

Faculté des bioingénieurs

Détermination du caractère agroécologique de parcelles de cacaoyers sur base de paramètres écologiques et agronomiques

Étude dans la région de l'Alto Beni, Bolivie

Auteur : Nicolas Bourgois

Promoteur(s) : Pierre Bertin (UCLouvain/ELIA)

Lecteur(s) : Philippe Baret (UCLouvain/ELIA), Xavier Draye (ELIA)

Année académique 2021-2022

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

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pu avoir lieu sans l'aide précieuse de plusieurs personnes, que je souhaite remercier ici.

Tout d'abord, je tiens à remercier profondément le Pr. Pierre Bertin de m'avoir permis de prendre part à ce projet en tant que mémorant. Grâce à cela, j'ai pu apprendre et découvrir énormément de choses, tant sur l'agronomie que dans de nombreux autres domaines. Merci pour la confiance, le soutien et la motivation apportés lorsque ce fut nécessaire, tant en Bolivie qu'en Belgique.

Mon séjour en Bolivie fut merveilleux grâce à Juana et Eucebio Pérez. Leur accueil dans leur foyer est inoubliable. Leur gentillesse et leur soutien m'ont permis de surmonter sans crainte les difficultés rencontrées. Merci aussi à Eucebio pour son aide sur le terrain et pour sa bonne humeur durant les nombreuses heures de voiture.

Merci à Séverine Guisset pour ses éclaircissements sur R et sur la méthodologie de l'analyse statistique.

Je remercie également les technicien·ne·s qui m'ont aidé à réaliser les analyses nécessaires en laboratoire. Merci Thomas Dagbert, Claudine Givron et Karine Hénin. Merci aussi à Lola Leveau pour ses conseils sur la rédaction d'un mémoire.

Pour finir, je souhaite remercier tout particulièrement mes parents, Lucie et Frédéric, pour leur indéfectible soutien et encouragements tout au long de la réalisation de ce travail et durant toutes mes années d'étude.

Merci !

Résumé

Afin de répondre à la demande croissante de cacao, les surfaces de cacaoyères augmentent, au détriment des forêts tropicales. La cacaoculture est responsable de la déforestation de plus de 10 millions d'hectares. On assiste également au développement de la conduite de cacaoyères en monoculture alors que le cacaoyer était traditionnellement cultivé sous un couvert forestier. La monoculture permet une augmentation des rendements à court-terme, mais malheureusement, sans apport de fertilisation minérale et de gestion des maladies et ravageurs à l'aide de produits phytosanitaires, la productivité s'effondre rapidement. De plus, le manque de production de matière organique causé par l'abattage du couvert forestier conduit à la diminution du taux d'humus et à l'érosion des sols. Rapidement, la plantation n'est plus rentable et le producteur doit défricher une nouvelle parcelle forestière, accentuant encore la pression de déforestation. L'agroforesterie agroécologique permet d'augmenter la longévité des cacaoyères grâce à l'entretien de la fertilité organique des sols, tout en offrant divers avantages aux producteurs. La diminution de la production de cacao peut être largement compensée par ceux-ci.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer s'il est possible d'estimer le degré d'adhésion de producteurs à l'agroforesterie et à l'agroécologie à partir de données écologiques et agronomiques, inventoriées directement dans les plantations. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à une enquête préliminaire à large spectre, reprenant tant des questions agronomiques qu'économiques ou sociales, réalisée auprès de 360 producteurs de cacao de la région de l'Alto Beni en Bolivie. Certains producteurs de cette région ont bénéficié de l'appui d'ONG telles que l'AOPÉB ou SOS Faim.

Pour ce faire, des inventaires ont été faits dans les parcelles de 24 producteurs ayant participé à l'enquête. Les placettes expérimentales ont été classifiées par une fonction statistique en trois groupes. Une fois caractérisés, ces groupes ont été comparés aux résultats de l'enquête préliminaires.

Les résultats montrent qu'un groupe se distingue clairement des autres quant à ses paramètres agroécologiques et agroforestiers supérieurs. Un autre présente très peu de caractéristiques agroforestières mais une certaine adhésion à l'agroécologie. Le dernier est celui présentant le moins d'adhésion à l'agroforesterie agroécologique mais se distingue fortement par sa situation topographique, sur les versants des montagnes. Les parcelles des deux autres groupes sont, quant à elles, toutes situées dans la plaine.

Les paramètres écologiques et agronomiques permettent donc de donner un aperçu du système de production d'une parcelle de cacaoyers. Cependant, les relations existantes entre variables restent parfois mal comprises et mériteraient d'être davantage investiguées afin de mieux comprendre les raisons de l'adoption ou non d'une production de cacao agroforestière et agroécologique par le producteur.

Table des matières

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Table des matières	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	IX
Plan du rapport	1
État de l'art	2
1. Le cacao	3
1.1. <i>Theobroma cacao</i>	3
1.2. Ecophysiologie	4
1.3. Récolte et transformation	5
2. Historique d'une culture mondialisée	7
2.1. Culture du cacaoyer en Bolivie	8
3. La monoculture du cacaoyer	9
4. La culture agroforestière	11
4.1. Agroforesterie en agroécologie	11
5. Comparaison des systèmes	15
5.1. Production de cacao	15
5.2. Production totale du système	15
5.3. Sol, matière organique et séquestration de carbone	16
5.4. Biodiversité, maladie et ravageurs	17
Matériels et méthodes	18
6. Contexte	19
6.1. Projet et acteurs	19
6.2. Difficultés rencontrées	19
6.3. Enquête préliminaire	20
6.4. Objectif du mémoire	20
7. Sélection des exploitations	21
7.1. Choix	21
7.2. Exploitations sélectionnées	21
8. Plan expérimental	23
8.1. Détermination des variables d'intérêt	23

8.2.	Entretien avec le producteur	23
8.3.	Détermination des limites de la plantation et des parcelles	23
8.4.	Détermination des placettes	23
9.	Collection des données	24
9.1.	Données géographiques	24
9.2.	Cacaoyer	24
9.3.	Arbres forestiers	25
9.4.	Plantes agricoles	25
9.5.	Strate arbustive et herbacée	25
9.6.	Ombrage	25
9.7.	Litière	26
9.8.	Prélèvement de sol	26
10.	Analyse de sol	27
10.1.	Pré-traitement	27
10.2.	pH _{H2O}	27
10.3.	Azote total et carbone total	27
11.	Analyse des données	28
11.1.	Numérisation et base de données	28
11.2.	Prétraitement	29
11.3.	Moyenne, médiane, écart-types et normalité des données quantitatives	31
11.4.	Coefficient de corrélation et test de significativité	32
11.5.	Analyses en Composantes Principales	32
11.6.	Clustering	32
11.7.	Moyennes, écarts-types et médiane des groupes	33
11.8.	Analyse de la variance et comparaison des moyennes	33
11.9.	Comparaison aux données de l'enquête préliminaire	34
Résultats		39
12.	Analyse descriptive des variables	40
13.	Analyse en Composantes Principales	42
13.1.	Valeurs propres	42
13.2.	ACP à 3 dimensions : liens entre variables et CP	43
13.3.	ACP à 6 dimensions : base du clustering	48
14.	Corrélations	49
14.1.	Corrélation entre variables	49
15.	Clustering	52
15.1.	Lien entre groupes, placettes et dimensions	54
15.2.	Moyenne, écart-types et médiane des groupes	55
15.3.	Poids des variables dans la constitution des groupes	58
16.	Comparaison aux données de la phase 1	61
16.1.	Variables agroécologiques synthétiques	61
16.2.	Indice Agroécologique	67
16.3.	Variables socio-économiques	67
Discussion		69

17.	Relations entre variables	70
17.1.	Cacaoyers	70
17.2.	Ombrage, arbres forestiers et plantes agricoles	71
17.3.	pH	71
17.4.	Litière, couverture herbacée et surface arbustive	71
17.5.	Altitude et pente	72
17.6.	Conclusion	72
18.	Caractérisation des groupes	74
18.1.	Interprétation des variables agronomiques et écologiques	74
18.2.	Interprétation des variables agroécologiques synthétiques et de l'indice agroécologique	76
18.3.	Interprétation des variables socio-économiques	77
18.4.	Comparaison avec les résultats de la phase 1	78
18.5.	Conclusion	79
19.	Perspectives et améliorations	81
Conclusion		82
Bibliographie		84

Liste des figures

Figure 1 : Répartition et diversité génétique du cacaoyer	3
Figure 2 : Architecture du cacaoyer	4
Figure 3 : Aire de répartition du cacaoyer et du cupuaçu (<i>Theobroma grandiflorum</i>) selon les grands groupes variétaux	5
Figure 4 : Subdivision de l'agroécologie par Wezel	11
Figure 5 : Comparaison de la productivité des cacaoyers	15
Figure 6 : Stock de carbone aérien	16
Figure 7 : Carte de localisation des producteurs rencontrés.	22
Figure 8 : Scree plot des valeurs propres	43
Figure 9 : Cercles de corrélation de l'ACP simplifiée.	46
Figure 10 : Graphique des corrélations entre variables	51
Figure 11 : Dendrogramme du clustering des placettes	52
Figure 12 : Représentation des placettes dans le plan des CP1 et CP2, avec le cercle de corrélation associé	54
Figure 13 : Représentation des placettes dans le plan des CP2 et CP3, avec le cercle de corrélation associé	55
Figure 14 : Représentation des placettes dans le plan des CP1 et CP3, avec le cercle de corrélation associé	55
Figure 15 : Cercle de corrélation des variables quantitatives et coordonnées des variables qualitatives de l'AFDM	62
Figure 16 : Graphe de corrélation entre variables de l'enquête, VAS et IAE	65
Figure 17 : Boxplot des indices agroécologiques des trois groupes	76
Figure 18 : Cercle de corrélation des variables quantitatives et coordonnées des variables qualitatives de l'AFDM	77

Liste des tableaux

Tableau 1 : Variable spécifique à la base de données sur les cacaoyers. _____	28
Tableau 2 : Variables spécifique à la base de données sur les arbres forestiers. _____	28
Tableau 3 : Variables spécifiques à la base de données sur les plantes agricoles. _____	29
Tableau 4 : Variables générales. _____	29
Tableau 5 : Variables agroécologiques synthétiques comparées. _____	35
Tableau 6 : Variables économiques et sociologiques comparées. _____	37
Tableau 7 : Moyenne, médiane, écart-types et test de normalité de chaque variable. ____	40
Tableau 8 : Valeurs propres et pourcentage de la variabilité expliqué par les composantes principales de l'ACP générale. _____	42
Tableau 9 : Contributions des variables aux CP. _____	43
Tableau 10 : Valeurs propres de l'ACP simplifiée. _____	44
Tableau 11 : Corrélation entre les variables et la CP1. _____	47
Tableau 12 : Corrélation entre les variables et la CP2. _____	48
Tableau 13 : Corrélation entre les variables et la CP3. _____	48
Tableau 14 : Liste des placettes et de leur groupe et producteur associés. _____	53
Tableau 15 : Moyennes, écart-types et médianes des données complètes et des groupes _____	56
Tableau 16 : Variables associées au groupe 1. _____	58
Tableau 17 : Variables associées au groupe 2. _____	59
Tableau 18 : Variables associées au groupe 3. _____	59
Tableau 19 : Valeurs propres de l'AFDM. _____	61
Tableau 20 : R^2 des quatre dimensions de l'AFDM. _____	61
Tableau 21 : Corrélation entre variables agroécologiques synthétiques et la CP1 de l'AFDM. _____	63
Tableau 22 : Corrélation entre variables agroécologiques synthétiques et la CP3 de l'AFDM. _____	63
Tableau 23 : Statistiques descriptives des variables agroécologiques synthétiques et IAE _____	66
Tableau 24 : Auto-considération comme écologique. _____	67
Tableau 25 : Auto-considération comme producteur en SAF. _____	67

Tableau 26 : Statistiques descriptives des variables socio-économiques _____	68
--	----

Liste des abréviations

ACP	Analyse en Composantes Principales
AE	Agroécologie
AFDM	Analyse Factorielle de Données Mixtes
AOPEB	Asociación de Organizaciones de Productores Ecológicos de Bolivia (Association des organisations de producteurs écologiques de Bolivie)
Bol.	Bolivianos (monnaie bolivienne)
C	Carbone
C/N	Rapport carbone/azote
CP	Composantes Principales
Dim.	Dimension
E.T.	Ecart-type
HCPC	Hierarchical Clustering on Principal Components
IAE	Indice Agroécologique
Ind.	Individus
KULeuven	Katholieke Universiteit Leuven
MO	Matière Organique
PIB	Produit Intérieur Brut
SAF	Système Agroforestier
UCLouvain	Université Catholique de Louvain
VAS	Variables Agroécologiques Synthétiques
VP	Valeurs Propres

Plan du rapport

Ce travail est organisé en quatre parties successives : « état de l'art », « matériel et méthodes », « résultats » et « discussion ».

L'état de l'art reprend les connaissances actuelles sur le sujet. Tout d'abord, une première partie est consacrée aux spécificités de la culture du cacaoyer. Ensuite, une présentation de la situation de la cacaoculture au niveau mondial et en Bolivie est faite. Pour finir, les deux systèmes de production principaux que sont la monoculture et l'agroforesterie sont présenté, avec un focus sur la forme agroécologique que peut prendre l'agroforesterie. Ils sont ensuite comparés au niveau de la production de cacao, de la production totale du système, de leurs impacts sur le sol et la matière organique et enfin au niveau de la biodiversité, des maladies et des ravageurs.

La partie « matériels et méthodes » explique d'abord le contexte dans lequel fût réalisé ce mémoire, puis passe en revue la manière dont toutes les données utilisées ont été obtenues et comment elles furent traitées. Une première partie détaille la collecte de données sur le terrain, une seconde partie concerne les analyses de sol et pour finir, une dernière partie décrit la méthode d'analyse statistique.

Les résultats se divisent en deux parties principales. La première concerne les résultats du traitement des données inventoriées. Cette partie révèle en premier lieu les relations existantes entre les variables puis détermine une classification des placettes d'inventaires en trois groupes distincts. La deuxième partie compare les résultats de l'analyse d'une enquête à large spectre réalisée auprès de 360 producteurs selon la classification obtenue dans la première partie. Cette comparaison se fait sur des variables agroécologiques et socio-économiques.

Pour finir, la discussion met en évidence les caractéristiques spécifiques de chaque groupe et cherche à déterminer leur adhésion à l'agroforesterie agroécologique sur base des résultats obtenus et de la littérature. Cette partie se termine par une suggestion d'améliorations possible pour cette étude et des perspectives qu'elle offre.

État de l'art

1. Le cacao

1.1. *Theobroma cacao*

Le cacaoyer (*Theobroma cacao*) est un petit arbre d'une dizaine de mètres de hauteur, à feuillage persistant et produisant des fruits, les cabosses, contenant les fèves de cacao. Il appartient au genre *Theobroma*, littéralement « nourriture des Dieux ». Ce genre regroupe 22 espèces différentes et le cacaoyer est la seule à avoir une importance économique significative. Le cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) fait l'objet d'une production beaucoup plus limitée.

Il est naturellement présent dans les forêts tropicales humides d'Amérique Centrale et du Sud. Traditionnellement, on distinguait jusqu'il y a peu deux principaux groupes parmi les cacaoyers : le *criollo* et le *forastero*. A cela, s'ajoute le *trinitario* qui résulte de l'hybridation naturelle entre le *criollo* et le *forastero*. Le *criollo* est originaire du nord du Venezuela et de la Colombie. Le *forastero*, quant, à lui a été domestiqué dans l'Amazonie brésilienne. Plus récemment, grâce aux marqueurs moléculaires et au séquençage génétique, il a été déterminé que sous l'appellation « *forastero* » existait en fait neuf groupes génétiques différents. Le plus répandu d'entre eux, notamment en Afrique, est l'*amelonado* (Figure 1 (Cornejo et al., 2018; Motamayor et al., 2008)).

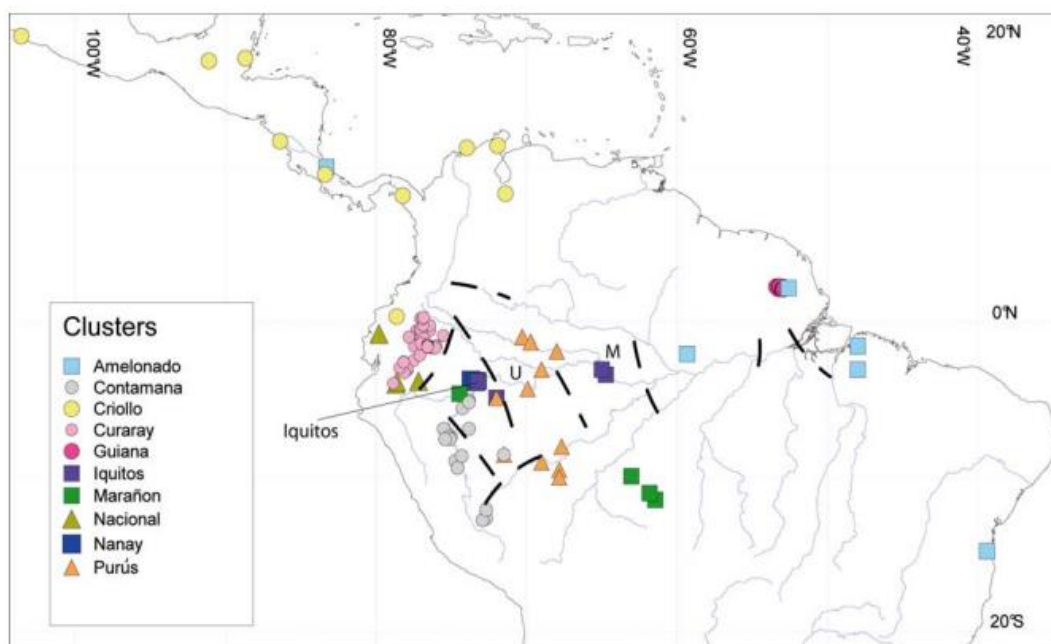


Figure 1 : Répartition et diversité génétique du cacaoyer (Motamayor et al., 2018)

Le système caulinaire de l'arbre croît de manière étagée avec une succession de tiges verticales, ou orthotropes, et de tiges horizontales, ou plagiotropes (Bertin, 2021a). Le tronc est un axe orthotrope faisant environ 1,5m chez les plants de cacaoyers semés et environ 30-50cm chez les plants greffés. Au sommet de celui-ci se développe une première couronne d'axes plagiotropes. Ensuite, un bourgeon axillaire situé juste en

dessous va se développer en un nouvel axe orthotrope qui, surmonté d'axes plagiotropes, formera un deuxième étage. L'arbre formera ainsi quatre à cinq étages. De plus, des gourmands orthotropes peuvent se développer à la base du tronc et s'enraciner, pouvant donner aux cacaoyers sauvages l'aspect d'une touffe de tiges. (Mialet, 1990 ; Mossu, 1990)

Le système racinaire du cacaoyer descend en général jusqu'à 1,5m de profondeur et se déploie dans un rayon de 5m. Il est principalement superficiel, dans les vingt premiers centimètres du sol, car la majorité de ses ressources en nutriments proviennent de la minéralisation de la couche humifère (Bertin, 2021a; Nair, 2010).

