiser leur structure, pour anticiper les futurs changements et pour profiter des nouvelles opportunités (Urruty et al., 2016) (Figure 12).

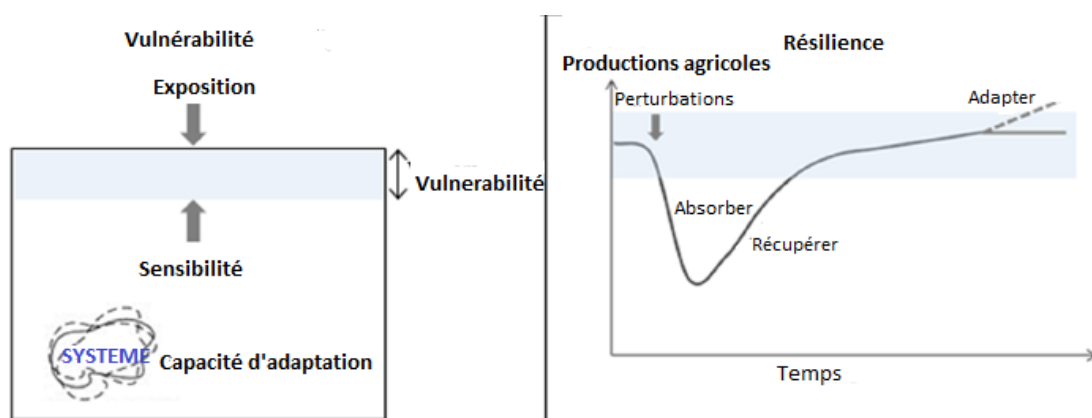


Figure 12 - Illustration des concepts de vulnérabilité et de résilience, repris de (Urruty et al., 2016)

<sup>6</sup> United Nations/International Strategy for Disaster Reduction

### 2.5.2. Quantification de la vulnérabilité – fonctions de fragilité

L'évaluation des risques consiste à quantifier les conséquences d'un événement dangereux en reliant les caractéristiques du danger, de l'exposition et de la vulnérabilité et est traduite par l'équation :  $\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Exposition} \times \text{Vulnérabilité}$

Dans le contexte d'un risque volcanique,

- l'aléa représente la probabilité d'une éruption dans une période et une région donnée,
- l'exposition est l'élément ou la valeur considérée à risque (ex. une population, une activité économique ou encore une propriété),
- la vulnérabilité est la mesure de la proportion de la valeur susceptible d'être perdue suite à la manifestation volcanique (ex : pertes financières subies par les exploitations) (Ligot, 2022).

L'évaluation des risques de chute de téphra peut être basée sur des modèles déterministes, via la simulation d'un scénario d'éruptions historiques ou de référence, ou probabilistes (basées sur une gamme de scénarios associés avec les probabilités liées à chaque scénario dangereux considéré (Wilson et al., 2014). S'il n'y a pas de probabilité associée, on parle d'évaluation d'impact (Ligot, 2022). Le choix entre les deux méthodes dépend de la disponibilité des données et du type d'évaluation recherché. Les risques ainsi évalués peuvent être représentés sur des cartes thématiques permettant de mieux préparer les plans d'urgence et les stratégies d'atténuation des risques, en ciblant les ressources là où elles sont le plus nécessaires, et en mettant en place des mesures pré- et post-éruption (évacuations, récoltes précoces, distribution de kit d'aide...), comme illustré dans la Figure 13.

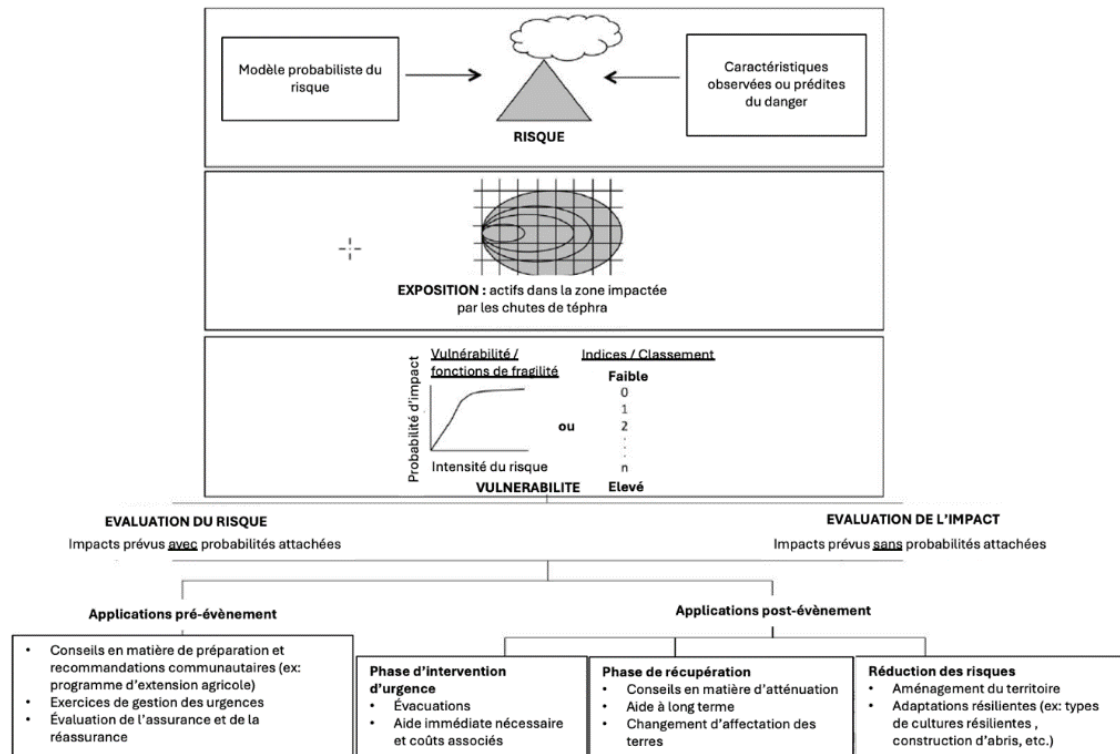


Figure 13 - Diagramme de la relation entre les évaluations d'impacts et de risques et leurs entrées et sorties associées (Craig, 2015)

L'estimation de la vulnérabilité, bien que complexe, est un exercice indispensable à l'évaluation du risque (Ligot, 2022).

Les données de base pour construire ces évaluations de risques proviennent d'observations empiriques, de données analytiques, de jugements d'expert et de sources hybride.

Pour tous les risques naturels, la source de donnée la plus courante provient de l'observation pendant et immédiatement après l'événement dangereux, permettant de prendre en compte toute une gamme d'intensité de danger et de propriétés des éléments exposés (Wilson et al., 2014). Néanmoins, cette méthode peut se révéler compliquée, dangereuse et coûteuse, même si certaines techniques de télédétection ont amélioré la situation (Jenkins et al., 2014).

Les études expérimentales permettent également d'améliorer la compréhension de la réponse physique aux chutes de téphra. Elles consistent à effectuer des tests empiriques de performance en utilisant des intensités, des types et des compositions de téphra variables dans des conditions de laboratoire, mais elles restent limitées (Jenkins et al., 2015). On peut citer, par exemple, les travaux de Ligot and al., sur l'impact de la taille des grains de téphra sur le feuillage des cultures, ainsi que l'effet du téphra selon le stade de croissance et l'état physiologique des plantes (Ligot et al., 2023; Ligot et al., 2024).

En termes de risque de chute de téphra, les observations de terrain collectées après les éruptions ont permis l'élaboration d'échelles d'impact/dommage et de fonctions de fragilité pour différents groupes de cultures (légumes fruitiers non arboricoles, cultures arboricoles, légumes à feuilles, céréales, légumes-racines, viticulture et rizières), pour différentes épaisseurs de téphra (Craig et al., 2021a; Wilson & Kaye, 2007).

Les courbes de fragilité assignent une probabilité qu'un niveau particulier d'impact soit atteint ou dépassé. Elles montrent une relation continue entre le risque (l'épaisseur du dépôt de téphra en mm) et l'impact (pertes potentielles sur les récoltes), plutôt que des seuils discrets (Craig et al., 2021a) (Figure 14).

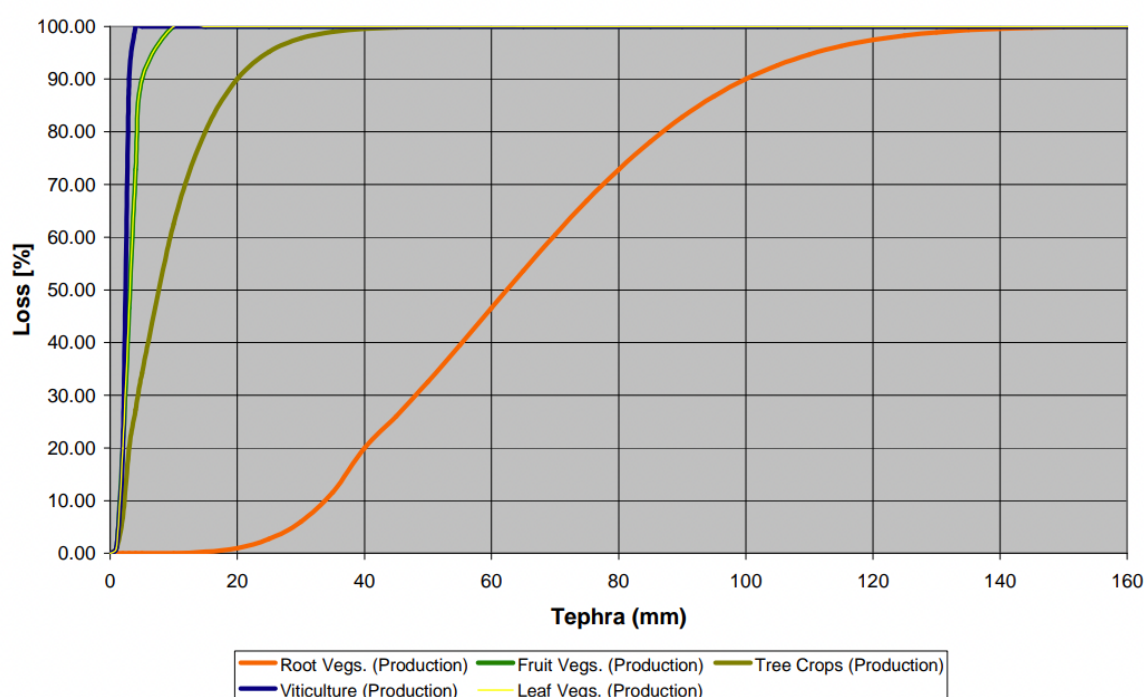


Figure 14 - Fonction de fragilité représentant la perte de productions horticoles selon l'épaisseur du dépôt de téphra (Wilson & Kaye, 2007)

Combinées à la distribution spatiale des retombées de téphra, les fonctions de fragilité permettent d'estimer les pertes potentielles de rendement de l'agriculture dans les zones concernées. L'évolution de la vulnérabilité saisonnière est également prise en compte à l'aide d'un coefficient dépendant de la période de l'année. Néanmoins, ces coefficients ne prennent pas en compte l'effet de certains facteurs comme les précipitations, la sécheresse ou les ravageurs sur la vulnérabilité des exploitations agricoles (Thompson et al., 2017).

D'autres facteurs volcaniques (comme la taille des grains du téphra, la composition de la surface) et non volcaniques (par exemple, les conditions environnementales, les caractéristiques des plantes, le stade de développement des cultures) peuvent

également impacter les cultures et la vulnérabilité au téphra. La résilience des biens exposés peut aussi influencer l'ampleur des impacts (Jenkins et al., 2015).

D'autre part, les impacts indirects des systèmes interdépendants, tels que les réseaux électriques ou routiers ne sont pas inclus dans l'analyse. Elle ne considère pas non plus de possibles interactions entre les différentes activités au sein d'une même exploitation (par ex. dépendance du bétail à la production fourragère, fertilisation des cultures par les déjections). Ne sont pas non plus considérées les éventuelles techniques d'atténuation entreprises avant ou pendant l'éruption, ou encore les mesures de récupération que les exploitations agricoles peuvent mettre en œuvre après l'évènement (Craig, 2015; Craig et al., 2021a).

### 3. Objectifs du travail

Comme montré à la section 2.5, la vulnérabilité de l'agriculture en cas d'éruption volcanique a été jusqu'à présent évaluée de manière parcellaire : les cultures et l'élevage sont considérés isolément et sans tenir compte d'éventuelles interdépendances au sein des exploitations. Cette approche est insuffisante et ne permet pas une analyse réaliste du risque volcanique pour l'agriculture.

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer la vulnérabilité de différentes exploitations agricoles face à des retombées de téphra par le biais d'une approche systémique qui intègre les interactions entre les différents sous-systèmes qui composent l'exploitation.

Les sous objectifs sont :

- (i) Caractériser la structure et le fonctionnement économique d'exploitations agricoles en situation normale (hors éruption) dans une région volcanique donnée grâce à une approche systémique, en décrivant de manière exhaustive leur structure ainsi que les flux de matières et d'argent associés.
- (ii) Quantifier l'impact d'un dépôt de téphra sur la viabilité économique des exploitations, en tenant compte de l'épaisseur du dépôt et de la saisonnalité (mois de l'éruption).
- (iii) Identifier les éléments les plus vulnérables des exploitations et confronter les résultats à la réalité de terrain.

## 4. Matériel et méthodes

### 4.1. Site d'étude : le volcan Taal, Philippines

L'étude se concentre sur la région du volcan Taal, localisée dans la province de Batangas sur l'île principale de Luçon aux Philippines (Figure 15). Ce volcan fait partie d'une île volcanique d'environ 5 km de diamètre située au centre d'une large caldeira contenant le lac Taal, au-dessus duquel le cratère principal culmine à 311m et renferme également un lac acide (Delmelle et al., 1998; Fikos et al., 2012; Perttu et al., 2023).

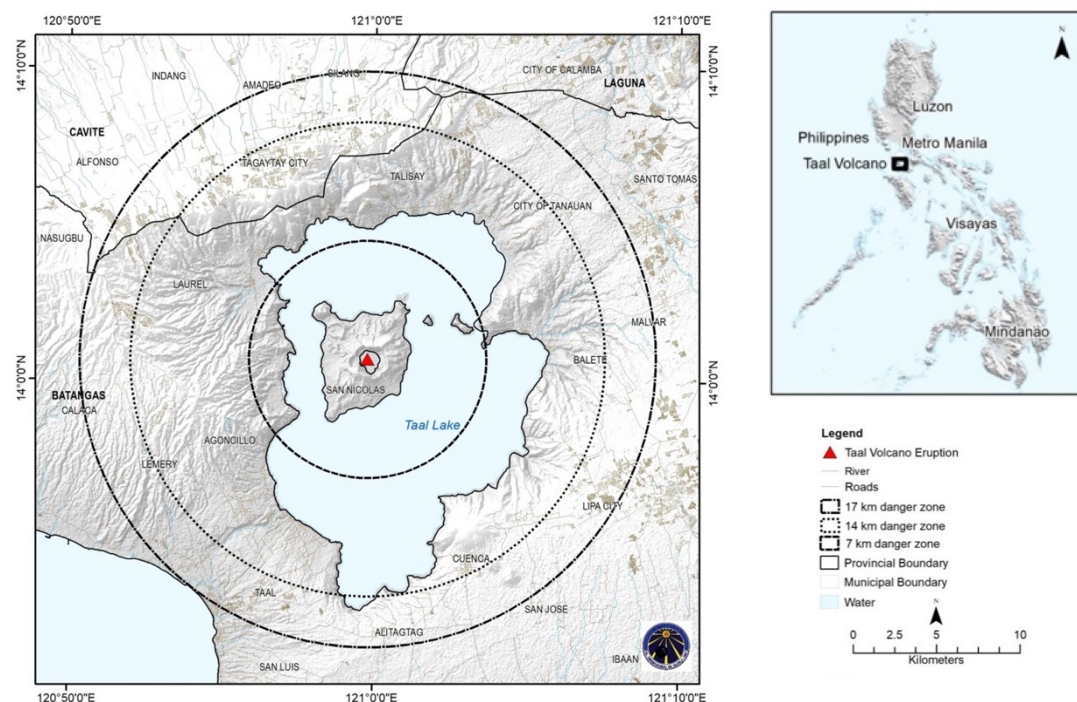


Figure 15 - Localisation du volcan Taal (Manila Observatory, 2020)

Environ 33 éruptions historiques du Taal ont été enregistrées entre 1572 et 1977, parmi lesquelles, quatre, en 1749, 1754, 1911 et 1965, sont caractérisées comme violentes avec un VEI compris entre 3 et 5 (Delos Reyes et al., 2018; Newhall & Self, 1982). La majorité des éruptions du Taal sont dites phréatiques ou phréatomagmatiques. Les éruptions phréatiques se produisent lorsque de l'eau souterraine ou de surface est chauffée par le magma ou par des roches volcaniques chaudes sans entrer en contact direct avec le magma, provoquant des explosions de vapeur. En revanche, les éruptions phréatomagmatiques surviennent lorsque le magma entre directement en contact avec l'eau, générant une interaction explosive (Pardo et al., 2014). Dans le cas du Taal, cela implique souvent l'eau de surface contenue dans le cratère principal, provoquant alors des explosions violentes à l'origine de colonnes éruptives pouvant atteindre des

hauteurs significatives et des retombées de téphra chargées en eau comme illustré à la Figure 16.



*Figure 16 – Retombées de téphra suite à l'éruption de janvier 2020, à Lemery dans la province de Batangas (Global Volcanism Program, 2020)*

Les régions avoisinant le volcan Taal sont densément peuplées. En effet, dans un rayon de 17 km autour du volcan, la population s'élève à 931 400 habitants. De plus, étant situé à environ 60 km au sud de Manille, le Taal menace également la population de l'aire métropolitaine qui comptait près de 13 millions d'habitants en 2020 (OCHA, 2020; Philippine Statistics Authority, 2020). La combinaison de la densité de population élevée et de l'activité volcanique rend la région particulièrement vulnérable aux retombées de téphra.

La dernière éruption importante du volcan Taal a eu lieu en janvier 2020, bien qu'il y ait eu depuis des éruptions de moindre intensité (Global Volcanism Program, 2024). La phase éruptive principale a produit une colonne éruptive de 15 km de hauteur, entraînant des chutes de téphra importantes sur les provinces de Batangas, Quezon, Cavite et Laguna, ainsi que des retombées plus légères jusqu'à Manille. Au total, près de 565 000 personnes ont été directement affectées par l'éruption et les dégâts liés aux infrastructures et au secteur agricole se sont élevés à 3 milliards de pesos philippins. Le secteur de la pisciculture a été le plus touché, représentant à lui seul la moitié des dommages. (NDRRMC Update, 2020; PHIVOLCS, 2020).

Le site d'étude, est caractérisé par un climat tropical de mousson, avec une température annuelle moyenne avoisinant les 27°C. Ce climat présente deux saisons distinctes : une saison sèche, s'étendant généralement de novembre à avril, durant laquelle les précipitations sont inférieures à 100 mm par mois, et une saison humide, de mai à octobre, marquée par des précipitations excédant les 200 mm par mois. De plus, la région est exposée aux typhons, qui peuvent apporter des pluies torrentielles et des

vents violents. En effet, les Philippines sont situées sur la trajectoire d'une grande partie des perturbations qui prennent naissance dans l'océan Pacifique (Lansigan et al., 2000; Miyake et al., 1988).

La province de Cavite, située au nord-ouest du volcan Taal, présente une topographie divisée en quatre zones distinctes : la plaine côtière de basse altitude, les terres basses comprenant des plaines côtières et alluviales, les collines centrales constituées d'un plateau tufié ondulé, et enfin la région des hautes terres montagneuses. Environ 41% de la superficie de la province est classée comme vallonnée à ondulée, avec des pentes qui varient entre 8 % et 18 %. Parmi les caractéristiques notables, on trouve la crête de Tagaytay, qui est l'un des points culminants de la région. Cette chaîne de montagnes s'étend sur 32 km et atteint une altitude de 600 mètres au-dessus du niveau de la mer. La crête domine le lac Taal et forme le rebord nord de la vaste caldeira du volcan Taal (Provincial Government of Cavite, 2015). La province de Batangas à l'ouest et au sud du volcan se compose essentiellement de plaines parsemées de montagnes. Parmi les municipalités, on retrouve notamment Agoncillo avec une altitude de 64 mètres, ou encore celle de Lemery située à l'ouest du volcan avec une altitude de 10 mètres au-dessus du niveau de la mer (PhilAtlas, 2024).

Les sols de la partie nord-ouest du volcan Taal, dans la province de Cavite, montrent un gradient de fertilité distinct qui varie des pentes supérieures aux plaines alluviales. Les sols des pentes supérieures se distinguent par des propriétés physico-chimiques favorables : texture limoneuse, sol meuble, friable, bien drainé, avec une teneur élevée en matière organique et en phosphore disponible, ainsi qu'une faible rétention de phosphore, caractéristique des sols formés à partir de cendres volcaniques. En revanche, les sols des pentes inférieures et des plaines alluviales sont plus argileux, avec de faibles niveaux de carbone, d'azote, de phosphore disponible, et une rétention de phosphore réduite. Les terres situées à des altitudes plus élevées présentent souvent des systèmes de cultures multiples, principalement des cultures pérennes telles que le café, l'ananas, la banane, et les noix de coco. En revanche, les terres à des altitudes plus basse, avec une productivité des sols plus faibles, présentent souvent des monocultures, comme le riz. (Dela Cruz et al., 2003; Miyake et al., 1988).

## 4.2. Collecte des données

Pour évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles autour du volcan Taal, il a été nécessaire de recueillir des données chiffrées directement sur le site d'étude. Ainsi, une mission de terrain a été organisée aux Philippines, du 5 au 15 février 2024. Au cours de cette période, six exploitations agricoles ont été interviewées : quatre situées dans la province de Batangas et deux dans celle de Cavite. Parmi celles-ci, seules cinq exploitations sont étudiées dans ce travail, une d'entre elles n'ayant pas fourni de données complètes, et la collecte de ces données est toujours en cours, rendant son analyse impossible à ce stade. Les cinq exploitations analysées sont localisées à la Figure 17.

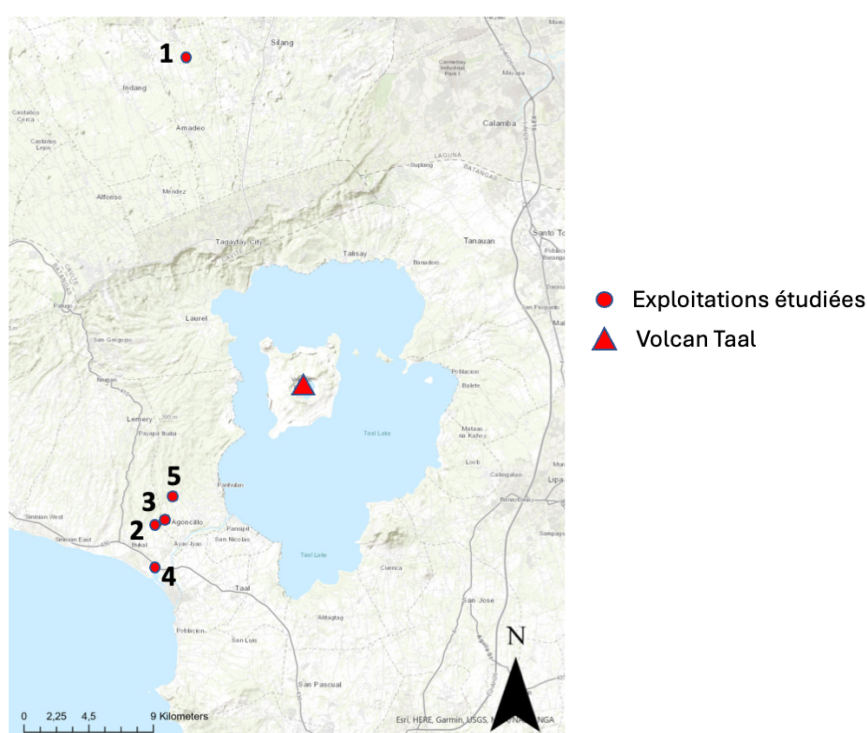


Figure 17 – Localisation des cinq exploitations étudiées à proximité du volcan Taal, Philippines

La majorité des entretiens ont été menés par Sophie Malherbe, Juliette Glorieux (doctorantes de l'UCLouvain) et moi-même. Sur place, Talens Virginia (membre de CCNCI<sup>7</sup>), et Jamoralin Suyin, Hermosa Marice, et Tejome Jhana membres des ONG Solidagro et Viva Salud ont également contribué. Elles ont assuré la traduction des entretiens du tagalog vers l'anglais. Pour mener à bien la récolte de données, un questionnaire a été réalisé en amont en anglais, et traduit en tagalog. Il est composé des sept sections suivantes (Annexe A) :

<sup>7</sup> CCNCI : The Climate Change Network for Community-Based Initiatives

- 1) Informations de contact et généralités,
- 2) Système d'élevage
- 3) Système de culture
- 4) Main d'œuvre
- 5) Dépenses et revenus
- 6) Préoccupations et craintes
- 7) Le volcan et les chutes de téphra

Ces interviews semi-directives<sup>8</sup> permettent de collecter à la fois des données qualitatives et quantitatives sur le mode de fonctionnement détaillé des exploitations agricoles. Il interroge également les agriculteurs sur leurs craintes générales et celles spécifiquement liées aux aléas volcaniques, ainsi que sur leurs perceptions de l'impact volcanique sur leurs exploitations.

### 4.3. Analyse qualitative

Afin d'en évaluer la vulnérabilité, les exploitations agricoles étudiées sont envisagées comme des systèmes dont les sous-systèmes interagissent entre eux et avec l'extérieur via des flux de matières. Cette approche se base sur les travaux de Stark and al. 2019, qui ont développé une méthode d'analyse de réseaux écologiques visant à évaluer les performances agroécologiques de systèmes mixtes agriculture- élevage (SMAE). Cette méthode d'analyse implique la reconstitution du fonctionnement des exploitations sur une année afin d'en caractériser les interactions entre l'agriculture et l'élevage.

Sur base des données récoltées, la première étape a été l'élaboration d'un modèle conceptuel détaillé d'un système agricole, visant à représenter de manière exhaustive toutes les dimensions et interactions pertinentes du système. Ce modèle délimite les frontières du système à l'échelle de l'exploitation et identifie deux compartiments principaux : le sous-système de cultures et le sous-système d'élevage, ainsi que deux compartiments secondaires : un de stockage de déjections et un de stockage de végétaux. Ensuite, les flux au sein du système et ceux entrants et sortants du système ont également été caractérisés. Au sein de ces sous-systèmes, les différents compartiments ont été définis en tenant compte de leurs spécificités et des impacts potentiels différenciés face aux chutes de téphra.

Pour le sous-système d'élevage, les animaux sont séparés non seulement selon leur espèce, car ils ne sont pas tous impactés de la même manière, mais aussi en fonction de l'endroit où ils sont gardés. Par exemple, un animal vivant à l'extérieur sera

---

<sup>8</sup> Méthode de collecte de données où les questions sont ouvertes, permettant à la personne interviewée de s'exprimer librement en profondeur. L'intervieweur peut demander des précisions ou approfondir certains points selon les réponses obtenues (Imbert, 2010).

généralement plus vulnérable aux chutes de téphra qu'un animal qui est abrité ou complètement gardé à l'intérieur.

Pour le sous-système cultural, le choix de différencier les cultures pérennes, annuelles et de cycle court, ainsi que celles cultivées en serre ou sous bâche, repose également sur l'hypothèse de l'impact varié que les dépôts de téphra peuvent avoir sur chaque type. En effet, la vulnérabilité de chaque type de culture peut être influencée par leur cycle de développement, leurs caractéristiques phénologiques et leur temps de renouvellement. Par exemple, les cultures pérennes, ayant des cycles de développement pluriannuels, sont susceptibles de subir des impacts prolongés. En effet, si un arbre meurt, il peut nécessiter plusieurs années avant que le nouveau plant atteigne une production comparable. Tandis que les cultures annuelles, dont le cycle est complété en une seule année, peuvent voir des pertes immédiates, mais peuvent être replantées et recommencer leur cycle de croissance plus rapidement.

Ensuite, une distinction a été établie entre quatre types de flux afin de caractériser les relations internes du système et entre le système et son environnement.

1. Flux entrants : ces flux désignent les éléments provenant de l'extérieur du système et à destination des sous-systèmes. Par exemple, l'achat de fertilisants pour une culture, ou encore de concentrés alimentaires pour le compartiment d'élevage.
2. Flux sortants : ces flux représentent les éléments allant du système agricole à l'extérieur de celui-ci. Un exemple typique est la commercialisation des productions agricoles de l'exploitation.
3. Flux internes au système : il s'agit des mouvements de matière entre les différents compartiments du système. Par exemple, l'utilisation de résidus de culture comme fourrage pour le bétail, lorsque les deux appartiennent à l'exploitation.
4. Flux internes au même compartiment : par exemples, l'utilisation de semences issues de sa propre production pour replanter, montrant les mouvements de matière au sein d'un même compartiment.

Le fonctionnement des différentes exploitations interviewées a été schématisé dans la partie 5.1 de ce travail sur base de ce modèle conceptuel général (Figure 18). Ces modélisations ont été réalisés sur une plateforme intitulée *Mural*.

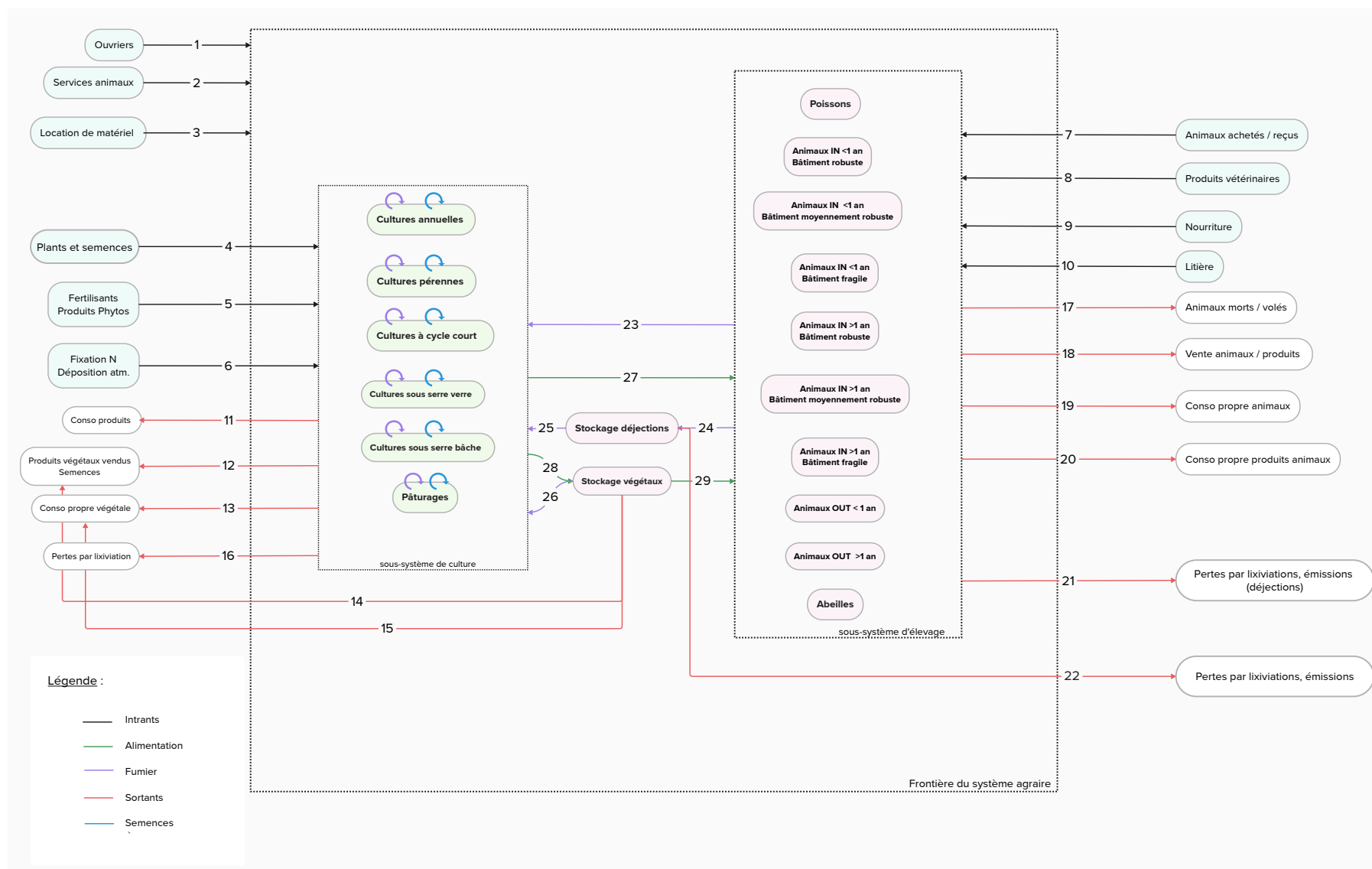


Figure 18 - Modèle conceptuel global d'un système agricole

#### 4.4. Analyse quantitative

L'étape suivante consiste à traiter les données recueillies dans les interviews pour analyser le fonctionnement économique des exploitations sur une base annuelle, en utilisant une unité commune, le peso philippin par an (PHP/an). Cette uniformité permet notamment de comparer les exploitations ultérieurement. Les données ont été traitées à l'aide du logiciel *Excel*, dans lequel les éléments constitutifs des exploitations ainsi que les flux entrants et sortants du système ont été quantifiés et convertis en PHP/an. Cela permet de déterminer la situation économique des exploitations étudiées en contexte hors éruptif en utilisant les indicateurs suivants :

1. **Valeur annuelle brute** : Représente la valeur de l'ensemble des productions de l'exploitation (animales et culturales) si elles étaient vendues.
2. **Revenu annuel brut** : Correspond à la valeur des ventes réelles des productions de l'exploitation.
3. **Coûts annuels** : Est la valeur totale des dépenses engendrées par l'exploitation agricole, comprenant l'ensemble des coûts liés aux différents compartiments du système tels que les achats mais également les salaires pour la main-d'œuvre.
4. **Valeur annuelle nette** : Est obtenue après avoir déduit les coûts annuels de la valeur annuelle brute.
5. **Revenu annuel net** : Est obtenu après avoir déduit les coûts annuels du revenu annuel brut.
6. **Revenu net généré par d'autres sources que l'exploitation** : Représente les revenus additionnels obtenus en dehors de l'exploitation agricole.

Cette approche permet de fournir une analyse détaillée et comparative des performances économiques des exploitations étudiées. Cependant, il est important de noter que certains flux, tels que les flux liés au fumier ou les pertes par lixiviations des différents compartiments n'ont pas pu être quantifiés en PHP/an dans cette étude.

#### 4.5. Quantification des pertes face à des dépôts de 5 et 50 mm de téphra

Après avoir établi le fonctionnement économique des exploitations hors éruption, les pertes de production et les pertes économiques sont quantifiées, dans un contexte éruptif générant un dépôt de téphra. Un choix de dépôts contrastés a été réalisé : une épaisseur de 5 mm et une épaisseur de 50 mm afin de simuler différents niveaux

d'impact sur l'exploitation. Notons que ces épaisseurs sont réalistes et plausibles pour le volcan Taal (Figure 4).

Le nombre d'études quantifiant les pertes de rendement d'une exploitation agricole en utilisant une approche systémique, et considérant les interactions au sein du système agricole, est limité. En revanche, la littérature présente des études ayant développé des fonctions de fragilité pour quantifier les pertes sur les différents éléments d'une exploitation agricole. Parmi celles-ci, l'ouvrage de Wilson & Kaye (2007) peut être cité. Il a établi des fonctions de fragilité pour des trois types d'activités agricoles dans des fermes néo-zélandaises : horticulture, élevage pastoral et sylviculture de production (Annexe B). De plus, les auteurs distinguent, pour chaque catégorie, les pertes de production, qui concernent directement les cultures elles-mêmes, des pertes de capital, qui se rapportent aux cultures pluriannuelles, considérées comme des actifs de valeur pour l'exploitation. Les coefficients provenant de ces fonctions oscillent entre 0 et 1, où 0 correspond à une absence de dommages et donc à une perte de production nulle et 1 signifie une destruction complète de la production.

D'autres fonctions de fragilité ont également été mises au point, notamment par Craig et al (2021), qui ont introduit de nouvelles catégories dans le domaine de l'horticulture par rapport à Wilson & Kaye (2007), incluant par exemple les céréales. Une autre étude importante est celle de Ligot et al. (2023), où des fonctions plus détaillées pour certaines cultures (maïs, blé, laitue, chou, carotte et pomme de terre) ont été élaborées. En effet, les pertes de rendements y sont représentées pour les stades phénologiques suivants : croissance, floraison, maturation et récolte.

Il est essentiel de noter que les travaux et modèles utilisés ne sont pas spécifiques à l'agriculture des Philippines. Les pratiques agricoles, les types de sols, et les conditions climatiques de la région du Taal peuvent différer considérablement des régions étudiées dans les travaux existants (notamment la Nouvelle-Zélande). Ces différences peuvent influencer la manière dont les dépôts de téphra affectent les cultures et dès lors, les rendements et les pertes économiques. Pour mieux comprendre l'impact des dépôts de téphra sur les exploitations agricoles locales, il serait pertinent de mener des études d'impact post-éruptives spécifiques aux régions avoisinant le volcan Taal.

#### 4.5.1. Détermination des coefficients de perte de production – cultures

Les fonctions de fragilité de Wilson & Kaye (2007), spécifiques à l'horticulture (Annexe B) ont été élaborées pour divers types de cultures, incluant :

- les légumes à feuilles,
- les légumes à fruits,
- les légumes racines, ainsi que,
- les cultures arboricoles.

Chaque type de culture recensé dans les exploitations analysées dans ce travail a été associé à une de ces catégories. Cela inclut en particulier : des cultures arboricoles telles que des bananiers, cocotiers, avocatiers, jacquiers, papayers, calamondins, mais également des légumes à fruits dont des haricots verts, aubergines, courges, tomates, chou chinois, piments, gombos et un légume racine, le taro.

Il convient de noter que la canne à sucre est une culture pérenne de la famille des graminées. Toutefois, en l'absence d'études spécifiques dans la littérature, cette culture a été assimilée à la catégorie des cultures arboricoles en raison de la robustesse de leur tige, qui, bien que différente des troncs d'arbres, présente des caractéristiques de résistance similaire. Cette robustesse permet aux cannes à sucre de mieux supporter les conditions difficiles, telles que l'impact des retombées de téphra, ce qui a justifié leur classification dans un cadre analogue à celui des cultures arboricoles.

Les prairies de pâturage ou prairies de coupe ont été associées à un coefficient de perte à partir de l'ouvrage de Wild et al. (2019), qui ont développé des fonctions de fragilité spécifiques à l'industrie laitière, notamment en évaluant l'impact des retombées de téphra sur les pâtures.

Les différents coefficients pour les deux scénarios de dépôt de téphra qui ont été utilisés ultérieurement sont repris dans le Tableau 3 ci-dessous.

*Tableau 3 - Coefficients de pertes de production par type de culture et pour un dépôt de 5 et 50 mm*

| Type de culture      | Dépôt 5 mm | Dépôt 50 mm | Références            |
|----------------------|------------|-------------|-----------------------|
| Cultures arboricoles | 0,3        | 1           | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Légumes fruits       | 0,8        | 1           | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Légumes à racines    | 0          | 0,35        | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Prairie              | 0,2        | 0,65        | (Wild et al., 2019)   |

#### 4.5.2. Détermination des coefficients de perte de production – élevage

Les élevages recensés dans les systèmes agricoles étudiés incluent notamment des élevages de bovins à viande, pour lesquels une fonction de fragilité est documentée dans l'ouvrage de Wilson & Kaye (2007), permettant de déterminer les coefficients de perte correspondants (Tableau 4). Cependant les caprins, porcins, et volailles n'ayant pas fait l'objet de fonctions de fragilité spécifiques, ils ont été attribués à des catégories similaires. Cette classification repose sur des critères tels que des régimes alimentaires comparables ou des caractéristiques physiologiques similaires, qui pourraient influencer leur vulnérabilité de manière analogue face aux retombées de téphra.

Tout d'abord, les caprins (chèvres et chevreaux) ont été associés aux ovins. L'hypothèse est que les deux catégories sont des ruminants dépendants du pâturage. En effet, lorsqu'une prairie est recouverte de téphra, cela peut entraîner des problèmes digestifs chez ces animaux, tel que le blocage du rumen par les particules de téphra. Ce blocage peut entraîner des blessures internes et, dans les cas graves, entraîner la mort par famine (Craig, 2015). De plus, en comparaison avec les bovins, les chèvres, ayant une taille similaire à celle des moutons, sont exposées à des affections de même type, telles que l'abrasion des dents et des troubles respiratoires, en raison de leur proximité avec le sol.

Ensuite, les porcins ont été regroupés à la catégorie des ovins-cervidés, non pas en raison de leur type alimentaire, les porcins étant des monogastriques, mais plutôt parce que dans l'élevage étudié, ils reçoivent également de l'herbe coupée venant d'une prairie tout comme les ovins. Ainsi, si cette prairie est recouverte de téphra, cet apport de nourriture sera affecté, nécessitant des ajustements dans l'alimentation. De plus, comme pour les caprins, les porcins présentent des similitudes avec les ovins en raison de leur proximité avec le sol. Ce qui les expose également aux risques de maladies liées à l'ingestion et à la respiration des particules de téphra.

D'autre part, les volailles ont été associées à un coefficient de perte égal à zéro puisque dans l'exploitation étudiée, elles sont élevées dans une infrastructure fermée. En effet, les poulets sont achetés au stade de poussins et gardés dans une infrastructure fermée pendant 45 jours avant d'être vendus. Ils sont nourris exclusivement avec concentrés achetés. Ainsi, ils ne subissent pas les impacts directs auxquels ils seraient exposés en liberté, ce qui permet d'assurer que toute la production soit vendue sans perte, tant que le fermier est en mesure de récupérer les poulets, et que l'infrastructure n'est pas endommagée par l'éruption.

*Tableau 4 - Coefficients de perte pour le bétail pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra (Wilson & Kaye, 2007)*

| Type d'animaux | Dépôt de 5 mm | Dépôt de 50 mm | Références            |
|----------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Bovin          | 0,2           | 0,57           | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Caprin         | 0,05          | 0,63           | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Porcin         | 0,05          | 0,63           | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Volaille       | 0             | 0              | (Wilson & Kaye, 2007) |

#### 4.5.3. Détermination des coefficients de saisonnalité

Wilson & Kaye (2007) ont également souligné que les activités agricoles sont étroitement liées à la saisonnalité et au climat. En effet, les différentes pratiques agricoles varient au cours de l'année en raison des variations de température, de précipitations et du mode de fonctionnement des exploitations. Par exemple, aux Philippines, les cycles de la saison sèche et de la saison des pluies influencent directement certaines pratiques culturales.

Cette saisonnalité joue un rôle crucial dans l'évaluation de l'impact des retombées volcaniques puisque le moment de l'année où l'éruption se produit aura un impact différent sur les différentes cultures de l'exploitation, selon les stades phénologiques auxquels elles se trouvent. Dès lors, des coefficients de saisonnalité ont été développés par Wilson & Kaye (2007) pour trois catégories de vulnérabilité : faible, modérée et élevée, auxquelles sont associés les différents stades du cycle de développement des cultures (Tableau 5). Une catégorie dite de vulnérabilité nulle a été ajoutée pour la période dite hors culture. En effet, la culture n'étant pas sur le champ, aucune perte ne peut être enregistrée.

Tableau 5 - Coefficients de saisonnalité associés aux stades de développement des cultures (Wilson & Kaye, 2007)

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

Des fonctions de fragilité plus détaillées ont été élaborées par Ligot (2023), pour certaines cultures spécifiques. Celles-ci permettent de différencier les pertes de rendement en fonction de l'épaisseur du dépôt de téphra, tout en tenant compte des différents stades phénologiques des cultures (Annexe B). Cet ouvrage a été utilisé pour affiner et préciser les coefficients de saisonnalité associés à certaines cultures présentes dans les fermes enquêtées, pour lesquelles ces fonctions sont disponibles. Parmi ces cultures, on retrouve les cultures arboricoles et les légumes à racines pour un scénario de 5mm, ainsi qu'uniquement les légumes à racines pour le scénario de dépôt de 50 mm. Tous ces coefficients associés aux types de cultures étudiées dans ce travail sont regroupés dans les Tableaux 6 et 7 ci-dessous.

Tableau 6 - Coefficients de perte de production liés à la saisonnalité pour un dépôt de 5 mm de téphra

| Type de culture      | Semis | Croissance | Floraison | Maturation | Récolte | Hors culture | Références            |
|----------------------|-------|------------|-----------|------------|---------|--------------|-----------------------|
| Cultures arboricoles | 0,75  | 0,8        | 1         | 0,6        | 1       | 0            | (Ligot et al., 2023)  |
| Légumes à racines    | 0,75  | 0,75       | 0,7       | 0,65       | 0,5     | 0            | (Ligot et al., 2023)  |
| Légumes à fruits     | 0,75  | 0,75       | 1         | 0,25       | 0,75    | 0            | (Wilson & Kaye, 2007) |

Tableau 7 - Coefficients de perte de production liés à la saisonnalité pour un dépôt de 50 mm de téphra

| Type de culture      | Semis | Croissance | Floraison | Maturation | Récolte | Hors culture | Références            |
|----------------------|-------|------------|-----------|------------|---------|--------------|-----------------------|
| Cultures arboricoles | 0,75  | 0,75       | 1         | 0,25       | 0,75    | 0            | (Wilson & Kaye, 2007) |
| Légumes à racines    | 0,75  | 0,75       | 1         | 0,25       | 0,75    | 0            | (Ligot et al., 2023)  |
| Légumes à fruits     | 0,75  | 0,75       | 1         | 0,25       | 0,75    | 0            | (Wilson & Kaye, 2007) |

Dans le cadre de ce travail, la saisonnalité liée à l'élevage n'a pas été prise en compte. Bien que certains animaux soient plus vulnérables à certaines périodes de l'année, comme par exemple les bovins/ovins en fin de gestation (Craig et al., 2016), il n'a pas été possible de considérer ce facteur en raison de l'insuffisance de données précises sur les cycles d'élevage. Par conséquent, il a été décidé de considérer les animaux comme vulnérables tant qu'ils restent au sein du système agricole, et de ne plus les compter comme perte une fois qu'ils quittent le système, par exemple lorsqu'ils sont vendus ou donnés.

#### 4.5.4. Détermination des coefficients de perte sur les actifs

Les actifs relatifs aux exploitations agricoles représentent selon Wilson & Kaye (2007), les ressources économiques telles que la fertilité du sol, les machines de production, les infrastructures de la ferme, le bétail et les arbres des cultures pérennes détenus pendant plusieurs années, qui ne sont pas vendus comme des produits et dont la perte a des répercussions sur les récoltes ultérieures.

Dans le cadre de ce travail, pour les cultures, seules les pertes d'actifs des cultures pérennes ont été associées à un coefficient de perte pour 5 et 50 mm (Tableau 8),

provenant de la fonction de fragilité pour les cultures permanentes (Annexe B), les données récoltées ne permettant pas de quantifier les pertes des autres types d'actifs.

Tableau 8 - Coefficients de perte sur les actifs pour les cultures arboricoles pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra

| Type de culture      | Dépôt de 5 mm | Dépôt de 50 mm | Références            |
|----------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Cultures arboricoles | 0,02          | 0,14           | (Wilson & Kaye, 2007) |

De plus, chaque culture pérenne représentant un actif pour l'exploitation s'est vu attribuer un temps de renouvellement à partir de la littérature et des données récoltées (Tableau 9). Cela correspond à la durée nécessaire pour qu'un arbre atteigne une taille productive (première récolte possible) après avoir été planté, dans le contexte où le fermier cherche à remplacer les arbres perdus.

Tableau 9 - Temps de renouvellement des cultures pérennes étudiées

| Type de culture pérenne | Temps de renouvellement (année) |
|-------------------------|---------------------------------|
| Canne à sucre           | 1                               |
| Bananier                | 1                               |
| Cocotier                | 6                               |
| Avocatier               | 4                               |
| Jacquier                | 5                               |
| Papayer                 | 1                               |
| Calamondin              | 2                               |

#### 4.6. Détermination des pertes de production et des pertes économiques liées aux dépôts de téphra

Après avoir déterminé les coefficients de pertes de rendement et de saisonnalité pour les deux scénarios de dépôts choisis, les pertes de production en (kg/an) et les pertes de revenus en (PHP/an) ont été quantifiées pour les différents éléments des exploitations, mais également à l'échelle du système, grâce aux équations suivantes :

$$Perte\ de\ production\ \left(\frac{kg}{an}\right) = Production\ \left(\frac{kg}{an}\right) \times Coeff.\ de\ perte \times Coeff.\ de\ saisonnalité \quad (1)$$

$$Perte\ de\ valeur\ brute\ \left(\frac{PHP}{an}\right) = Valeur\ brute\ \left(\frac{PHP}{an}\right) \times Coeff.\ de\ perte \times Coeff.\ de\ saisonnalité \quad (2)$$

$$Perte\ de\ revenu\ brut\ \left(\frac{PHP}{an}\right) = Revenu\ brut\ \left(\frac{PHP}{an}\right) \times Coeff.\ de\ perte \times Coeff.\ de\ saisonnalité \quad (3)$$

$$Perte\ de\ valeur\ nette\ \left(\frac{PHP}{an}\right) = Valeur\ nette\ \left(\frac{PHP}{an}\right) \times Coeff.\ de\ perte \times Coeff.\ de\ saisonnalité \quad (4)$$

$$Perte\ de\ revenu\ net\ \left(\frac{PHP}{an}\right) = Revenu\ net\ \left(\frac{PHP}{an}\right) \times Coeff.\ de\ perte \times Coeff.\ de\ saisonnalité \quad (5)$$

Pour mener à bien cette analyse quantitative, il a été nécessaire de formuler des hypothèses afin de cadrer la simulation des scénarios éruptifs. Premièrement, toutes les ventes (des récoltes et des animaux) ne sont pas supposées comme déjà réalisées lorsqu'elles sont prévues pour le mois auquel se produit l'éruption. Inversement, les opérations agricoles impliquant des coûts telles que l'application de fertilisants, de produits phytosanitaires et l'administration de soins vétérinaires sont supposées effectuées jusqu'au mois de l'éruption compris.

Pour les activités plus spécifiques aux cultures, il a été établi que le semis est maintenu lorsqu'il est prévu le mois de, ou après l'éruption, tout comme les récoltes, mis à part que celles prévues post-éruption sont révisées en fonction des pertes observées. Cependant, les applications de fertilisants et de produits phytosanitaires prévues post-éruption sont annulées jusqu'au prochain semis. Seules les cultures pérennes sont fertilisées après l'éruption au prorata de ce qu'il reste des cultures. De plus, la perte de capital étant prise en considération pour les cultures pérennes, les pertes de production associées sont maintenues le temps que les plants endommagés soient renouvelés.

En cas de perte de production et lorsque les cultures ont plusieurs utilisations, il a été décidé de les allouer en premier lieu à la consommation du ménage, suivie du fourrage, du semis, et en dernier lieu, à la vente.

Tandis qu'en cas de pertes animales, les animaux restants sont d'abord vendus avant d'être alloués à la consommation du ménage et finalement gardés pour régénération du cheptel.

Différentes hypothèses ont également été formulées pour le bétail. En premier lieu, si les naissances devaient se produire le mois de l'éruption, elles sont considérées comme ayant eu lieu. Ensuite, les ventes prévues le mois de l'éruption sont quant à elles estimées comme effectuées après l'éruption.

## 5. Résultats

### 5.1. Représentation conceptuelle et analyse du fonctionnement économique hors éruption des exploitations interviewées

Le fonctionnement hors éruption des différentes exploitations a été décrit et schématisé par un modèle conceptuel reprenant les différents compartiments, flux et interactions qui composent ces systèmes agricoles. Les données économiques associées aux flux entrants et sortants du système agricole ont ensuite été analysées, de manière à déterminer la répartition des coûts annuels, la valeur des produits consommés (non vendus) annuellement, le revenu brut provenant des produits vendus et finalement le revenu annuel net. Il est important de noter que les résultats économiques présentés sont basés sur les valeurs fournies (y compris les prix au kg) au moment des interviews. Bien qu'ils tentent de refléter la réalité, les fluctuations des prix ne sont pas toujours prises en compte. De plus, certaines hypothèses ont été faites dans des cas spécifiques comme expliqué à la section 4.6.

#### 5.1.1. Exploitation n°1

La première exploitation est située dans la municipalité d'Amadéo de la province de Cavite. Propriété d'Edgard Cupino, elle couvre une superficie de 0,5 ha. Le système agricole possède un compartiment végétal composé de cultures pérennes, annuelles et de pâture. Son modèle conceptuel est représenté à la Figure 19.

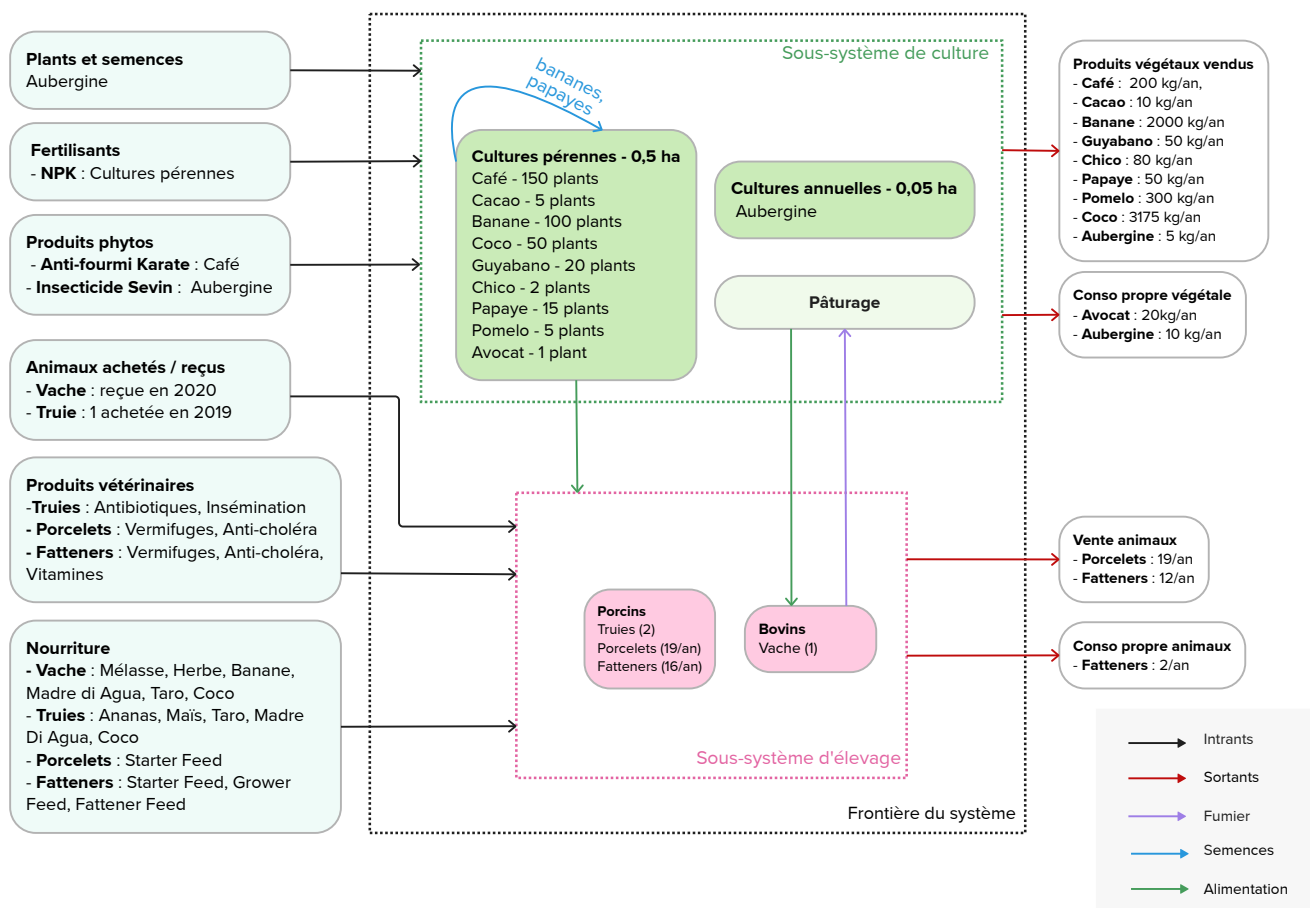


Figure 19 - Modèle conceptuel de l'exploitation n° 1

Les principaux flux entrants sont des semences d'aubergine et du fertilisant NPK reçu par le gouvernement, mais également des produits phytosanitaires achetés pour les plants de café et d'aubergine. Les cultures pérennes sont entièrement destinées à la vente, sauf les avocats qui, avec la culture d'aubergines, sont consommés par le ménage.