La floraison du cacaoyer est assez particulière. Les fleurs n'apparaissent pas sur les rameaux mais sous l'écorce du bois, un an ou deux après son aoutement. Cette zone d'émergence est appelée « coussinet floral ». Le cacaoyer fait des fleurs toute l'année, par plusieurs vagues successives. La pollinisation est entomophile. Seulement 5 à 20% des fleurs sont pollinisées et, à cause de l'auto-incompatibilité, seul 1 à 1,5% des fleurs sont réellement fécondées. Cette sous-pollinisation est donc due à plusieurs facteurs génétiques et environnementaux, dont un déficit en insectes pollinisateurs (Mossu, 1990).

Les fleurs fécondées donnent des fruits, appelés cabosses, et dont 70% avortent à cause de problèmes nutritionnels, hydriques ou hormonaux. Les cabosses mettent environ 6 mois pour arriver à maturité. (Bertin, 2021a; Mossu, 1990).

1.2. Ecophysiologie

Etant à l'origine un arbre de sous-bois et ayant la majorité de son système racinaire à la surface du sol, le cacaoyer est une plante qui craint le manque d'eau. Il se plait dans les régions recevant entre 1500 mm et 3000 mm de précipitations annuelles et sans période prolongée de sécheresse. Pour les mêmes raisons, le sol doit être riche en humus, source de ses nutriments, et avoir une bonne économie en eau sans pour autant présenter de nappes perchées risquant de provoquer une asphyxie racinaire.

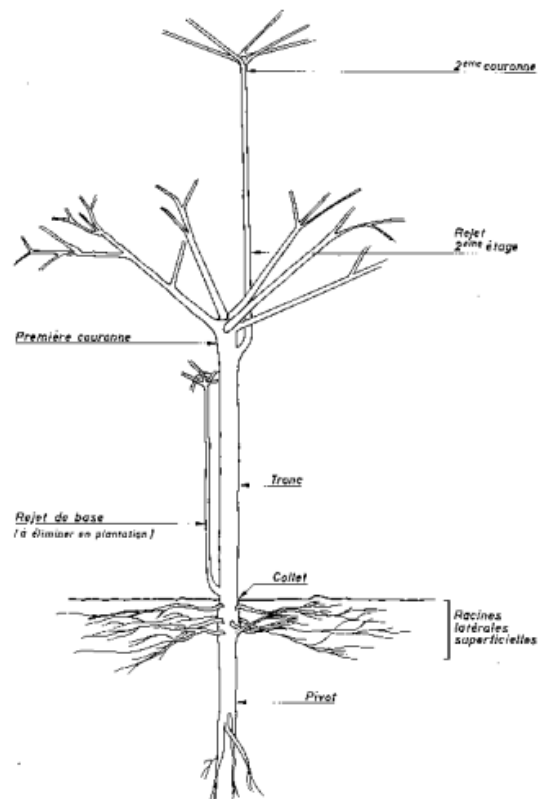


Figure 2 : Architecture du cacaoyer (Mossu, 1990)

De plus, le cacaoyer craint le froid. Pour son bon développement, les températures moyennes annuelles doivent se situer entre 18°C et 30°C, avec un optimal entre 24°C et 28°C. L'humidité relative doit se situer aux alentours de 80%. Géographiquement, cela se traduit par une aire de répartition et de culture comprise entre 10° de latitude Nord et Sud (Figure 3) (ICCO, 2022; Sémhur, 2021).

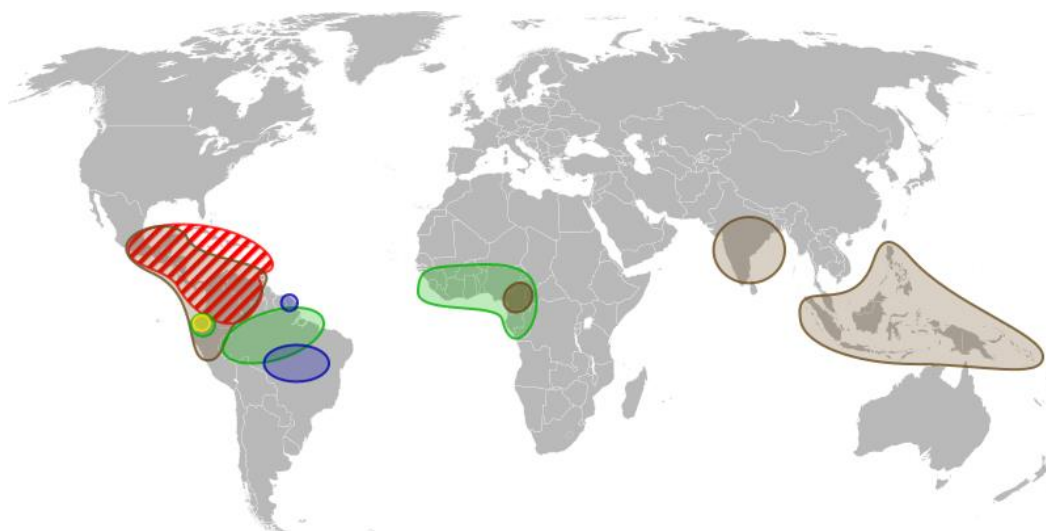


Figure 3 : Aire de répartition du cacaoyer et du cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) selon les grands groupes variétaux ; Trinitarios (brun), Criollos (rouge), Forasteros (vert), Cupuaçu (bleu), Nacional (jaune). (Sémhur, 2021).

Le cacaoyer est, dans son milieu naturel, une plante de sous-bois. Elle peut parfaitement croître sous un ombrage dense même si l'augmentation de l'intensité lumineuse améliore sa productivité, lorsque tous ses autres besoins sont assurés. Cependant, il est très sensible à la lumière directe lors de ses premières années de culture. Il nécessite qu'au moins 50% à 75% de la lumière soit filtrée le temps que sa couronne n'est pas développée. Cette ombre peut être apportée par des arbres forestiers plantés ou épargnés lors du défrichement ou encore par des bananiers plantés à côté de chaque cacaoyer (Bertin, 2021a; Mossu, 1990; Nair, 2010).

1.3. Récolte et transformation

La récolte des cabosses est très régulière, le cacaoyer en produisant tout au long de l'année, avec cependant une augmentation de la production durant les mois les plus secs. Il est nécessaire de cueillir les cabosses dès qu'elles arrivent à maturité car les fèves qu'elles renferment ne sont pas dormantes et peuvent germer à l'intérieur du fruit. La récolte se fait à la main, souvent à l'aide d'une machette même s'il est recommandé d'utiliser plutôt un sécateur afin de ne pas abimer le coussinet floral ou de provoquer des blessures, qui sont une porte d'entrée pour les pathogènes. (Bertin, 2021a; Yana, 2004).

Une fois récoltées, les cabosses sont ouvertes et les fèves extraites. Elles sont alors couvertes de mucilage. Pour transformer les fèves fraîches en cacao marchand¹, il faut passer par une fermentation suivie d'un séchage. La fermentation se produit en deux phases, grâce au mucilage, qui offre un milieu très favorable au développement des levures. La première phase, la fermentation, alcoolique, provoque une hausse de température jusqu'à 40°C. Lors de la seconde phase, l'alcool produit est alors transformé en acide acétique par des bactéries et c'est cette acidification ainsi que la température élevée qui tuent le germe de la fève, permettent le développement des arômes et diminuent l'amertume du cacao. La fermentation dure de deux à six jours, en fonction du type de cacaoyer, de la méthode utilisée, des conditions climatiques ou encore de l'importance de la masse en fermentation. C'est une étape sensible et déterminante dans la qualité du cacao produit (Beg et al., 2017; Mossu, 1990).

Les fèves fermentées sont ensuite mises à sécher afin de diminuer leur teneur en eau, passant de 60% à 8%. Cela assure la stabilité de la qualité du cacao, permettant son transport et stockage. Au cours de ces étapes de transformation, les fèves sèches de cacao ont perdu 60% de leur masse par rapport aux fèves fraîches (Mossu, 1990).

¹ Le cacao marchand correspond aux fèves de cacao fermentées et séchées, prêtes à être commercialisées et transformées en chocolat.

2. Historique d'une culture mondialisée

L'histoire commune de l'être humain et du cacaoyer a commencé il y a plus de deux mille ans avec la civilisation Olmèque en Mésoamérique. La domestication du cacaoyer a eu lieu grâce aux Mayas, qui utilisaient les fèves pour leur consommation mais aussi comme monnaie d'échange, et ce sont les Aztèques qui ont répandu sa culture dans leur empire, allant du nord de l'Amérique du Sud jusqu'au Mexique. On leur doit le mot « cacao » qui dérive de « cacahoatl », désignant le tribut sous forme de graines de cacaoyer qu'ils exigeaient des régions de culture du cacaoyer. Le mot « chocolat » viendrait quant à lui de « xocoatl », nom d'un breuvage sacré à base de fèves de cacao grillées et broyées, mélangée à de la farine de maïs, à du piment et autres condiments. C'est en hommage à cette dimension sacrée attribuée au cacao par les Aztèques que Linné donna le nom *Theobroma* au genre du cacaoyer, littéralement « nourriture des dieux » en grec (Bertin, 2021a; Mossu, 1990).

Les Européens découvrirent le cacao au XVIème siècle, lors de la colonisation du Mexique par l'Empire espagnol. Ceux-ci remplacèrent le piment et la farine de maïs du « xocoatl » par du sucre, provenant d'autres colonies espagnoles telles que les Canaries ou Saint-Domingue, et inventèrent ainsi le chocolat. Celui-ci se popularisa très rapidement à travers toute l'Europe, augmentant considérablement la demande en fèves de cacao. Au XVIIème siècle, la culture du cacaoyer se répandit en Amérique, dans les Caraïbes et à Sao Tomé. C'est de là que durant le XIXème siècle, il fut importé sur le continent africain (Mossu, 1990).

Lors du XXème siècle, la demande en cacao a fortement augmenté et continue sa croissance aujourd'hui, notamment par l'augmentation de la consommation dans certains pays « émergents ». Afin d'y répondre, la production de cacao s'est accrue d'une part grâce à une augmentation des rendements, passant de 254 à 484 kg/ha entre 1961 et 1996 et d'autre part via l'augmentation des surfaces de culture, passant de 3,3 millions d'hectares à 6,5 millions d'hectares en 60 ans (Jagoret et al., 2020). Certains pays ont parié sur le cacao comme produit d'exportation, principalement le Ghana et la Côte d'Ivoire, qui représentent aujourd'hui 60% de l'offre mondiale à eux deux. L'export de fèves de cacao contribue à 7,5% du PIB de la Côte-d'Ivoire et à 3,4% de celui du Ghana (Läderach et al., 2013).

Cette production est majoritairement le fruit de l'agriculture familiale, 80% des producteurs n'exploitant que quelques hectares de plantation. La cacaoculture compte entre 4 et 6 millions de producteurs, dont dépendent environ 40 à 50 millions de personnes dans le monde. Ensemble, ils produisent annuellement 4,2 millions de tonnes de cacao marchand, d'une valeur estimée à 11,8 milliards de dollars. (Beg et al., 2017; Jagoret et al., 2020).

2.1. Culture du cacaoyer en Bolivie

La culture du cacaoyer est présente depuis de nombreuses années en Bolivie et plus particulièrement dans la région de l'Alto Beni. Elle aurait été introduite au XVIII^e siècle par des moines franciscains mais son développement n'a pris de l'essor que depuis quelques décennies car la culture de cacaoyers est considérée par les autorités comme une alternative à la culture de la coca (*Erythroxylum spp.*), très présente dans la région (Andres et al., 2016).

L'Alto Beni se situe sur le contrefort Est des Andes, à une altitude comprise entre 350 et 800 m au-dessus du niveau de la mer. Le climat est tropical humide avec une saison sèche en hiver, entre mai et août. La température annuelle moyenne est de 25°C et les précipitations sont de l'ordre de 1500 mm/an. Les forêts sont majoritairement des forêts secondaires, la forêt primaire ne subsistant que dans les zones difficiles d'accès. La culture principale de la région est le cacao mais sont aussi cultivées des cultures annuelles telles que le riz pluvial ou le maïs ainsi que des cultures semi-pérennes et pérennes comme la papaye, la banane et différents types d'agrumes (Jacobi, 2013).

La production de cacao bolivien reste marginale comparé à d'autres pays. En 2020, les cacaoyères de Bolivie occupèrent 10 336 ha (0,084% de la superficie mondiale de cacaoyers) pour une production totale de 5 875 tonnes de cacao marchand, soit 0,1% des 5 756 953 tonnes produites dans le monde cette année-là. A titre de comparaison, la Côte-d'Ivoire en possédait 4 774 875 ha, soit 38,77% des 12 315 836 ha de cacaoyers cultivés dans le monde, pour une production totale 2 200 000 tonnes la même année. Le rendement moyen des cacaoyers bolivien est de 568 kg/ha, ce qui supérieur à la moyenne mondiale (467 kg/ha) et à la moyenne ivoirienne (460 kg/ha) (Andres et al., 2016; FAOSTAT, 2021).

Dans les années 1980, des associations de producteurs de cacao de l'Alto Beni se sont formées et regroupées sous la coopérative parapluie « El Ceibo ». Celle-ci prend le rôle d'intermédiaire pour la vente du cacao marchand, certifié Fairtrade et biologique, et transforme en Bolivie du cacao en chocolat à destination du marché local mais également à l'export, vers l'Europe² et les Etats-Unis. « El Ceibo » promeut la gestion en agroforesterie biologique des plantations de cacaoyers, notamment en mettant une banque de graines et une pépinière d'arbres forestiers à disposition de ses membres. Elle propose également des plants de cacaoyers de variétés sélectionnées ainsi qu'un soutien technique aux producteurs. Les prix reçus par les producteurs travaillant avec cette coopérative sont 42% plus élevés que pour ceux n'en faisant pas partie et 85% des membres considèrent que leur niveau de vie a augmenté depuis leur adhésion à la coopérative (Andres et al., 2016; El Ceibo, 2022; Jacobi, 2013; Jacobi et al., 2015).

² En Belgique, le chocolat « El Ceibo » n'est pas vendu mais la coopérative « Ethiquable » fabrique du chocolat à partir de fèves d'El Ceibo et le vend sous sa propre marque.

3. La monoculture du cacaoyer

L'intensification de la cacaoculture a mené au développement de monocultures. Elle est principalement présente dans les deux plus gros pays exportateurs, la Côte-d'Ivoire et le Ghana, où elle représente respectivement 35% et 10% de la surface totale de cacaoyers. Elle est également répandue dans des pays « émergents » tels que le Brésil ou l'Equateur (Läderach et al., 2013).

Des expérimentations de conduite de cacaoyères en monoculture ont montré que les rendements sont en moyenne 20% supérieurs aux systèmes à ombrage modéré et jusqu'à 50% supérieurs aux systèmes à ombrage fort. Ces études ont été faites sur des cacaoyers de variétés hybrides sélectionnées et bénéficiant d'une fertilisation minérale ainsi que de produits de protection phytosanitaire. Outre l'intensité lumineuse, la fertilisation minérale permet une importante augmentation du rendement. Une étude comparative montre qu'une monoculture bénéficiant d'une fertilisation minérale a un rendement de 48% supérieur qu'une monoculture fertilisée à base de matières organiques dans les premières années après son installation. Sur base de ces recherches, la monoculture intensive a été promue auprès des cultivateurs (Ahenkorah et al., 1987; Armengot et al., 2016; Niether et al., 2020; Vaast & Somarriba, 2014).

Cependant, les producteurs n'ont pas adopté l'ensemble du package « hybride-engrais-pesticides » et ont basé la productivité de leurs plantations en monoculture sur la « rente forestière ». Celle-ci correspond à la fertilité héritée de la matière organique accumulée pendant des décennies, voire des siècles, par la forêt ayant été défrichée ainsi qu'à l'absence d'adventices, de maladies et de ravageurs. Une fois cette « rente forestière » épuisée et sans engrais organiques ou minéraux pour restaurer la fertilité du sol, le rendement s'effondre. Cela arrive généralement après une vingtaine d'années d'exploitation, parfois bien plus tôt. De plus, la diminution du taux de matière organique du sol provoque la diminution de la vie microbienne et de la porosité du sol ainsi qu'une dégradation de la structure du sol. L'ensemble de ces facteurs mènent à l'érosion du sol (Ruf & Zadi, 1998; Vaast & Somarriba, 2014).

D'autre part, la conversion de forêt en monoculture induit une forte perte de biodiversité. La pression des maladies et ravageurs est alors accentuée par la disparition des services écosystémiques et provoque également une chute de rendement après la première décennie d'exploitation (Clough et al., 2009).

La difficulté et le coût élevé pour réhabiliter une cacaoyère en déperdition, par rapport au défrichement d'une nouvelle parcelle, pousse généralement les producteurs à abandonner la plantation pour aller s'installer plus loin dans la forêt. Cet abandon de plantations en monoculture et la durée plus courte d'exploitation des parcelles contribuent fortement à la déforestation, notamment Côte d'Ivoire et au Ghana où 80% de la surface forestière a disparu. A l'échelle mondiale, la cacaoculture serait responsable de la perte de 14-15 millions d'hectares de forêts tropicales, dont 3,5 millions rien qu'en

Côte-d'Ivoire et au Ghana. Or, la conversion de forêt en surface agricole est responsable de 17,4% des émissions globale de gaz à effet de serre. La part de la cacaoculture à ces émissions est donc non négligeable (Jacobi et al., 2014; Jagoret et al., 2018; Middendorp et al., 2018; Vaast & Somarriba, 2014).

En résumé, la monoculture du cacaoyer permet une augmentation du rendement à court terme. Pour que la productivité soit maintenue à long-terme, le recours à la fertilisation minérale est nécessaire ainsi que des moyens de contrôle des maladies et ravageurs. Ces intrants sont coûteux et bien souvent inaccessibles pour les producteurs. S'en suit un effondrement du rendement de la plantation et le défrichement d'une parcelle forestière afin d'installer une nouvelle cacaoyère. Ce phénomène est renforcé par la présence de zones forestières encore défrichables (Franzen & Borgerhoff Mulder, 2007).

4. La culture agroforestière

L'agroforesterie est une activité agricole combinant, dans la même parcelle, une ou plusieurs cultures annuelles ou pérennes avec des arbres. Elle est pratiquée depuis des siècles sur tous les continents mais plus particulièrement dans les zones tropicales. Cette pratique est toujours très répandue dans les cultures de plantes pérennes tropicales. En cacaoculture, elle est même la pratique majoritaire par rapport à la monoculture ; 60 à 70% des surfaces de cacao sont implantées sous un couvert forestier (Vaast et al., 2016).

Cependant, agroforesterie ne rime pas toujours avec écologie car la gestion de la culture et/ou des arbres d'ombrage peut varier très fortement d'un producteur à l'autre, en allant de systèmes sans intrant à des systèmes ultra-intensifs avec un recours systématique aux herbicides, pesticides et engrais chimiques (Vaast et al., 2016).

4.1. Agroforesterie en agroécologie

4.1.1. L'agroécologie

À l'origine, l'agroécologie (AE) était considérée comme une discipline scientifique cherchant à appliquer en agriculture des pratiques provenant d'observations faites dans la nature. Les exemples les plus courants sont les tentatives de recréer, dans un système agricole, des interactions inter-espèces naturelles dans le but de gérer les maladies et ravageurs ou la fertilité des sols (Wezel et al., 2009). Dans les années 1970 à 2000, le concept d'agroécologie a évolué et s'est enrichi, intégrant notamment une vision sociologique à la discipline. Francis et al. (2003) la définissent d'ailleurs comme étant « l'étude intégrative de l'écologie de l'ensemble du système alimentaire, englobant les dimensions écologiques, économiques et sociales ».