Le sous-système d'élevage quant à lui est composé de deux truies inséminées artificiellement, produisant 19 porcelets non engraisés par an et 16 porcelets engraisés, parmi lesquels deux sont consommés par le ménage. Les mères sont principalement nourries avec des résidus de culture trouvés, tandis que des aliments concentrés sont achetés pour les porcelets. Une vache à l'attache complète le bétail : elle se nourrit de l'herbe dans le périmètre déterminé par la corde, que le fermier déplace une fois par jour, mais aussi de mélasse et de résidus de cultures tel que des bananes ou autre cultures trouvées sur des terrains avoisinants l'exploitation. Les déjections porcines ne sont pas récoltées, et celle de la vache sont dispersées là où elle pâture.

Pour ce qui est des interactions entre les deux sous-systèmes, elles se traduisent par des flux allant des cultures pérennes vers l'élevage, notamment par l'utilisation des résidus de cultures de bananes pour nourrir les animaux. Par ailleurs, un flux de la pâture

vers les bovins, ainsi qu'un flux inverse des déjections animales vers la pâture, sont également présents.

Le fonctionnement économique en situation normale représenté dans le Tableau 10, indique que les coûts de l'exploitation sont principalement dus à l'élevage (95%) et plus particulièrement à l'achat d'aliments concentrés pour les porcelets. Tandis que les coûts du sous-système cultural (5%) proviennent entièrement de l'achat de produits phytosanitaires pour la culture de café et d'aubergines.

Tableau 10 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°1

| Coûts annuels              | PHP/an      | Sous-système cultural | Valeur annuelle brute       | PHP/an       |
|----------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|
| Plants et semences :       | 0           |                       | Produits végétaux vendus :  | 54500        |
| Fertilisants :             | 0           |                       | Produits végétaux consommés |              |
| Produits phytosanitaires : | 7561        |                       | et destinés au fourrage :   | 13360        |
| Main d'oeuvre :            | 0           |                       |                             |              |
| <b>TOTAL</b>               | <b>7561</b> |                       | <b>TOTAL</b>                | <b>67860</b> |

| Coûts annuels           | PHP/an        | Sous-système d'élevage | Valeur annuelle brute | PHP/an        |
|-------------------------|---------------|------------------------|-----------------------|---------------|
| Achat d'animaux :       | 0             |                        | Vente animaux :       | 158000        |
| Produits vétérinaires : | 11950         |                        | Animaux consommés :   | 21000         |
| Alimentation animale :  | 126125        |                        |                       |               |
| <b>TOTAL</b>            | <b>138075</b> |                        | <b>TOTAL</b>          | <b>179000</b> |

|                  |                            |              |
|------------------|----------------------------|--------------|
| Système agricole | Revenu annuel brut :       | 212500       |
|                  | - Coûts annuels:           | 145636       |
|                  | <b>Revenu annuel net :</b> | <b>66864</b> |

|                           |                                        |               |
|---------------------------|----------------------------------------|---------------|
| Autres sources de revenus | Achat / revente de café :              | 32000         |
|                           | Poste d'institutrice :                 | 180000        |
|                           | <b>Revenu annuel total du ménage :</b> | <b>278864</b> |

La vente des produits végétaux représente 26% du revenu annuel brut, avec une contribution majeure des cultures pérennes, qui représentent 99% de ces 26%. Parmi ces cultures pérennes, les sources de revenus les plus importantes sont la vente des bananes, des noix de coco et du café. La vente des porcelets de lait et des porcelets engraisés génère 74% du revenu brut de l'exploitation, tandis que l'élevage bovin ne génère aucun revenu brut, car la vache est seulement entretenue.

Le revenu net des activités agricoles s'élève à 66864 PHP/an. Le revenu agricole n'est pas la seule source de revenu du ménage, le fermier exerce également une activité d'achat/revente de café générant 32000 PHP/an et le poste d'institutrice occupé par son épouse rapporte 180000 PHP/an.

### 5.1.2. Exploitation n°2

Cette exploitation appartenant à Fernando De Villa est localisée dans la municipalité Agoncillo de la province de Batangas à l'est du volcan Taal et couvre une superficie de 0,3 ha. Le fonctionnement de l'exploitation est représenté à la Figure 20.

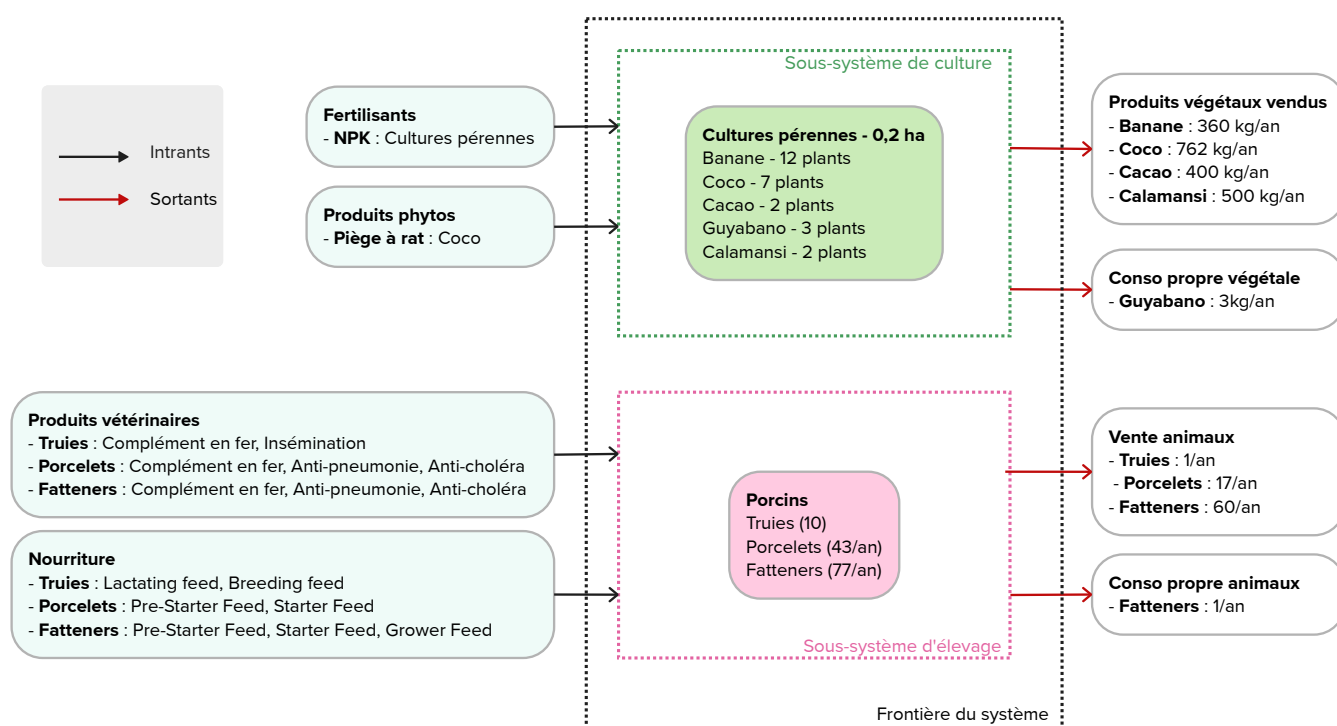


Figure 20 - Modèle conceptuel de l'exploitation n°2

Le sous-système de culture est entièrement composé de cultures pérennes telles que des bananiers, cocotiers, cacaoyers, guyabanos et calamondins. Elles sont regroupées sur la même surface de 0,2 ha et destinées à la vente, à l'exception des guyabanos qui sont consommés par le ménage. Lors de l'interview, le fermier n'a pas pu fournir les quantités exactes des récoltes et des ventes. Par conséquent, les flux sortants de produits végétaux vendus sont basés sur les informations qu'il a fournies lors d'une interview précédente en 2022.

Pour le compartiment animal, l'élevage porcin fonctionne par le biais d'un sponsor qui achète l'entièreté de la nourriture en échange des soins prodigués par le fermier et de la moitié du revenu net de la vente des porcelets. Le régime alimentaire des porcins est entièrement constitué de concentrés industriels. De plus, le fermier leur administre des produits vétérinaires après la naissance.

Les deux sous-systèmes sont indépendants, ils ne possèdent aucune interaction entre eux. Les déjections sont jetées avec les eaux usées et aucune culture n'est utilisée comme fourrage.

Le fonctionnement économique en situation normale (hors-éruption) est détaillé dans le Tableau 11.

Tableau 11 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°2

| Coûts annuels              | PHP/an     | Sous-système<br>cultural | Valeur annuelle brute         | PHP/an       |
|----------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------|--------------|
| Plants et semences :       | 0          |                          | Produits végétaux vendus :    | 18300        |
| Fertilisants :             | 0          |                          | Produits végétaux consommés : | 357          |
| Produits phytosanitaires : | 100        |                          |                               |              |
| Main d'oeuvre :            | 0          |                          |                               |              |
| <b>TOTAL</b>               | <b>100</b> |                          | <b>TOTAL</b>                  | <b>18657</b> |

| Coûts annuels           | PHP/an      | Sous-système<br>d'élevage | Valeur annuelle brute | PHP/an        |
|-------------------------|-------------|---------------------------|-----------------------|---------------|
| Achat d'animaux :       | 0           |                           | Vente animaux :       | 455700        |
| Produits vétérinaires : | 8940        |                           | Animaux consommés :   | 6983          |
| Alimentation animale :  | 0           |                           |                       |               |
| <b>TOTAL</b>            | <b>8940</b> |                           | <b>TOTAL</b>          | <b>462683</b> |

|                     |                            |               |
|---------------------|----------------------------|---------------|
| Système<br>agricole | Revenu annuel brut :       | 474000        |
|                     | - Coûts annuels:           | 9040          |
|                     | <b>Revenu annuel net :</b> | <b>464960</b> |

L'activité principale de cette ferme repose sur l'élevage porcin pour générer du revenu. Au cours de l'année 2023, 17 porcelets de lait, 60 porcelets engraisés et une truie ont été vendus, représentant 96% du revenu brut de l'exploitation, après que le sponsor a eu prélevé la moitié du revenu de la vente. Les seuls coûts associés au sous-système d'élevage sont donc entièrement dus à l'achat des produits vétérinaires, représentant 99% des coûts totaux de l'exploitation, étant donné que le fermier ne fait pas de frais pour ses cultures, à l'exception d'un piège à rat pour sa culture de noix de coco (100 PHP).

Le sous-système cultural génère les 4% restant du revenu brut total de l'exploitation, via la vente des récoltes des cultures pérennes qui génèrent 18 300 PHP/an. Seule la récolte de guyabanos est destinée à la consommation personnelle du ménage.

Le revenu net annuel de l'exploitation s'élève à 464 960 PHP par an. Le fermier a mentionné une activité complémentaire en tant qu'agent intermédiaire dans l'achat/revente de porcelets, mais le revenu généré par cette activité n'est pas connu.

### 5.1.3. Exploitation n°3

La troisième exploitation est également située dans la municipalité d'Agoncillo de la province de Batangas. Josephine Malapitan supervise les activités quotidiennes agricoles tandis que son mari travaille dans le secteur de croisières en bateau. Ces deux activités constituent l'intégralité du revenu du ménage.

Le fonctionnement de l'exploitation agricole est représenté à la Figure 21.

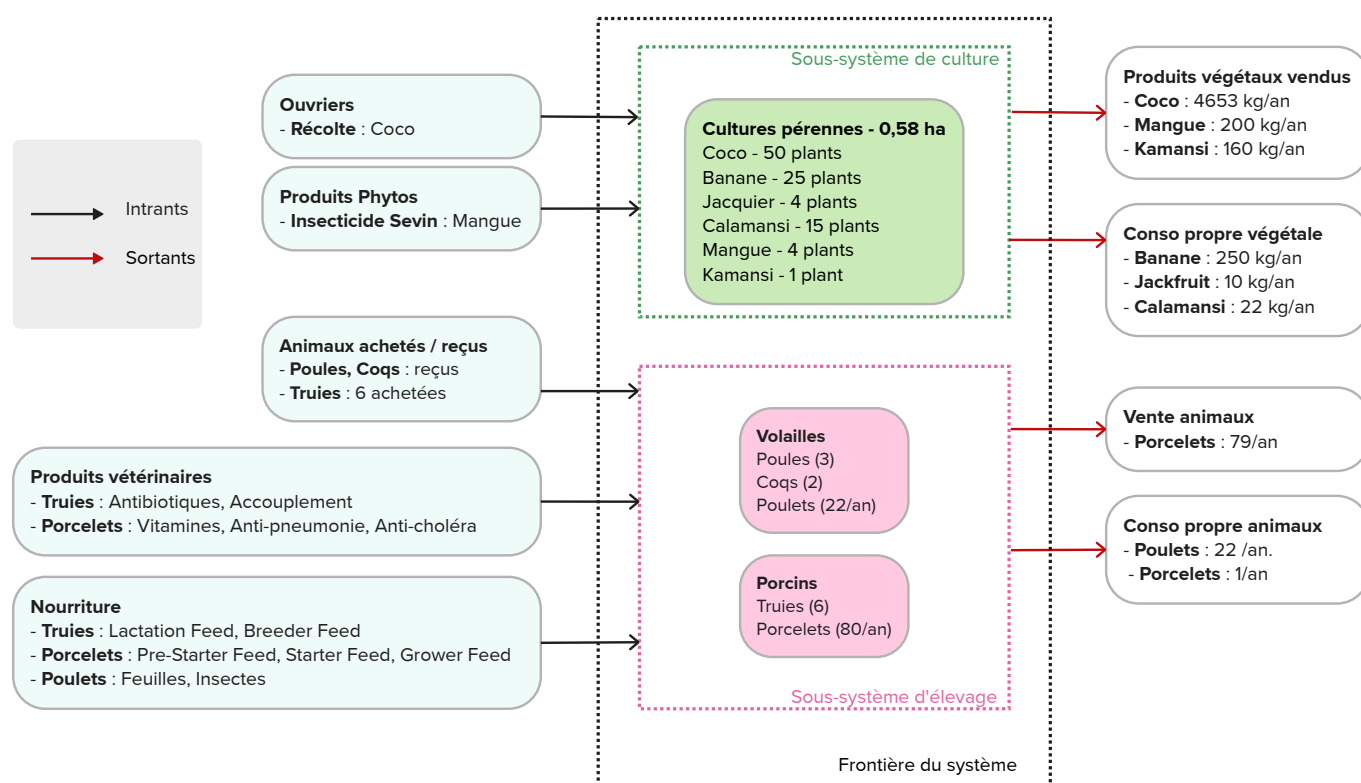


Figure 21 - Modèle conceptuel de l'exploitation n°3

Le sous-système d'élevage comprend un élevage porcin de six truies, produisant des porcelets vendus à quatre mois, dont l'intégralité de l'alimentation provient de l'achat de concentré industriel. L'exploitation agricole possède également un élevage de volaille. Les volailles, issues de parents (poules, coqs) reçus par des proches, se déplacent librement sur la propriété. Elles ne sont pas nourries de manière spécifique par les agriculteurs, et les œufs produits ne sont pas collectés. La production de viande résultante est entièrement destinée à la consommation personnelle du ménage.

Le sous-système de culture se compose exclusivement de cultures pérennes, parmi lesquelles les noix de coco, les mangues et les kamansis sont cultivés à des fins commerciales, tandis que les bananes et les calamansis sont destinés à la consommation directe au sein du ménage. Aucun fertilisant n'est appliqué sur les cultures pérennes, seul un insecticide est appliqué sur les manguiers lorsque cela est nécessaire.

Les deux compartiments (animal et végétal) sont indépendants et ne présentent pas d'interaction directe entre eux. En effet, les cultures ne sont pas utilisées comme fourrage pour les animaux, et les déjections animales ne sont pas valorisées comme fertilisant pour les cultures. Les déjections porcines sont nettoyées et jetées, tandis que les déjections des volailles sont dispersées sur le terrain puisqu'elles s'y promènent librement.

L'analyse économique des flux est représentée dans le Tableau 12.

Tableau 12 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°3

| Coûts annuels              | PHP/an      | Sous-système<br>cultural | Valeur annuelle brute         | PHP/an       |
|----------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|--------------|
| Plants et semences :       | 0           |                          | Produits végétaux vendus :    | 27200        |
| Fertilisants :             | 0           |                          | Produits végétaux consommés : | 282          |
| Produits phytosanitaires : | 750         |                          |                               |              |
| Main d'oeuvre :            | 3500        |                          |                               |              |
| <b>TOTAL</b>               | <b>4250</b> |                          | <b>TOTAL</b>                  | <b>27482</b> |

| Coûts annuels           | PHP/an        | Sous -système<br>d'élevage | Valeur annuelle brute | PHP/an         |
|-------------------------|---------------|----------------------------|-----------------------|----------------|
| Achat d'animaux :       | 0             |                            | Vente animaux :       | 1201630        |
| Produits vétérinaires : | 27930         |                            | Animaux consommés :   | 21499          |
| Alimentation animale :  | 556726        |                            |                       |                |
| <b>TOTAL</b>            | <b>584656</b> |                            | <b>TOTAL</b>          | <b>1223129</b> |

|                  |                            |               |
|------------------|----------------------------|---------------|
| Système agricole | Revenu annuel brut :       | 1228830       |
|                  | - Coûts annuels:           | 588906        |
|                  | <b>Revenu annuel net :</b> | <b>639924</b> |

|                        |                                        |                |
|------------------------|----------------------------------------|----------------|
| Autre source de revenu | Activité de croisières :               | 400000         |
|                        | <b>Revenu annuel total du ménage :</b> | <b>1039924</b> |

L'analyse révèle que le sous-système cultural a des coûts annuels de 4250 PHP/an, représentant seulement 0,7% des coûts totaux de l'exploitation. Les coûts de main d'œuvre pour la récolte de noix de coco est la part la plus importante de ces coûts avec 3500 PHP, le reste étant l'achat d'insecticide pour la culture de mangues. Le revenu annuel brut généré par la vente des cultures de mangues, de noix de coco et de kamansis est de 27200 PHP/an (2% du total de l'exploitation). Le reste des cultures (bananes, jacquiers et calamansis) sont destinés à la consommation personnelle.

Le sous-système d'élevage représente 99% des coûts de l'exploitation (584656 PHP/an), dont la majorité est due à l'achat d'aliments pour l'élevage porcin. En effet, aucune nourriture n'est fournie aux volailles qui mangent librement sur la propriété. Le reste des coûts est attribué à l'achat de produits vétérinaires. Le revenu annuel brut associé à ce sous-système est de 1201630 PHP/an, soit 98% du revenu annuel brut total de l'exploitation. Ce revenu provient de la vente de 79 porcelets sur l'année, le reste des productions animales est consommé par le ménage (un porcelet et les 22 poulets).

Le revenu annuel net de l'exploitation agricole s'élève à 639924 PHP/an. Ce montant constitue une contribution significative au revenu du ménage. En parallèle, le mari génère un revenu supplémentaire grâce à son activité de croisières en bateau, apportant ainsi 400000 PHP annuellement.

#### 5.1.4. Exploitation n°4

L'exploitation n°4 se situe à Lemery, une municipalité de la province de Batangas. Ce système agricole appartient à Ed Tordecilla et est composé exclusivement d'une monoculture de canne à sucre couvrant une superficie de 1,4 hectares (Figure 22).

Les plants de canne à sucre sont récoltés en moyenne tous les 10 mois et destinés à la vente à des entreprises spécialisées dans la fabrication de liqueur et d'alcool. Le renouvellement des plants est effectué tous les trois ans afin de maintenir un rendement élevé. Concrètement, cela signifie qu'une année sur trois, la moitié de la récolte est utilisée pour semer au mois de février, réduisant alors la quantité disponible pour la vente. Tandis que pour les deux autres années, la totalité de la récolte est commercialisée, générant des revenus plus élevés et les coûts de main d'œuvre liés au semis y sont inexistant.

Afin de représenter ce fonctionnement triennal sur une base annuelle, un modèle conceptuel a été réalisé à la Figure 22 en répartissant la quantité de récolte destinée aux semis et les coûts de main d'œuvre qui y sont associés sur les trois ans du cycle. Ce qui permet de lisser les variations observées sur l'ensemble de la période.

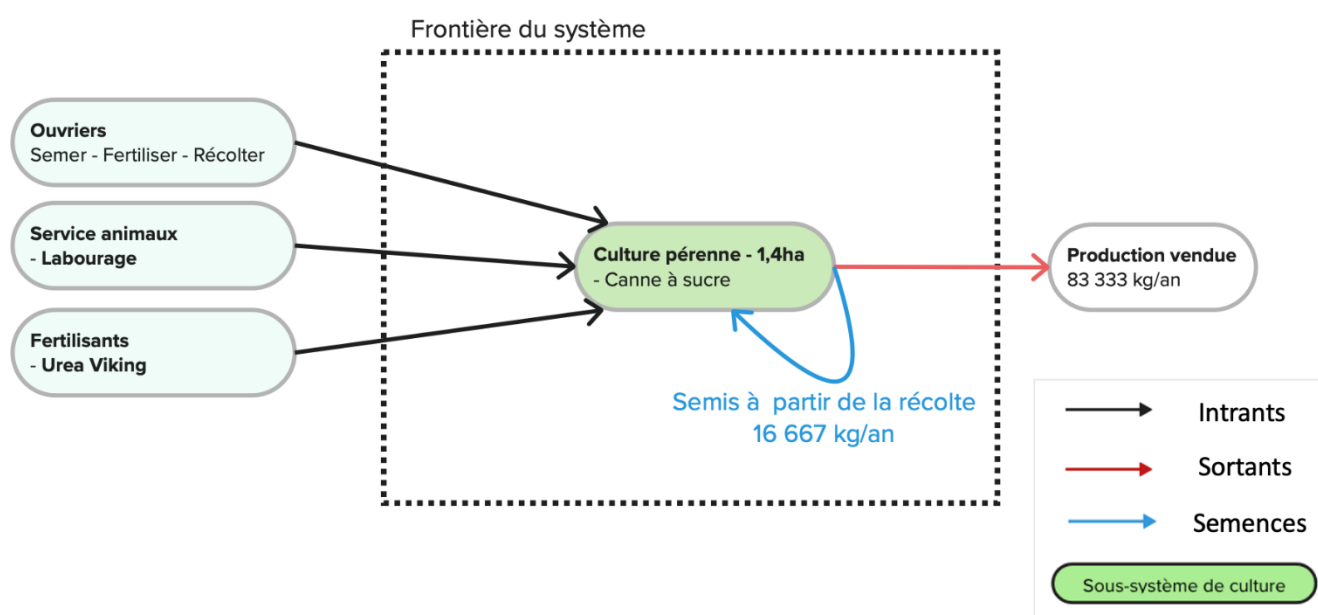


Figure 22 - Modèle conceptuel de l'exploitation n°4 pour une année lissée

Le Tableau 13 représente les flux entrants sur base annuelle, ils comprennent l'achat de fertilisants à hauteur de 29 400 PHP/an et le recours à la main d'œuvre, dont les coûts s'élèvent à 12 950 PHP/an, pour les opérations de semis, de fertilisation, de retournement du sol et de récolte.

Tableau 13 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°4 (année lissée)

| Coûts annuels              | PHP/an       | Sous-système<br>cultural | Valeur annuelle brute         | PHP/an        |
|----------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|
| Plants et semences :       | 0            |                          | Produits végétaux vendus :    | 100000        |
| Fertilisants :             | 29400        |                          | Produits destinées au semis : | 20000         |
| Produits phytosanitaires : | 0            |                          |                               |               |
| Main d'oeuvre :            | 12950        |                          |                               |               |
| <b>TOTAL</b>               | <b>42350</b> |                          | <b>TOTAL</b>                  | <b>120000</b> |

|                           |                                        |               |
|---------------------------|----------------------------------------|---------------|
| Système agricole          | Revenu annuel brut :                   | 100000        |
|                           | - Coûts annuels totaux :               | 42350         |
|                           | <b>Revenu annuel net :</b>             | <b>57650</b>  |
| Autres sources de revenus | Ingénieur électricien                  | 50000         |
|                           | Sécurité sociale                       | 84000         |
|                           | <b>Revenu annuel total du ménage :</b> | <b>191650</b> |

La vente de la récolte génère un revenu annuel brut de 100000 PHP/an et dès lors, un revenu annuel net de 57650 PHP après déduction des coûts.

En plus de l'activité agricole, le ménage dispose d'autres sources de revenus. Le mari travaille occasionnellement comme ingénieur électricien et bénéficie également d'une pension de la sécurité sociale. De plus, une partie des revenus provient des enfants, bien que le montant exact de cette contribution n'ait pas été spécifié lors de l'interview.

#### 5.1.5. Exploitation n°5

L'exploitation n° 5 appartenant à Torribio Holgado se situe dans la municipalité d'Agoncillo, enclavée dans la province côtière de Batangas. Le système agricole est schématisé à la Figure 23.

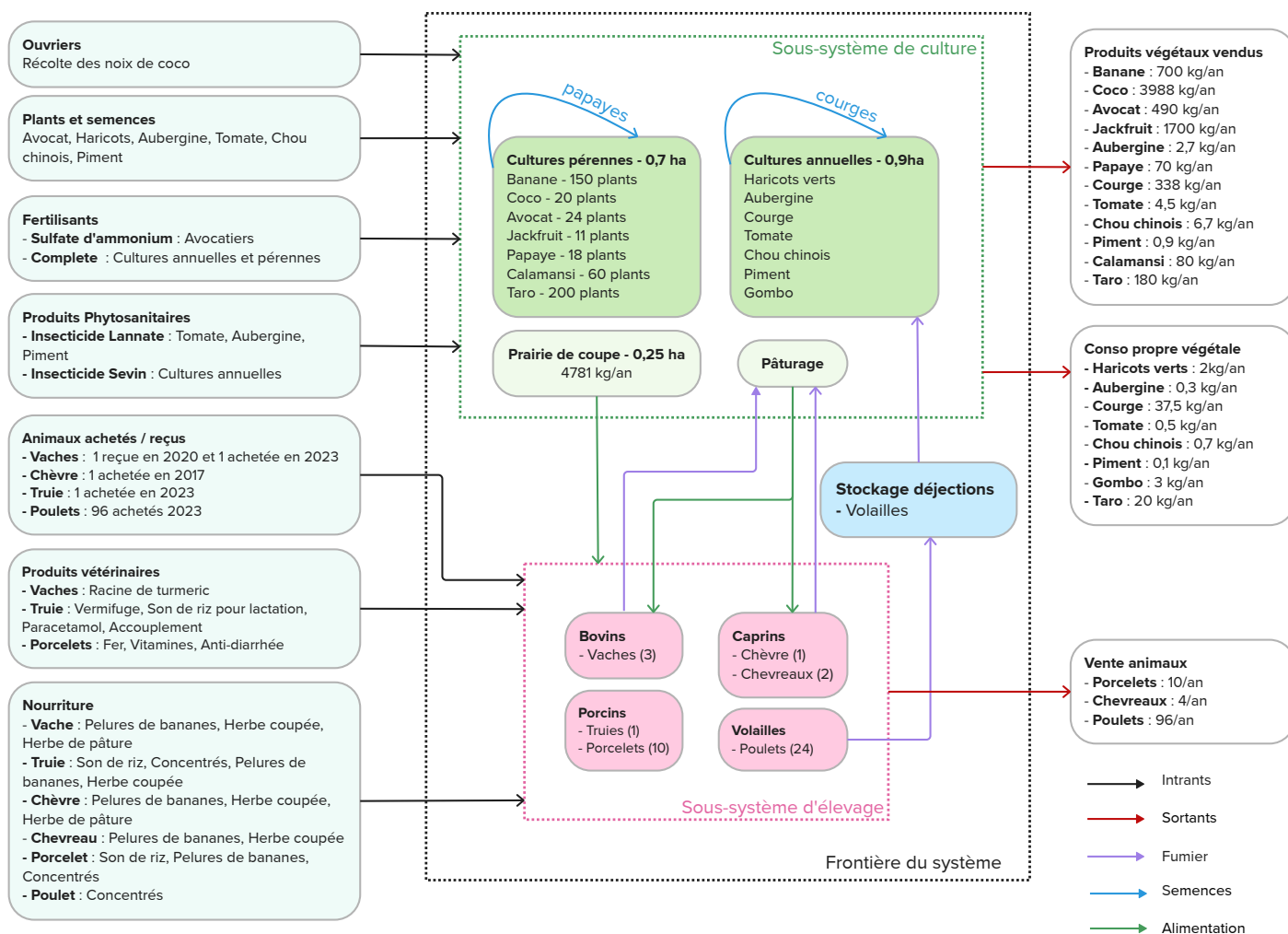


Figure 23 - Modèle conceptuel de l'exploitation n°5

Le sous-système de culture (1,85 ha) est composé de cultures pérennes dont des bananiers, calamondins, avocatiers, cocotiers, papayers, jacquiers et taros. Mais également d'une prairie de coupe et de pâturage à destination des animaux. Des cultures annuelles : haricots verts, aubergines, tomates, courges, chou chinois, piments, et des gombos sont également exploitées.

Le sous-système d'élevage est composé d'un élevage de porcelets engraisés destinés à la vente à quatre mois, d'un élevage de chevreaux vendus à neuf mois et demi et d'un élevage de poulets de 45 jours. L'exploitation possède également trois vaches. Au moment de l'interview, et sur la période considérée, aucun veau n'était présent dans la ferme, le fermier n'inséminant qu'une vache sur trois tous les 1,5 ans. Seules les déjections des poulets sont récoltées et appliquées comme fertilisant sur les cultures annuelles. Les déjections des bovins et des caprins restent répandues sur la prairie de pâturage. Les déjections porcines ne sont quant à elles pas utilisées.

Le Tableau 14 indique les flux économiques des deux sous-systèmes de l'exploitation. Les coûts du sous-système cultural s'élèvent à 31635 PHP/an, correspondant à 18% des coûts totaux du système agricole. Ces coûts incombent principalement aux frais de main d'œuvre et de l'achat de fertilisants. Le sous-système d'élevage génère des coûts plus élevés, représentant 82% des coûts totaux. Ils sont principalement dus aux différents achats d'animaux et à l'achat d'alimentation animale.

Tableau 14 - Résumé des flux économiques de l'exploitation n°5

| Coûts annuels              | PHP/an       | Sous-système<br>cultural | Valeur annuelle brute         | PHP/an        |
|----------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|
| Plants et semences :       | 853          |                          | Produits végétaux vendus :    | 120403        |
| Fertilisants :             | 13741        |                          | Produits végétaux consommés : | 2983          |
| Produits phytosanitaires : | 842          |                          |                               |               |
| Main d'oeuvre :            | 16200        |                          |                               |               |
| <b>TOTAL</b>               | <b>31635</b> |                          | <b>TOTAL</b>                  | <b>123386</b> |

| Coûts annuels           | PHP/an        | Sous-système<br>d'élevage | Valeur annuelle brute | PHP/an        |
|-------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------|---------------|
| Achat d'animaux :       | 83128         |                           | Vente animaux :       | 137800        |
| Produits vétérinaires : | 2101          |                           | Animaux consommés :   | 0             |
| Alimentation animale :  | 59042         |                           |                       |               |
| <b>TOTAL</b>            | <b>144270</b> |                           | <b>TOTAL</b>          | <b>137800</b> |

|                  |                            |              |
|------------------|----------------------------|--------------|
| Système agricole | Revenu annuel brut :       | 258203       |
|                  | - Coûts annuels:           | 175906       |
|                  | <b>Revenu annuel net :</b> | <b>82298</b> |

|                        |                                        |               |
|------------------------|----------------------------------------|---------------|
| Autre source de revenu | Revente de bananes sucrées :           | 397444        |
|                        | <b>Revenu annuel total du ménage :</b> | <b>479742</b> |

Le sous-système de cultures contribue au revenu annuel brut à hauteur de 47% du système agricole par la vente des récoltes. Tandis que la vente d'animaux du sous-système d'élevage génère 53% du revenu annuel brut total de l'exploitation via la vente des porcelets, des chevreaux et des poulets (Annexe C5).

Ces activités agricoles génèrent un revenu net annuel de 82298 PHP/an après déduction des coûts du revenu annuel brut. Le ménage possède une autre source de revenu, provenant de la revente de bananes caramélisées générant un apport important de revenu selon l'interview. Celui-ci s'élève à 397444 PHP/an. Les pelures des bananes achetées et ainsi transformées sont récupérées afin de nourrir les différents animaux de l'exploitation.

### 5.1.6. Comparaison des différentes exploitations

Les principales caractéristiques des cinq exploitations décrites précédemment sont résumés dans le Tableau 15.

Tableau 15 - Comparaisons des différents caractéristiques principales des cinq exploitations

| Exploitation n°                  | 1          | 2      | 3      | 4     | 5              |
|----------------------------------|------------|--------|--------|-------|----------------|
| Sous-système de cultures         | Pé, An, Pa | Pé     | Pé     | Pé    | Pé, An, Pa     |
| Sous- système d'élevage          | Bo, Po     | Po     | Po, Vo | /     | Bo, Po, Ca, Vo |
| Flux des cultures vers l'élevage | Oui        | /      | /      | /     | Oui            |
| Flux de l'élevage aux cultures   | Oui        | /      | /      | /     | Oui            |
| Revenu annuel net (PHP/an)       | 66864      | 464960 | 639924 | 57650 | 82298          |

Pé = Cultures pérennes, An = Cultures annuelles, Pa = Pâturages, Bo = Bovins, Po = Porcins, Vo = Volailles, Ca = Caprins.

Toutes les exploitations génèrent un revenu annuel net positif. En ce qui concerne les compartiments qui les composent, seule la quatrième exploitation ne présente pas de sous-système d'élevage et est composée d'une monoculture. Toutes les autres exploitations combinent deux sous-systèmes (culture et bétail). Cependant, seules les exploitations une et cinq montrent des interactions entre ces sous-systèmes. Plus particulièrement, l'exploitation cinq est la seule à collecter les déjections animales et à les appliquer sur les cultures comme fertilisant.

Pour la suite de notre étude simulant l'impact de deux épaisseurs de téphra, il a été décidé de comparer des exploitations avec des systèmes de fonctionnement contrastés.

Le choix s'est donc porté d'une part, sur la quatrième exploitation, qui représente le système le plus simple, avec une monoculture de canne à sucre et aucun élevage. La seconde exploitation choisie est la cinquième, car elle incarne le système agricole le plus complexe, présentant la plus grande variété de cultures et d'élevages différents. De plus, cette exploitation est la seule à présenter autant d'interactions entre les deux sous-systèmes, notamment la collecte des déjections animales pour fertiliser les cultures.

## 5.2. Quantification de la vulnérabilité face à une éruption : Simulation sur deux exploitations choisies

### 5.2.1. Précisions et détails du fonctionnement de l'exploitation n°4

Précédemment, le modèle conceptuel et les flux économiques répartis sur une année de la monoculture de canne à sucre ont été présentés, ajustant les coûts et revenus pour refléter une période annuelle. Cependant, afin d'évaluer au mieux la vulnérabilité de l'exploitation face à des retombées de téphra, des précisions sur son fonctionnement hors éruption sont apportées dans ce paragraphe. Les flux économiques sont détaillés en fonction de l'année du cycle de production, permettant de comparer les variations économiques entre les deux années sans renouvellement de la culture et l'année de semis.

Comme décrit dans la Figure 24, une année sans renouvellement génère le revenu net le plus élevé, toute la récolte étant vendue et les coûts liés au semis étant inexistant. En revanche, pour l'année de semis, le revenu brut est réduit de moitié, du fait des coûts de main d'œuvre supplémentaire et de la récolte plus faible. Pour une année lissée, les revenus et les coûts obtenus correspondent aux moyennes des années précédemment décrites. Le calendrier détaillant les pratiques et activités réalisées tout au long de l'année pour la monoculture est présenté sous forme de schéma dans l'Annexe D.

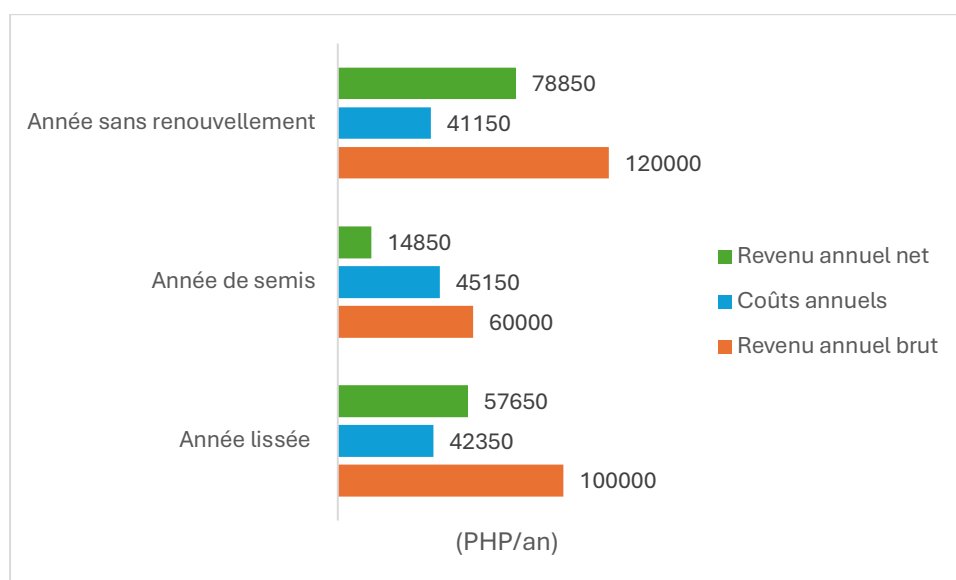


Figure 24 - Comparaison des revenus annuels nets, bruts et des coûts annuels de l'exploitation n°4 pour les différentes périodes du cycle de la monoculture et pour une année lissée

#### 5.2.2. Détermination des pertes face à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm – Exploitation n°4

Les pertes de production de la monoculture de canne à sucre en (kg/an) et (PHP/an) et les pertes de revenus annuels net associés (PHP/an) ont été estimés pour les deux scénarios de dépôt de téphra de 5 et 50mm, mais également en fonction du mois auquel se déroulerait l'éruption. De plus, ces estimations ont été réalisées pour les différentes années du cycle et l'année lissée (cf. le point 5.2.1).

L'impact d'un dépôt de 5 et 50 mm de téphra sur la production de canne à sucre se traduit par une perte de capital comme expliqué dans la section 4.5.1.. En effet, même si elle diffère structurellement d'un véritable tronc, la canne à sucre a une tige robuste et rigide, elle a donc été classée parmi les cultures arboricoles en raison de sa solidité. Dès lors, il a été estimé qu'il n'y avait pas d'effet de saisonnalité, c'est-à-dire que les variations en fonction du stade phénologique de la plante sont négligeables.

Pour un dépôt de 5 et de 50mm, les pertes sont respectivement de 2000 kg/an (2%) et de 14000 kg/an (14%), quel que soit le mois auquel se produit l'éruption et les différentes périodes du cycle analysées. En terme économique, cela se traduit par une perte de revenu annuel direct annuel estimée à 2400 PHP/an pour le scénario à 5mm de téphra et 60000 PHP/an pour le scénario à 50 mm.

Les pourcentages de perte de revenu annuel net pour une année sans renouvellement sont représentés à la Figure 25. Pour le faible dépôt de 5 mm, les pertes augmentent progressivement tout au long de l'année. Les pertes les plus faibles sont enregistrées pour une éruption survenant en janvier et février, avec une perte de 2%, qui s'élève ensuite à 3% à partir du mois de mai et se maintient à ce niveau jusqu'en décembre.

Pour le scénario de dépôt plus important de 50 mm, une tendance similaire est observée sur la figure, mais les pertes de revenu net sont nettement plus élevées. En janvier et février, les pertes s'élèvent à 16%, elles augmentent à 19% en mars et avril, puis atteignent 21% pour les mois suivants, de mai à décembre. En effet, pour cette période toutes les fertilisations de la culture ont été réalisées en amont, tandis que si l'éruption se produit en janvier ou février, les fertilisations post-éruption sont ajustées proportionnellement aux pertes de canne à sucre. Ce qui diminue les frais engendrés par les fertilisants, permettant un revenu net plus élevé.

Pour une année de semis, les périodes les plus vulnérables sont les mêmes que précédemment, mais le revenu annuel net est considérablement affecté avec des pertes pour le premier scénario de 12% pour janvier et février, et de 16 % pour la période de mai à décembre. Le second scénario génère à nouveau des pertes nettement plus importantes augmentant de 85% les deux premiers mois à 113% pour la fin de l'année. Le revenu net est alors négatif de -1950 PHP/an (les pertes occasionnées aux cultures ne couvrant pas les coûts engendrés au préalable).

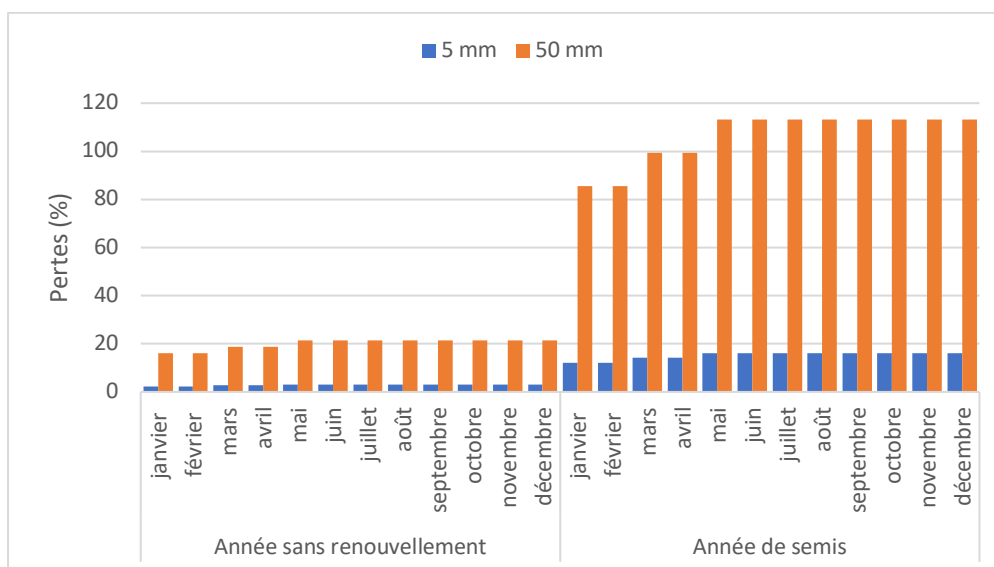


Figure 25 – Pourcentages de perte de revenu annuel net de l’exploitation n°4 pour les années avec et sans renouvellement des plants, en fonction du mois de l’éruption, pour un dépôt de 5 et 50 mm de téphra

La simulation a également été réalisée pour une année lissée regroupant les trois années du cycle de la monoculture de canne à sucre (voir Annexe E). Les résultats, sont cohérents avec ceux des deux périodes décrites ci-dessus. . En effet, les pertes varient de 3 à 4% pour le premier dépôt et de 22 à 29% pour le second. Ainsi, aucun revenu négatif n’est observé pour l’année lissée.

#### 5.2.2.1. Évaluation des coûts supplémentaires associés aux pertes de production

Les deux scénarios de dépôt de téphra entraînent une perte de capital sous forme de plants de canne à sucre. Dès lors, si l’éruption se produit pour une année de non-renouvellement, ce déficit de plants doit être renouvelé, sans quoi le revenu de l’année suivante sera également impacté. Le remplacement des plants perdus génère des coûts non représentés dans l’analyse économique. Pour une éruption avec un dépôt de 5mm, 2% des plants devront être renouvelés, entraînant un coût supplémentaire de 2400 PHP et pour 50 mm 14% des plants sont perdus générant alors 16800PHP de frais supplémentaires.

De plus, les coûts liés à la main d’œuvre et à l’achat de fertilisants, qui sont maintenus post-éruption, pourraient varier. Des coûts de main d’œuvre supplémentaires pour le semis des nouveaux plants devraient également être pris en compte.

### 5.2.3. Précisions et détails du fonctionnement de l'exploitation n°5

La Figure 26 indique que les cultures pérennes représentent la majeure partie du revenu net annuel avec une contribution de 83% et des coûts relativement faibles (17% des coûts totaux). Parmi ces cultures, les principales contributions proviennent des bananes (20800 PHP/an), des avocats (19547 PHP/an) et des jacquiers (16472 PHP/an). De plus, les coûts associés sont respectivement de 7200 PHP/an, 1523 PHP/an et 528 PHP/an. La culture de noix de coco, représente la plus grande part des coûts des cultures pérennes (56%) et dès lors, contribue le moins au revenu net. Ces coûts élevés sont imputés aux frais de main-d'œuvre nécessaires pour la récolte, qui s'élèvent à 16200 PHP/an.

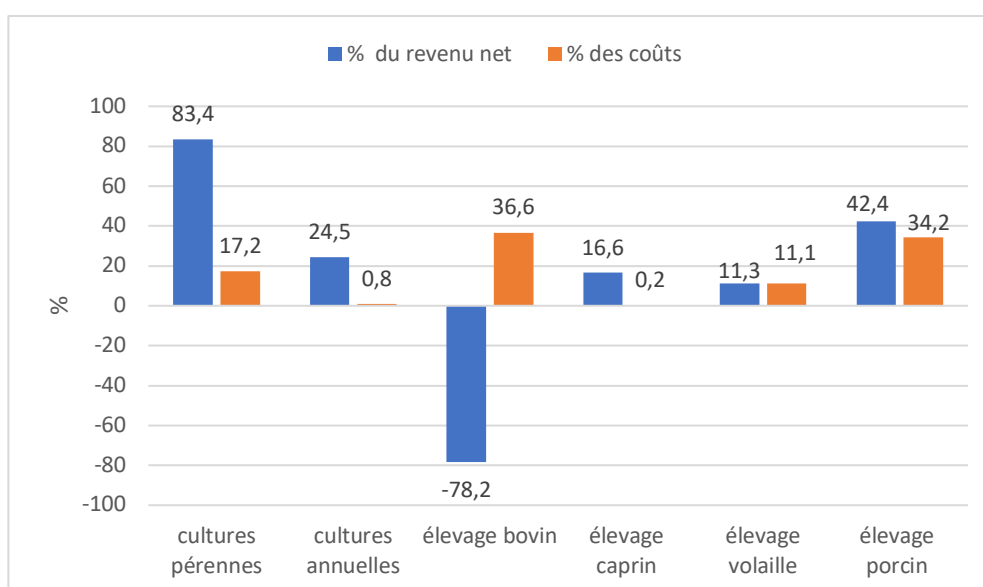


Figure 26 – Contribution des différentes catégories de production au revenu annuel net et aux coûts annuels de l'exploitation n°5

Les cultures annuelles contribuent à 24,5% du revenu annuel net avec des coûts négligeables (0,8% des coûts totaux). La culture de courges présente la part de revenu la plus élevée avec 20124 PHP/an, tandis que les cultures d'haricots verts, aubergine et gombo participent négativement au revenu. En effet, elles sont entièrement destinées à la consommation personnelle du ménage, sauf pour les aubergines pour lesquelles une partie de la récolte est vendue, mais ne génère pas un revenu suffisant que pour contrer les coûts.

L'élevage est une composante importante de l'exploitation, elle représente 53% des revenus bruts annuels (Annexe C5) mais contribue négativement aux revenus nets (-7,9%) en raison des coûts très élevés des différents types d'élevage, et plus spécifiquement l'élevage bovin. L'élevage porcin est le plus grand contributeur avec 42% du revenu net annuel de l'exploitation et 34% des coûts totaux. L'élevage bovin contribue négativement au revenu net (-78,2%), en raison des coûts élevés qu'il engendre (36,6%). En effet, sur la période étudiée, aucun veau n'a été élevé, ni vendu et aucune activité

laitière n'a été répertoriée pour les trois vaches. L'élevage caprin et de volaille contribuent à 16,6% et 11,3 % du revenu net, et présentent des coûts minimes pour les chèvres et chevreaux avec 0,2% des coûts totaux et 11% pour les poulets.

Les coûts élevés associés à l'élevage sont principalement imputés aux animaux « capitaux » tels que les vaches, les truies et les chèvres. Ces animaux nécessitent des frais importants pour la nourriture et les frais vétérinaires. Cependant, ils ne sont pas destinés à la vente directement car leur rôle principal est de produire des petits qui eux, sont commercialisés.

#### 5.2.4. Détermination des pertes face à un dépôt de téphra de 5 et 50 mm – Exploitation n°5

Dans le cas d'un dépôt de téphra de 5 mm, les pertes de revenu annuel net varient de 1306 PHP (2 %) pour une éruption en décembre à 28021 PHP (34%) de pertes au mois de juillet, tandis que pour un scénario de dépôt de 50 mm, le minimum de perte est enregistré en décembre avec 2672 PHP de perte (3 %) et le maximum en mai avec 96414 PHP (117%). Seule une éruption au mois de juin engendre une perte légèrement moins importante pour un dépôt plus important de téphra (Figure 27). Cela est dû aux coefficients de saisonnalité attribués au préalable pour les cultures arboricoles, qui est plus élevé pour le stade de récolte à 5 mm qu' à 50 mm.

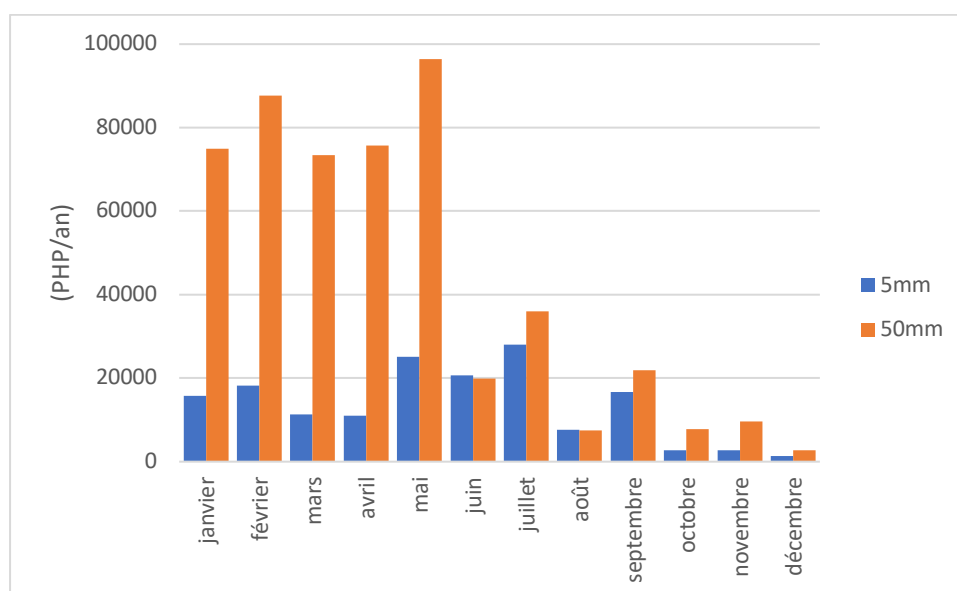


Figure 27 - Pertes de revenus annuels nets pour l'exploitation n°5 en fonction du mois de l'éruption pour des dépôts de 5 et 50 mm de téphra

Les Tableaux 16, 17 et 18 représentent les impacts sur les flux économiques entrants et sortants du système agricole d'une éruption en juillet pour le scénario de 5 mm et en mai pour celui de 50 mm, ces mois ayant été sélectionnés car ils correspondent aux périodes où une éruption engendrerait les pertes les plus importantes.

Tableau 16 - Impacts sur les flux entrants en PHP/an et en % de l'exploitation n°5 pour 5 mm de téphra en juillet et 50 mm en mai

|                         |                            | 5 mm - juillet |                | 50 mm - mai |               |
|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| Sous-système cultural   | Coûts annuels              | PHP/an         | % baisse coûts | PHP /an     | %baisse coûts |
|                         | Plants et semences :       | 853            | 0              | 853         | 0             |
|                         | Fertilisants :             | 13740          | 0              | 11807       | 14            |
|                         | Produits phytosanitaires : | 842            | 0              | 399         | 53            |
|                         | Main d'œuvre :             | 16200          | 0              | 16200       | 0             |
| TOTAL                   |                            | 31635          | 0              | 29258       | 8             |
|                         |                            | 5 mm - juillet |                | 50 mm - mai |               |
| Sous -système d'élevage | Coûts annuels              | PHP/an         | % baisse coûts | PHP /an     | %baisse coûts |
|                         | Achat d'animaux :          | 83128          | 0              | 83128       | 0             |
|                         | Produits vétérinaires :    | 2101           | 0              | 1236        | 41            |
|                         | Alimentation animale :     | 58742          | 0,5            | 30294       | 49            |
|                         | TOTAL                      | 143971         | 0,2            | 114658      | 21            |

Dans le cas d'un dépôt de téphra de 5mm pour le mois de juillet, les coûts des intrants du sous-système cultural ne sont pas impactés, alors que ceux associés au compartiment d'élevage baissent légèrement de 0,2%. Le second scénario de dépôt impacte les flux entrants à hauteur de 8% pour les cultures, ce qui est dû à des achats de produits phytosanitaires plus faibles, puisque les applications prévues le mois suivant l'éruption (en juin) sont annulées. Pour le compartiment d'élevage, le second scénario est beaucoup plus impactant (-21% des coûts), attribuables à la réduction des achats d'aliments et des produits vétérinaires (près de la moitié des achats d'alimentation par rapport à la situation normale).

Pour les flux sortants, la valeur brute annuelle des produits végétaux vendus subit une perte de 23% et de 29% par rapport à la situation initiale, pour des dépôts respectivement de 5mm en juillet et de 50 mm en mai. La consommation propre des produits végétaux diminue également pour les deux scénarios, la valeur brute diminue de 4% par rapport à la situation hors éruption. Quant au sous-système d'élevage, l'impact d'une éventuelle éruption sur les animaux diminuerait le revenu annuel brut de 1% et 68% respectivement pour un dépôt de 5 et 50 mm, attribuable à la perte de chevreaux et de porcelets.

Tableau 17 - Impacts sur les flux sortants de l'exploitation n°5 en PHP/an et en % pour 5 mm de téphra en juillet et 50 mm en mai

|                                     |                               | 5 mm - juillet |           | 50 mm - mai  |           |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------------|-----------|--------------|-----------|
| Sous-système<br>système<br>cultural | Valeur annuelle brute         | PHP/an         | % perte   | PHP/an       | % perte   |
|                                     | Produits végétaux vendus :    | 92782          | 23        | 85644        | 29        |
|                                     | Produits végétaux consommés : | 2871           | 4         | 2878         | 4         |
|                                     | <b>TOTAL</b>                  | <b>95653</b>   | <b>29</b> | <b>88522</b> | <b>28</b> |
|                                     |                               | 5 mm - juillet |           | 50 mm - mai  |           |
| Sous-système<br>d'élevage           | Valeur annuelle brute         | PHP/an         | %perte    | PHP /an      | % perte   |
|                                     | Vente animaux :               | 137100         | 1         | 44155        | 68        |
|                                     | Animaux consommés :           | 0              | 0         | 0            | 0         |
|                                     | <b>TOTAL</b>                  | <b>137100</b>  | <b>1</b>  | <b>44155</b> | <b>68</b> |

Le Tableau 18, indique les pertes totales à l'échelle du système agricole.