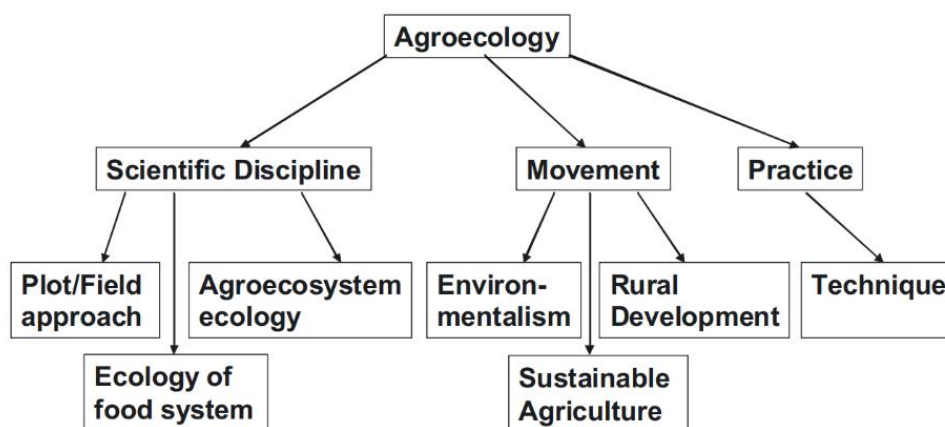


Figure 4 : Subdivision de l'agroécologie par Wezel. (Wezel et al., 2009)

Wezel subdivise l'agroécologie en trois significations différentes ; la discipline scientifique, le mouvement et les pratiques (Figure 4).

La discipline scientifique correspond à la recherche d'applications en agriculture de phénomènes écologiques naturels mais est également influencée par les recherches sur les systèmes agricoles traditionnels dans les régions tropicales ou subtropicales. De cette discipline a émergé le concept intéressant « d'agroécosystèmes » qui consiste à considérer les systèmes agricoles comme des écosystèmes domestiqués, intermédiaires entre écosystèmes naturels et artificiels. De ce fait, l'agroécologie considère que la nature et l'agriculture font partie du même environnement et que la durabilité de l'un ne va pas sans l'autre. L'agroécologie a donc contribué au développement du concept d'agriculture durable. Elle a aussi amené des scientifiques à dépasser l'échelle du champ ou de l'agroécosystème et à étudier les systèmes alimentaires dans leur ensemble, c'est-à-dire au réseau liant production, distribution et consommation de nourriture. Gliessman (1998) résume la discipline scientifique de l'AE en la définissant comme « l'application de concepts et principes écologiques pour le design et la gestion des agroécosystèmes durables » (Francis et al., 2003; Gliessman et al., 1998; Wezel et al., 2009).

Le mouvement agroécologique est un mouvement social qui s'est développé dans les années 1990 dénonçant les politiques agricoles, leur reprochant de se concentrer uniquement sur les aspects économiques et de ne pas prendre assez en considération l'impact environnemental et social du type d'agriculture qu'elles cherchent à mettre en place. Ce mouvement propose le modèle agroécologique comme une alternative durable (Wezel et al., 2009).

Les pratiques agroécologiques sont des pratiques agricoles basées sur les disciplines scientifiques de l'AE et qui cherchent à proposer des alternatives plus durables aux méthodes intensives et à hauts niveaux d'intrants. L'agroforesterie est l'une de ces pratiques agroécologiques (Wezel et al., 2009).

4.1.2. L'agroforesterie agroécologique et tropicale

L'agroforesterie comme une pratique agroécologique est l'une des clés pour améliorer la durabilité des productions de plantes pérennes tropicales telles que le cacaoyer ou le caféier. L'agroécologie a comme principe d'améliorer la résilience des agroécosystèmes, notamment dans la lutte et l'adaptation face au changement climatique et l'agroforesterie augmente cette résilience en l'influençant à trois niveaux différents : microclimatique, écologique et socioéconomique.

4.1.2.1. Niveau microclimatique

Les arbres de la canopée, ou arbres d'ombrage, permettent d'intercepter une partie du rayonnement solaire. Cela aide à réguler les variations de température journalière ainsi que l'intensité de la pluie ou du vent au sein de la plantation. Cela permet de réduire la température au niveau des plantes cultivées de 2 à 5°C par rapport à la canopée et augmenter l'humidité relative de l'air, les deux combinés réduisant le risque de stress hydrique. Cependant, une influence trop forte ou non contrôlée des arbres d'ombrage peut exercer un impact négatif sur la production, par exemple en créant un microclimat

trop humide, favorable au développement de maladies fongiques. Un mauvais management peut également entraîner une concurrence entre plantes cultivées et arbres lors de conditions défavorables, telles qu'une saison sèche qui se prolonge. Cependant, de manière générale, les plantations en agroforesterie s'en sortent tout de même mieux que les monocultures en cas de stress hydriques, et ce bien que la consommation nette d'eau soit plus élevée. Cela peut s'expliquer par la différence de profondeur des racines, celles des arbres allant plus en profondeur et redistribuant, dans tout le profil du sol, une eau qui n'aurait pas été disponible pour les autres cultures en leur absence (Vaast et al., 2016).

4.1.2.2. Niveau écologique

L'agroforesterie permet un usage plus efficient des ressources naturellement présentes grâce à la diversité des espèces et de leurs besoins. Cette diversité permet également de valoriser tout le profil du sol grâce aux profondeurs racinaires différentes alors que les racines des cacaoyers ou des caféiers sont principalement superficielles. De cette manière, des nutriments présents en profondeur peuvent être remontés dans la biomasse superficielle par les arbres d'ombrage, entrer dans le cycle de la matière organique et ainsi être disponibles pour les plantes de production. L'utilisation d'arbre de la famille des légumineuses permet une meilleure gestion de l'azote afin de réduire les intrants azotés et les pertes dues aux émissions de N_2O . Ils ont une capacité de fixation de 100 kg N/ha/an et permettrait de couvrir les exportations annuelles via les fèves de cacaoyers, qui sont de l'ordre de 20-50 kg N/ha/an. De manière plus générale, un système agroforestier bien géré peut permettre de maintenir, et même de restaurer, la fertilité du sol à son état d'avant le défrichement de la forêt et cela sans recours aux engrais. C'est un point clé de la durabilité des cacaoyères car le recours au engrais de synthèse est bien souvent inaccessible aux producteurs et ceux-ci sont donc généralement contraints de capitaliser sur la « rente forestière ». En ayant un système agroforestier entretenant ou augmentant la teneur en matière organique du sol, la durée de productivité se trouve prolongée d'une vingtaine d'année par rapport aux systèmes en monoculture, tout en préservant le sol de la dégradation et de l'érosion. De plus, la litière produite favorise l'activité biologique qui elle-même entraîne une meilleure infiltration de l'eau, l'incorporation de matière organique au sol ainsi que sa minéralisation en éléments nutritifs (Jagoret et al., 2018; Tschardt et al., 2011; Vaast et al., 2016).

4.1.2.3. Niveau socioéconomique

La diversification des productions permet une sécurisation du revenu, d'une part grâce à l'augmentation de la résilience face aux fluctuations des cours des marchés et d'autre part via l'augmentation de la résilience face aux événements météorologiques défavorables, dont la fréquence risque d'augmenter à cause du changement climatique. La part de revenus obtenus par la diversification peut représenter jusqu'à 35% du revenu total, voire plus de 50% dans les systèmes les plus complexes. Cette diversification permet également une autonomie plus importante pour le producteur, tant alimentaire que médicinale. Les

arbres d'ombrage servent à terme de bois de construction et de bois de chauffage, réduisant ainsi la pression faite sur la forêt naturelle pour ces ressources. D'ailleurs, la production de bois de chauffage peut également venir de la taille des arbres faite pour réguler l'ombrage des plantes cultivées dans les strates inférieures. Cette production peut s'élever à 5 m³/ha/an. De plus, l'association de plusieurs espèces permet d'avoir des cultures à cycle plus court ou à production plus précoce, permettant d'avoir déjà un premier revenu avant la pleine production du système agroforestier (SAF). Cette association permet aussi un étalement des récoltes, et donc des revenus, tout au long de l'année (Andres et al., 2016; Gold & Garrett, 2015; Jagoret et al., 2018; Tschardt et al., 2011; Vaast et al., 2016).

4.1.2.4. Règle des quatre « i »

L'agroforesterie agroécologique se distingue d'autres systèmes agroforestiers par quatre points clés (Gold & Garrett, 2015). Elle est :

- Intentionnelle : les espèces associées ont été choisies délibérément pour interagir entre elles
- Intensive : les différentes espèces sont gérées activement par des opérations culturales pour maintenir leurs fonctions et productions
- Intégrée : le système agroforestier est géré comme un ensemble et non comme plusieurs entités séparées
- Interactive : les interactions entre espèces sont activement manipulées et utilisées afin de multiplier les productions tout en fournissant des avantages écologiques.

5. Comparaison des systèmes

5.1. Production de cacao

Les rendements des systèmes agroforestiers sont souvent équivalents ou supérieurs aux monocultures peu ou pas fertilisées, allant de 600kg/ha à plus de 2t/ha (Jagoret et al., 2018). En revanche, en cas de fertilisation minérale, la monoculture présente un rendement de 25 à 50% supérieur aux autres systèmes (Figure 5). Cependant, à long-terme, le rendement des cacaoyers en monoculture décroît plus rapidement que ceux en agroforesterie (Armengot et al., 2016; Niether et al., 2020).

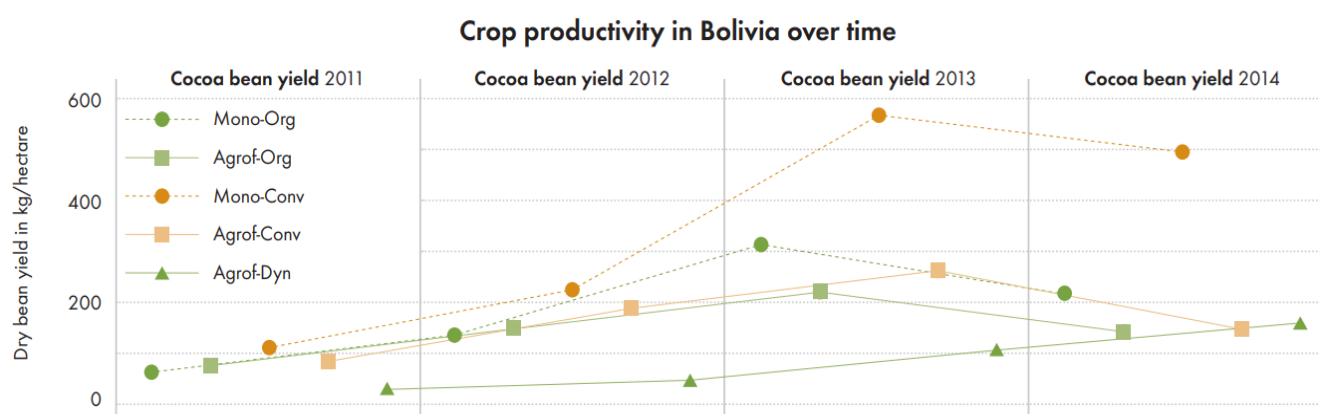


Figure 5 : Comparaison de la productivité des cacaoyers en monoculture biologique (Mono-Org), en SAF biologique (Agrof-Org), en monoculture conventionnelle (Mono-Conv), en SAF conventionnel (Agrof-Conv) et en SAF complexe. (Bhullar et al., 2021).

Dans les systèmes agroforestiers, la fertilisation n'a pas autant d'influence qu'en monoculture car le principal facteur limitant du rendement est la quantité de lumière disponible. Il n'y a pas donc pas de différence significative de rendement entre des SAF conventionnels ou biologiques (Armengot et al., 2016; Bhullar et al., 2021).

5.2. Production totale du système

En considérant l'ensemble des produits récoltés, la productivité des cacaoyères en SAF est environ deux fois supérieure en poids de matière sèche que celle des cacaoyères en monoculture. Cependant, cela ne se traduit pas par un revenu supérieur pour le producteur, notamment car les productions annexes sont soit auto-consommées soit sont d'une valeur bien inférieure au cacao. Les revenus générés par les productions annexes dépendent beaucoup du design de l'implantation de la parcelle, du choix des espèces associées et de l'intensité de la conduite. Cela entraîne une grande diversité parmi les systèmes agroforestiers et une difficulté pour les chercheurs de l'estimer (Andres et al., 2016; Niether et al., 2020).

5.3. Sol, matière organique et séquestration de carbone

Les parcelles en agroforesterie permettent un stockage de carbone beaucoup plus important dans le sol et en surface que ne peut le faire une monoculture. Au Cameroun, une étude parle d'une capacité de stockage de 75 t C/ha pour les parcelles en agroforesterie contre 10 t C/ha pour celles en monoculture (Jagoret et al., 2020). En Bolivie, dans les premières années d'essai comparatif de longue durée, la quantité du stock de C aérien est comparable entre les différents systèmes mais augmente fortement avec les années pour les SAF alors qu'il reste stable pour les monocultures (Figure 6) (Bhullar et al., 2021).

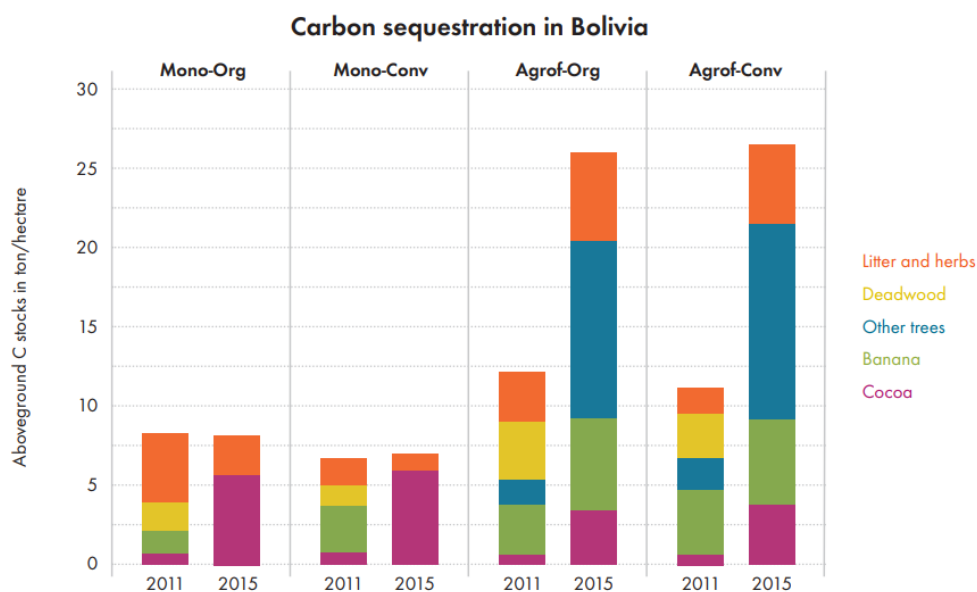


Figure 6 : Stock de carbone aérien formé par les arbres, la litière, les herbes et le bois mort en monoculture biologique (Mono-Org), en SAF biologique (Agrof-Org), en monoculture conventionnelle (Mono-Conv), en SAF conventionnel (Agrof-Conv) et en SAF complexe. (Bhullar et al., 2021).

La quantité de biomasse en surface dépend des espèces végétales et de leur densité dans la parcelle, les cacaoyers ne contribuant que pour 2 à 12% de celle-ci. L'occupation de la surface avant l'implantation de la parcelle l'influence aussi ; les cultures installées là où était autrefois une forêt possèdent une quantité de biomasse superficielle beaucoup plus importante que celles implantées dans une savane (Vaast et al., 2016).

La dégradation de la litière est plus rapide dans les systèmes agroforestiers que dans les monocultures ; 60% de la masse des feuilles des cacaoyers sont dégradées dans les 6 mois en cacaoyère agroforestière alors que seulement 18% le sont dans les monocultures. Par conséquent, la quantité de nutriments relâchés par la minéralisation de la matière organique est plus importante en agroforesterie qu'en monoculture. Cela serait induit d'une part par une humidité relative plus importante en SAF, favorable à la décomposition de la litière, et d'autre part à la quantité d'organismes décomposeurs également supérieurs (Ofori-Frimpong et al., 2007).

5.4. Biodiversité, maladie et ravageurs

Les systèmes agroforestiers abritent une biodiversité importante, souvent semblable au milieu forestier naturel. Il existe une corrélation positive entre le nombre d'espèces végétales présentes dans la plantation et le nombre d'individus et d'espèces animales (Middendorp et al., 2018; Siebert, 2002). Cette biodiversité offre des services écosystémiques tels qu'une meilleure pollinisation des fleurs de cacaoyers, augmentant le rendement (Tscharntke et al., 2011). La diversité des espèces dépend de la conduite, de la diversité et de la complexité du SAF (Niether et al., 2020).

Les cacaoyères agroforestières peuvent jouer un rôle dans la protection d'espèces menacées en jouant le rôle de corridors écologiques entre différentes forêts dans des régions aux paysages de plus en plus fragmentés (Saj et al., 2017).

Concernant les maladies et ravageurs, il n'y a pas de différence claire entre les systèmes. Certaines maladies semblent plus présentes dans les SAF, profitant du microclimat créé alors que d'autres s'épanouissent dans les monocultures. La gestion de la plantation semble avoir un impact plus déterminant, par exemple via la destruction des fruits infectés avant la sporulation de la maladie, par la taille des arbres d'ombrage ou par l'utilisation de variétés de cacaoyers résistantes à certaines maladies (Andres et al., 2016; Niether et al., 2020).

Matériels et méthodes

6. Contexte

6.1. Projet et acteurs

Ce mémoire s'inscrit dans un projet plus global mené par le Pr. Pierre Bertin (UCLouvain), en collaboration avec la Universidad Mayor de San Andrés (La Paz), les ONG belges SOS Faim et Eclasio ainsi que l'ONG bolivienne AOPEB.

Ce projet a pour objectif d'analyser et de quantifier les impacts des systèmes agroforestiers de culture de cacao et de café par rapport aux systèmes conventionnels dans la région des Yungas en Bolivie. Le souhait est d'analyser les impacts agronomiques mais également socio-économiques des différents systèmes de production. Pour cela, le travail se sépare en deux phases ; une enquête préliminaire à large spectre cherchant à faire un état des lieux des habitudes culturelles et socio-économiques dans la région afin de déterminer quels systèmes sont en place, et une enquête cherchant à déterminer plus précisément les caractéristiques de chaque système et à les comparer entre eux (Bertin, 2019). La première phase a été conçue par l'UCLouvain, SOS Faim et Eclasio puis réalisé par quatre étudiants de la UMSA et accompagnés par l'Ir. Eucebio Pérez. 360 producteurs de café et 360 producteurs de cacao ont été rencontrés et leurs réponses ont été reprises dans une base de données pour chacune des deux cultures. À partir de celles-ci, une classification en groupe a été réalisée et différents agriculteurs de chaque groupe sont sélectionnés aléatoirement pour participer à la deuxième phase, qui consiste à une prise de mesures agronomiques et écologique. C'est à cette deuxième phase qu'est lié ce travail. L'accompagnement sur place a également été fait par l'Ir. Eucebio Pérez.

6.2. Difficultés rencontrées

Au cours de la réalisation du travail de terrain, des difficultés imprévues ont été rencontrées. Celles-ci ont eu un impact direct sur le déroulement du mémoire et des adaptations par rapport au projet initial ont dû être prises.

La première difficulté rencontrée est un retard important de la réception des résultats du traitement statistique des enquêtes préliminaires. Les catégories de producteurs n'ont donc pas pu être définies anticipativement et n'ont pu servir de critère de sélection des exploitations. Le choix de celles-ci a dû se faire sur d'autres critères, expliqués au point 7.1.