Tableau 18 - Pertes en PHP/an et en pourcents à l'échelle du système agricole n°5 pour 5 mm de téphra en juillet et 50 mm en mai

|                     |                            | 5mm - juillet |           | 50mm - mai    |            |
|---------------------|----------------------------|---------------|-----------|---------------|------------|
|                     |                            | PHP/an        | % perte   | PHP/an        | %perte     |
| Système<br>agricole | Revenu annuel brut :       | 229882        | 11        | 129799        | 50         |
|                     | Coûts annuels totaux :     | 175605        | 0,2       | 143916        | 18         |
|                     | <b>Revenu annuel net :</b> | <b>54277</b>  | <b>34</b> | <b>-14116</b> | <b>117</b> |

Les coûts annuels totaux de l'exploitation diminuent de 0,2% et de 18% par rapport à la situation hors éruption pour 5 et 50mm. Les revenus annuels bruts quant à eux, subissent une perte de 11% par rapport au revenu initial pour 5 mm et cette valeur chute à 50% pour 50 mm. Après déduction des coûts totaux, le revenu annuel net obtenu est de 54277 PHP/an pour 5 mm (34%), tandis qu'un dépôt de 50 mm, génère un revenu net négatif de -14116 PHP/an (117% de pertes).

La Figure 28 permet de regarder en détail la contribution des différentes cultures à la valeur annuelle brute de l'exploitation selon les deux scénarios de dépôt. Ce sont les cultures pérennes qui y contribuent majoritairement dans les deux cas, à hauteur de 94% et 93% pour 5 mm en juillet et 50 mm en mai. Il est important de noter que la culture d'herbe coupée ne contribue pas à la valeur brute puisqu'elle n'est pas commercialisée mais destinée à l'alimentation des animaux tout comme la prairie de pâturage. Les cultures annuelles apportent quant à elles le reste de la valeur annuelle brute à 6% et 7% pour 5 et 50 mm de dépôts, avec comme contributeur majeur, la culture de courges qui dans les deux cas génère plus de 80% de la valeur brute des cultures annuelles. Notons également que les courges génèrent moins de revenu brut lorsqu'elles sont face à un

dépôt de 5 mm en juillet que face à 50 mm en mai. En effet, au mois de juillet la culture est au stade de floraison, rendant la culture plus vulnérable que pour un dépôt plus important de 50 mm au stade de semis en mai.

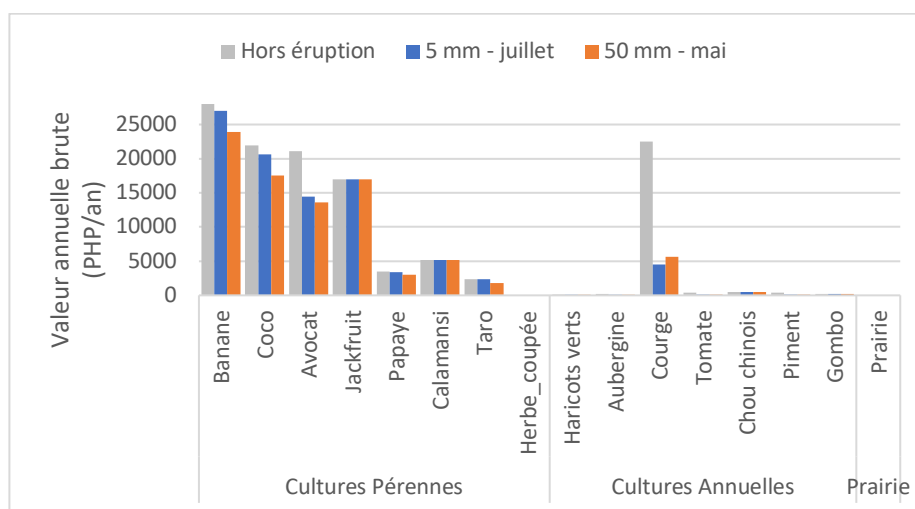


Figure 28 - Valeur annuelle brute des différentes cultures de l'exploitation n°5 en situation normale et pour 5 et 50 mm de téphra en juillet et en mai

La Figure 29 détaille les pertes de productions pour les différentes variétés de cultures de l'exploitation n°5. Parmi les cultures pérennes, les avocatiers subissent la perte la plus élevée avec un dépôt de 50 mm, atteignant 35% de perte et 31% pour 5 mm. Les cultures pérennes restantes sont un peu moins impactées. En effet, leurs pertes varient de 0% à 6% de pertes pour 5mm et de 0% à 26% pour 50mm. Les cultures de jacquiers et de calamansis ne subissent aucune perte puisqu'elles ont été récoltées avant les mois d'éruption. Les pertes de production des cultures annuelles s'élèvent à 80% et 75 % pour 5 et 50 mm respectivement. Seuls le chou chinois et le gombo qui sont hors culture lors du mois de mai et de juillet ne sont pas impactés. Même si la prairie ne contribue pas au revenu, la perte de production n'est pas insignifiante puisqu'elle sert de pâturage aux animaux dont l'alimentation devra être complétée.

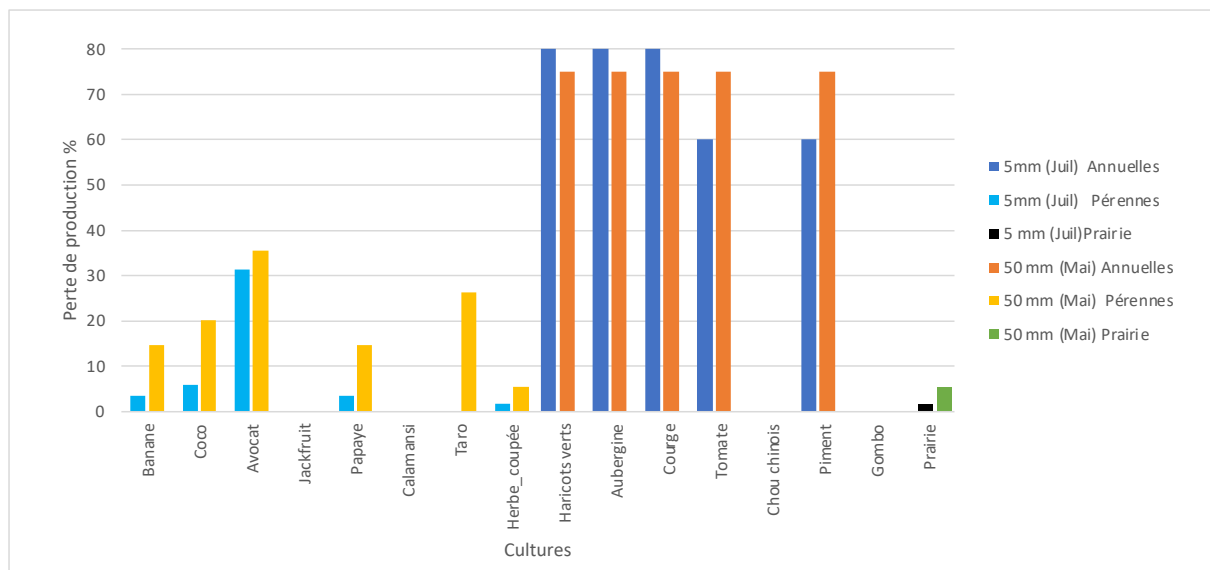


Figure 29 – Pertes de production des différentes cultures de l'exploitation n°5 pour le scénario d'éruption de 5 et 50 mm de téphra en juillet et en mai

Pour le sous-système d'élevage, on observe à la Figure 30 que les porcs et les volailles ne subissent pas de pertes pour 5 mm de dépôt de téphra en juillet, alors que les chevreaux sont impactés à hauteur de 5%. De même, pour 50 mm de téphra, l'élevage de caprin est plus fortement impacté (91% de perte) que les porcins (85%). Seuls les poulets de 45 jours ne sont pas impactés par une éruption (50mm) au mois de mai puisqu'ils sont achetés et élevés à l'intérieur.

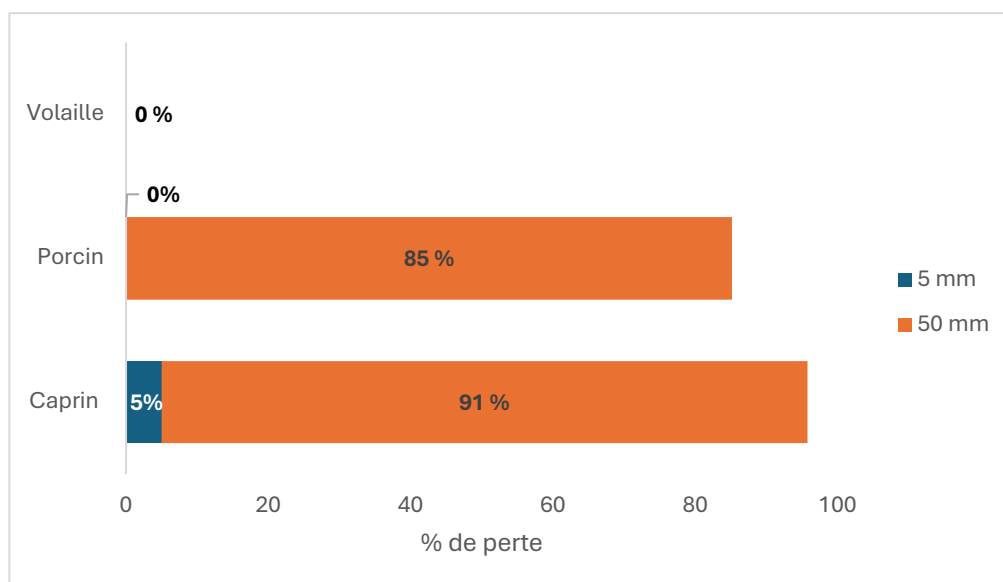


Figure 30 - Pourcentages de perte de revenu annuel brut pour les différents élevages de l'exploitation n°5 pour le scénario d'éruption de 5 et 50 mm de téphra en juillet et en mai

En conséquence, pour le sous-système d'élevage, c'est la vente de porcelets qui contribue à la majorité du revenu annuel brut (69%) face à une retombée de 5 mm de téphra en juillet, tandis que pour le second scénario en mai, c'est la vente de poulets qui génère proportionnellement le plus de revenu brut (65%) (Figure 31). A noter que le revenu annuel brut de l'exploitation chute de 258203 PHP/an en situation hors éruption à 229882 PHP/an et 129799 PHP/an pour 5 mm en juillet et 50 mm en mai respectivement.

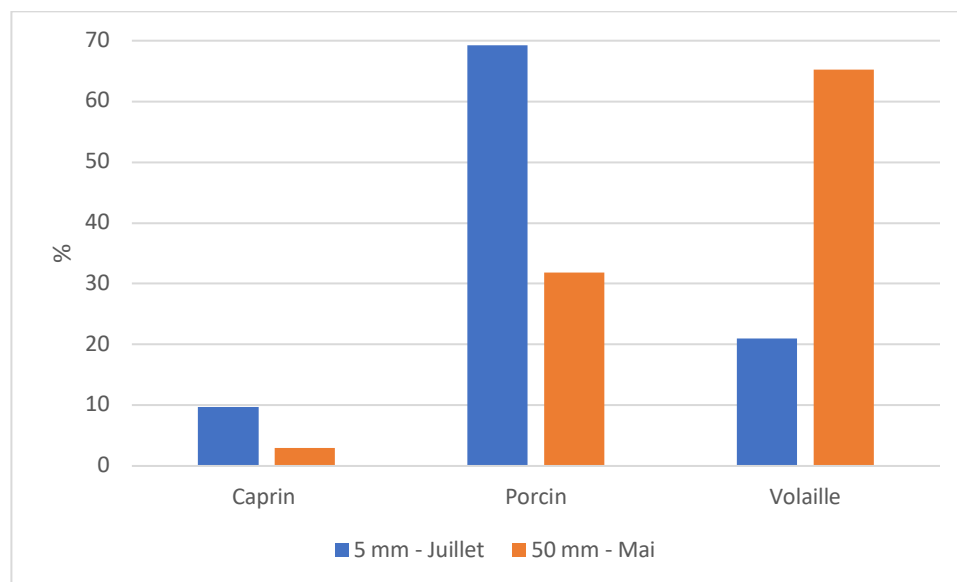


Figure 31 - Apport des différents élevages au revenu annuel brut du compartiment animal de l'exploitation n°5 pour le scénario d'éruption de 5 et 50 mm de téphra en mai

## 6. Discussion

Dans cette section, nous procéderons à une évaluation approfondie de la vulnérabilité des exploitations agricoles en nous appuyant sur les résultats économiques présentés précédemment. L'analyse se concentrera spécifiquement sur les pertes de revenu brut et les pertes de revenu net annuel pour les périodes identifiées comme les plus vulnérables, en fonction des deux scénarios de dépôt de téphra.

Un des objectifs de cette discussion est d'identifier les éléments les plus impactés par les dépôts de téphra, en mettant en évidence les écarts de vulnérabilité entre les différents scénarios. En particulier, nous comparerons les résultats obtenus pour les deux systèmes agricoles sélectionnés en raison de leur fonctionnement contrasté : une monoculture et un système de polyculture-élevage intégrée. Cette comparaison permettra de déterminer lequel de ces systèmes est le moins vulnérable aux dépôts de téphra, sur la base des pertes économiques observées.

De plus, les éléments identifiés comme les plus vulnérables dans notre analyse seront confrontés aux déclarations des exploitants agricoles recueillies sur le terrain. Cette confrontation nous permettra de vérifier la cohérence entre les résultats théoriques obtenus et les perceptions des agriculteurs.

### 6.1. Interprétation des résultats – Exploitation n° 4

Cette exploitation se caractérise par une simplicité structurelle, reposant exclusivement sur une monoculture de canne à sucre dont la production suit un cycle triennal où les mêmes plants de canne à sucre sont utilisés pendant trois ans, avec une récolte annuelle, et ne sont remplacés qu'à la fin de ce cycle. Étant donné que le modèle d'analyse se base sur une année, il a été décidé de simuler l'impact des retombées de téphra en considérant deux phases distinctes du cycle de production : l'année de renouvellement des plants et les années sans renouvellement. Le compartiment végétal dépend d'intrants tels que l'achat de fertilisants mais aussi du recours à une main d'œuvre extérieure au système pour les opérations de semis, de fertilisation et de récolte. De plus, les services d'un carabao<sup>9</sup> extérieur au système sont nécessaires pour le labour.

La canne à sucre présente une vulnérabilité relativement faible face aux dépôts de téphra. Sa résistance est due à plusieurs facteurs, notamment sa structure végétative dense et son cycle de croissance rapide. En effet, les pertes de production qui ont été

---

<sup>9</sup> Buffle d'eau répandu aux Philippines

quantifiées sont limitées, avec une diminution de seulement 2 % pour un dépôt de 5 mm et de 14 % pour celui de 50 mm. Par ailleurs, le temps de renouvellement rapide, d'environ un an, permet à la culture de se régénérer rapidement après une perturbation.

Cependant, les pertes quantifiées (Figure 25) montrent une augmentation progressive tout au long de l'année pour les deux épaisseurs de téphra, avec des pertes minimales en janvier et février, culminant en mai et se maintenant ensuite jusqu'en décembre. Cette tendance s'explique par le calendrier de la culture de canne à sucre (Annexe D1), où la récolte est prévue en décembre. La saisonnalité n'étant pas prise en compte en raison de l'association de cette culture avec les cultures arboricoles, les pertes de production restent constantes quel que soit le mois de l'éruption. Les variations observées dans les revenus annuels nets sont donc entièrement dues aux fluctuations des coûts de traitement de la culture. Bien que les traitements, comme la préparation du sol, soient maintenus après l'éruption comme prévu dans le calendrier, ce qui n'affecte pas les coûts initiaux, les applications de fertilisants sont ajustées en fonction des plants restants. Dans ce cas-ci, deux applications de fertilisants étant prévues en mars et mai, une éruption avant ces dates réduit les quantités appliquées, et par conséquent les coûts associés, ce qui a un impact direct sur le revenu net.

En comparant les deux phases du cycle de production, l'année de renouvellement des plants se révèle plus vulnérable en termes de revenus. Les pertes nettes varient de 2 à 16% pour un dépôt de 5 mm et de 85 à 113% pour un dépôt de 50 mm. Cette vulnérabilité accrue s'explique par le fait que la moitié de la production est utilisée pour le renouvellement des plants, réduisant considérablement les ventes. À partir de mai, les coûts des traitements (fertilisations et main d'œuvre) dépassent les revenus générés par les ventes, entraînant une baisse du revenu net. En revanche, l'année sans renouvellement est beaucoup moins vulnérable, avec des pertes variant de 2 à 3% et de 16 à 21% respectivement pour les deux dépôts, garantissant que le revenu reste positif quel que soit le mois auquel se produit l'éruption.

Cette simulation est réalisée uniquement à l'échelle de l'exploitation et ne concerne que l'impact direct des particules de téphra sur la culture de canne à sucre. Néanmoins, un impact sur d'autres éléments externes à l'exploitation est envisageable. Par exemple, les effets potentiels des retombées de téphra sur le carabao, dont les services sont loués pour le labourage du sol de la culture, ne sont pas intégrés dans l'évaluation, ce qui peut sous-estimer l'ampleur réelle des perturbations sur l'exploitation globale.

Ce système agricole est donc peu vulnérable aux dépôts de téphra de 5 et 50 mm si l'éruption se produit pour une année sans renouvellement. Cependant, les années de renouvellement représentent des périodes critiques où les pertes économiques peuvent être considérables.

## 6.2. Interprétation des résultats – Exploitation n°5

Pour analyser économiquement la vulnérabilité de l'exploitation face à une éruption, les pertes annuelles nettes ont été quantifiées pour chaque mois de l'année et représentées à la Figure 27. Pour le premier scénario, l'exploitation est identifiée comme la plus vulnérable au mois de juillet, avec une perte de 34% par rapport au revenu net hors éruption et au mois de mai pour le second scénario, avec une perte de 117% générant un revenu net négatif.

### 6.2.1. Pertes associées à un dépôt de 5 mm de téphra

Tout d'abord, il convient d'examiner le premier scénario d'éruption qui génèrerait un dépôt de 5 mm de téphra au mois de juillet, afin d'identifier les éléments les plus vulnérables et les mécanismes sous-jacents au système, justifiant cette perte de revenu élevée. Le Tableau 17 montre que c'est le compartiment végétal qui induit les plus grandes pertes, avec une diminution de 23 % des revenus bruts liés à la vente des produits végétaux contre une faible diminution de 1% des ventes animales. Cette vulnérabilité accrue s'explique principalement par l'impact sur les cultures annuelles. La Figure 29 indique des pertes de production allant jusqu'à 80 % pour les haricots verts, les aubergines et les courges, et 60% pour les tomates et les piments. Ces pertes s'expliquent par le stade de développement auquel se trouvent ces cultures en juillet (voir calendrier de culture à l'Annexe D2). En effet, les plus impactées sont en phase de floraison, qui est le stade le plus vulnérable aux dépôts de téphra, puisque les dommages causés aux bourgeons floraux peuvent empêcher les fruits de se développer (Craig et al., 2021a). Parmi ces cultures, celle des courges se distingue comme le principal contributeur à la perte de revenu. Elle représente en situation hors éruption, 25% du revenu annuel net total de l'exploitation. Dès lors, la forte réduction de production induite par le faible dépôt de téphra impacte significativement le revenu net de l'exploitation engendrant une perte de 18000 PHP/an. En revanche, bien que les autres cultures annuelles principalement destinées à la consommation du ménage, n'aient pas d'impact direct sur la baisse de revenu, elles sont néanmoins vulnérables. Dès lors, les pertes de production subies par ces cultures entraîneront la nécessité de les remplacer par d'autres sources de nourriture, ce qui engendrera des frais supplémentaires pour le ménage, même si ces coûts ne se reflètent pas directement dans le revenu global de l'exploitation. Seuls les choux chinois et les gombos ne sont pas impactés par le dépôt de téphra puisqu'ils se trouvent au stade hors culture.

Du côté des cultures pérennes, c'est la production d'avocats qui est la plus vulnérable avec 31% de perte de production, sa récolte étant prévue en juillet. Cette culture contribue également à hauteur de 25 % au revenu annuel net en temps normal (hors éruption), ce qui accentue la vulnérabilité de l'exploitation en juillet avec une perte de

6615 PHP/an rien que pour cette culture. Il est à noter que les cultures de jacquiers et de calamansis ne montrent aucune perte de production (Figure 29), puisque la récolte a déjà été réalisée. Cependant, elles se trouvent au stade de la floraison pour les jacquiers et de croissance pour les calamansis, impliquant des pertes qui se répercuteront sur les revenus de l'année suivante.

Pour le bétail, l'élevage caprin semble être le seul secteur impacté par le faible dépôt de téphra (Figure 30). Cette perte de 5% de revenu annuel brut est attribuable à la diminution du poids des chevreaux en croissance au moment de l'éruption, ainsi qu'à l'effet indirect sur le poids des chevreaux à naître en novembre, la chèvre se trouvant en période de gestation à ce moment-là. Étant donné que le prix de vente des chevreaux est déterminé par leur poids, le revenu est donc impacté. De plus, la simulation indique la perte d'un chevreau qui aurait normalement été conservé pour régénérer le cheptel après la vente des autres animaux. Afin de compenser cette perte, le fermier devra recourir à l'insémination artificielle de la chèvre ou faire appel à un bouc externe pour la reproduction, entraînant ainsi des frais supplémentaires non négligeables pour l'exploitation.

En revanche, l'élevage porcin et de volailles ne présentent pas de pertes économiques significatives. Selon le cycle de production établi en Annexe D2, une seule vente des porcelets est prévue, en mai, ils ne sont plus présents sur l'exploitation au moment de l'éruption. En ce qui concerne la truie, l'impact est relativement limité. Son alimentation provient principalement d'aliments achetés en dehors du système. Seule la portion d'herbe coupée fournie par le fermier est affectée et devra être substituée par une autre source. Dès lors, aucune perte de revenu n'est générée à partir de cette catégorie d'animaux pour l'année en cours. Les poulets, quant à eux, ne sont pas affectés par le dépôt de téphra puisqu'ils ne naissent pas sur l'exploitation, ils sont achetés et nourris avec des aliments provenant de l'extérieur du système. De plus, ils sont élevés en intérieur, ce qui les protège des impacts liés aux dépôts de téphra. Par conséquent, la production de poulets reste intacte, garantissant leur vente sans pertes associées. Notons que dans ce cas-ci, il est supposé que les poulets continueraient d'être nourris par le fermier après l'éruption, sans prendre en compte la possibilité que le ménage soit évacué et qu'il n'ait plus accès à l'exploitation. Il est également considéré que le dépôt de 5 mm n'engendre aucun dommage structurel au bâtiment tel qu'un effondrement du toit, ce type de dommage ne survenant généralement que pour des dépôts de téphra compris entre 100 et 300 mm (Jenkins et al., 2015; Wilson & Cole, 2006).

En ce qui concerne les trois vaches présentes sur l'exploitation, bien qu'elles ne génèrent pas de revenus immédiats, elles se révèlent plus vulnérables que les autres animaux de l'exploitation lorsqu'elles sont exposées à un dépôt de téphra de 5 mm. En effet, le modèle de simulation indique la perte d'une des trois vaches suite à cette exposition. Ces vaches, bien que non productives sur l'année étudiée, sont conservées pour assurer

la régénération du cheptel via la production future de veaux. Ce cycle de reproduction relativement long signifie que le nombre de veaux produits, et donc les revenus générés, est faible. Ainsi, même en l'absence de revenus immédiats, les coûts d'entretien de ces vaches restent significatifs pour le fermier, car elles nécessitent une alimentation et des soins constants. La perte d'une vache, qui aurait pu potentiellement générer des revenus lors des années suivantes, constitue non seulement une perte de capital reproductif, mais accentue également le caractère non rentable de leur entretien.

Après avoir évalué les pertes directes subies par les différents animaux de l'exploitation à la suite d'un dépôt de 5 mm de téphra, il est essentiel de se pencher sur les interactions au sein de l'exploitation pour comprendre les implications de ce dépôt et vérifier la cohérence avec les pertes observées. Les interactions entre les compartiments végétal et animal se manifestent principalement de deux manières :

1. Apport d'herbe et pâturage : Le fermier fournit aux animaux, à l'exception des porcelets et des poulets, de l'herbe coupée provenant d'une prairie de fauche. Par ailleurs, les vaches et la chèvre pâturent sur une autre prairie.
2. Apport de fertilisation : Les déjections des vaches et de la chèvre fertilisent directement les prairies, tandis que celles des poulets sont récoltées et appliquées sur les cultures annuelles.

Bien que le dépôt de 5 mm de téphra entraîne une perte de 2 % de production annuelle sur les prairies de coupe et de pâture (Figure 29), cette perte n'est pas directement quantifiée en termes de revenu (PHP/an). D'après le modèle, les quantités produites restent suffisantes pour subvenir aux besoins alimentaires des animaux pour l'année impactée par l'éruption. Cependant, même si le faible dépôt permet aux animaux de continuer à pâturer, l'exposition prolongée des animaux aux particules de téphra peut impliquer des effets tels que des irritations oculaires et cutanées, des abrasions dentaires, ou encore un faible risque de fluorose si le dépôt n'est pas dissipé par le vent, la pluie ou des interventions manuelles (Craig et al., 2016). En outre, mis à part ces prairies, l'alimentation des animaux ne dépend pas d'autres cultures de l'exploitation. Les apports externes réduisent ainsi l'impact sur leur approvisionnement en nourriture.

Concernant la fertilisation, les cultures annuelles dépendent des déjections de poulets pour maintenir leur fertilité. Cependant, puisque les poulets ne subissent pas de pertes, ce flux n'est pas impacté. En revanche, la perte d'une vache entraînerait une diminution de l'apport de fertilisation directe sur la prairie, ce qui pourrait affecter la productivité des prairies à long terme.

### 6.2.2. Pertes associées à un dépôt de 50 mm de téphra

En ce qui concerne les pertes associées au dépôt de téphra de 50 mm, la Figure 25 montre que les pertes de revenu net pour une éruption allant de janvier à mai sont largement plus élevées que celles observées pour un dépôt de 5 mm. Ces pertes augmentent progressivement pour atteindre un pic en mai avec 117 % de perte de revenu net annuel. Après ce sommet, les pertes diminuent considérablement, variant fortement jusqu'à atteindre un minimum de 3 % en décembre.

Le compartiment le plus vulnérable est celui du bétail, qui enregistre une diminution significative de 68 % des revenus bruts annuels (Tableau 17). En effet, les caprins présentent la perte de revenu annuel brut la plus élevée des différents élevages avec une diminution de 91%. Ceci s'explique par l'impact direct sur les deux chevreaux nés lors de la première portée en janvier et destinés à être vendus en octobre. L'un d'eux est perdu, tandis que le seul chevreau restant voit son poids considérablement réduit, ce qui affecte fortement le revenu tiré de sa vente. De plus, le dépôt de téphra entraîne la perte de la seule génitrice, rendant impossible la naissance de la deuxième portée prévue en novembre et privant ainsi l'exploitation d'une source essentielle de revenu, puisque le nombre de chevreaux vendus par an passe de quatre à un seul.

L'élevage porcin montre également une vulnérabilité significative face à cette chute de téphra. Cet élevage comprend une truie qui donne naissance à 10 porcelets par an, normalement destinés à être vendus en mai. Cependant, selon l'hypothèse posée, toute vente prévue durant le mois de l'éruption est considérée comme non réalisée, ce qui entraîne une perte de 60 % de la portée. Ainsi, seulement quatre porcelets sont vendus, et ce à un prix réduit en raison de l'impact sur leur santé.

De plus, la perte de la truie elle-même entraîne des répercussions importantes sur la rentabilité future de l'exploitation. Cette perte compromet également les perspectives de production pour l'année suivante, qui ne sont pas prises en compte dans cette simulation. La nécessité de remplacer la truie et les coûts associés à l'achat d'une nouvelle reproductrice doivent également être considérés, augmentant ainsi les impacts économiques négatifs à long terme.

Pour l'élevage bovin, la simulation entraîne la perte de deux vaches sur trois initialement présentes. Bien que cette réduction n'affecte pas directement le revenu net, la valeur brute du capital chute de manière significative, passant de 186000 PHP à 6200 PHP. Les coûts d'entretien diminuent également, puisque l'alimentation est désormais nécessaire pour une seule vache, entraînant une réduction des dépenses de 1717 PHP/an à 948 PHP/an. Cependant, les coûts liés aux soins vétérinaires restent inchangés, car les traitements, tels que l'administration de racine de curcuma, sont effectués en janvier.