La seconde difficulté rencontrée est l'instabilité politique faisant suite aux élections présidentielles boliviennes d'octobre 2019. Des mouvements de protestation dénonçant une potentielle fraude électorale ont conduit au blocage du pays durant plusieurs semaines, entraînant l'impossibilité de se déplacer pour des raisons de sécurité, de barrages routiers et de pénurie d'essence.

La troisième difficulté rencontrée est la dégradation de l'état des routes à cause de la saison des pluies. La majorité des itinéraires passant par des pistes en terre battue,

généralement en mauvais état, et ne nous déplaçant pas en véhicule tout terrain, il n'a pas été possible de se rendre chez les producteurs les jours de fortes averses.

À cause de ces deux dernières difficultés réduisant considérablement le nombre de jours de travail, il n'a pas été possible de réaliser l'entièreté du travail souhaité. Il a alors été choisi de se concentrer uniquement sur les systèmes de productions de cacao, laissant de côté les productions de café.

6.3. Enquête préliminaire

La première phase du projet a été réalisée par quatre étudiants boliviens qui ont été rencontrer 360 producteurs de cacao et autant de café. Les données qu'ils ont récoltées en culture de cacao ont ensuite été traitées statistiquement. Cela a permis de déterminer que les producteurs pouvaient être séparés en cinq groupes différents, dont trois systèmes de production se distinguent sur base de leur degré d'adhésion à l'agroécologie (Bertin, 2020). Ces 360 producteurs seront nommés « producteurs enquêtés » dans ce travail.

6.4. Objectif du mémoire

Initialement, le souhait était de partir des résultats de l'enquête statistique et des modes de production définis par celle-ci pour sélectionner aléatoirement les producteurs à rencontrer dans chacun des groupes identifiés. Le but était que les catégories de producteurs soient déterminées par les données de l'enquête préliminaire et non *a priori*.

Ensuite, les données récoltées auraient servi à étudier les relations entre les méthodes de cultures, la composition des peuplements et les propriétés du sol dans ces différentes catégories et à les comparer entre elles.

Pour les raisons évoquées au point 6.2, il n'a pas été possible de réaliser cette méthodologie. Le spectre de la recherche a été réduit aux productions de cacao et les producteurs ont été sélectionnés sur base des connaissances déjà accumulées par les techniciens de terrain. L'objectif, après le terrain, est devenu d'établir une classification des producteurs à partir des données récoltées, essentiellement d'ordre écologique, et de comparer celle-ci ainsi que les caractéristiques des groupes à la classification finalement obtenue au terme de la phase 1 et à la littérature.

7. Sélection des exploitations

7.1. Choix

Compte tenu des difficultés rencontrées, il n'a pas été possible de sélectionner les exploitations en fonction des classes déterminées de producteurs. De plus, il n'a pas été possible de visiter autant d'exploitations qu'espéré. Le choix des exploitations n'a donc pas pu être aussi rigoureux statistiquement que voulu mais il a tout de même été fait avec attention.

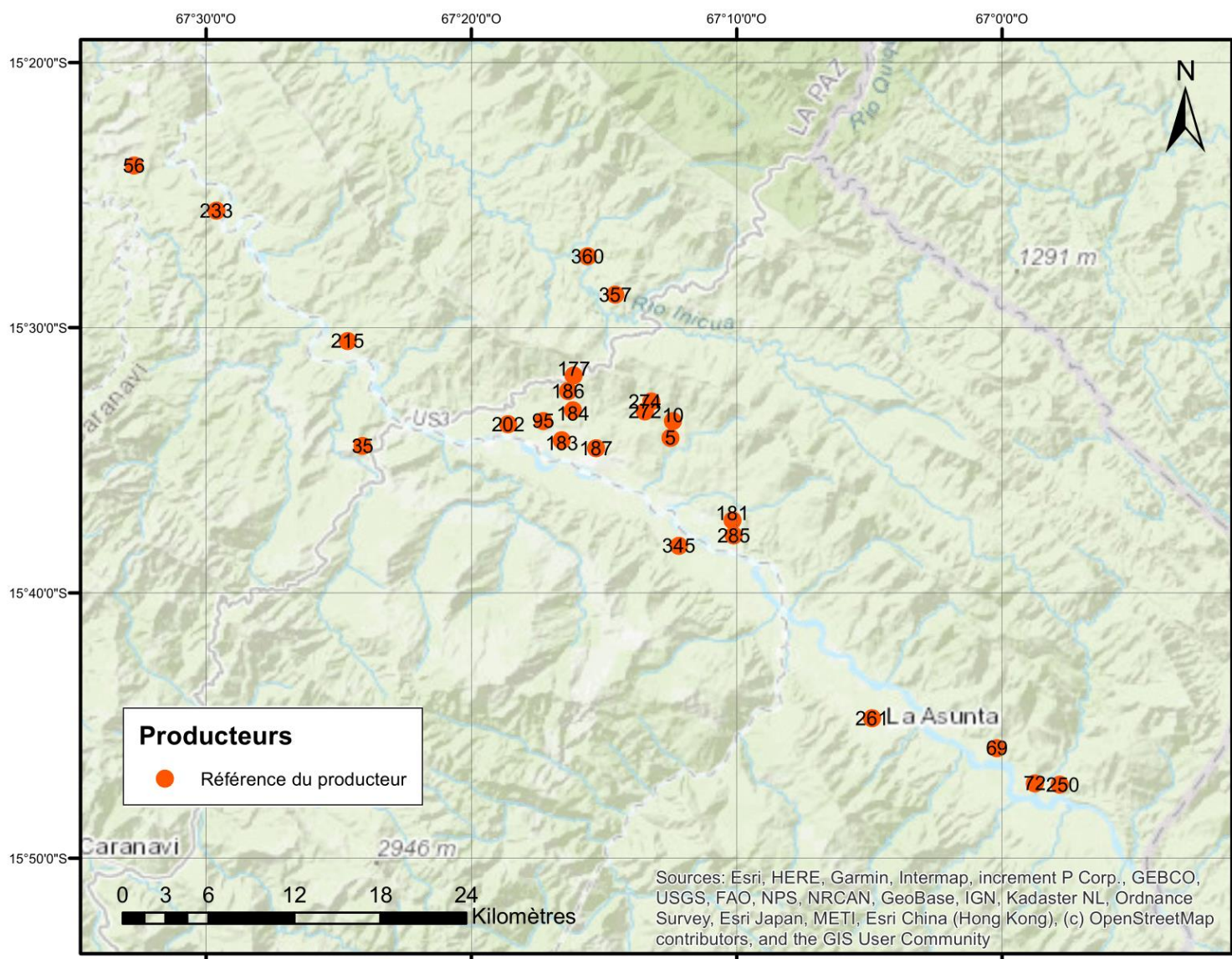
Dans un premier temps, les exploitations ont été choisies par l'Ir. Eucebio Perez, en cherchant à visiter des exploitations connues comme représentatives d'un modèle de production. Ces modèles présumés sont : la monoculture, les systèmes agroforestiers simple, avec quelques arbres forestiers, et les systèmes agroforestiers complets, avec une diversité importante d'arbres forestiers et de plantes agricoles.

Dans un second temps, d'autres exploitations ont été sélectionnées selon les informations contenues dans la base de données de l'enquête préliminaire. Les critères de choix étaient les suivants ; la priorité était donnée aux exploitations ne possédant qu'une seule parcelle d'au moins 1 hectare. Ensuite, les producteurs ont été choisis s'ils possédaient une caractéristique qui les différenciaient des exploitations déjà visitées, telle que l'absence d'arbres forestier, absence de certification biologique, nombre élevé d'espèces agricoles... Une fois un producteur sélectionné, les caractéristiques des exploitations environnantes sont analysées afin d'en déterminer d'autres pertinentes à proximité et avoir des alternatives si le premier producteur n'est pas disponible.

7.2. Exploitations sélectionnées

En tout, 25 exploitations ont été visitées, dont une a servi comme blanco. Les 24 exploitations dont les données sont prises en compte pour la réalisation de ce mémoire sont reprises sur la carte ci-dessous (Figure 7). Ces 24 producteurs seront nommés « producteurs sélectionnés » dans ce travail.

Localisation des producteurs rencontrés



Auteur: Nicolas Bourgois

Date: 05-12-21

Système de coordonnées: GCS WGS 1984

Datum: WGS 1984

Unités: Degree

Figure 7 : Carte de localisation des producteurs rencontrés.

8. Plan expérimental

8.1. Détermination des variables d'intérêt

Les variables d'intérêt ont été définies par le promoteur de ce mémoire, le Pr. Pierre Bertin. Elles concernent la géographie, la végétation agricole et forestière et pédologique. Elles sont reprises en détail au point 0.

8.2. Entretien avec le producteur

Lors de l'arrivée chez le producteur et après une présentation des objectifs du travail, les informations générales sur la plantation (superficie, âge, pratiques et techniques utilisées...) sont récoltées. Ensuite, Louise Verheyen, mémorante en anthropologie à la KULeuven, poursuit l'entretien avec le producteur en approfondissant les questions sociologiques et pendant ce temps, les données agronomiques sont prises.

8.3. Détermination des limites de la plantation et des parcelles

Les limites de la plantation sont définies avec le producteur. Si une forte hétérogénéité est constatée entre différentes zones, alors celles-ci sont considérées comme deux parcelles différentes.

8.4. Détermination des placettes

Il a été décidé de réaliser en général trois placettes de 20m*20m à différents endroits de la parcelle. Dans certains cas, si la plantation présente des variations topographiques, si elle est séparée par un cours d'eau ou encore si elle est d'une superficie importante, le nombre de placettes est porté à 4 ou 5 afin d'améliorer la représentativité.

9. Collection des données

9.1. Données géographiques

9.1.1. Points GPS

Les points GPS ont été relevés à l'aide d'un GPS Garmin Etrex 22X, dans le système de référence UTM, utilisé sur place. Chaque coin de la plantation a été relevé ainsi que chaque coin des placettes.

9.1.2. Altitude

L'altitude a été relevée pour chaque point GPS, toujours à l'aide du GPS Garmin. Ensuite une altitude moyenne a été calculée pour chaque placette.

9.1.3. Topographie

L'amplitude de la pente et son orientation ont été estimées à l'aide d'une application « boussole »³.

9.2. Cacaoyer

9.2.1. Age

L'âge des cacaoyers a été donné par le producteur. Il a été considéré comme égal pour tous les individus d'une même plantation. Il correspond à l'âge depuis la plantation de la parcelle. Il arrive que certains producteurs fassent une greffe ou une surgreffe pour changer de cultivars. Dans ce cas, l'âge donné correspond à l'âge du porte-greffe.

9.2.2. Nombre

Le nombre de cacaoyers présents dans la placette a été comptabilisé en ne prenant en compte que les plants productifs. Ont été exclus les arbres trop jeunes pour porter des fruits et les arbres en mauvais état.

9.2.3. Circonférence

La circonférence de chaque cacaoyer de la placette a été mesurée à l'aide d'un mètre à ruban. Compte tenu de l'architecture particulière du cacaoyer, il a été décidé de prendre la mesure de la circonférence à la base de la couronne plutôt qu'à une certaine hauteur du sol. En effet, si le cacaoyer a été greffé, la couronne ne se trouve qu'à une trentaine de centimètres du sol alors que celle d'un plan issu d'un semis peut être située à plus d'un mètre de haut.

9.2.4. Variétés

Les variétés de cacaoyers présentes dans la placette ont été déterminées sur place par le producteur et/ou par Ir. Eucebio Perez. Même si les noms des différentes variétés ont été relevés, c'est surtout le nombre de variétés ainsi que la distinction entre variétés sélectionnées greffées et plants hybrides issus de semis qui nous intéresse.

³ <https://play.google.com/store/apps/details?id=app.melon.icompass&hl=fr>

9.3. Arbres forestiers

Par arbres forestiers, ont été considérées toutes plantes ligneuses dont la cime est supérieure à celle des cacaoyers et n'ayant pas de but de production fruitière. Leur rôle est la production de bois d'œuvre, d'ombrage ou même parfois médicinal. Chaque arbre présent dans la placette a été identifié et mesuré par sa circonférence et le diamètre de sa couronne.

9.3.1. Espèces

Les espèces présentes (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ont été déterminées par I. Eucebio Pérez selon leur nom vernaculaire. Les noms scientifiques ont ensuite été déterminés (López & Somarriba, 2005), (World Agroforestry Centre et al., 2018), (Killeen et al., 1993), (Wilkes et al., 2007), (Villegas Nava, 2012), (Toledo, 2005).

9.3.2. Circonférence

La circonférence a été mesurée à l'aide d'un mètre ruban, à une hauteur de 1,5m du sol.

9.3.3. Diamètre de la couronne

Le diamètre de la couronne a été estimé au pas, en faisant la somme de deux rayons perpendiculaires.

9.4. Plantes agricoles

Dans cette catégorie, sont considérées les plantes, autres que le cacaoyer, ayant un objectif de production régulier et à court terme. Cette catégorie reprend donc typiquement les arbres fruitiers mais également des espèces fruitières non-ligneuses telles que les bananiers (*Musa sp.*) et les ananas (*Ananas comosus*), ou encore des plantes médicinales, épices... Chaque espèce présente dans la placette a été relevée, ainsi que le nombre d'individus la représentant. Les espèces ont été identifiées par leur nom vernaculaire, le nom scientifique a été déterminé par après (López & Somarriba, 2005), (World Agroforestry Centre et al., 2018), (Killeen et al., 1993), (Wilkes et al., 2007), (Villegas Nava, 2012), (Toledo, 2005).

9.5. Strate arbustive et herbacée

Les strates arbustives et herbacées ont été estimées par le pourcentage de la surface au sol qu'elles recouvraient respectivement.

9.6. Ombrage

Le taux d'ombrage a été mesuré grâce à une application smartphone, « HabitApp⁴ ». La mesure a été faite en cinq points de la placette et à une hauteur de 1,5m du sol. Ensuite, une moyenne a été calculée.

9.6.1. HabitApp

« HabitApp » est une application smartphone développée en 2014 par « Scrufster ». Elle fonctionne sur base de la prise de photos de la canopée à partir du sol. Les images sont

⁴ https://play.google.com/store/apps/details?id=com.scrufster.habitapp&hl=en_US&gl=US

enregistrées en noir et blanc, en réglant manuellement les contrastes de manière telle que la végétation apparaisse noir et le ciel blanc. L'application calcule ensuite la proportion de noir de l'image, ce qui correspond au pourcentage du sol ombragé (O'Loughlin et al., 2020).

9.7. Litière

L'épaisseur de la litière a été mesurée à cinq endroits différents dans la placette grâce à un mètre enrouleur. Une moyenne par placette a ensuite été calculée.

9.8. Prélèvement de sol

Des échantillons de sol ont été prélevés pour chaque placette. Pour cela, en cinq points différents, un trou est creusé. Ensuite, à l'aide d'une bêche, une tranche de sol du premier horizon (0-30cm) est prélevée et mise dans un seau. Les cinq prélèvements sont homogénéisés et un volume d'environ 1L est mis dans un sac référencé.

Au retour du terrain, les prélèvements sont mis à sécher à l'air libre et une fois secs, tamisés à 5mm. Environ 50g de sol par placette ont pu être ramenés en Belgique.

10. Analyse de sol

10.1. Pré-traitement

Les échantillons ont été broyés et retamisés à 2mm. Une mesure de la matière sèche a été faite en mesurant la variation de poids avant et après un passage à l'étuve à 105°C pendant 24h (Leveau, 2016), (ISO, 1993).

10.2. $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$

Une mesure du $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ a été réalisée sur place, mais en absence de certitude sur la qualité de l'eau distillée, il a été décidé de refaire cette mesure au laboratoire en Belgique. Et de fait, des différences notables ont été observées entre les résultats obtenus dans les deux situations. Il a été décidé de prendre en compte uniquement les résultats d'analyses obtenues au laboratoire.

Pour cela, un pH-mètre à électrode a été utilisé selon la méthode de McLean dans une solution au rapport eau distillée-sol de 5:1 (Leveau, 2016). Une mesure de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ a été prise pour chaque placette.

10.3. Azote total et carbone total

Pour réaliser le dosage de l'azote et du carbone total, une petite quantité de sol a été passée au broyeur afin d'obtenir un échantillon très fin et homogène. Une fois broyé, 20 à 25mg de sol sont placés dans une capsule d'étain et l'ensemble est pesé avec une précision de 0,01mg.

La mesure a été réalisée par l'analyseur élémentaire VARIO EL Cube d'Elementar®. Celui-ci fonctionne sur le principe d'une combustion catalytique et donc sur l'oxydation du C en CO_2 et du N en NO_x . Les NO_x sont ensuite réduits en N_2 . Le CO_2 et le N_2 obtenus sont envoyés vers un détecteur thermo-conductif pour être dosés grâce à la différence de conductivité thermique entre un gaz de référence (He) et un gaz composé d'He et des analytes (C. Givron, communication personnelle, 2021).

Les résultats de l'analyse sont donnés en pourcentage massique d'N ou de C présent dans le sol sec. Ce résultat peut donc aussi être exprimé par gramme de C ou d'N pour 100g de sol sec.

Grâce à ces résultats, le rapport C/N peut être calculé. Ce rapport sert d'indicateur de la dégradation de la matière organique du sol et donc de l'activité biologique de celui-ci. Si le rapport est élevé (>10), c'est-à-dire si la quantité de carbone est beaucoup plus élevée que la quantité d'azote, cela signifie que de la MO s'accumule et est dégradée plus lentement qu'elle ne se forme. Un dosage a été réalisé pour chacune des placettes.

11. Analyse des données

Les logiciels utilisés sont R et Excel. Les méthodes d'inférence statistique employées sont décrites ci-dessous en suivant le formalisme du cours de modélisation et d'exploration de données multivariées LBIRA2110 de Xavier Draye et Bernadette Govaerts (Draye & Govaerts, 2020). Un soutien méthodologique a été apporté par Séverine Guisset du Service de Méthodologie et Calcul Statistique (SMCS) de l'UCLouvain.

11.1. Numérisation et base de données

Dans un premier temps, les données récoltées sur le terrain et notées sur papier sont numérisées afin de les télécharger sur un cloud et ainsi les sécuriser. Ensuite, différentes bases de données sont constituées ; une première pour les cacaoyers, une seconde pour les arbres forestiers et une troisième pour les arbres fruitiers.

11.1.1. Base de données sur les cacaoyers

Cette base de données reprend comme entrée chaque cacaoyer. À chaque ligne correspond donc un individu et sont repris sa circonférence ainsi que les autres données générales de la placette. Les variables générales constituant cette base de données sont reprises plus bas (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La variable spécifique à cette base de données est détaillée dans le tableau ci-dessous (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 1 : Variable spécifique à la base de données sur les cacaoyers.

Nom	Unité	Code	Type	Description
Circonférence de chaque cacaoyer	[cm]	Cacao_circ	Quantitatif	Circonférence du tronc mesuré en dessous de la couronne.

11.1.2. Base de données sur les arbres forestiers

Cette base de données reprend comme entrée chaque arbre forestier. À chaque ligne correspond un individu et sont repris son essence, la circonférence de son tronc, le diamètre de sa couronne ainsi que les autres données générales de la placette. Les variables constituant cette base de données sont reprises ci-dessous (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et les variables générales sont détaillées plus bas (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 2 : Variables spécifique à la base de données sur les arbres forestiers.

Nom	Unité	Code	Type	Description
Essence	[-]	Arbre_nom_esp	Qualitatif	Nom vernaculaire de l'essence de l'arbre.
Circonférence de l'arbre	[cm]	Arbre_circ	Quantitatif	Circonférence de l'arbre, mesurée à 1,5m du sol.

Diamètre du tronc	[cm]	Arbre_diam	Quantitatif	Diamètre du tronc, calculé à partir de la circonférence.
Couronne de l'arbre	[m]	Arbre_cour	Quantitatif	Diamètre de la couronne de l'arbre.

11.1.3. Base de données sur les plantes agricoles

Cette base de données reprend comme entrée chaque espèce de plantes agricole. À chaque ligne correspond une espèce et sont repris le nom de l'espèce, le nombre d'individus de cette espèce présents dans la placette ainsi que les autres données générales de la placette. Les variables constituant cette base de données sont reprises ci-dessous (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et les données sont détaillées au point suivant (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 3 : Variables spécifiques à la base de données sur les plantes agricoles.

Nom	Unité	Code	Type	Description
Nombre de plantes	[-]	Prod_nombre	Quantitatif	Nombre d'individus fruitiers de la même espèce dans la placette.
Espèce	[cm]	Prod_nom_esp	Qualitatif	Nom vernaculaire de l'espèce fruitière.

11.2. Prétraitement

A partir des données contenues dans les bases de données citées ci-dessus, des moyennes par placette ont pu être calculées, telles que la circonférence moyenne des cacaoyers, le nombre moyen de cacaoyers, le diamètre moyen du tronc et de la couronne des arbres forestiers... L'ensemble de ces données sont reprises ci-dessous (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il a été choisi de travailler à l'échelle de la placette car cela amenait un bon compromis entre une agrégation des données et un niveau de détail suffisant.

Tableau 4 : Variables générales.

Nom	Unité	Code	Type	Description
Ecologie	[-]	Ecologie	Qualitatif	Correspond à l'environnement de la placette, qui se distingue en trois niveaux : plaine, versant et plateau
Altitude	[m]	Altitude	Quantitatif	Altitude moyenne de la placette.
Topographie	[-]	Topographie	Qualitatif	Correspond à la topographie de la placette et se distingue en deux niveaux : plat ou pente.

Pente	[%]	Pente	Quantitatif	Pourcentage de la pente, considéré comme homogène pour toute la placette.
Age du cacaoyer	[an]	Cacao_age	Quantitatif	Age des cacaoyers, considéré comme égal pour tous les individus d'une même placette.
Variétés	[-]	Cacao_variete	Quantitatif	Nombre de variétés différentes présentes dans la placette.
Nombre de cacaoyers	[-]	Cacao_nombre	Quantitatif	Nombre de cacaoyers présents dans la placette.
Circonférence moyenne des cacaoyers	[cm]	Cacao_circmoy	Quantitatif	Moyenne calculée des circonférences des troncs de cacaoyers d'une même placette.
Nombre d'arbres forestiers	[-]	Arbre_nombre	Quantitatif	Nombre d'individus d'arbres forestiers au sein de la placette.
Nombre d'espèces d'arbres forestiers	[-]	Arbre_esp	Quantitatif	Nombre d'espèces différentes d'arbres forestiers présents dans la placette.
Diamètre moyen des arbres forestiers	[cm]	Arbre_diammoy	Quantitatif	Moyenne des diamètres des troncs d'arbres forestiers présents dans la placette, mesurés à 1,5m.
Diamètre moyen des couronnes	[m]	Arbre_courmoy	Quantitatif	Moyenne des diamètres des couronnes des arbres forestiers présents dans la placette.
Nombre de plantes fruitières	[-]	Prod_nombre	Quantitatif	Nombres d'individus à objectifs de production fruitières, autre que le cacao, présents dans la placette.
Nombre d'espèces fruitières	[-]	Prod_esp	Quantitatif	Nombre d'espèce différentes à objectifs de production fruitières, autre que le cacao, présents dans la placette.
Couverture herbacée	[%]	Couv_herb	Quantitatif	Pourcentage estimé de la surface du sol couverte par des plantes herbacées

Surface arbustive	[%]	Arbust_surf	Quantitatif	Pourcentage estimé de la surface du sol couverte de plantes arbustive
Type d'arbustes	[-]	Type	Qualitatif	Rôle donné par le producteur à la surface arbustives : absence, adventices, régénération des arbres forestiers.
Ombrage	[%]	Ombrage	Quantitatif	Moyenne du pourcentage d'ombrage de la placette, calculée avec HabitApp.
Litière	[cm]	Litiere	Quantitatif	Moyenne de l'épaisseur de la litière de la placette.
pH	[-]	pH	Quantitatif	pH de la placette.
% C	[%]	c_sec	Quantitatif	Pourcentage de carbone total de la placette.
C/N	[-]	Cn_sec	Quantitatif	Rapport carbone/azote.

11.3. Moyenne, médiane, écart-types et normalité des données quantitatives

11.3.1. Description

Les moyennes et écarts-types ont été calculés grâce aux formules suivantes :

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

Avec :

μ = valeur moyenne de la variable

n = Nombre de mesure effectuées pour la variable

x_i = valeur de la variable, pour la mesure i

σ = écart-type à la moyenne

Le test de Shapiro-Wilk permet de déterminer si les données suivent une distribution normale pour la variable (Husson, 2018).

11.3.2. Application

Pour chaque variable quantitative, la moyenne, l'écart-type et la médiane ont été calculées sur l'ensemble des données. Ensuite, un test de Shapiro-Wilk permet de déterminer si la distribution de l'échantillon suit une loi normale ou pas. Les fonctions R utilisées sont les fonctions « mean », « sd », « median » ainsi que la fonction « shapiro.test » du package « stats » (DataCamp, 2021a).

11.4. Coefficient de corrélation et test de significativité

La matrice de corrélations des variables et la matrice de test de significativité ont été calculées grâce à la fonction R « rcorr » du package « Hmisc » (DataCamp, 2021b). Cette fonction a appliqué la méthode de Spearman car les données, en majorité, ne suivent pas une distribution normale (MacFarland & Yates, 2021).

11.5. Analyses en Composantes Principales

11.5.1. Description

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode d'analyse multivariée qui a pour but de mettre en évidence les corrélations entre différentes variables et avoir une vision globale de l'information contenue dans les données, ainsi qu'un premier aperçu des interactions entre les variables (Draye & Govaerts, 2020). Pour cela, les variables sont combinées linéairement afin d'en créer de nouvelles, les composantes principales (CP). Celles-ci représentent l'information contenue dans les corrélations entre variables. Cela permet de réduire le nombre de dimensions du système et donc de faciliter sa représentation et son interprétation.

11.5.2. Application

Les ACP ont été réalisées grâce au package « FactoMineR » sur R (Husson et al., 2016). Elles ont été réalisées sur l'ensemble des données quantitatives des placettes afin de faire ressortir les tendances globales des interactions entre variables. L'objectif est également de déterminer quelles variables n'apportent aucune information significative au modèle et peuvent être supprimées. D'autre part, les composantes principales créées lors de l'ACP vont servir de base pour le clustering.

Lors de la réalisation de l'ACP, le nombre de composantes principales retenues est déterminé à partir des valeurs propres, en fonction de leur valeur (>1) et/ou de la présence d'un coude dans le « scree plot ». Il est également choisi en fonction du but de l'ACP, c'est-à-dire si l'objectif est d'avoir une première visualisation des données ou de servir d'input pour le clustering.

Dans cette analyse, les résultats des valeurs propres et du « scree plot » ne donnant pas le même nombre de dimensions idéal, il a été choisi de faire deux ACP différentes ; la première ayant le nombre de CP suggéré le plus élevé afin de garder un maximum d'informations dans le but d'être utilisée pour le clustering. La deuxième ayant le nombre de dimensions le plus petit suggéré afin d'avoir la représentation des liens entre variables la plus visuelle et explicite possible.

11.6. Clustering

Le clustering a été réalisé grâce à la fonction « HCPC » du package « FactoMineR » et au package « factoextra » sur R (Draye & Govaerts, 2020), (Husson et al., 2016).

11.6.1.Description

La fonction « HCPC » permet de réaliser une « Classification Hiérarchique sur Composantes Principales » (Husson et al., 2017). L'intérêt de se baser sur les composantes principales créées lors de l'ACP est que cela permet de réduire le « bruit » lorsque l'on a un jeu important de variables et de données.

La fonction a été codée pour fonctionner en trois étapes ; la première consiste à une classification ascendante hiérarchique basée sur la méthode de Ward. Celle-ci cherche à minimiser l'inertie intra-groupe et à maximiser l'inertie intergroupe⁵. La seconde étape permet de choisir le nombre idéal de clusters. La fonction recommande elle-même le nombre de clusters en se basant sur l'inertie⁶. Pour finir, en se basant sur le nombre de clusters choisis, plusieurs itérations d'un « *k-means* » sont faites afin de consolider le partitionnement.

11.6.2.Application

Le clustering a été réalisé sur le résultat de l'ACP. Il permet de regrouper les placettes partageants le plus de caractéristiques entre-elles. La fonction « HCPC » permet également de connaître les variables qui, pour chaque groupe, ont été les plus déterminantes dans leur formation.

11.7. Moyennes, écarts-types et médiane des groupes

11.7.1.Description

Pour chaque variable, la moyenne, l'écart-type et la médiane de chaque groupe ont été calculées de la même manière qu'au point 11.3.

11.8. Analyse de la variance et comparaison des moyennes

L'objectif de l'analyse des variances est de pouvoir déterminer et comparer l'existence des différences d'une même variable entre les groupes obtenus par le clustering. Les données n'étant pas paramétriques, il n'est pas possible d'utiliser les méthodes habituelles telles que les ANOVA ou les comparaisons de moyennes à l'aide de tests de Tukey. De plus, comme les variables ont servies à l'élaboration des composantes principales, elles-mêmes utilisées pour le clustering, la significativité des différences entre les groupes ne peut être qu'illustrative.

Ces analyses sont réalisées grâce à la fonction R « *dunn.test* » du package « *dunn.test* ». Cette fonction réalise à la fois un test de Kruskal-Wallis et un test de Dunn (Dinno, 2017).

⁵ « L'inertie d'un groupe d'objets correspond à la moyenne des distances au carré des points à leur centre de gravité » (Draye & Govaerts, 2020).

⁶ « Elles suggèrent une division en Q clusters lorsque l'augmentation de l'inertie entre $Q - 1$ et les clusters Q est beaucoup plus importante que celle entre les clusters Q et $Q + 1$. » (Husson et al., 2017).

11.8.1. Kruskal-Wallis

Kruskal-Wallis est une méthode alternative à l'ANOVA 1 pour des données non-paramétriques. Elle permet de vérifier s'il existe une différence significative entre les moyennes des différents groupes pour une même variable.

11.8.2. Test de Dunn.

Ce test est une alternative non-paramétrique au test de Tukey. L'objectif est de comparer les moyennes des groupes deux à deux afin de déterminer quels groupes sont significativement différents par rapport aux autres. A la différence du test de Wilcoxon, le test de Dunn tient compte du classement utilisé par le test de Kruskal-Wallis et fait des ajustements pour les exæquos (Datanovia, 2018).

11.9. Comparaison aux données de l'enquête préliminaire

11.9.1. Données agroécologiques comparées

Les données de l'enquête préliminaire ont été traitées par le Pr. Pierre Bertin (Bertin, 2021b). Parmi plus de 100 variables écologiques, économiques et sociales, celles qui sont directement liées à l'agroécologie ont été sélectionnées. Ensuite elles ont été regroupées sur base logique en variables agroécologiques synthétiques (VAS). Toutes ces variables sont quantitatives et leur valeur liée au degré d'adhésion à l'AE. Ces variables sont :

- Le nombre de variétés de cacaoyers
- Le nombre d'espèces fruitières, médicinales et de palmiers associés
- Le nombre d'espèces forestières associées
- Les pratiques agroécologiques à l'installation
- La conduite annuelle du cacao
- Le nombre d'étapes de transformation du cacao
- La certification
- Le nombre de parcelles sans cacaoyers
- Les pratiques AE dans les parcelles sans cacao
- Le nombre d'espèces animales
- Le nombre d'activités agricoles générant un revenu
- La taille de la sphère de transmission

Ces 12 variables ont servi à la réalisation d'un clustering. Finalement, elles ont été synthétisées en une variable unique, l'indice agroécologique (IAE), en donnant le même poids à chacune des 12 variables et en les sommant.

Onze des VAS sont utilisées pour la comparaison (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Contenant des valeurs manquantes pour l'un des 24 producteurs, la variable « nombre de parcelles sans cacaoyers » n'a pas été incluse dans l'analyse.

Dans cette enquête préliminaire, les informations sont contenues à l'échelle du producteur et de son exploitation entière. Or, dans ce mémoire, c'est au niveau de la placette expérimentale que les analyses ont eu lieu, notamment pour le clustering. Afin de

pouvoir fusionner les données du rapport avec celles des groupes, il a été décidé de continuer à travailler au niveau de la placette et d'ajouter, pour chacune d'entre-elles, les données de son producteur. Il aurait été compliqué de travailler au niveau du producteur car, pour certains d'entre eux, les placettes associées se sont retrouvées dans deux clusters différents au terme de l'analyse.

Tableau 5 : Variables agroécologiques synthétiques comparées.

Nom	Unité	Code	Type	Description
Cluster	[-]	cluster	Qualitatif	Numéro du groupe établi par le clustering
Nombre de variétés	[-]	numero_var	Quantitatif	Nombre de variétés de cacaoyers présent sur l'exploitation
Espèces fuitières, médicinales et de palmiers associées	[-]	especies_frut	Quantitatif	Nombre d'espèces fruitières, médicinales et palmiers associés aux cacaoyers
Espèces forestières associées	[-]	especies_forest	Quantitatif	Nombre d'espèces forestières associées aux cacaoyers
Pratiques agroécologiques à l'installation	[-]	praticas_ae	Quantitatif	Somme des pratiques agroécologiques réalisées à l'installation
Conduite annuelle du cacao	[-]	manejo	Quantitatif	Somme des pratiques AE réalisées dans la conduite du cacaoyer
Transformation du cacao	[-]	proces	Quantitatif	Nombre d'étapes de transformation des fèves de cacao avant la vente
Certification	[-]	capa	Quantitatif	Nombre de certifications détenues par le producteur
Parcelles sans cacao	[-]	parcelas_sin_cacao	Quantitatif	Nombre de parcelles du producteur ne contenant pas de cacaoyers
Espèces animales	[-]	Especies_ani	Quantitatif	Nombre d'espèces animales élevées par le producteur
Activités agricoles générant un revenu	[-]	actividades_agricolas	Quantitatif	Nombre d'activités agricoles générant un revenu sur l'exploitation

Sphère de transmission	[-]	transmi	Quantitatif	Somme des sphères sociales avec lesquelles s'échange des connaissances
Indice agroécologique	[-]	IAE	Quantitatif	Indice Agroécologique

11.9.2. Analyse Factorielle de Données Mixtes et corrélation

De manière similaire à ce qui a été fait précédemment, les données de l'enquête préliminaires portant sur les 24 agriculteurs sélectionnés ont d'abord été traitées par une analyse factorielle. Le but est d'obtenir un premier aperçu des relations entre variables ainsi que de leurs potentielles différences selon le groupe auquel appartient les placettes.

Pour cela, il a fallu ajouter la variable catégorielle « cluster ». Du fait d'avoir à la fois des données quantitatives et qualitatives, il n'est pas possible de faire une ACP comme au point 11.5. L'Analyse Factorielle de Données Mixtes (AFDM) permet d'inclure ces deux types de données dans l'analyse et de les représenter dans le même système de composantes principales. De ce fait, on peut analyser les variables quantitatives de manière similaire à une ACP, grâce aux cercles de corrélation notamment, et situer les groupes obtenus par la classification sur les CP pour voir à quelles variables quantitatives ils sont liés. L'AFDM a été effectuée grâce à la fonction R « FAMD » du package « FactoMineR » (Husson, 2018).

Ensuite, une matrice de corrélation est calculée en reprenant les variables des inventaires, les VAS et l'IAE. L'intérêt de reprendre toutes ces variables au sein d'une même matrice de corrélation est triple ; le premier est, tout d'abord, de voir les corrélations existantes entre les VAS. Le second est de voir s'il existe des liens entre variables de l'inventaire et VAS, tout en gardant à l'esprit que les variables de l'inventaire ont été mesurées dans des placettes de 20m*20m alors que les données des VAS ont été données oralement par le producteur et portent sur l'ensemble de son exploitation. Le troisième intérêt porte sur l'IAE. D'une part la matrice de corrélation met en évidence l'influence des différentes VAS, et donc leur poids, dans la valeur de l'indice. Et d'autre part, elle montre des corrélations positives ou négatives entre IAE et variables inventoriées.

11.9.3. Moyennes, écart-types, médianes et différences entre clusters

Par après, de la même manière qu'au point 11.7, les valeurs de la moyenne, l'écart-type et la médiane sont calculées pour chacune des variables dans chacun des groupes. Ces variables n'ayant pas servi à la conception des groupes, les tests de Kruskal-Wallis et de Dunn peuvent être appliqués et interprétés sans crainte quant à leur rigueur statistique.

11.9.4. Variables économiques et sociologiques

Pour finir, les groupes définis par le clustering ont été comparés sur 16 variables économiques et sociologiques provenant également de l'enquête préliminaire. Elles ont été choisies parmi de nombreuses autres variables de la phase 1 en fonction de leur

pertinence présumée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), (Bertin, 2021b). Leurs moyennes, écart-types et médianes ont été calculés similairement au point 11.7. Ensuite, les différences entre groupes ont été déterminées par les tests de Kruskal-Wallis et de Dunn.

Tableau 6 : Variables économiques et sociologiques comparées.

Nom	Unité	Code	Type	Description
Cluster	[-]	cluster	Qualitatif	Numéro du groupe établi par le clustering
Surface de cacaoyers	[ha]	area_cacao	Quantitatif	Surface de cacaoyers
Age moyen des cacaoyers	[an]	edad_cacao	Quantitatif	Age des cacaoyers
Vente de cacao	[ha]	area_chaco	Quantitatif	Revenu de la vente
Surface totale de l'exploitation	[Bol]	venta	Quantitatif	Surface totale de l'exploitation
Main d'œuvre	[ind]	mano_obra	Quantitatif	Main d'œuvre totale disponible sur l'exploitation
Équipement motorisé	[-]	motor	Quantitatif	Nombre d'outils motorisés
Véhicules	[-]	vehiculos	Quantitatif	Nombre de véhicules
Distance au marché principal	[min]	dist_merc	Quantitatif	Distance jusqu'au marché le plus proche
Distance au lieu de livraison	[min]	dist_livre	Quantitatif	Temps de trajet jusqu'au lieu de livraison
Appui d'El Ceibo/AOPEB	[-]	el_ceibo	Catégoriel	Appui d'une organisation (El Ceibo, AOPEB) (0=non,1=oui)
Producteur écologique	[-]	prod_eco	Catégoriel	Se considère comme écologique (0 : non, 1 : partiellement, 2 : oui)
Producteur en SAF	[-]	prod_SAF	Catégoriel	Se considère en SAF (0 : non, 1 : partiellement, 2 : oui)
Perception de la production en SAF	[-]	perc_SAF	Quantitatif	Somme des bienfaits présumés des SAF par le producteur

Perception de la production écologique	[-]	perc_eco	Quantitatif	Somme des bienfaits présumés de l'écologie par le producteur
Surface cacaoyers sur la surface totale	[-]	cacao_chaco	Quantitatif	Rapport de la surface de cacao sur la surface globale de l'exploitation
Vente par hectare de cacaoyers	[Bol/ha]	venta_area	Quantitatif	Rapport de la surface de cacao sur la surface globale de l'exploitation

Résultats

12. Analyse descriptive des variables

La moyenne, la médiane et l'écart-type de chaque variable ont été calculés sur l'ensemble des données (N = 80) (Tableau 7). La normalité a été testée par un test de Shapiro-Wilk. Seules deux variables, l'ombrage et la litière, suivent une distribution selon la loi normale.