En ce qui concerne la fertilisation des prairies par les déjections, la réduction du nombre de vaches entraîne une diminution de la quantité de déjections, passant de 28470 kg/an à 15730 kg/an. Bien que cette réduction ait un impact potentiel sur la fertilité des sols, celui-ci n'est pas quantifié en termes de PHP/an.

L'élevage de poulets s'est révélé être le plus résilient dans cette simulation. De la même manière que pour le dépôt de 5 mm, aucune perte n'est enregistrée. Les poulets sont achetés sous forme de poussins, élevés en intérieur fermé, puis vendus après 45 jours, ce qui les protège des impacts directs de l'éruption. En conséquence, les quantités de déjections utilisées pour la fertilisation des cultures annuelles ne sont pas réduites, permettant de maintenir le retour de matière organique vers ces cultures.

Néanmoins, comme pour le premier scénario de dépôt, il est important de noter que cette résilience liée à l'élevage de poulets dépend de certaines conditions non prises en compte dans cette simulation. Si le bâtiment venait à s'effondrer ou si, en raison d'une évacuation, le fermier perdait l'accès à sa ferme et ne pouvait plus nourrir ses poulets, ces derniers risqueraient d'être ensevelis sous les débris de la structure ou de mourir de faim.

Pour le compartiment végétal, les cultures pérennes génèrent l'essentiel du revenu brut annuel en situation normale (80%), tandis que parmi les cultures annuelles, seule la courge contribue réellement au revenu brut (20%), les autres étant principalement destinées à la consommation du ménage. L'analyse de l'impact du second scénario de dépôt révèle que les pertes de production sont proportionnellement plus importantes pour les cultures annuelles (jusqu'à 75%) (Figure 29), principalement en raison de leur stade de développement plus vulnérable au moment de l'éruption en mai (semis). Dès lors, seule la perte de production des courges impacte le revenu brut de l'exploitation en le privant de 13431PHP sur l'année, alors que les pertes de production des autres cultures annuelles n'affectent pas directement le revenu brut de l'exploitation puisqu'elles sont principalement consommées. L'impact se traduirait donc plutôt par des dépenses supplémentaires pour compenser les manques alimentaires. Seules les cultures de gombos et de chou chinois ne sont pas impactées, puisqu'elles se trouvent au stade hors culture au mois de mai.

En revanche, parmi les cultures pérennes, les plus grandes pertes de production sont indiquées pour les avocats en premier lieu, suivi des taros, des noix de coco, des bananes et des papayes respectivement (Figure 29). Les avocats présentent la perte de revenu brute la plus élevée de 36% par rapport à la situation normale. Les cultures de jacquiers et de calamansis ne présentent pas de perte de production étant donné que leur récolte a déjà été réalisée. Toutefois, bien que l'éruption ne semble pas affecter le revenu de l'exploitation pour ces deux cultures, il est important de noter que ces dernières se trouvent au stade de croissance au moment de l'éruption, et le dépôt de 50 mm aura des conséquences sur les rendements de l'année suivante.

Des pertes plus importantes pour un dépôt plus faible sont indiquées à la Figure 29 pour les cultures d'haricots verts, aubergines et courges. Cela s'explique par le stade de développement auquel se trouve ces cultures. La simulation du dépôt de 5 mm est analysée pour le mois de juillet où les cultures sont au stade très vulnérable de la floraison, tandis que pour le second scénario étudié au mois de mai, le stade est celui du semis qui est moins vulnérable.

Dans les deux scénarios, une réduction graduelle des pertes est observée d'octobre à décembre, avec un impact minimal sur les revenus en cas d'éruption en décembre (de 2% à 3%). Cette observation peut être attribuée à la structure même du modèle de simulation, qui est basé sur une année civile. Cela signifie que plus l'éruption se produit tard dans l'année, plus des quantités importantes auront été récoltées et vendues, ce qui atténue l'impact des retombées de téphra sur les revenus annuels nets. Cela ne reflète donc pas pleinement les répercussions que l'éruption pourrait avoir sur les récoltes et les productions animales dans l'année suivante, puisque le modèle s'arrête en décembre. En réalité, les dépôts de téphra impacteront les performances et revenus agricoles de l'année suivante, un aspect que ce modèle ne prend pas en compte. Ainsi, bien que décembre puisse sembler le mois pour lequel l'exploitation est la plus résiliente, une analyse approfondie des calendriers de culture et des cycles de production animale est nécessaire pour révéler les éléments tout de même vulnérables.

Par exemple, les avocats ont déjà été récoltés en juillet, et se trouvent au stade de floraison au mois de décembre. Ils sont donc particulièrement vulnérables à ce stade, et une éruption à cette période engendrera des pertes de revenu puisque 31% de la récolte sera perdue (154 kg perdus, représentant 6622PHP de revenu brut perdu). Cependant, il est à noter qu'en décembre (à part la tomate et le chou-chinois), les autres cultures annuelles sont au stade « hors-récolte » et ne sont donc pas impactés par un dépôt de téphra. Pour le sous-système d'élevage, l'entièreté des ventes ont déjà été réalisées (porcelets, poulets, chevreaux). Mais l'éruption aura un impact sur les animaux présents sur l'exploitation dont la truie qui se trouve en période de gestation, impactant considérablement les revenus de l'année suivante.

Quant à la dépendance aux intrants, l'exploitation s'appuie fortement sur des ressources extérieures pour son fonctionnement (Figure 23). Le sous-système de culture nécessite l'achat de fertilisants pour les cultures annuelles et pérennes, ainsi que de produits phytosanitaires pour les cultures annuelles. De plus, la récolte des noix de coco dépend de la main d'œuvre extérieure. En ce qui concerne le sous-système d'élevage, la dépendance est marquée par l'achat de poussins à plusieurs reprises dans l'année pour l'élevage de volailles, ainsi que par l'utilisation de concentrés alimentaires pour les porcs et les poulets. Les animaux reçoivent également des pelures de bananes achetées. Seuls les bovins et les caprins sont principalement nourris à partir de ressources provenant de l'exploitation.

### 6.3. Comparaison des résultats pour les deux exploitations agricoles

La comparaison entre les deux exploitations agricoles révèle des structures contrastées: l'une adopte une monoculture (n°4), tandis que l'autre utilise un système intégré de polyculture-élevage (n°5). L'analyse de la vulnérabilité économique des deux systèmes face aux scénarios de dépôt montre que le système monocultural (n°4) subit un impact plus significatif sur son revenu en fin d'année, particulièrement de mai à décembre (Figure 25). En revanche, le système de polyculture-élevage (n°5) présente une vulnérabilité plus prononcée au début de l'année, jusqu'à juillet, avant que les pertes ne diminuent (Figure 27).

Les pourcentages de pertes de revenu net maximaux sont systématiquement plus élevés pour les deux scénarios dans l'exploitation n°5 (polyculture-élevage) comparativement à l'exploitation n°4 (monoculture). Cette observation suggère que le système de monoculture est moins impacté. Ce qui serait principalement dû à la résistance intrinsèque de la culture de canne à sucre. Cependant, il est crucial de se demander si cette constatation permet réellement de conclure qu'une monoculture est plus résiliente face aux retombées de téphra par rapport aux systèmes mixtes culture - élevage. En effet, malgré les indications selon lesquelles la monoculture semble subir moins de pertes, de nombreuses études montrent que les systèmes agricoles dotés d'une plus grande diversité sont généralement plus résilients. Cette diversité contribue à réduire la sensibilité, définie par comme « le degré auquel le système est modifié ou affecté par une perturbation interne ou externe » (Gallopín, 2006; Lurette et al., 2020; Stark et al., 2017). Stark et al. (2016) affirment que les systèmes mixtes agriculture-élevage, grâce à leurs interactions complexes, tendent à offrir une meilleure résilience face aux perturbations, notamment en raison de leur moindre dépendance aux intrants ce qui les rend moins sensibles aux fluctuations du marché. De plus, d'un point de vue agroécologique, une faible dépendance aux ressources externes est souvent avantageuse, car elle indique une intégration efficace des éléments au sein de l'exploitation, favorisant le recyclage des ressources et réduisant les pertes (Altieri et al., 2015). Toutefois, dans le contexte d'une éruption, les systèmes agricoles intégrant des interactions entre différents sous-systèmes peuvent se retrouver contraints de compenser les pertes dans ces flux interconnectés. Par exemple, pour l'exploitation n°5, la perte d'animaux qui contribuaient à la fertilisation des pâturages et la réduction de la production des prairies destinées à nourrir les animaux doivent être compensées. Cette nécessité de remplacement entraîne une augmentation des coûts et une dépendance accrue aux intrants.

Dès lors, il serait pertinent d'approfondir les recherches pour déterminer comment maximiser la résilience des systèmes agricoles en préservant la diversité des cultures et les interactions entre les sous-systèmes, tout en équilibrant les coûts supplémentaires

et la dépendance accrue aux intrants qui peuvent découler d'une éruption, afin de maintenir leur viabilité économique.

Il est également important de noter que la généralisation de la culture de la canne à sucre dans la région, au détriment des autres cultures, pourrait entraîner des conséquences néfastes. Sur le plan économique, une telle transition pourrait provoquer une baisse des prix du marché, réduisant ainsi les revenus des producteurs. De plus, l'exploitant a mentionné des difficultés sur le marché de la canne à sucre, notamment avec la fermeture d'une usine clé pour la transformation dans la région. Sur le plan environnemental, cela pourrait nuire fortement à la biodiversité régionale. Altieri (2008) a notamment démontré les avantages en termes de rendements pour les polycultures développées par de petits exploitants, qui peuvent être de 20% à 60% supérieurs à ceux d'une culture unique, grâce à la réduction des pertes dues aux mauvaises herbes, aux insectes et aux maladies, ainsi qu'à une utilisation plus efficace des ressources disponibles en eau, lumière et nutriments (Altieri, 2008).

Ensuite, les résultats obtenus dans les deux cas soulignent l'importance cruciale de la gestion temporelle dans la réduction de la vulnérabilité des systèmes agricoles. En effet, l'impact d'une éruption dépend largement du moment de l'année où elle survient, les pertes économiques étant fortement influencées par le calendrier de production des cultures et la gestion de la production animale. Il semble essentiel de veiller à ce que les différentes cultures ne soient pas toutes à leur stade de vulnérabilité maximale au même moment. Par exemple, dans le cas de l'exploitation n°5, les pertes de revenu les plus importantes ont été associées à la coïncidence de la seule période de récolte des avocats avec la floraison des courges au mois de juillet, ces deux cultures étant parmi les principales contributrices au revenu de l'exploitation.

Pour minimiser de telles pertes, il pourrait être judicieux d'optimiser le calendrier de culture tout en respectant les contraintes notamment climatiques telles que les périodes de semis optimales. En échelonnant les mois de semis et en répartissant les stades de floraison, il est possible non seulement d'étaler les récoltes des cultures annuelles, mais aussi d'éviter la coïncidence de la récolte des courges avec celles des cultures pérennes majeures, comme les avocats. Cela réduit le risque que toutes les cultures principales soient simultanément exposées à leur pic de vulnérabilité, ce qui pourrait entraîner des pertes importantes pour l'exploitation.

Il est également crucial d'intégrer le calendrier de production des élevages dans la planification globale. Éviter que toutes les génitrices soient en gestation simultanément et étaler les périodes de vente pour qu'elles ne coïncident pas avec les moments de vulnérabilité des cultures les plus rentables permet de mieux gérer les risques. En diversifiant les périodes de production et en ajustant les calendriers de manière à ne pas avoir toutes les sources de revenu exposées aux mêmes risques, l'exploitation pourra mieux absorber les chocs liés aux éruptions volcaniques.

Enfin, intégrer des cultures moins sensibles aux risques de téphra, dans le mix de cultures pourrait également renforcer la résilience globale de l'exploitation et assurer une production continue.

#### 6.4. Confrontation aux données de terrains : perceptions des exploitants agricoles

Dans cette section, les résultats obtenus au cours de l'étude sont confrontés aux observations et aux témoignages recueillis sur le terrain. Cela permet de valider ou de nuancer les interprétations des simulations d'impact en tenant compte des expériences pratiques des exploitants.

##### 6.4.1. Exploitation n°4

Suite à l'éruption du volcan Taal en janvier 2020, l'exploitation a été soumise à des chutes de téphra. Selon la position géographique de l'exploitation et les courbes isopaques de la Figure 4, l'épaisseur de la couche de téphra est estimée à environ 3 mm.

Par rapport à cet événement, l'exploitant a confirmé la résistance des cannes à sucre, qui ont légèrement été impactées sur leur hauteur et dont les feuilles tombent, sans pour autant affecter considérablement le rendement. Il mentionne également qu'il cultivait auparavant des légumes, du riz et qu'il élevait des animaux (poulets, cochons), mais ces productions ont été gravement impactées par l'éruption. Depuis, il a cessé ces activités pour se concentrer sur la canne à sucre, qui s'est avérée la plus résistante. Cette décision est en adéquation avec les résultats de notre étude.

Cependant, l'exploitant a apporté une information supplémentaire importante : après un dépôt de téphra, il utilise des machines pour labourer le sol en profondeur, afin de ramener de la terre à la surface et d'ensevelir le dépôt de téphra. Selon lui, cela permet de fertiliser et de limiter l'acidité due au téphra. Cela nécessite l'emploi de machines plus lourdes et coûteuses, contrairement au labour traditionnel avec le carabao, ce qui représente un coût supplémentaire non inclus dans la simulation.

Outre les dépôts de téphra, l'activité volcanique a engendré des tremblements de terre et des affaissements de terrain, lesquels ont également impacté les cultures. Ces événements ont nécessité l'évacuation des habitants pendant deux mois.

#### 6.4.2. Exploitation n°5

Tout comme pour l'exploitation précédente, l'épaisseur du dépôt de téphra résultant de l'éruption du Taal en 2020 a été estimée entre 5 et 15 mm, en se basant sur la position géographique de l'exploitation et les courbes isopaques présentées la Figure 4.

D'après l'exploitant, les plantes annuelles ont été plus particulièrement impactées (ex: aubergines), tandis que les cultures pérennes telles que les bananes et les noix de coco ont été décrites comme peu vulnérables. Ce qui corrobore les résultats de la simulation.

Cependant, il a déploré un impact plus important sur la prairie de coupe destinée au fourrage, qui a été entièrement recouverte, nécessitant une replantation complète. Dans la simulation, seuls 2% de pertes de production ont été observés pour 5 mm de dépôts à maximum 65% pour 50 mm. Probablement, le coefficient appliqué défini pour des prairies néo-zélandaises sous-estime les conditions réelles des Philippines. De plus, le mois de janvier correspond à la saison sèche aux Philippines et l'herbe ne peut être semée qu'à partir de mai, juste avant la saison des pluies.

Concernant les dommages observés sur l'élevage, il mentionne simplement avoir dû racheter des animaux après l'éruption, sans fournir de détails sur les espèces spécifiques qui ont été impactées. Ces impacts semblent plus dramatiques que ceux obtenus dans la simulation pour 5 mm de téphra et plus proches des résultats obtenus pour 50 mm. Il est possible que l'impact ait été amplifié par des facteurs non pris en compte dans l'étude, tels que les dégâts engendrés à son système d'approvisionnement en eau, dont le béton a été fissuré par les tremblements de terre. En effet, de nombreux tremblements de terre associés à des mouvements magmatiques sous-jacents ont été enregistrés autour du volcan Taal à cette période, provoquant des fissures notamment dans la municipalité d'Agoncillo où se situe l'exploitation (Manila Observatory, 2020).

Il mentionne également qu'après l'éruption, les particules de téphra sont retirées de la surface des plantes et des fruits, car, selon l'exploitant, elles absorbent la chaleur et brûlent les végétaux.

#### 6.5. Utilisation d'une approche systémique

La méthode utilisée dans ce travail a permis d'élargir l'analyse de la vulnérabilité agricole en considérant les exploitations comme des systèmes intégrés. Cette approche tient compte des interactions au sein des exploitations, contrairement aux études existantes qui se concentrent uniquement sur les cultures ou les animaux pris isolément. Les résultats indiquent que les pertes économiques des exploitations agricoles sont influencées, d'une part, par les interactions entre les deux sous-systèmes, telles que la

coïncidence des périodes de vulnérabilité élevées pour les cultures et les animaux les plus rentables. D'autre part, elles sont également affectées par les interactions au sein même d'un sous-système, comme pour le sous-système cultural, où l'agencement du calendrier des différentes cultures peut moduler l'ampleur des pertes. Ce qui met en lumière la nécessité d'une gestion intégrée des ressources et des périodes critiques pour améliorer la résilience des exploitations.

Cette approche a également permis de modéliser les exploitations de manière systémique sur base d'un modèle conceptuel global, fournissant ainsi une base pour des études futures.

## 6.6. Limites de l'étude

En ce qui concerne les données, la méthode de collecte basée sur des interviews présente certaines limitations. La traduction et les différentes interprétations des réponses ont pu introduire des erreurs, rendant certaines informations potentiellement inexactes. Les exploitants ont souvent fourni des données estimatives plutôt que de s'appuyer sur des documents précis détaillant les différents flux, ce qui a probablement conduit à des imprécisions. Par ailleurs, certaines informations manquaient ou n'étaient pas cohérentes avec les autres données, nécessitant des estimations basées sur d'autres exploitations ou sur la littérature existante. Par conséquent, il est probable que certains flux économiques aient été surévalués ou sous-évalués, introduisant ainsi des biais dans les résultats de l'analyse économique.

Une autre limitation de cette étude réside dans la quantification des pertes pour les différents éléments des exploitations agricoles, qui repose sur l'utilisation de coefficients de pertes et de saisonnalité issus de la littérature et principalement des travaux de Craig et al., 2021a; Wild et al., 2019; Wilson & Kaye, 2007. Cette approche comporte plusieurs inconvénients. Tout d'abord, ces coefficients proviennent de fonctions de fragilité développées pour des exploitations en Nouvelle-Zélande, où les exploitations sont plus grandes, plus intensives, et plus mécanisées, ce qui diffère considérablement des conditions rencontrées aux Philippines. Le climat en Nouvelle-Zélande est tempéré avec des saisons bien marquées, tandis que les Philippines bénéficient d'un climat tropical, caractérisé par une saison sèche et une saison des pluies. Ces différences climatiques influencent de manière significative les pratiques agricoles dans chaque région. De plus, le type de sol varie considérablement entre ces deux pays, affectant les conditions de culture et de production. Ces différences climatiques et pédologiques ne sont pas prises en compte dans les coefficients utilisés, ce qui limite la pertinence des données pour le contexte philippin.

De plus, les espèces animales et végétales étudiées en Nouvelle-Zélande ne sont pas identiques à celles des Philippines. Cette disparité a conduit à un autre défi dans notre étude : les éléments trouvés aux Philippines, pour lesquels aucun coefficient spécifique n'est disponible dans la littérature, ont dû être associés à des catégories existantes sur base d'hypothèses. Cette nécessité d'adaptation et d'estimation, en raison du manque de données spécifiques, peut introduire des biais et affecter la précision des résultats.

Il convient également de souligner que les coefficients utilisés ne tiennent compte que de l'épaisseur du dépôt de téphra comme paramètre impactant. Cependant, d'autres paramètres peuvent influencer l'impact, tels que l'épaisseur et la taille des grains de téphra, la morphologie des plantes ou encore les conditions météorologiques (Craig, 2015; Ligot, 2022; Ligot et al., 2023).

Ensuite, afin d'utiliser les coefficients de saisonnalité, un calendrier de production des différentes cultures a été établi, associant chaque mois à un stade de développement des plantes. Cependant, les données disponibles se limitaient principalement aux périodes de semis et de récolte, nécessitant une estimation des stades intermédiaires basée sur la littérature. Il est donc possible que certains stades aient été assignés aux mauvais mois, ce qui pourrait altérer les résultats, en particulier pour les stades les plus vulnérables tels que la floraison.

La modélisation employée ne prend pas en compte certains éléments qui, dans la réalité, exercent une influence considérable sur la vulnérabilité des exploitations agricoles. Par exemple, bien que dans la réalité la plupart des habitants soient évacués en cas d'éruption, notre simulation suppose que les activités agricoles se poursuivent normalement après l'événement. De plus, la disponibilité continue de l'eau est présumée, alors qu'en pratique, cette ressource peut être fortement compromise. La modélisation néglige également les impacts autres que les retombées de téphra, tels que les tremblements de terre qui ont affecté de manière significative la région, ainsi que les dommages aux infrastructures, souvent peu résistantes (Manila Observatory, 2020). Enfin, certains coûts supplémentaires, bien que partiellement mentionnés dans ce travail, ne sont pas intégrés dans les résultats économiques de la simulation.

Bien que l'étude ait l'ambition d'évaluer la vulnérabilité des exploitations agricoles en utilisant une approche systémique qui intègre les interactions au sein des systèmes, certaines limites ont été rencontrées. Parmi les cinq exploitations étudiées, seules deux présentaient des interactions entre leurs sous-systèmes. Ainsi, l'exploitation avec les interactions les plus complexes a été choisie pour l'analyse quantitative. Cependant, ces interactions, telles que la fertilisation des cultures par les déjections animales et l'alimentation du bétail grâce aux prairies, sont uniquement représentées en (kg/an) et ne sont pas quantifiables en termes monétaires (PHP/an), comme souligné dans l'interprétation des résultats. Cette approche limite la portée de l'analyse économique,

qui ne capture pas pleinement l'impact des chutes de téphra sur ces interactions, et par conséquent, sur la vulnérabilité des systèmes agricoles.

Il est également important de mentionner que les prix d'achat et de vente utilisés dans l'analyse économique ont été basés sur les valeurs recueillies au moment des interviews. Cette fixation statique des prix ne tient pas compte des fluctuations possibles du marché au cours de l'année, ni des variations pouvant survenir après une éruption. Cela pourrait introduire des biais dans l'analyse économique.

## 6.7. Perspectives de l'étude

Étant donné les limites de l'analyse économique, qui ne capture pas l'ensemble des flux dans le modèle, il est essentiel de pousser plus loin l'évaluation quantitative des pertes. Une approche prometteuse serait d'appliquer la méthode d'analyse des réseaux écologiques développée par (Stark et al., 2019), qui utilise comme unité commune l'azote (kg d'azote par an). Cela permettrait de convertir tous les flux en flux d'azote et de faciliter ainsi la quantification des interactions entre les sous-systèmes de cultures et d'élevage.

La méthodologie repose sur la création de matrices de flux permettant de caractériser l'intégration agriculture-élevage et d'évaluer les performances agroécologiques des systèmes agricoles sur base d'indicateurs. Ces indicateurs clés incluent la productivité, les niveaux d'intrants, la dépendance aux ressources externes, l'efficacité, et la résilience du système. En utilisant cette méthode, il serait possible de renforcer l'analyse systémique de la vulnérabilité des systèmes agricoles.

Une autre piste intéressante pour approfondir l'analyse consisterait à explorer différentes combinaisons de paramètres dans le modèle existant, en vue d'identifier celles qui minimiseraient les pertes. Cela pourrait se faire en utilisant des outils d'itérations, qui permettraient de tester comment des variations dans les calendriers de culture affectent les pertes de l'exploitation. En variant systématiquement les paramètres du modèle, il serait peut-être possible de déterminer les configurations optimales du calendrier de culture, permettant ainsi d'optimiser la gestion des cultures et de minimiser les pertes.

## 7. Conclusion

Ce travail avait pour objectif d'évaluer la vulnérabilité de systèmes agricoles soumis à des retombées de téphra en adoptant une approche systémique. Pour ce faire, cinq exploitations agricoles situées dans la région avoisinante du volcan Taal aux Philippines ont été étudiées. Le fonctionnement normal et la structure de chaque exploitation ont été décrits et schématisés, ainsi que leur situation économique en contexte hors-éruptif. Par la suite, les deux exploitations présentant les fonctionnements les plus distincts ont été sélectionnées pour comparer l'impact de deux scénarios de dépôts de téphra, à savoir 5 et 50 mm. Les pertes économiques engendrées par ces dépôts ont été quantifiées et la vulnérabilité de ces exploitations a été évaluée sur base de ces pertes. Les deux exploitations analysées comprennent une monoculture et un système mixte de polyculture et d'élevage.

Les résultats indiquent que le système agricole le plus complexe subit des pertes économiques plus importantes pour les deux scénarios de dépôts. Cependant, l'analyse met en évidence d'une part le potentiel de la diversité pour optimiser certains paramètres, tels que les calendriers de production. Une gestion bien planifiée des différents éléments (cultures, animaux) pouvant permettre de minimiser les pertes économiques. D'autre part, elle révèle que l'utilisation d'une année civile comme cadre d'étude peut influencer les résultats, en particulier en sous-estimant les pertes qui pourraient s'étendre aux années suivantes.

L'approche systémique utilisée dans cette étude a permis de modéliser les exploitations en les considérant comme des systèmes interconnectés. Cette méthode a non seulement permis de quantifier les pertes des différents éléments constitutifs des exploitations mais aussi de tenir compte des interactions entre eux. En offrant une meilleure compréhension de la vulnérabilité des exploitations agricoles, cette analyse systémique met en lumière des dimensions qui échappent souvent aux analyses retrouvées dans la littérature.

De plus, cette approche ouvre de nombreuses perspectives pour approfondir la recherche, notamment en améliorant la quantification des flux de matières au sein des systèmes agricoles. Par exemple, l'utilisation d'une unité commune en kg d'azote par an, comme suggéré par Stark et al. (2019), pourrait préciser la mesure des transferts entre les différents sous-systèmes, dans le but de contribuer à la réduction du risque des retombées de téphra sur le secteur crucial qu'est l'agriculture dans les régions volcaniques.