Tableau 7 : Moyenne, médiane, écart-types et test de normalité de chaque variable.

Variable	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Normalité ⁷
Altitude (m)	514,86	±93,95	497,88	Non-normale
Pente (%)	8,11	±9,76	3,5	Non-normale
Age des cacaoyers (an)	21,19	±14,07	18	Non-normale
Variétés de cacaoyers (var/400m²)	2,58	±1,73	2	Non-normale
Circonférence des cacaoyers (cm)	38,85	±11,57	38,16	Non-normale
Nombre de cacaoyers (ind/400m²)	25,56	±8,26	25	Non-normale
Nombre d'arbres forestiers (ind/400m²)	7,25	±13,19	3	Non-normale
Nombre d'espèces d'arbres forestiers (esp/m²)	3,49	±4,11	2	Non-normale
Diamètre des troncs d'arbres forestiers (cm)	30,13	±15,69	27,13	Non-normale
Diamètre des couronnes d'arbres forestiers (m)	9,37	±6,99	7,38	Non-normale
Nombre de plantes agricoles (ind/400m²)	9,83	±12,59	6,5	Non-normale
Nombre d'espèces de plantes	2,79	±2,07	3	Non-normale

⁷ Evaluée via test de Shapiro-Wilk, $\alpha = 0.05$

agricoles (esp/400m²)				
Couverture herbacée (%)	48,88	±25,52	50	Non-normale
Surface arbustive (%)	8,13	±14,26	2,5	Non-normale
Ombrage (%)	49,97	±20,45	47,6	Normale
Litière (cm)	4,94	±1,70	4,9	Normale
pH (-)	6,36	±0,81	6,22	Non-normale
Taux de C (%)	1,52	±0,66	1,45	Non-normale
Rapport C/N (-)	9,04	±1,03	8,93	Non-normale

13. Analyse en Composantes Principales

13.1. Valeurs propres

Les valeurs propres illustrent la part de la variabilité du système représentée par chacune des composantes principales.

Pour cette ACP (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), les dimensions 1, 2 et 3 représentent respectivement 23,06%, 15,77% et 9,80% de la variabilité. À elles trois, elles totalisent donc 48,60% de la variabilité du système. On remarque également qu'il faut 19 composantes pour expliquer la totalité de la variabilité.

Tableau 8 : Valeurs propres et pourcentage de la variabilité expliqué par les composantes principales de l'ACP générale.

	Valeurs propres	Pourcentage de la variabilité expliqué	Pourcentage cumulé
Dim.1	4,38	23,06	23,06
Dim.2	3,00	15,77	38,80
Dim.3	1,86	9,80	48,60
Dim.4	1,73	9,10	57,71
Dim.5	1,31	6,92	64,63
Dim.6	1,10	5,80	70,42
Dim.7	0,90	4,75	75,16
Dim.8	0,89	4,69	79,86
Dim.9	0,66	3,48	83,34
Dim.10	0,62	3,27	86,61
Dim.11	0,55	2,88	89,49
Dim.12	0,47	2,45	91,94
Dim.13	0,37	1,95	93,86
Dim.14	0,28	1,47	95,35
Dim.15	0,27	1,45	95,35
Dim.16	0,21	1,10	97,85
Dim.17	0,14	0,76	98,61
Dim.18	0,14	0,71	99,32
Dim.19	0,12	0,68	100

13.1.1.Choix du nombre de composantes principales

Le choix du nombre de composantes principales (CP) retenues pour l'ACP dépend des valeurs propres (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et de l'évolution de celles-ci d'une dimension à l'autre (Figure 8). Les résultats donnent deux choix. En se basant sur les valeurs propres (VP), on retiendrait 6 dimensions car la valeur de la Dim. 6 est la dernière dimension qui soit supérieure à 1. En se basant sur le « Scree plot » (Figure 8), on observe un coude à la Dim. 3 et on choisirait donc 3 dimensions.

Comme les ACP servent à deux objectifs différents dans ce travail, à savoir d'une part la caractérisation des variables et de leurs relations, et d'autre part de données d'entrée pour le clustering, il a été choisi d'en réaliser deux différentes. La première, qui servira à l'illustrations des liens entre variables et CP, contiendra 3 dimensions. Elle constitue une simplification plus forte mais gagnera en lisibilité. La deuxième ACP, qui servira à réaliser le clustering, sera de 6 dimensions, gardant de ce fait un maximum d'informations.

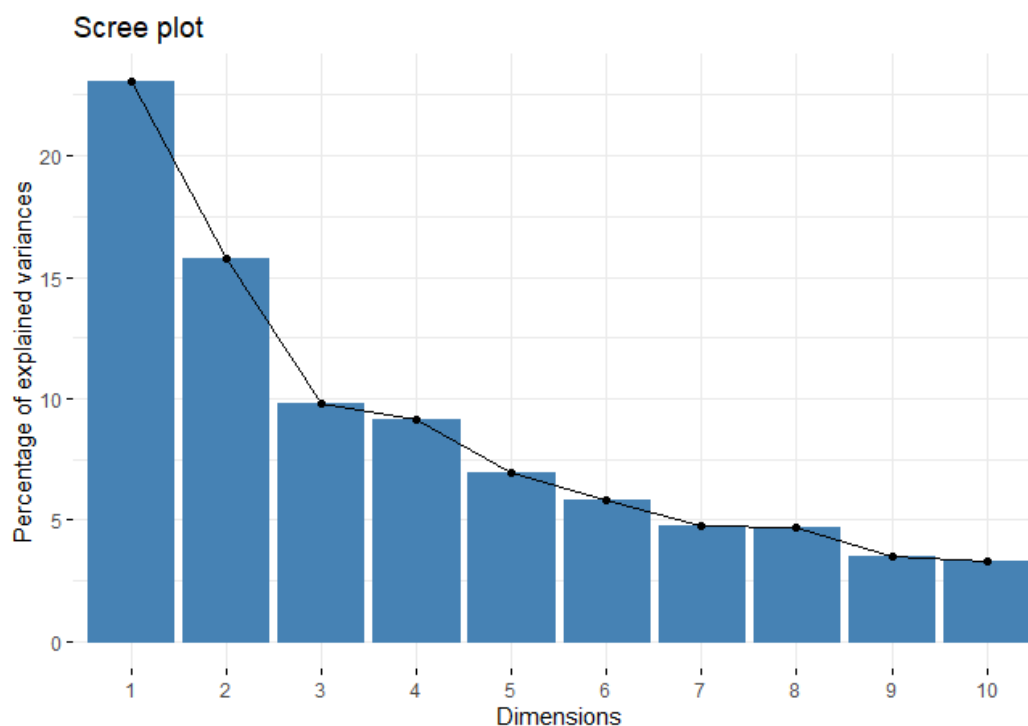


Figure 8 : Scree plot des valeurs propres

13.2. ACP à 3 dimensions : liens entre variables et CP

Dans un premier temps, afin de simplifier davantage l'ACP à 3 dimensions, les variables ne contribuant pour au moins 5% à aucune des trois premières dimensions sont supprimées des données de l'ACP (Tableau 9). Il s'agit du nombre de cacaoyers, du taux de C et du C/N. Une fois ces variables supprimées des données d'entrée, l'ACP est recalculée. Cette simplification permet aux trois premières CP d'expliquer une part plus grande de la variabilité que lors de la première ACP au point 13.1. En effet, la Dim.1, 2 et 3 en représentent 27,49, 18,86% et 10,94%, respectivement (Tableau 10). Cumulées, les trois premières CP expliquent 57,29 % de la variabilité des données contre 48,60% précédemment et il faut 15 CP pour représenter 100% de la variabilité contre 19 CP dans la première ACP.

Tableau 9 : Contributions des variables aux CP.

	Dim.1 (%)	Dim.2 (%)	Dim.3 (%)	Dim4. (%)	Dim.5 (%)	Dim.6 (%)
altitude	0,41	6,37	13,78	0,81	0,01	18,68
pente	2,13	17,41	0,01	2,65	1,72	0,01

cacao_age	0,31	0,61	16,71	23,83	1,99	4,36
cacao_circmoy	1,84	1,71	18,61	6,27	18,41	2,94
cacao_nombre	1,50	0,45	2,44	0,32	24,13	18,03
cacao_variete	4,67	6,32	0,00	1,82	3,34	0,49
arbre_nombre	12,52	0,28	5,19	2,18	1,88	2,70
arbre_esp	17,21	0,41	0,30	1,45	1,64	1,24
arbre_courmoy	3,45	16,86	0,45	0,06	1,54	0,43
arbre_diammoy	2,23	21,35	2,30	0,54	0,43	1,63
prod_esp	14,31	1,66	0,39	1,38	0,58	1,13
prod_nombre	6,51	1,32	5,23	2,22	7,43	2,28
couv_herb	3,54	4,97	16,18	2,10	4,90	2,50
arbust_surf	2,73	7,35	0,92	0,03	8,95	29,20
ombrage	13,35	0,67	0,26	0,04	0,23	7,21
litier	0,24	8,83	5,64	2,27	11,91	2,99
pH	7,08	2,33	5,48	7,36	0,13	0,34
c_sec	2,21	0,06	2,89	23,49	7,31	1,53
cn_sec	3,77	1,04	3,22	21,19	3,46	2,30

Tableau 10 : Valeurs propres de l'ACP simplifiée.

	Valeurs propres	Pourcentage de la variabilité expliqué	Pourcentage cumulé
Dim.1	4,12	27,49	27,49
Dim.2	2,83	18,86	46,35
Dim.3	1,64	10,94	57,29
Dim.4	1,31	8,75	66,04
Dim.5	0,98	6,54	72,58
Dim.6	0,88	5,86	78,44
Dim.7	0,70	4,65	83,09
Dim.8	0,63	4,21	87,30
Dim.9	0,49	3,29	90,59
Dim.10	0,39	2,57	93,16
Dim.11	0,29	1,92	95,08
Dim.12	0,28	1,85	96,92
Dim.13	0,19	1,25	98,18
Dim.14	0,14	1,95	99,12
Dim.15	0,13	0,87	100

13.2.1. Cercles de corrélations

Les cercles de corrélations (Figure 9) permettent une représentation visuelle facilement interprétable des liens existants entre deux ou plusieurs variables. Lorsque des vecteurs sont de grandeurs similaires et forment un angle proche de 0° , cela indique une corrélation positive entre eux. Si l'angle est proche de 180° , alors la corrélation est négative. En revanche, si deux vecteurs sont perpendiculaires, alors les variables sont indépendantes l'une de l'autre.

Dans le premier cercle, reprenant les dimensions 1 et 2 et représentant 46,35% de la variabilité, un groupe de vecteurs se dégage comme étant corrélés positivement entre eux. Ce sont les vecteurs des variables « nombre d'espèces d'arbres forestiers », « nombre d'arbres forestiers », « nombre d'espèces de plantes agricoles », « nombre de plantes agricoles » « pH » et « ombrage ». Les variables « diamètre des couronnes des arbres forestiers » et « diamètre des troncs des arbres forestiers » paraissent corrélées entre elles mais indépendantes du premier groupe de vecteurs. Elles semblent également corrélées négativement à la pente. La surface arbustive et la couverture herbacée paraissent être opposées. Les variables dont les vecteurs sont de petite taille ne peuvent être interprétées.

Dans le second cercle de corrélation, reprenant les dimensions 1 et 3 et représentant 38,43% de la variabilité, on retrouve le même premier groupe de vecteurs corrélés entre eux que dans le premier cercle. On observe aussi une corrélation entre l'âge et la circonférence des cacaoyers. Les vecteurs des autres variables ne donnent pas d'informations claires.

Dans le troisième cercle de corrélation, reprenant les dimensions 2 et 3 et représentant 29,8% de la variabilité, la circonférence des cacaoyers semble également corrélée à leur âge. La litière et la pente paraissent corrélées entre elles et opposées aux diamètres des troncs et des couronnes des arbres forestiers

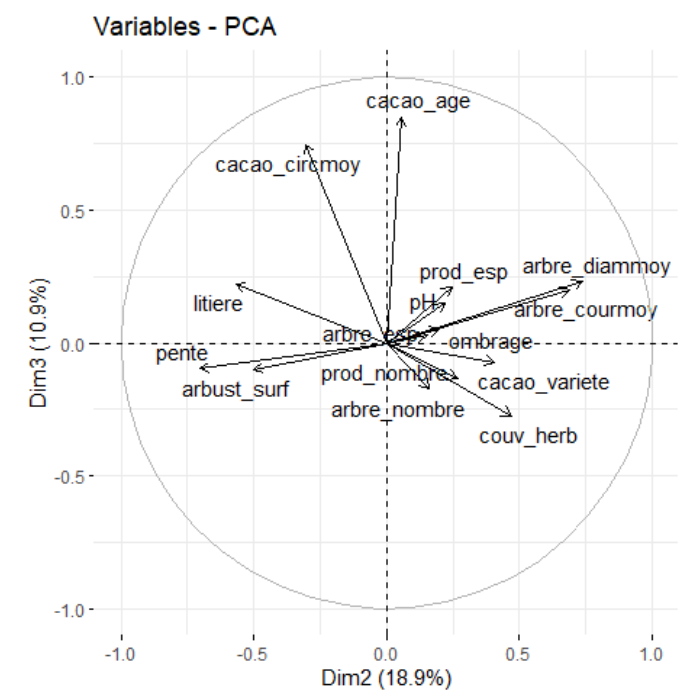
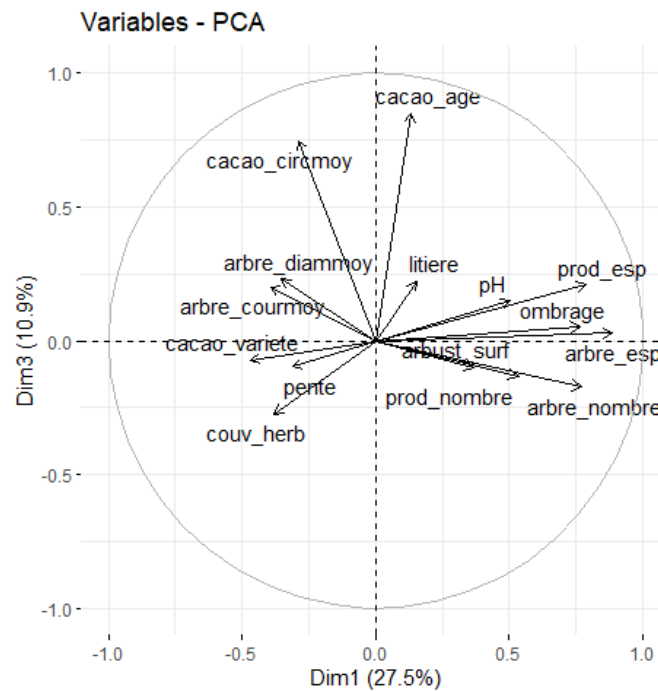
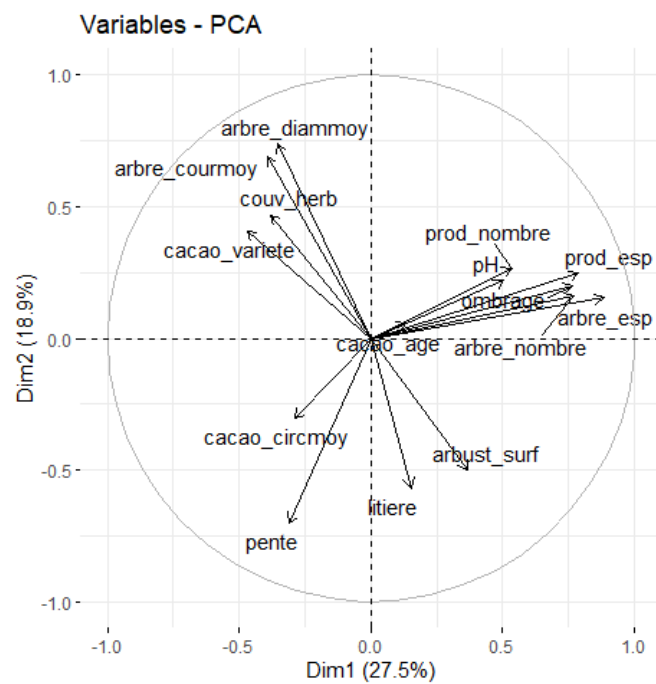


Figure 9 : Cercles de corrélation de l'ACP simplifiée.

13.2.2. Description des composantes principales

Grâce à la fonction R « dimdesc », il est possible de déterminer la valeur de la corrélation existante entre chaque variable et les composantes principales. Cela permet de comprendre à partir de quelles variables et dans quelles proportions celles-ci sont utilisées pour construire les CP.

Cela permet également de renforcer les analyses issues de l'interprétation de cercles de corrélation montrant des liens entre groupes de variables et CP.

La Dim.1 (Tableau 11) est fortement définie par le nombre d'individus et d'espèces d'arbres et de plantes agricoles mais également par, l'ombrage, le pH et le nombre de variétés de cacaoyers. Cette dernière variable est corrélée négativement à la dimension, contrairement aux variables précitées. Dans une moindre mesure, interviennent d'une part la surface arbustive (positivement corrélée) et d'autre part, les diamètres des troncs et des couronnes des arbres forestiers, la couverture herbacée, la pente et la circonférence des cacaoyers (corrélés négativement).

Tableau 11 : Corrélation entre les variables et la CP1.

Dim.1	Corrélation	p. valeur
Arbre_esp	0,8862	$8,76.10^{-28}$
Prod_esp	0,7871	$4,87.10^{-18}$
Arbre_nombre	0,7708	$6,22.10^{-17}$
Ombrage	0,7652	$1,41.10^{-16}$
Prod_nombre	0,5342	$3,34.10^{-7}$
pH	0,5032	$1,96.10^{-6}$
Arbust_surf	0,3691	$7,54.10^{-4}$
Cacao_circmoy	-0,2899	$9,10.10^{-3}$
Pente	-0,3108	$5,01.10^{-3}$
Arbre_diammoy	-0,3534	$1,30.10^{-3}$
Couv_herb	-0,3792	$5,23.10^{-4}$
Arbre_courmoy	-0,3929	$3,13.10^{-4}$
Cacao_varitete	-0,4684	$1,18.10^{-5}$

La Dim.2 (Tableau 12) est surtout déterminée positivement par les diamètres des troncs et couronnes des arbres forestiers et négativement par la pente, la litière et la surface arbustive. Le nombre de variétés de cacaoyers, le nombre d'individus et d'espèces de plantes agricoles interviennent également.

Tableau 12 : Corrélation entre les variables et la CP2.

Dim.2	Corrélation	p. valeur
Arbre_diammoy	0,7372	$6,36.10^{-15}$
Arbre_courmoy	0,6890	$1,60.10^{-12}$
Couv_herb	0,4686	$1,17.10^{-5}$
Cacao_variete	0,4075	$1,76.10^{-4}$
Prod_nombre	0,2658	$1,72.10^{-2}$
Prod_esp	0,2459	$2,19.10^{-2}$
Cacao_circmoy	-0,3024	$6,40.10^{-3}$
Arbust_surf	-0,4994	$2,40.10^{-6}$
Litiere	-0,5675	$4,04.10^{-8}$
Pente	-0,7012	$4,40.10^{-13}$

La Dim.3 (Tableau 13) est composée principalement par l'âge et la circonférence des troncs des cacaoyers. La litière, la couverture herbacée et le diamètre des troncs des arbres forestiers participent également à cette composante.

Tableau 13 : Corrélation entre les variables et la CP3.

Dim.3	Corrélation	p. valeur
Cacao_age	0,8503	$1,90.10^{-23}$
Cacao_circmoy	0,7466	$1,87.10^{-15}$
Arbre_diammoy	0,2303	$3,99.10^{-2}$
Litiere	0,2226	$4,72.10^{-2}$
Couv_herb	-0,2730	$1,43.10^{-2}$

13.3. ACP à 6 dimensions : base du clustering

Le rôle de cette ACP est de servir de donnée d'entrée pour le clustering. Le choix de se baser sur les six premières CP permet de garder plus d'informations que dans l'ACP à 3 CP. En effet, en regardant les valeurs propres, l'ACP à 6 dimensions représente 70,42% de la variabilité, là où 3 dimensions n'en représentent que 48,60% sans simplification de variables (Tableau 8) ou bien 57,29% après élimination de variables non significatives dans les 3 premières CP (Tableau 10). A noter qu'aucune variable ne peut être supprimée dans cette ACP car elles représentent toutes au moins 5% d'une des 6 CP (Tableau 9).

14. Corrélations

14.1. Corrélation entre variables

Grâce à la matrice de corrélations, on peut déterminer les corrélations existantes entre les variables (Figure 10), (Annexe G) et leur significativité (Annexe H).

Les tests de corrélations révèlent des corrélations positives fortes ($>0,5$) entre les variables suivantes:

- altitude et pente
- nombre d'individus et d'espèces d'arbres forestiers
- nombre d'individus et d'espèces de plantes agricoles
- diamètre des troncs et diamètre des couronnes des arbres forestiers
- nombre d'individus d'arbres forestiers et nombre d'espèces de plantes agricoles
- nombre d'espèces d'arbres forestiers et nombre d'espèces de plantes agricoles
- ombrage et nombre d'arbres forestiers
- ombrage et nombre d'espèces d'arbres forestiers
- ombrage et nombre d'individus de plantes agricoles
- ombrage et nombre d'espèces de plantes agricoles
- pH et nombre d'espèces agricoles

Les tests de corrélations révèlent des corrélations positives faibles ($0,25 < x < 0,5$) mais significatives ($p.\text{valeur} < 0,05$) entre les variables suivantes :

- pente et circonférence des cacaoyers
- âge des cacaoyers et nombre de cacaoyers
- âge des cacaoyers et nombres d'arbres forestiers
- âge des cacaoyers et diamètres de troncs et de couronnes des arbres forestiers
- nombre de cacaoyers et diamètre de la couronne des arbres forestiers
- nombre de variétés de cacaoyers et diamètre des couronnes d'arbres forestiers
- nombre d'arbres forestiers et nombre de plantes agricoles
- nombre d'arbres forestiers et pH
- nombre d'espèces d'arbres forestiers et nombre d'espèces de plantes agricoles
- nombre d'espèces d'arbres forestiers et pH
- nombre d'espèces de plantes agricoles et surface arbustive
- nombre d'espèces de plantes agricoles et pH
- nombre de plantes agricoles et ombrage
- surface arbustive et litière
- ombrage et pH
- pH et rapport C/N
- taux de carbone et rapport carbone-azote

Les tests de corrélations révèlent des corrélations négatives fortes ($>0,5$) entre les variables :

- nombre de variétés de cacaoyers et la surface arbustive
- La couverture herbacée et la surface arbustive

Les tests de corrélations révèlent des corrélations négatives faibles ($<0,5$) mais significatives (p.valeur $<0,05$) entre les variables :

- altitude et âge des cacaoyers
- altitude et diamètre des troncs des arbres forestiers
- pente et âge des cacaoyers
- pente et nombre d'arbres forestiers
- pente et nombre d'espèces d'arbres forestiers
- pente et diamètre des troncs des arbres forestiers
- pente et nombre de plantes agricoles
- pente et nombre d'espèces de plantes agricoles
- pente et ombrage
- âge des cacaoyers et taux de carbone
- circonférence des cacaoyers et nombre d'arbres forestiers
- circonférence des cacaoyers et nombre d'espèces d'arbres forestiers
- circonférence des cacaoyers et ombrage
- nombre de cacaoyers et nombre de plantes agricoles
- nombre de variétés de cacaoyers et nombre de plantes agricoles
- nombre d'arbres forestiers et diamètre des couronnes des arbres forestiers
- nombre d'espèces d'arbres forestiers et diamètre des couronnes d'arbres forestiers
- diamètre des couronnes d'arbres forestiers et nombre de plantes agricoles
- diamètre des couronnes d'arbres forestiers et surface arbustive
- diamètre des troncs d'arbres forestiers et nombre de plantes agricoles
- diamètre des troncs d'arbres forestiers et surface arbustive
- diamètre des troncs d'arbres forestiers et litière
- couverture herbacée et litière
- couverture herbacée et pH

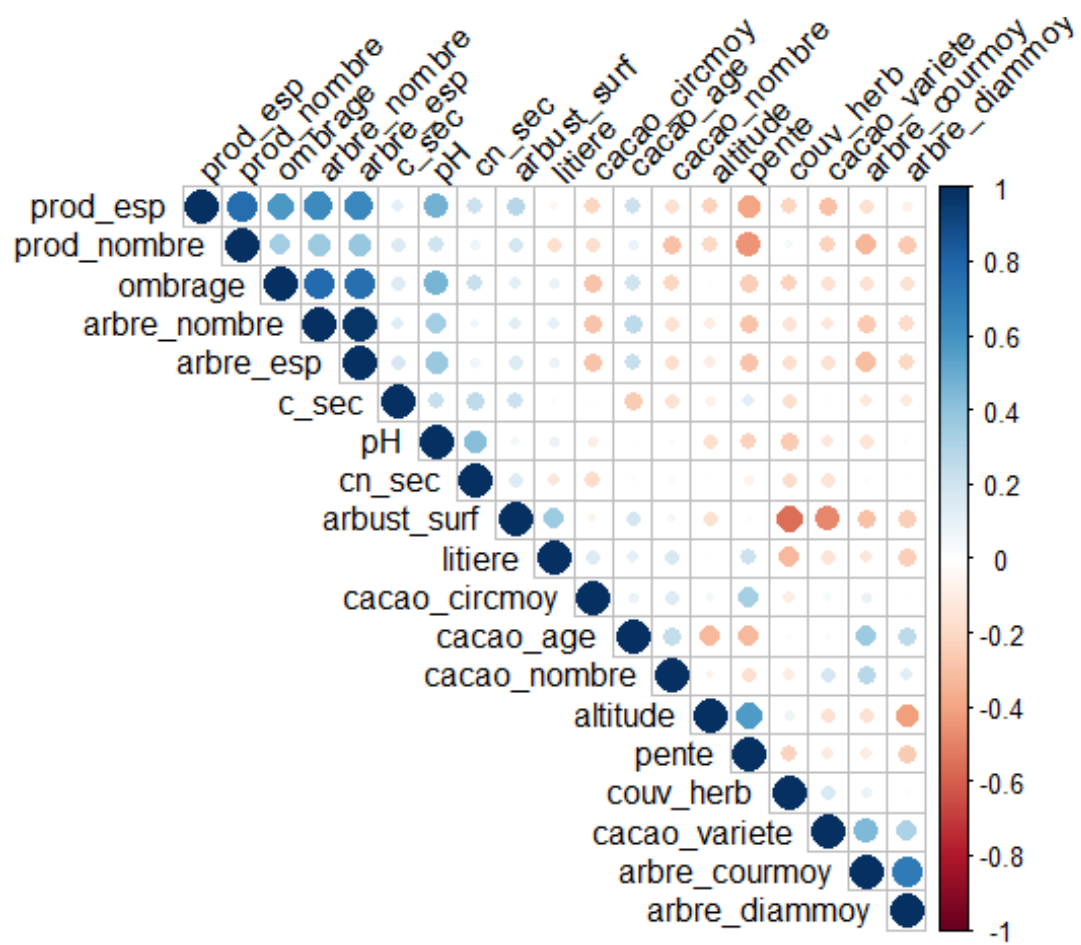


Figure 10 : Graphique des corrélations entre variables. La taille du point et l'intensité de sa couleur indique la force de la corrélation entre deux variables.

15. Clustering

Le clustering est réalisé par la fonction « HCPC ». Celle-ci fait une « Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) » et suggère un certain nombre de clusters. Ensuite, une fois ce nombre fixé, la fonction améliore le partitionnement des individus via plusieurs itération d'un « k-means ». Le résultat de ce clustering donne une division des placettes en trois groupes ; un « Groupe 1 » de 21 placettes, un « Groupe 2 » de 36 placettes et un « Groupe 3 » de 23 placettes (Figure 11), (Tableau 14).

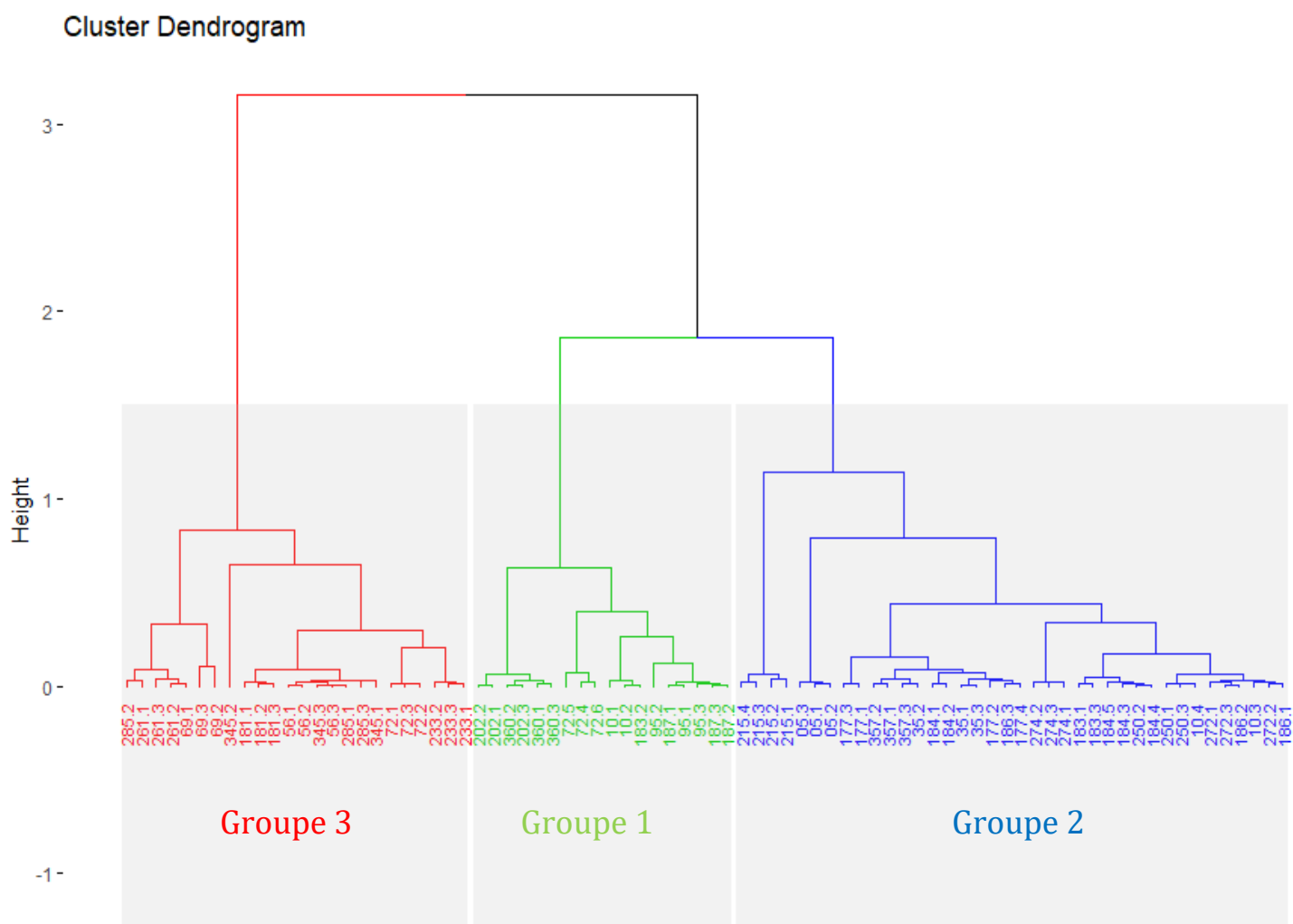


Figure 11 : Dendrogramme du clustering des placettes. Rouge : Groupe 3 ; Vert : Groupe 1 ; Bleu : Groupe 2

Tableau 14 : Liste des placettes et de leur groupe et producteur associés.

Code parcelle	Nom	Groupe	Code parcelle	Nom	Groupe
05.1	Juana Sullcani	2	186.1	Delfin Pardo	2
05.2	Juana Sullcani	2	186.2	Delfin Pardo	2
05.3	Juana Sullcani	2	186.3	Delfin Pardo	2
10.1	Luis Quisbert	1	187.1	Cirilo Limari	1
10.2	Luis Quisbert	1	187.2	Cirilo Limari	1
10.3	Luis Quisbert	2	187.3	Cirilo Limari	1
10.4	Luis Quisbert	2	202.1	Martin Marquez	1
35.1	Max Tipula	2	202.2	Martin Marquez	1
35.2	Max Tipula	2	202.3	Martin Marquez	1
35.3	Max Tipula	2	215.1	Donato Colque	2
56.1	Sonia Flores	3	215.2	Donato Colque	2
56.2	Sonia Flores	3	215.3	Donato Colque	2
56.3	Sonia Flores	3	215.4	Donato Colque	2
69.1	Gabriel Nate	3	233.1	Toribio Alborta	3
69.2	Gabriel Nate	3	233.2	Toribio Alborta	3
69.3	Gabriel Nate	3	233.3	Toribio Alborta	3
72.1	Hugo Chavez	3	250.1	Edilberto Siquimen	2
72.2	Hugo Chavez	3	250.2	Edilberto Siquimen	1
72.3	Hugo Chavez	3	250.3	Edilberto Siquimen	2
72.4	Hugo Chavez	1	261.1	Tomas Valencia	3
72.5	Hugo Chavez	1	261.2	Tomas Valencia	3
72.6	Hugo Chavez	1	261.3	Tomas Valencia	3
95.1	Marcelina Poma	1	272.1	Hector Calle	2
95.2	Marcelina Poma	1	272.2	Hector Calle	2
95.3	Marcelina Poma	1	272.3	Hector Calle	2
177.1	Saturnino Chura	2	274.1	Nicolas Sausa	2
177.2	Saturnino Chura	2	274.2	Nicolas Sausa	2
177.3	Saturnino Chura	2	274.3	Nicolas Sausa	2
177.4	Saturnino Chura	2	285.1	Fidel Ortiz	3
181.1	Sabino Apaza	1	285.2	Fidel Ortiz	3
181.2	Sabino Apaza	3	285.3	Fidel Ortiz	3
181.3	Sabino Apaza	3	345.1	Bernabe Ramos	3
183.1	Maximo Chuquimia	1	345.2	Bernabe Ramos	3
183.2	Maximo Chuquimia	1	345.3	Bernabe Ramos	3
183.3	Maximo Chuquimia	2	357.1	Martha Quispe	2
184.1	Victor Gallo	2	357.2	Martha Quispe	2
184.2	Victor Gallo	2	357.3	Martha Quispe	2
184.3	Victor Gallo	2	360.1	Patricio Mamani	1
184.4	Victor Gallo	2	360.2	Patricio Mamani	1
184.5	Victor Gallo	2	360.3	Patricio Mamani	1

15.1. Lien entre groupes, placettes et dimensions

En représentant les placettes dans le plan des composantes principales, on peut voir les relations entre groupes et dimensions. Ces dernières étant des combinaisons de variables, cela donne un premier aperçu des caractéristiques des groupes et des variables les plus influentes dans leurs formations.

Dans le plan des CP1 et CP2 (Figure 12), la distinction des trois groupes est très claire. Le groupe 3 paraît positivement corrélé à la Dim.1 alors que les deux autres sont corrélés à la Dim 2 ; le groupe 1 positivement et le groupe 2 négativement. Les informations contenues dans les CP sont illustrées par les cercles de corrélations des dimensions associées.

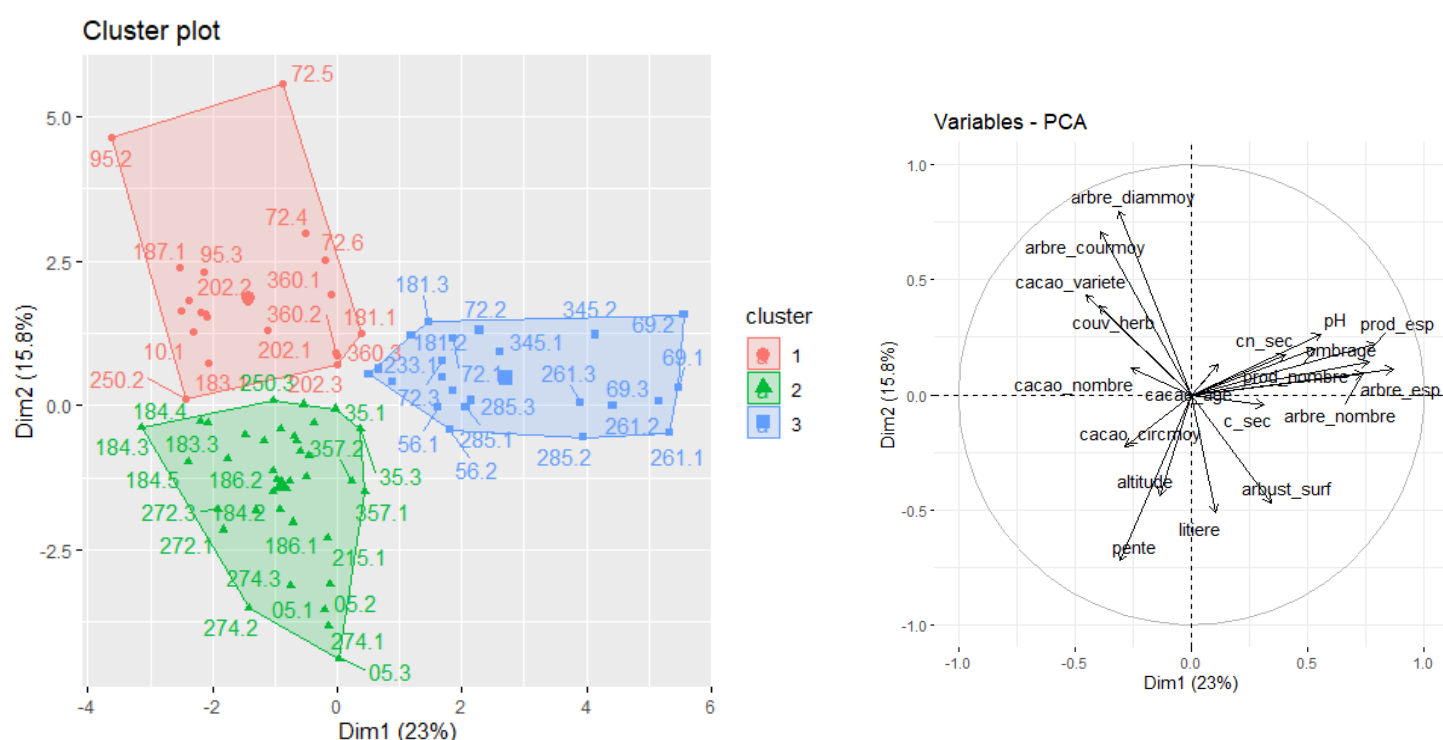


Figure 12 : Représentation des placettes dans le plan des CP1 et CP2, avec le cercle de corrélation associé.