## Références bibliographiques

- Altieri, M. A. (2008). Small farms as a planetary ecological asset : Five key reasons why we should support the revitalisation of small farms in the global south (Vol. 7). Citeseer.
- Ayris, P. M., & Delmelle, P. (2012). The immediate environmental effects of tephra emission. *Bulletin of Volcanology*, 74(9), 1905-1936. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0654-5>
- Balangue-Tarriela, M. I. R., Lagmay, A. M. F., Sarmiento, D. M., Vasquez, J., Baldago, M. C., Ybañez, R., Ybañez, A. A., Trinidad, J. R., Thivet, S., Gurioli, L., De Vries, B. V. W., Aurelio, M., Rafael, D. J., Bermas, A., & Escudero, J. A. (2022). Analysis of the 2020 Taal Volcano tephra fall deposits from crowdsourced information and field data. *Bulletin of Volcanology*, 84(3), 35. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01534-y>
- Bonadonna, C., Costa, A., Folch, A., & Koyaguchi, T. (2015). *Tephra dispersal and sedimentation*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130079536>
- Bosi. (2012). *Handbook for volcanic risk management : Prevention, crisis management and resilience*. BRGM Orleans. <https://doi.org/10.13140/2.1.2167.0083>
- Brown, S., Loughlin, S., Sparks, R. S. J., Vye-Brown, C., Barclay, J., Calder, E., Cottrell, E., Jolly, G., Komorowski, J.-C., Mandeville, C., Newhall, C., Palma, J., Potter, S., & Valentine, G. (2015). Global volcanic hazard and risk. In *Global Volcanic Hazards and Risk* (p. 81-172). <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.004>
- Cook, R. J., Barron, J. C., Papendick, R. I., & Williams, G. J. (1981). Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruptions. *Science*, 211(4477), 16-22. <https://doi.org/10.1126/science.211.4477.16>
- Craig, H. (2015). *Agricultural vulnerability to tephra fall impacts*.
- Craig, H., Wilson, T., Magill, C., Stewart, C., & Wild, A. J. (2021a). Agriculture and forestry impact assessment for tephra fall hazard : Fragility function development and New Zealand scenario application. *Volcanica*, 4(2), 345-367.
- Craig, H., Wilson, T., Magill, C., Stewart, C., & Wild, A. J. (2021b). Agriculture and forestry impact assessment for tephra fall hazard : Fragility function development and New Zealand scenario application. *Volcanica*, 4(2), 345-367.
- Craig, H., Wilson, T., Stewart, C., Villarosa, G., Outes, V., Cronin, S., & Jenkins, S. (2016). Agricultural impact assessment and management after three widespread tephra falls in Patagonia, South America. *Natural Hazards*, 82(2), 1167-1229. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2240-1>
- Dela Cruz, M. J., Yoshida, M., Kubota, M., Fujita, H., & Arai, S. (2003). Some Physico-chemical characteristics of soils influenced by Taal Volcano in reference to soil productivity. *Soil Science and Plant Nutrition*, 49(6), 793-803. <https://doi.org/10.1080/00380768.2003.10410341>

Delmelle, P., Kusakabe, M., Bernard, A., Fischer, T., de Brouwer, S., & del Mundo, E. (1998). Geochemical and isotopic evidence for seawater contamination of the hydrothermal system of Taal Volcano, Luzon, the Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 59(8), 562-576. <https://doi.org/10.1007/s004450050210>

Delmelle, P., Lambert, M., Dufrêne, Y., Gerin, P., & Óskarsson, N. (2007). Gas/aerosol-ash interaction in volcanic plumes : New insights from surface analyses of fine ash particles. *Earth and Planetary Science Letters*, 259(1), 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.052>

Delmelle, P., Opfergelt, S., Cornelis, J.-T., & Ping, C.-L. (2015). Volcanic Soils. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (p. 1253-1264). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00072-9>

Delos Reyes, P. J., Bornas, Ma. A. V., Dominey-Howes, D., Pidlaoan, A. C., Magill, C. R., & Solidum, Jr., Renato U. (2018). A synthesis and review of historical eruptions at Taal Volcano, Southern Luzon, Philippines. *Earth-Science Reviews*, 177, 565-588. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.014>

Dull, R., Southon, J., & Sheets, P. (2001). Volcanism, Ecology and Culture : A Reassessment of the Volcán Ilopango TBJ Eruption in the Southern Maya Realm. *Latin American Antiquity*, 12, 25-44. <https://doi.org/10.2307/971755>

Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort. (s. d.). *NECROSE DU CORTEX CEREBRAL et POLIOENCEPHALOMALACIE*. Consulté 10 juillet 2024, à l'adresse [https://theses.vet-alfort.fr/Th\\_multimedia/ovins/pdf/ncc%20et%20polioencephalomalacie.pdf](https://theses.vet-alfort.fr/Th_multimedia/ovins/pdf/ncc%20et%20polioencephalomalacie.pdf)

Exploitation agricole. (2024). In *Wikipédia*. [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Exploitation\\_agricole&oldid=215626569](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Exploitation_agricole&oldid=215626569)

FAO. (2018). *2017 -The impact of disasters and crises on agriculture and food security*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0f03a24f-8d37-4700-aef4-fc436ff32021/content>

FAO (Food and Agricultural Organization). *FAO Soils Portal : Soil classification*. (s. d.). Consulté 7 juillet 2024, à l'adresse <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/>

Fikos, I., Vargemezis, G., Zlotnicki, J., Puertollano, J. R., Alanis, P. B., Pigtain, R. C., Villacorte, E. U., Malipot, G. A., & Sasai, Y. (2012). Electrical resistivity tomography study of Taal volcano hydrothermal system, Philippines. *Bulletin of Volcanology*, 74(8), 1821-1831. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0638-5>

Fortier et al. (2021). *Système agricole : Définition et explications*. AquaPortail. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/6856/systeme-agricole>

Gallopín, G. C. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16(3), 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.004>

GAP EcoGes. (2017). *Analyse systémique et son application en agriculture*. ENSFEA. <https://ecoges.ensfea.fr/wp-content/uploads/sites/17/2018/04/Analyse-systemique.pdf>

Global Volcanism Program. (2020). *Global Volcanism Program | Report on Taal (Philippines)—June* 2020.  
<https://volcano.si.edu/ShowReport.cfm?doi=10.5479/si.GVP.BGVN202006-273070>

Global Volcanism Program. (2024). *Global Volcanism Program | Report on Taal (Philippines)—31 July-6 August* 2024.  
<https://volcano.si.edu/ShowReport.cfm?wvar=GVP.WVAR20240731-273070>

Gueymard, C. A., Lara-Fanego, V., Sengupta, M., & Xie, Y. (2019). Surface albedo and reflectance : Review of definitions, angular and spectral effects, and intercomparison of major data sources in support of advanced solar irradiance modeling over the Americas. *Solar Energy*, 182, 194-212. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.040>

Huertas, G. (2022). *Livestock Emergency Preparedness and Response for Areas at High Risk of Volcanic Eruptions*.

Imbert, G. (2010). L'entretien semi-directif : À la frontière de la santé publique et de l'anthropologie. *Recherche en soins infirmiers*, 102(3), 23-34.  
<https://doi.org/10.3917/rsi.102.0023>

Jenkins, S. F., Wilson, T. M., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., Marzocchi, W., Boulton, M., Bonadonna, C., & Costa, A. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk. In S. C. Loughlin, S. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins, & C. Vye-Brown (Éds.), *Global Volcanic Hazards and Risk* (1<sup>re</sup> éd., p. 173-222). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273.005>

Jenkins, S., Spence, R., Fonseca, J., Solidum, R., & Wilson, T. (2014). Volcanic risk assessment : Quantifying physical vulnerability in the built environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 105-120.

Kelman, I., & Mather, T. A. (2008). Living with volcanoes : The sustainable livelihoods approach for volcano-related opportunities. *Volcanic risk perception and beyond*, 172(3), 189-198. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.007>

Kobayashi, T., & Okuno, M. (2002). *The Mode of Eruptions and Their Tephra Deposits*.

Lansigan, F. P., de los Santos, W. L., & Coladilla, J. O. (2000). Agronomic impacts of climate variability on rice production in the Philippines. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1), 129-137. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00222-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00222-X)

Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Fluorose - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 25 juillet 2024, à l'adresse  
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/fluorose/34303>

Le Guern, F., Bernard, A., & Chevrier, R. M. (1980). Soufriere of Guadeloupe 1976–1977 eruption—Mass and energy transfer and volcanic health hazards. *Bulletin volcanologique*, 43, 577-593.

Le Maitre et al. (2004). *Igneous rocks a classification and glossary of terms : Recommendations of the international union of geological sciences, subcommission on the systematics of igneous rocks*. Cambridge University Press. <http://resolver.ebscohost.com/Redirect/PRL?EPPackageLocationID=9616.330600.6724653&epcusercontentid=s8491974&db=9616>

Lebon, S. L. G. (2009). *Volcanic activity and environment : Impacts on agriculture and use of geological data to improve recovery processes*. University of Iceland - Institute of Earth Sciences.

Ligot, N. (2022). *Crop vulnerability to tephra fall in volcanic regions : Field, experimental and modelling approaches*.

Ligot, N., Bogaert, P., Biass, S., Lobet, G., & Delmelle, P. (2023). Grain size modulates volcanic ash retention on crop foliage and potential yield loss. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(4), 1355-1369.

Ligot, N., de Tornaco, P. M., Pereira, B., Bogaert, P., & Delmelle, P. (2024). Exposure of vegetables to simulated volcanic ashfall reveals production loss controlled by plant traits and growth stage. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 7(3), e20494. <https://doi.org/10.1002/agg2.20494>

Ligot, N., Viera, W., Peñaherrera, D., Bernard, B., Bogaert, P., & Delmelle, P. (2023). *A quantitative assessment of crop vulnerability to tephra hazard at Tungurahua volcano, Ecuador: Understanding the effect of volcanic and biological factors*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2915673/v1>

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>

Lurette, A., Stark, F., Lecomte, L., Lasseur, J., & Moulin, C.-H. (2020). A model to explore which diversity is needed to design sustainable agricultural systems at the territorial level. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(5), 32. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00634-3>

Macedonio, G., & Costa, A. (2012). Brief Communication" Rain effect on the load of tephra deposits". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(4), 1229-1233.

Manila Observatory. (2020). *Impacts of Taal Volcano Phreatic Eruption (12 January 2020) on the Environment and Population : Satellite-Based Observations Compared with Historical Records*. <https://www.observatory.ph/2020/04/20/impacts-of-taal-volcano-phreatic-eruption-12-january-2020-on-the-environment-and-population-satellite-based-observations-compared-with-historical-records/>

Masters, N. R. (2012). *Volcanic eruptions*. Cherry Lake Pub.

Mcdaniel, P., Lowe, D., Arnalds, O., & Ping, C.-L. (2012). *Andisols* (p. 33.29-33.48).

Miyake, M., Kobayashi, M., Takahashi, T., Araragi, M., Nishiyama, I., Hasegawa, K., & Nozaki, M. (1988). *Characteristics and genesis of volcanic ash soils in the Philippines*.

NDRRMC Update : Situational Report No. 74 re Taal Volcano Eruption, 13 February 2020, 6:00 AM - Philippines | ReliefWeb. (2020, février 13). <https://reliefweb.int/report/philippines/ndrrmc-update-situational-report-no-74-re-taal-volcano-eruption-13-february-2020>

Neild, J., O'Flaherty, P., Hedley, P., Underwood, R., Johnston, D., & Christenson, B. (1998). *Impact of a Volcanic Eruption on Agriculture and Forestry in New Zealand*.

Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) : An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2), 1231-1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>

OCHA. (2020, janvier 12). *Philippines : Taal Volcano Eruption (As of 12 January 2020)*. <https://www.unocha.org/publications/map/philippines/philippines-taal-volcano-eruption-12-january-2020>

Pardo, N., Cronin, S. J., Németh, K., Brenna, M., Schipper, C. I., Breard, E., White, J. D. L., Procter, J., Stewart, B., Agustín-Flores, J., Moebis, A., Zernack, A., Kereszturi, G., Lube, G., Auer, A., Neall, V., & Wallace, C. (2014). Perils in distinguishing phreatic from phreatomagmatic ash; insights into the eruption mechanisms of the 6 August 2012 Mt. Tongariro eruption, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 397-414. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.05.001>

Perttu, A., Assink, J., Van Eaton, A. R., Caudron, C., Vagasky, C., Krippner, J., McKee, K., De Angelis, S., Perttu, B., Taisne, B., & Lube, G. (2023). Remote Characterization of the 12 January 2020 Eruption of Taal Volcano, Philippines, Using Seismo-Acoustic, Volcanic Lightning, and Satellite Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(4), 1471-1492. <https://doi.org/10.1785/0120220223>

PhilAtlas. (2024). *Lemery, Batangas Profile* – PhilAtlas. <https://www.philatlas.com/luzon/r04a/batangas/lemery.html>

Philippine Statistics Authority. (2020). *2020 Census of Population and Housing (2020 CPH) Population Counts Declared Official by the President*. <https://psa.gov.ph/content/2020-census-population-and-housing-2020-cph-population-counts-declared-official-president>

PHIVOLCS. (2020). *Annual-Report-2020*. Google Docs. [https://drive.google.com/file/d/1uxGApw\\_mn3Rx0jLZ\\_OXSSM9ppi5zzcNq/view?usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/1uxGApw_mn3Rx0jLZ_OXSSM9ppi5zzcNq/view?usp=embed_facebook)

Proag, V. (2014). The Concept of Vulnerability and Resilience. *4th International Conference on Building Resilience, Incorporating the 3rd Annual Conference of the ANDROID Disaster Resilience Network, 8th – 11th September 2014, Salford Quays, United Kingdom*, 18, 369-376. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00952-6](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00952-6)

Provincial Government of Cavite. (2015). *Local Government Report*. <https://cavite.gov.ph/home/wp-content/uploads/2017/06/LGR2015-brief-ecological-profile.pdf>

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>

Rees, J. D. (1979). 9 – *Effects of the Eruption of Parícutin Volcano on Landforms, Vegetation, and Human Occupancy*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131941096>

Rose, W. I., & Durant, A. J. (2009). Fine ash content of explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1), 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.010>

- Seymour, V., Hinckley, T., Morikawa, Y., & Franklin, J. (1983). Foliage damage in coniferous trees following volcanic ashfall from Mt. St. Helens. *Oecologia*, 59, 339-343.
- Shoji, S., Dahlgren, R., & Nanzyo, M. (1993). Chapter 2 Morphology of Volcanic Ash Soils. In *Developments in Soil Science* (Vol. 21, p. 7-35). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70263-0](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70263-0)
- Siebert, L., Simkin, T., & Kimberly, P. (2010). *Volcanoes of the world* (3rd ed). Smithsonian Institution.
- Stark, F., Archimède, H., González García, E., Pocard-Chapuis, R., Fanchone, A., & Moulin, C.-H. (2019). Évaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide : Application de l'analyse de réseaux écologiques. *Innovations Agronomiques*, 72, 1-14. <https://doi.org/10.15454/l1w6us>
- Stark, F., Fanchone, A., Semjen, I., Moulin, C.-H., & Archimède, H. (2016). Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics : Case studies in Guadeloupe. *European Journal of Agronomy*, 80, 9-20.
- Stark, F., González-García, E., Navegantes, L., Miranda, T., Pocard-Chapuis, R., Archimède, H., & Moulin, C.-H. (2017). Crop-livestock integration determines the agroecological performance of mixed farming systems in Latino-Caribbean farms. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0479-x>
- Suttle, N. (2010). *Mineral nutrition of livestock*. Cabi GB.
- Thompson, M. A., Lindsay, J. M., Wilson, T. M., Biass, S., & Sandri, L. (2017). Quantifying risk to agriculture from volcanic ashfall : A case study from the Bay of Plenty, New Zealand. *Natural Hazards*, 86(1), 31-56. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2672-7>
- Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., & Huyghe, C. (2016). Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for sustainable development*, 36, 1-15.
- USGS. (2015a). *Impacts & Mitigation—Feed availability*. [https://volcanoes.usgs.gov/volcanic\\_ash/feed\\_availability.html](https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/feed_availability.html)
- USGS. (2015b). *Impacts & Mitigation—Weight of Ash on Crops*. [https://volcanoes.usgs.gov/volcanic\\_ash/weight\\_ash\\_crops.html](https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/weight_ash_crops.html)
- Wild, A. J., Wilson, T. M., Bebbington, M. S., Cole, J. W., & Craig, H. M. (2019). Probabilistic volcanic impact assessment and cost-benefit analysis on network infrastructure for secondary evacuation of farm livestock : A case study from the dairy industry, Taranaki, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 387, 106670. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106670>
- Wilson, & Cole, J. W. (2006). Potential impact of a tephra eruption on a dairy farm in eastern Bay of Plenty, New Zealand; implications for hazard mitigation. *Natural Hazards*.
- Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I., & Cole, J. W. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure : A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148-182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>

Wilson, & Kaye, G. D. (2007). *Agricultural fragility estimates for volcanic ash fall hazards* (Vol. 2007). GNS Science.

Wilson, T., Cole, J., Cronin, S., Stewart, C., & Johnston, D. (2011). Impacts on agriculture following the 1991 eruption of Vulcan Hudson, Patagonia : Lessons for recovery. *Natural Hazards*, 57(2), 185-212. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9604-8>

Wilson, T. M., Jenkins, S., & Stewart, C. (2015). Impacts from Volcanic Ash Fall. In *Volcanic Hazards, Risks and Disasters* (p. 47-86). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396453-3.00003-4>

Zimanowski, B., & Büttner, R. (2003). Phreatomagmatic Explosions in Subaqueous Volcanism. In *Explosive Subaqueous Volcanism* (p. 51-60). American Geophysical Union (AGU). <https://doi.org/10.1029/140GM03>

Zobel, D. B., & Antos, J. A. (1987). Composition of rhizomes of forest herbaceous plants in relation to morphology, ecology, and burial by tephra. *Botanical Gazette*, 148(4), 490-500.

## Annexes

### A. Questionnaire utilisé pour les interviews sur le terrain

#### 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,<br>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...) If the use is systematic for a given crop, please fill in the calendar to indicate when you use them. | 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**

### **1.1. 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?**

### **1.2. 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:**

### **1.3. 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<br>(crop, animal...) |                     | Additional information |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|
| How do you evaluate the <b>economic</b> impact of volcanic ash fall on these elements of your farm and why? (0 no impact; 5 strongest impact) |                                   | -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |                        |
|                                                                                                                                               |                                   | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3  |                        |
|                                                                                                                                               |                                   | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3  |                        |
|                                                                                                                                               |                                   | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3  |                        |
|                                                                                                                                               |                                   | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3  |                        |

|                                                                                                                                                                             |                     |                    |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------|--|
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             |                     | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             | Permanent grassland | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             | Stored manure       | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
|                                                                                                                                                                             | Fodder              | 3 -2 -1 0 +1 +2 +3 |  |
| How do you evaluate the impact of volcanic ash fall on crop <b>yield</b> 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 <b>infrastructures</b> (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"

|           | 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 |
|-----------|-------------|--------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-------|
| Livestock |             |        |                       |                 |                             |                        |                        |                 |       |
|           |             |        |                       |                 |                             |                        |                        |                 |       |
|           |             |        |                       |                 |                             |                        |                        |                 |       |
|           |             |        |                       |                 |                             |                        |                        |                 |       |
|           |             |        |                       |                 |                             |                        |                        |                 |       |

|                | Type | Surface | Seeds/plants<br>costs per<br>year | Fertilizer<br>costs | Phytosanitary<br>costs | Seasonal<br>workers<br>costs | Income<br>per kg | Income<br>total | Total |
|----------------|------|---------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-------|
| Crops          |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
| Other<br>costs |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |
|                |      |         |                                   |                     |                        |                              |                  |                 |       |

## Map of the farm

## B. Fonctions de fragilité utilisées pour déterminer les coefficients de pertes

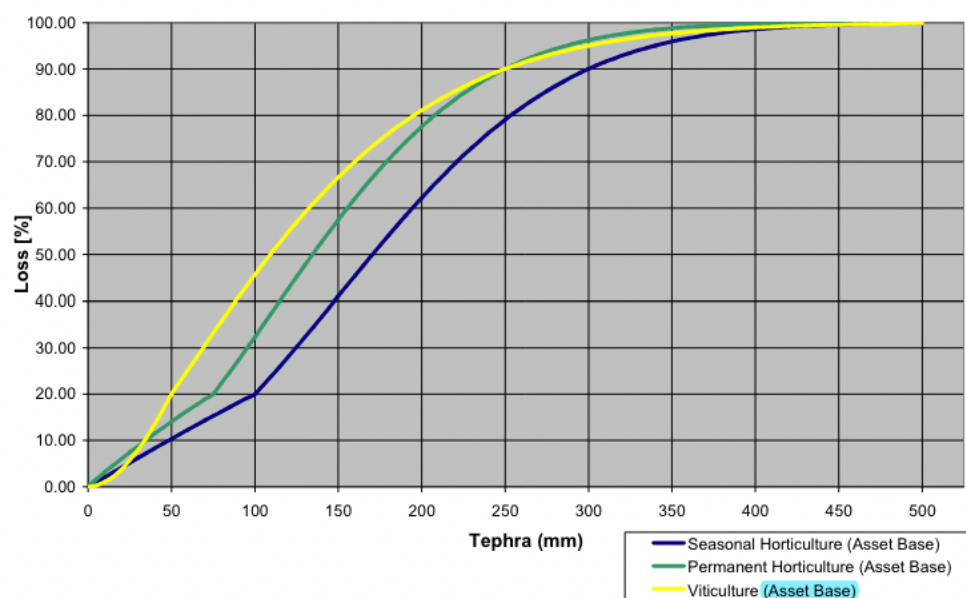


Figure 32 - Fonctions de fragilité spécifiques aux actifs agricoles (Wilson & Kaye, 2007)

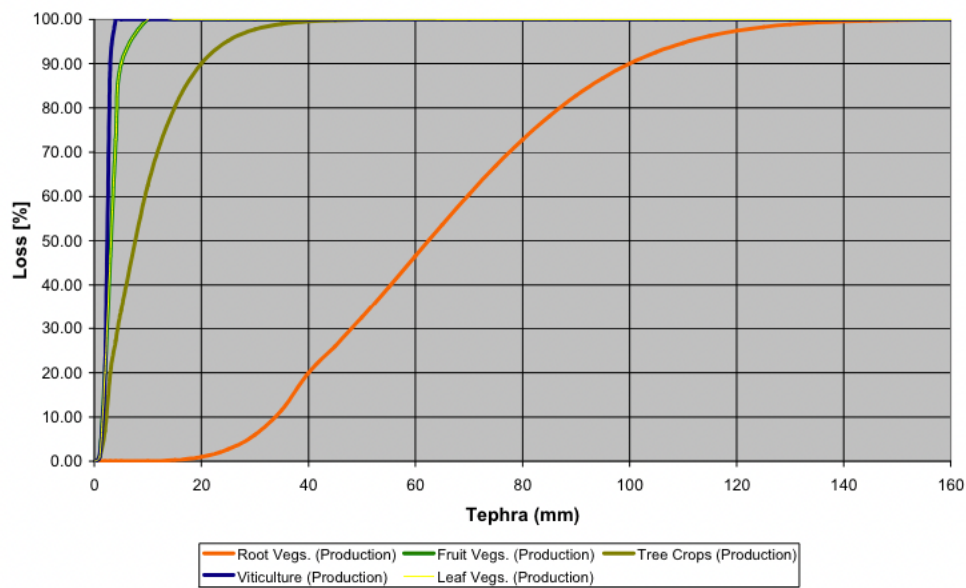


Figure 33 - Fonctions de fragilité pour différents types de productions horticoles (Wilson & Kaye, 2007)

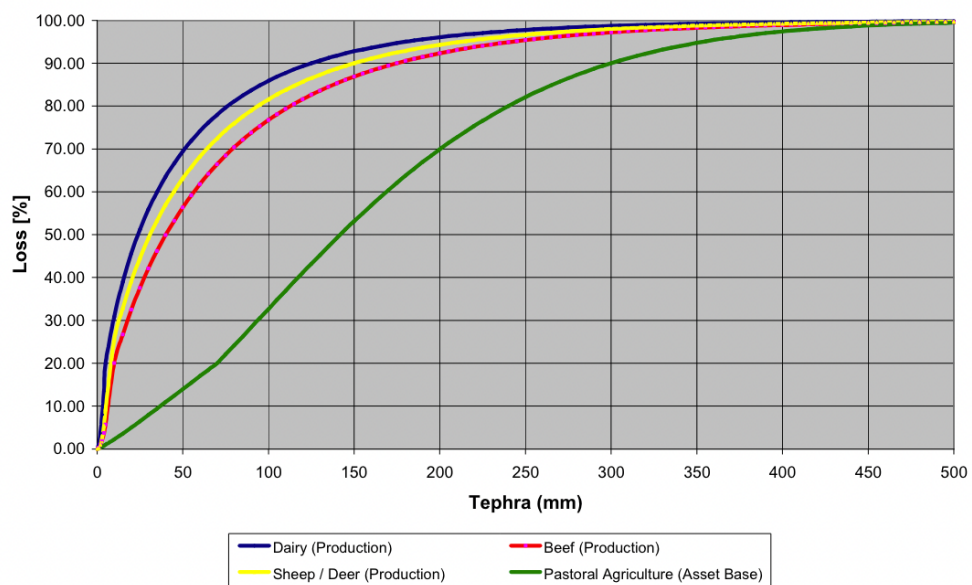


Figure 34 - Fonctions de fragilité pour différents types d'élevage (Wilson & Kaye, 2007)

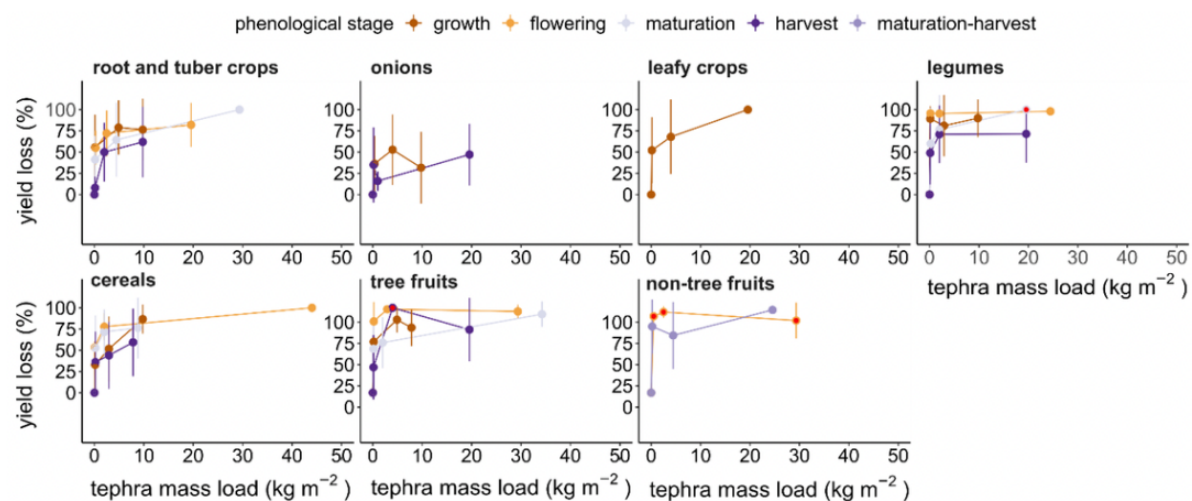


Figure 35 - Fonctions de fragilité pour des cultures spécifiques et qui intègre l'influence des stades phénologiques (Ligot, et al., 2023)

### C. Analyse économique des différentes exploitations en situation normale

#### C1. Exploitation n°1

Tableau 19 – Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°1 et récapitulatif global

| Type de production | Production annuelle (kg/an) | Valeur annuelle brute (PHP/an) | Revenu annuel brut (PHP/an) | Coûts annuels (PHP/an) | Valeur annuelle nette (PHP/an) | Revenu annuel net (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Pérenne            | 6885                        | 67110                          | 54250                       | 7461                   | 59649                          | 46789                      | 21                                     | 26                                 | 5                             | 70                                |
| Annuelle           | 15                          | 750                            | 250                         | 100                    | 650                            | 150                        | 0                                      | 0                                  | 0                             | 0                                 |
| <b>Total</b>       | <b>6900</b>                 | <b>67860</b>                   | <b>54500</b>                | <b>7561</b>            | <b>60299</b>                   | <b>46939</b>               | <b>21</b>                              | <b>26</b>                          | <b>5</b>                      | <b>70</b>                         |

| Type de production | Valeur annuelle brute produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel brut de l'espèce (PHP/an) | Coûts annuels de production de l'espèce (PHP/an) | Valeur annuelle nette produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel net de l'espèce (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Bovin              | 62000                                               | 0                                       | 3000                                             | 59000                                               | -3000                                  | 19                                     | 0                                  | 2                             | -4                                |
| Porcin             | 194000                                              | 158000                                  | 135075                                           | 58925                                               | 22925                                  | 60                                     | 74                                 | 93                            | 34                                |
| <b>Total</b>       | <b>256000</b>                                       | <b>158000</b>                           | <b>138075</b>                                    | <b>117925</b>                                       | <b>19925</b>                           | <b>79</b>                              | <b>74</b>                          | <b>95</b>                     | <b>30</b>                         |

| Exploitation          |        |
|-----------------------|--------|
| Valeur annuelle brute | 323860 |
| Revenu annuel brut    | 212500 |
| Coûts annuels         | 145636 |
| Valeur annuelle nette | 178224 |
| Revenu annuel net     | 66864  |

## C2. Exploitation n°2

Tableau 20 – Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°2 et récapitulatif global

| Type de production | Production annuelle (kg/an) | Valeur annuelle brute (PHP/an) | Revenu annuel brut (PHP/an) | Coûts annuels (PHP/an) | Valeur annuelle nette (PHP/an) | Revenu annuel net (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Pérenne            | 1139                        | 18657                          | 18300                       | 100                    | 18557                          | 18200                      | 2,7                                    | 3,9                                | 1,1                           | 3,9                               |
| <b>Total</b>       | <b>1139</b>                 | <b>18657</b>                   | <b>18300</b>                | <b>100</b>             | <b>18557</b>                   | <b>18200</b>               | <b>2,7</b>                             | <b>3,9</b>                         | <b>1,1</b>                    | <b>3,9</b>                        |

| Type de production | Valeur annuelle brute produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel brut de l'espèce (PHP/an) | Coûts annuels de production de l'espèce (PHP/an) | Valeur annuelle nette produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel net de l'espèce (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Porcin             | 682903                                              | 455700                                  | 8940                                             | 673963                                              | 446760                                 | 97,3                                   | 96,1                               | 98,9                          | 96,1                              |
| <b>Total</b>       | <b>682903</b>                                       | <b>455700</b>                           | <b>8940</b>                                      | <b>673963</b>                                       | <b>446760</b>                          | <b>97,3</b>                            | <b>96,1</b>                        | <b>98,9</b>                   | <b>96,1</b>                       |

| Exploitation          |        |
|-----------------------|--------|
| Valeur annuelle brute | 701560 |
| Revenu annuel brut    | 474000 |
| Coûts annuels         | 9040   |
| Valeur annuelle nette | 692520 |
| Revenu annuel net     | 464960 |

### C3. Exploitation n°3

Tableau 21 - Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°3 et récapitulatif global

| Type de production | Production annuelle (kg/an) | Valeur annuelle brute (PHP/an) | Revenu annuel brut (PHP/an) | Coûts annuels (PHP/an) | Valeur annuelle nette (PHP/an) | Revenu annuel net (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Pérenne            | 5295                        | 45271                          | 27200                       | 4250                   | 41021                          | 22950                      | 3,1                                    | 2,2                                | 0,7                           | 3,6                               |
| <b>Total</b>       | <b>5295</b>                 | <b>45271</b>                   | <b>27200</b>                | <b>4250</b>            | <b>41021</b>                   | <b>22950</b>               | <b>3,1</b>                             | <b>2,2</b>                         | <b>0,7</b>                    | <b>3,6</b>                        |

| Type de production | Valeur annuelle brute produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel brut de l'espèce (PHP/an) | Coûts annuels de production de l'espèce (PHP/an) | Valeur annuelle nette produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel net de l'espèce (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Volaille           | 7204                                                | 0                                       | 0                                                | 7204                                                | 0                                      | 0,5                                    | 0,0                                | 0,0                           | 0,0                               |
| Porcin             | 1401126                                             | 1201630                                 | 584656                                           | 816470                                              | 616974                                 | 96,4                                   | 97,8                               | 99,3                          | 96,4                              |
| <b>Total</b>       | <b>1408330</b>                                      | <b>1201630</b>                          | <b>584656</b>                                    | <b>823674</b>                                       | <b>616974</b>                          | <b>96,9</b>                            | <b>97,8</b>                        | <b>99,3</b>                   | <b>96,4</b>                       |

| Exploitation          |         |
|-----------------------|---------|
| Valeur annuelle brute | 1453601 |
| Revenu annuel brut    | 1228830 |
| Coûts annuels         | 588906  |
| Valeur annuelle nette | 864695  |
| Revenu annuel net     | 639924  |

#### C4. Exploitation n°4

Tableau 22 - Évaluation économique de l'exploitation n°4 et récapitulatif global

| Type de production | Production annuelle (kg/an) | Valeur annuelle brute (PHP/an) | Revenu annuel brut (PHP/an) | Coûts annuels (PHP/an) | Valeur annuelle nette (PHP/an) | Revenu annuel net (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Pérenne            | 100000                      | 120000                         | 100000                      | 42350                  | 77650                          | 57650                      | 100                                    | 100                                | 100                           | 100                               |
| <b>Total</b>       | <b>100000</b>               | <b>120000</b>                  | <b>100000</b>               | <b>42350</b>           | <b>77650</b>                   | <b>57650</b>               | <b>100</b>                             | <b>100</b>                         | <b>100</b>                    | <b>100</b>                        |

| Exploitation          |        |
|-----------------------|--------|
| Valeur annuelle brute | 120000 |
| Revenu annuel brut    | 100000 |
| Coûts annuels         | 42350  |
| Valeur annuelle nette | 77650  |
| Revenu annuel net     | 57650  |

## C5. Exploitation n°5

Tableau 23 - Évaluation économique des deux sous-systèmes de l'exploitation n°5 et récapitulatif global

| Type de production | Production annuelle (kg/an) | Valeur annuelle brute (PHP/an) | Revenu annuel brut (PHP/an) | Coûts annuels (PHP/an) | Valeur annuelle nette (PHP/an) | Revenu annuel net (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Pérenne            | 12010                       | 99108                          | 98868                       | 30251                  | 68858                          | 68618                      | 20,5                                   | 38,3                               | 17,2                          | 83,4                              |
| Annuelle           | 396                         | 24278                          | 21535                       | 1384                   | 22893                          | 20151                      | 5,0                                    | 8,3                                | 0,8                           | 24,5                              |
| Prairie            | 20557                       | 0                              | 0                           | 0                      | 0                              | 0                          | 0,0                                    | 0,0                                | 0,0                           | 0,0                               |
| <b>Total</b>       | <b>32963</b>                | <b>123386</b>                  | <b>120403</b>               | <b>31635</b>           | <b>91751</b>                   | <b>88768</b>               | <b>25,6</b>                            | <b>46,6</b>                        | <b>18,0</b>                   | <b>107,9</b>                      |

| Type de production | Valeur annuelle brute produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel brut de l'espèce (PHP/an) | Coûts annuels de production de l'espèce (PHP/an) | Valeur annuelle nette produite de l'espèce (PHP/an) | Revenu annuel net de l'espèce (PHP/an) | % De la valeur brute de l'exploitation | % Du revenu brut de l'exploitation | % Des coûts de l'exploitation | % Du revenu net de l'exploitation |
|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Bovin              | 186000                                              | 0                                       | 64362                                            | 121638                                              | -64362                                 | 38,5                                   | 0,0                                | 36,6                          | -78,2                             |
| Caprin             | 32500                                               | 14000                                   | 324                                              | 32176                                               | 13676                                  | 6,7                                    | 5,4                                | 0,2                           | 16,6                              |
| Volaille           | 28800                                               | 28800                                   | 19490                                            | 9310                                                | 9310                                   | 6,0                                    | 11,2                               | 11,1                          | 11,3                              |
| Porcin             | 112000                                              | 95000                                   | 60094                                            | 51906                                               | 34906                                  | 23,2                                   | 36,8                               | 34,2                          | 42,4                              |
| <b>Total</b>       | <b>359300</b>                                       | <b>137800</b>                           | <b>144270</b>                                    | <b>215030</b>                                       | <b>-6470</b>                           | <b>74,4</b>                            | <b>53,4</b>                        | <b>82,0</b>                   | <b>-7,9</b>                       |

| Exploitation          |        |
|-----------------------|--------|
| Valeur annuelle brute | 482686 |
| Revenu annuel brut    | 258203 |
| Coûts annuels         | 175906 |
| Valeur annuelle nette | 306780 |
| Revenu annuel net     | 82298  |

## D. Calendriers de production

### D1. Exploitation n°5

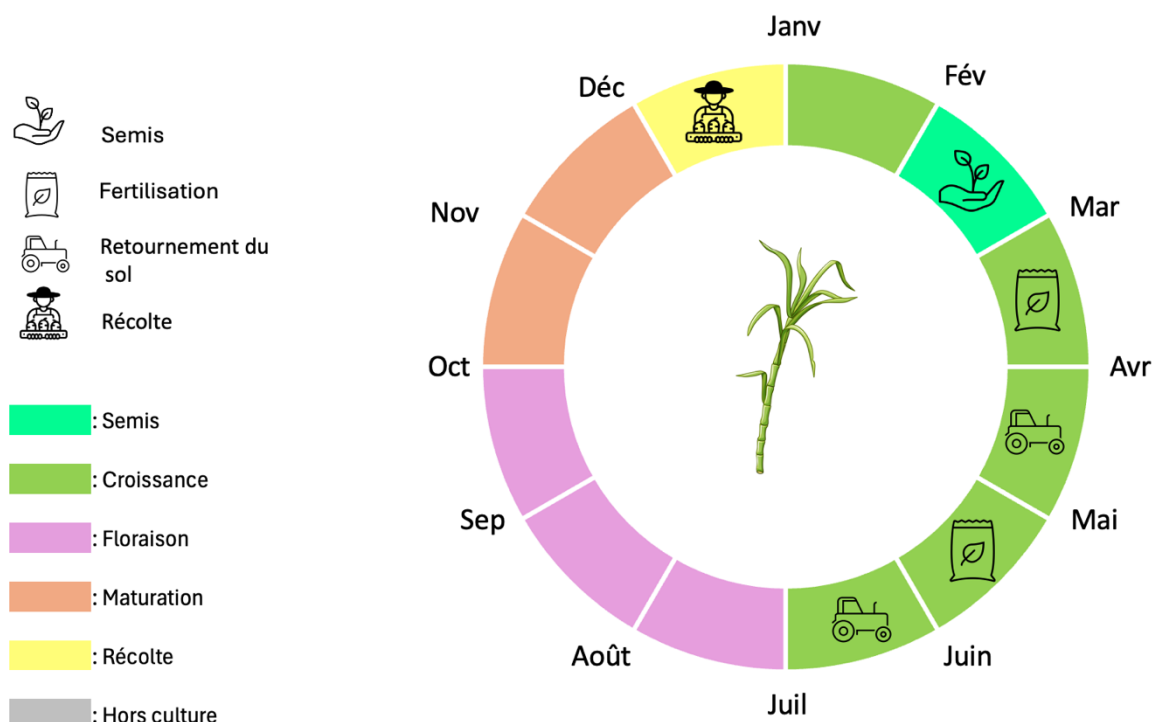


Figure 36 - Calendrier de culture de la canne à sucre pour l'exploitation n°5 – Année de semis

### D2. Exploitation n°6

| Culture        | Janvier      | Février      | Mars         | Avril        | Mai          | Juin         | Juillet      | Août         | Septembre    | Octobre      | Novembre     | Décembre     |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Banane         | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      |
| Coco           | Récolte      | Croissance   | Récolte      | Croissance   | Récolte      | Croissance   | Récolte      | Croissance   | Récolte      | Croissance   | Récolte      | Croissance   |
| Avocat         | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Récolte      | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Floraison    | Floraison    |
| Jackfruit      | Maturation   | Récolte      | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Floraison    | Floraison    | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Maturation   |
| Haricots verts | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Semis        | Croissance   | Floraison    | Maturation   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture |
| Aubergine      | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Semis        | Croissance   | Floraison    | Maturation   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture |
| Papaye         | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      |
| Courge         | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Semis        | Croissance   | Floraison    | Maturation   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture |
| Tomate         | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Semis        | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Floraison    | Maturation   | Maturation   | Récolte      |
| Chou chinois   | Croissance   | Maturation   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Semis        |
| Piment         | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Semis        | Croissance   | Croissance   | Floraison    | Maturation   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture |
| Calamansi      | Maturation   | Récolte      | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Floraison    | Maturation   |
| Prairie        | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      |
| Gombo          | Semis        | Croissance   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture | Hors Culture |
| Taro           | Semis        | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Croissance   | Maturation   | Maturation   | Maturation   | Récolte      | Hors Culture | Hors Culture |
| Herbe coupée   | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      | Récolte      |

Figure 37 - Calendrier de culture de l'exploitation n°6

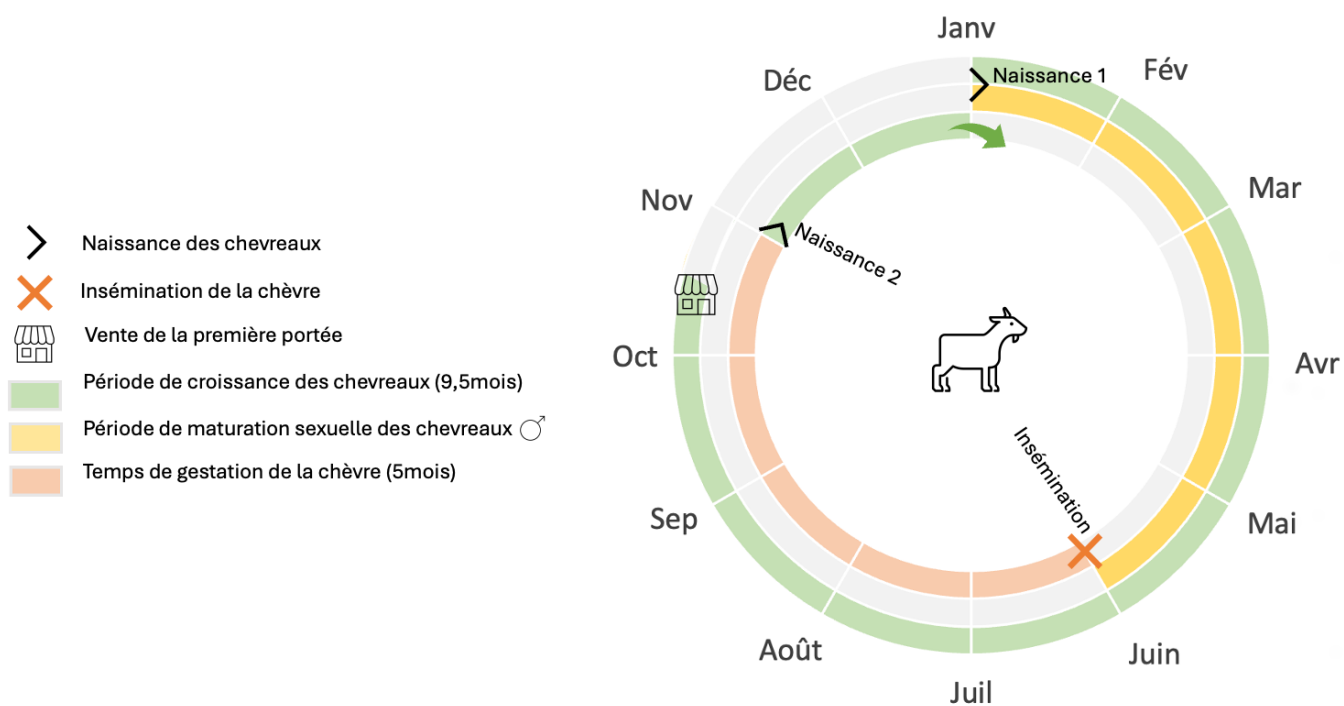


Figure 38 - Estimation du cycle annuel de fonctionnement de l'élevage caprin de l'exploitation n°6 sur base des données récoltées

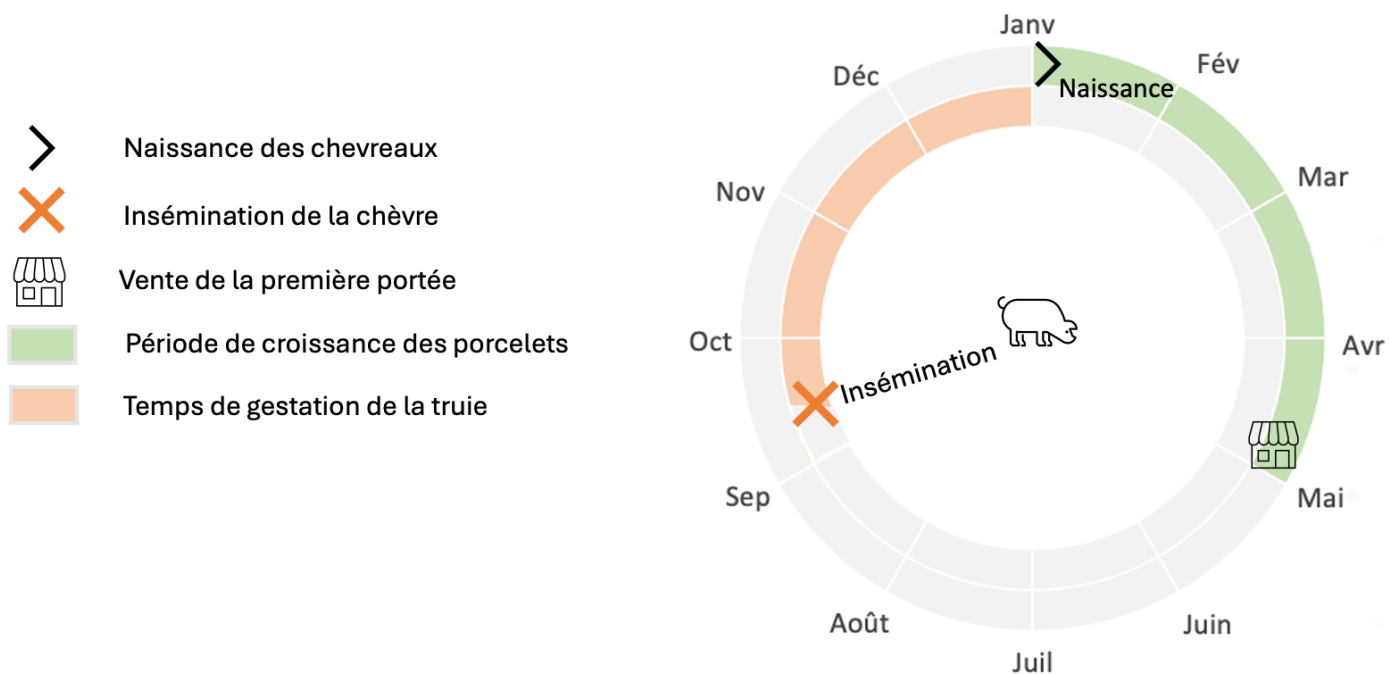


Figure 39 - Estimation du cycle annuel de fonctionnement de l'élevage porcin de l'exploitation n°6 sur base des données récoltées

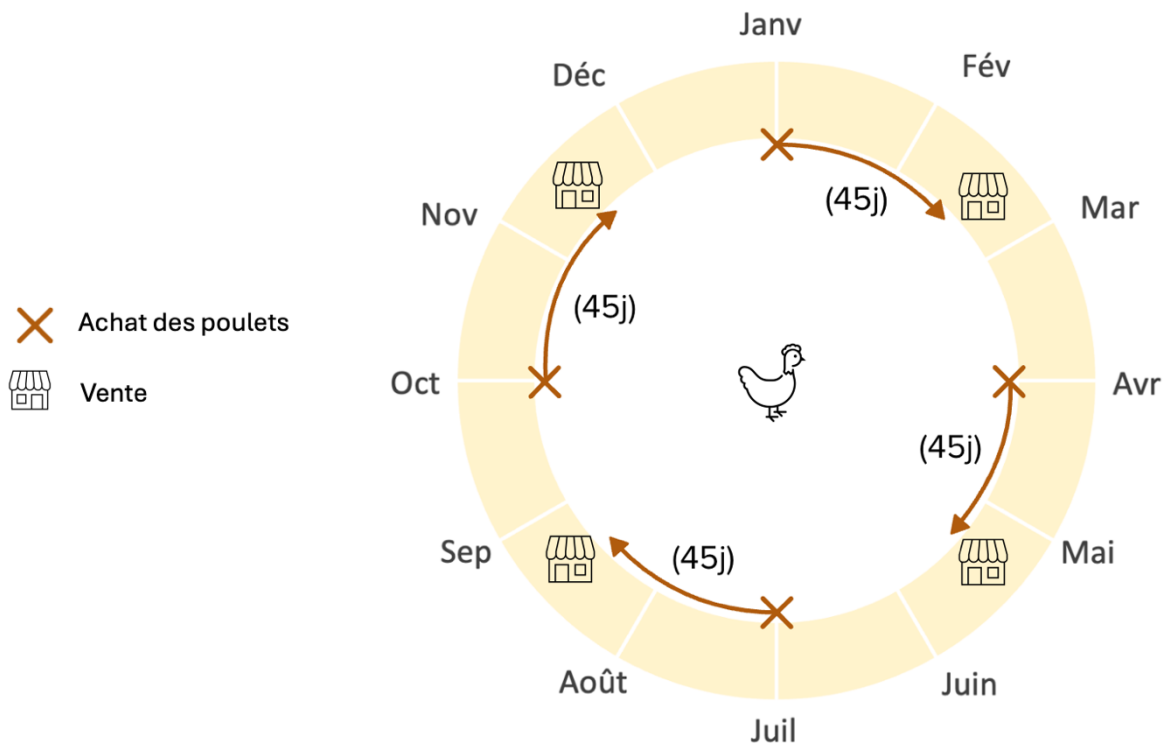


Figure 40 - Estimation du cycle annuel de fonctionnement de l'élevage de volailles de l'exploitation n°6 sur base des données récoltées

## E. Analyse économique post-éruption - Exploitation n°4

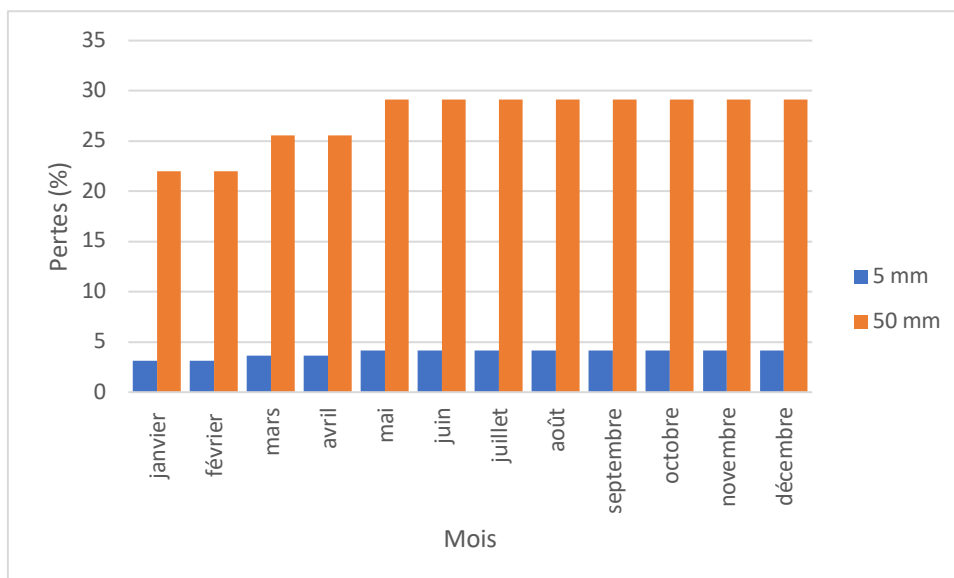


Figure 41 - Pourcentages de perte de revenu annuel net de l'exploitation n°5 pour une année lissée en fonction du mois de l'éruption pour un dépôt de 5 et 50 mm de téphra

Tableau 24 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°4 pour les deux scénarios de dépôt - Année lissée

| CAS 1: Quantité de semis lissée sur 3 ans |                            |       |                    |       |
|-------------------------------------------|----------------------------|-------|--------------------|-------|
| Mois                                      | Revenu annuel net (PHP/an) |       | Production (kg/an) |       |
|                                           | 5mm                        | 50mm  | 5mm                | 50mm  |
| Janvier                                   | 55838                      | 44966 | 98000              | 86000 |
| Février                                   | 55838                      | 44966 | 98000              | 86000 |
| Mars                                      | 55544                      | 42908 | 98000              | 86000 |
| Avril                                     | 55544                      | 42908 | 98000              | 86000 |
| Mai                                       | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Juin                                      | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Juillet                                   | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Août                                      | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Septembre                                 | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Octobre                                   | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Novembre                                  | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Décembre                                  | 55250                      | 40850 | 98000              | 86000 |
| Hors éruption                             | 57650                      |       |                    |       |

Tableau 25 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°4 pour les deux scénarios de dépôts – Année sans renouvellement

| CAS 2: Année de récolte sans renouvellement |                            |       |                    |       |
|---------------------------------------------|----------------------------|-------|--------------------|-------|
| Mois                                        | Revenu annuel net (PHP/an) |       | Production (kg/an) |       |
|                                             | 5mm                        | 50mm  | 5mm                | 50mm  |
| Janvier                                     | 77038                      | 66166 | 98000              | 86000 |
| Février                                     | 77038                      | 66166 | 98000              | 86000 |
| Mars                                        | 76744                      | 64108 | 98000              | 86000 |
| Avril                                       | 76744                      | 64108 | 98000              | 86000 |
| Mai                                         | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Juin                                        | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Juillet                                     | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Août                                        | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Septembre                                   | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Octobre                                     | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Novembre                                    | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Décembre                                    | 76450                      | 62050 | 98000              | 86000 |
| Hors éruption                               | 78850                      |       |                    |       |

Tableau 26 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°4 pour les deux scénarios de dépôts - Année de semis

| CAS 3: Année de semis |                            |       |                    |       |
|-----------------------|----------------------------|-------|--------------------|-------|
| Mois                  | Revenu annuel net (PHP/an) |       | Production (kg/an) |       |
|                       | 5mm                        | 50mm  | 5mm                | 50mm  |
| Janvier               | 13038                      | 2166  | 98000              | 86000 |
| Février               | 13038                      | 2166  | 98000              | 86000 |
| Mars                  | 12744                      | 108   | 98000              | 86000 |
| Avril                 | 12744                      | 108   | 98000              | 86000 |
| Mai                   | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Juin                  | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Juillet               | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Août                  | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Septembre             | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Octobre               | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Novembre              | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Décembre              | 12450                      | -1950 | 98000              | 86000 |
| Hors éruption         | 14850                      |       |                    |       |

## F. Analyse économique post-éruption – Exploitation n°5

Tableau 27 - Revenus annuels nets de l'exploitation n°5 pour les deux scénarios et les pourcentages de pertes associées

| Mois          | Revenu annuel net (PHP/an) |        | % de perte de revenu |      |
|---------------|----------------------------|--------|----------------------|------|
|               | 5mm                        | 50mm   | 5mm                  | 50mm |
| Janvier       | 66523                      | 7392   | 19                   | 91   |
| Février       | 64131                      | -5450  | 22                   | 107  |
| Mars          | 70983                      | 8881   | 14                   | 89   |
| Avril         | 71273                      | 6509   | 13                   | 92   |
| Mai           | 57205                      | -14116 | 30                   | 117  |
| Juin          | 61646                      | 62416  | 25                   | 24   |
| Juillet       | 54277                      | 46312  | 34                   | 44   |
| Août          | 74711                      | 74826  | 9                    | 9    |
| Septembre     | 65586                      | 60467  | 20                   | 27   |
| Octobre       | 79566                      | 74525  | 3                    | 9    |
| Novembre      | 79616                      | 72620  | 3                    | 12   |
| Décembre      | 80992                      | 79626  | 2                    | 3    |
| Hors éruption | 82298                      |        |                      |      |

## Évaluation de la vulnérabilité de systèmes agricoles soumis à des retombées de téphra.

Réalisé par Roxane Baudouin

Environ 11% de la population mondiale vit dans un rayon de 100 km autour de volcans ayant été actifs durant l'holocène. Cette densité de population élevée découle de la richesse des sols volcaniques, qui a de tout temps contribué à la subsistance des communautés locales. Si la proximité des volcans favorise les activités agricoles grâce à la fertilité des sols, elle expose également le secteur à des risques importants pouvant engendrer des pertes élevées en raison des retombées de téphra générées par les éruptions explosives. L'évaluation des impacts de ces retombées sur le secteur agricole est cruciale, permettant de développer des stratégies visant à prévenir et réduire les risques, afin de limiter les pertes. Toutefois, le nombre d'études disponibles est limité et se concentre principalement sur les impacts des dépôts de téphra sur des éléments isolés d'une exploitation agricole, comme des cultures spécifiques ou certains animaux. Ces recherches ne prennent pas en compte les interdépendances entre ces différents éléments, ignorant ainsi l'impact potentiel de leurs interactions sur les systèmes agricoles dans leur ensemble.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la vulnérabilité de différentes exploitations agricoles soumises à des retombées de téphra. En utilisant une approche systémique qui intègre les interactions existantes entre les sous-systèmes composant l'exploitation. Les objectifs spécifiques sont : (i) caractériser la structure et le fonctionnement économique des exploitations en situation normale (hors éruption), en décrivant de manière exhaustive leur structure ainsi que les flux de matières et d'argent associés ; (ii) quantifier l'impact de dépôts de téphra sur la viabilité économique des exploitations, en tenant compte de l'épaisseur du dépôt et de la saisonnalité ; (iii) identifier les éléments les plus vulnérables des exploitations et confronter les résultats à la réalité de terrain. Pour ce faire, l'étude se concentre sur la région avoisinant le volcan actif du Taal aux Philippines.

Les résultats de l'étude mettent en évidence l'intérêt de prendre en compte les interactions au sein du système agricole, et l'importance d'une gestion optimale des calendriers de culture et de production animale pour limiter les pertes économiques.

La méthode systémique utilisée contribue à l'amélioration de la compréhension de la vulnérabilité des exploitations agricoles, et offre des perspectives pour mieux caractériser et quantifier l'impact des retombées de téphra sur des systèmes agricoles.