Dans le plan des CP1 et CP3 (Figure 14), le groupe 3 reste bien distinct des deux autres et lié positivement à la CP1. Pour les groupes 1 et 2, la corrélation négative à la CP1 reste visible. Par contre, les deux groupes se confondent sur la CP3.

Dans le plan des CP2 et CP3 (Figure 13), les trois groupes semblent indépendants de la Dim.3. Quant à la Dim.2, on retrouve les mêmes relations que dans le plan des CP1 et CP 2 (Figure 12). A savoir une indépendance du groupe 3, une corrélation positive du groupe 1 et une corrélation négative du groupe 2.

15.2. Moyenne, écart-types et médiane des groupes

Les moyennes, écart-types et médiane de chaque variable ont été calculées sur l'ensemble des placettes, puis au sein de chaque groupe (Tableau 15).

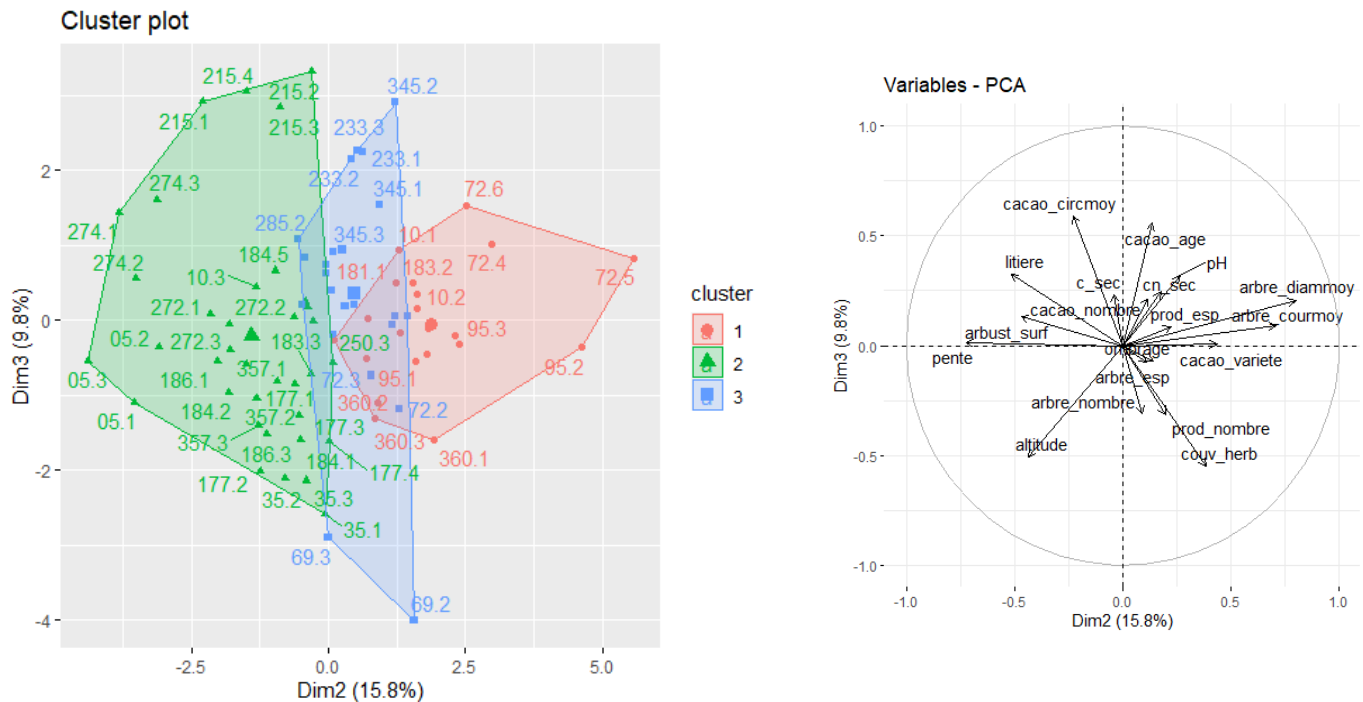


Figure 13 : Représentation des placettes dans le plan des CP2 et CP3, avec le cercle de corrélation associé.

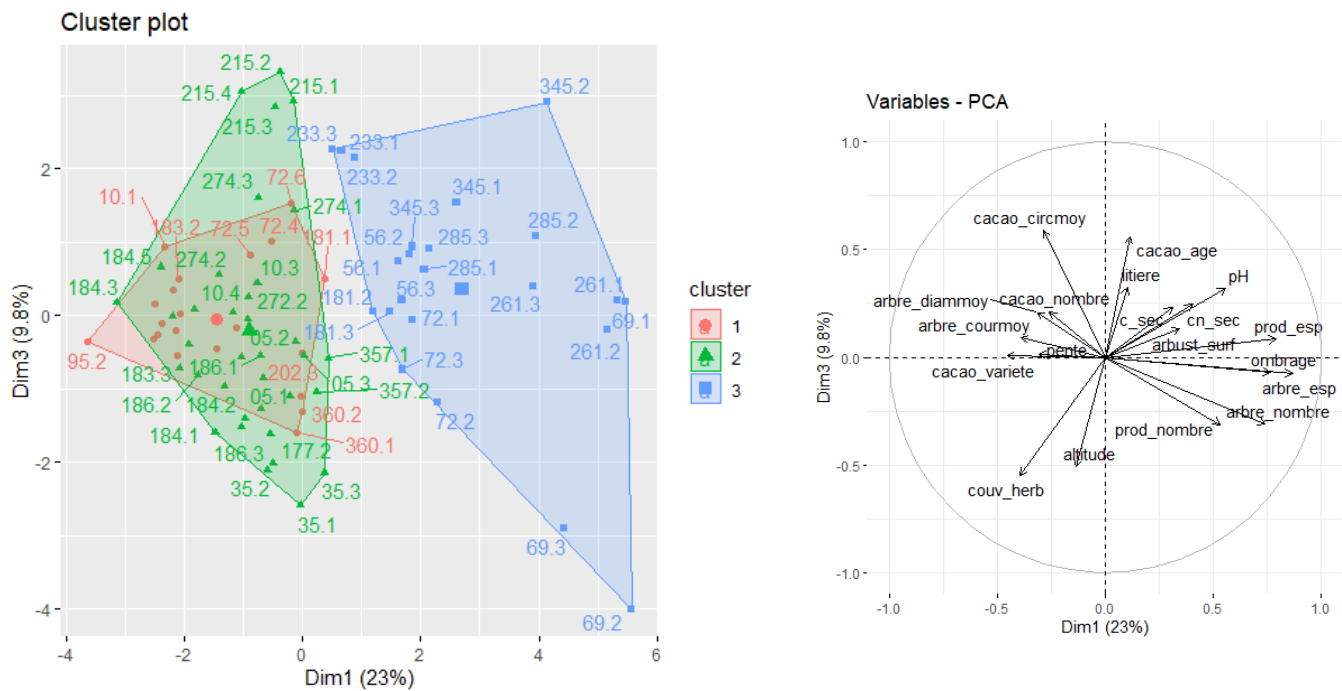


Figure 14 : Représentation des placettes dans le plan des CP1 et CP3, avec le cercle de corrélation associé.

Tableau 15 : Moyennes, écart-types et médianes des données complètes et des groupes.

	Données complètes (N=80)			Groupe 1 (N=21)			Groupe 2 (N=36)			Groupe 3 (N=23)		
	Moyenne	Ecart- type	Médiane	Moyenne	Ecart- type	Médiane	Moyenne	Ecart- type	Médiane	Moyenne	Ecart- type	Médiane
Altitude (m)	514,86	± 93,95	497,875	460,31	±44,22	466,50	581,50	±93,70	568,00	460,36	±52,31	449
Pente (%)	8,11	± 9,76	3,5	1,19	±3,84	0	16,17	±8,71	15	1,83	±3,86	0
Age cacaoyers (an)	21,19	± 14,07	18	19,10	±6,53	20	18,86	±17,19	12,5	26,74	±12,53	23
Variétés cacaoyers (nombre/400m²)	2,58	± 1,73	2	3,76	±1,51	4	2,25	±1,71	1	2	±1,48	1
Circonférence cacaoyers (cm)	38,85	± 11,57	38,16	36,87	±3,93	38,12	43,34	±14,52	40,14	33,65	±8,17	33,33
Nombre cacaoyers (ind./400m²)	25,53	± 8,26	25	27,86	±12,28	27	24,92	±7,25	24	24,35	±4,14	25
Nombre d'arbres forestiers (ind./400m²)	7,25	± 13,19	3	1,38	±1,77	1	2,61	±2,94	1	19,87	±19,33	13
Espèces d'arbres forestiers (nombre/400m²)	3,49	± 4,11	2	0,90	±0,99	1	1,69	±1,67	1	8,65	±3,97	8
Diamètre des troncs (cm)	30,13	± 15,69	27,13	46,71	±15,94	41,66	21,68	±7,78	22,19	26,88	±8,56	26,95
Diamètre de la couronne (m)	9,37	± 6,99	7,38	15,65	±9,32	14,28	7,03	±3,46	7	7,24	±1,66	7,29
Nombre de plantes agricoles (ind./400m²)	9,83	± 12,59	6,5	9,76	±9,69	7	5,94	±7,06	3,5	15,96	±18,46	12
Nombre d'espèces agricoles (nombre/400m²)	2,79	± 2,07	3	2	±1,45	2	1,78	±1,31	2	5,09	±1,73	5

Couverture herbacée (%)	48,88	± 25,52	50	67,14	±18,48	70	48,75	±24,15	50	32,39	±29,65	20
Surface arbustive (%)	8,13	± 14,26	2,5	1,67	±3,29	0	9,31	±16,95	0	12,17	±14,28	10
Ombrage (%)	49,97	± 20,45	47,6	39,93	±14,53	37,6	41,98	±17,10	42,3	71,63	±12,37	74,4
Litière (cm)	4,94	± 1,70	4,9	3,82	±1,63	3,4	5,31	±1,80	5,2	5,35	±1,12	5,4
pH (-)	6,36	± 0,81	6,22	6,31	±1,02	6,25	6,00	±0,47	5,86	6,98	±0,67	6,95
Taux de carbone (%)	1,52	± 0,66	1,45	1,31	±0,43	1,29	1,49	±0,38	1,46	1,76	±1,02	1,81
Rapport C/N (-)	9,04	± 1,03	8,93	8,96	±0,97	8,84	8,81	±0,73	8,90	9,47	±1,34	9,30

15.3. Poids des variables dans la constitution des groupes

Les résultats de la fonction R « HCPC » permettent de déterminer quelles sont les variables les plus associées à chaque groupe et de voir leurs différences par rapport à la moyenne générale des placettes. Ce sont ces variables qui ont été les plus influentes dans la distinction du groupe par rapport au reste de la population. Le poids de la variable est illustré par le v.test. Un v.test supérieur en valeur absolue à 1,96 correspond à une p. valeur inférieur à 0,05 et son signe montre si la moyenne du cluster est plus grande (v.test>0) ou plus petite (<0) que la moyenne générale.

Le groupe 1 (Tableau 16) est caractérisé par des arbres forestiers aux diamètres de troncs et de couronnes fortement supérieurs à la moyenne générale. La couverture herbacée et le nombre de variétés de cacaoyers sont également plus élevé que dans l'ensemble des placettes d'inventaire. Au contraire, le nombre d'individus et d'espèces d'arbres forestiers, le nombre d'espèces de plantes agricoles, la surface arbustive, l'ombrage, la litière, l'altitude et la pente sont plus faibles que la moyenne. Les variables n'ayant pas d'influence significative sur ce groupe sont l'âge, le nombre et la circonférence des cacaoyers, le nombre de plantes agricoles, le pH, le taux de C et le C/N.

Tableau 16 : Variables associées au groupe 1.

Groupe 1	V.test	Moyenne du groupe	Moyenne générale	E.-T. du groupe	E.-T. général	p. valeur
Arbre_diammoy	6,1017	41,71	29,75	±15,56	±14,74	1,05.10 ⁻⁹
Arbre_courmoy	5,1643	15,65	9,35	±9,10	±6,47	2,41.10 ⁻⁷
Cacao_variete	3,5416	3,76	2,58	±1,48	±1,72	2,60.10 ⁻⁴
Couv_herb	3,5416	67,14	48,88	±18,03	±27,36	3,98.10 ⁻⁴
Prod_esp	-2,0274	2,00	2,79	±1,41	±2,06	4,26.10 ⁻²
Arbre_nombre	-2,3741	1,38	7,25	±1,73	±13,11	1,76.10 ⁻²
Arbust_surf	-2,4164	1,67	8,13	±3,21	±14,17	1,57.10 ⁻²
Ombrage	-2,6192	39,93	49,97	±14,18	±20,31	8,81.10 ⁻³
Altitude	-3,0984	460,31	514,86	±43,16	±93,36	1,95.10 ⁻³
Arbre_esp	-3,3539	0,90	3,49	±0,97	±4,08	7,97.10 ⁻⁴
Litière	-3,4133	3,85	4,94	±1,59	±1,69	6,41.10 ⁻⁴
Pente	-3,7839	1,19	8,11	±3,75	±9,70	1,54.10 ⁻⁴

Pour le groupe 2 (Tableau 17), ce sont la pente et l'altitude qui sont les variables les plus influentes et plus élevées que la moyenne. Les diamètres moyens des troncs et couronnes des arbres forestiers sont significativement plus petits. Les arbres forestiers (en individus et en espèces) ainsi que les plantes agricoles (en individus) sont présents en moins grand nombre. L'ombrage est plus faible et le pH plus bas que la moyenne. Les variables n'ayant

pas d'influence significative sur ce groupe sont l'âge, le nombre de variétés et le nombre de variétés de cacaoyers, le diamètre des couronnes des arbres forestiers, la surface arbustive, la couverture herbacée, la litière, le taux de C et le C/N.

Tableau 17 : Variables associées au groupe 2.

Groupe 2	V.test	Moyenne du groupe	Moyenne générale	E.-T. du groupe	E.-T. général	p. valeur
Pente	6,675	16,17	8,11	±8,59	±9,70	$2,46.10^{-11}$
Altitude	5,739	581,5	514,06	±92,39	±93,36	$9,53.10^{-9}$
Cacao_circmoy	3,1347	43,34	38,85	±14,31	±11,50	$1,72.10^{-3}$
Prod_nombre	-2,4933	5,94	9,82	±6,96	±12,51	$1,27.10^{-2}$
Arbre_nombre	-2,8450	2,61	7,25	±2,90	±13,11	$4,44.10^{-3}$
Arbre_courmoy	-2,8874	7,03	9,35	±3,41	±6,47	$3,88.10^{-3}$
Ombrage	-3,1590	41,98	49,97	±16,86	±20,32	$1,59.10^{-3}$
Arbre_esp	-3,5302	1,69	3,49	±1,65	±4,08	$4,15.10^{-4}$
pH	-3,6319	6,00	6,36	±0,46	±0,81	$2,81.10^{-4}$
Prod_esp	-3,9412	1,78	2,79	±1,29	±2,06	$8,10.10^{-5}$
Arbre_diammoy	-4,3985	21,68	29,75	±7,68	±14,75	$1,09.10^{-5}$

Les variables les plus associées au groupe 3 (Tableau 18) sont les nombres d'espèces et d'individus d'arbres forestiers et de plantes agricoles, avec une moyenne fortement supérieure à la moyenne générale. L'ombrage et la moyenne possèdent également un influence forte et une moyenne supérieure alors que la pente, l'altitude et la couverture herbacée ont une moyenne inférieure à l'ensemble des données. Dans une moindre mesure, le C/N, le taux de C, l'âge et la circonférence des cacaoyers participent aussi à la distinction de ce troisième groupe. Les trois premières variables ont une contribution positive alors que la circonférence des cacaoyers a une influence négative. Les variables n'ayant pas d'influence significative sur ce groupe sont le nombre d'individus et de variétés de cacaoyers, la surface arbustive et la litière.

Tableau 18 : Variables associées au groupe 3.

Groupe 3	V.test	Moyenne du groupe	Moyenne générale	E.-T. du groupe	E.-T. général	p. valeur
Arbre_esp	7,1409	8,65	3,49	±3,89	±4,08	$9,27.10^{-13}$
Prod_esp	6,3032	5,09	2,79	±1,69	±2,06	$2,92.10^{-10}$
Ombrage	6,0187	71,63	49,97	±12,10	±20,32	$1,76.10^{-9}$
Arbre_nombre	5,4353	19,87	7,25	±18,91	±13,11	$5,47.10^{-8}$
pH	4,3404	6,98	6,36	±0,65	±0,81	$1,42.10^{-5}$

Prod_nombre	2,7667	15,96	9,83	±18,05	±12,51	5,66.10 ⁻³
Cn_sec	2,3841	9,47	9,04	±1,32	±1,02	1,71.10 ⁻²
Cacao_age	2,2416	26,74	21,19	±12,26	±13,98	2,50.10 ⁻²
C_sec	2,0716	1,76	1,52	±1,00	±0,65	3,83.10 ⁻²
Cacao_circmoy	-2,5555	33,65	38,85	±7,99	±11,50	1,06.10 ⁻²
Altitude	-3,2960	460,56	514,86	±51,16	±93,36	9,81.10 ⁻⁴
Couv_herb	-3,4026	32,39	48,88	±29,00	±27,35	6,67.10 ⁻⁴
Pente	-3,6589	1,83	8,11	±3,77	±9,70	2,53.10 ⁻⁴

16. Comparaison aux données de la phase 1

16.1. Variables agroécologiques synthétiques

Une fois la classification effectuée, les variables agroécologiques synthétiques (VAS) et l'IAE ont été analysées à la lumière des groupes obtenus.

16.1.1. Analyse Multifactorielle de Données Mixtes (AFDM)

Pour rappel, l'AFDM a été réalisée afin de pouvoir mettre en relation les groupes obtenus au terme du clustering – qui constitue une variable catégorielle – avec les 12 variables agroécologiques synthétiques de la phase 1. En se basant sur les valeurs propres (Tableau 19), le nombre de composantes principales choisies pour l'AFDM est de quatre. Elles représentent 69,09% de la variabilité totale des données.

Tableau 19 : Valeurs propres de l'AFDM.

	Valeurs propres	Pourcentage de la variabilité expliqué	Pourcentage cumulé
Dim.1	3,70	28,47	28,47
Dim.2	2,11	16,23	44,70
Dim.3	1,81	13,90	58,60
Dim.4	1,36	10,49	69,09
Dim.5	0,95	7,35	76,43
Dim.6	0,83	6,41	82,84
Dim.7	0,74	5,69	88,53
Dim.8	0,50	3,86	92,39
Dim.9	0,31	2,41	94,80
Dim.10	0,28	2,14	96,94
Dim.11	0,19	1,46	98,40
Dim.12	0,13	0,97	99,37
Dim.13	0,08	0,63	100

La fonction R « dimdesc » permet de savoir si la variable qualitative, ici le numéro du groupe, est liée à la CP. Le résultat est significatif pour les trois premières dimensions mais très faible pour la CP2 (Tableau 20). Seules les CP1 et CP3 seront représentées.

Tableau 20 : R^2 des quatre dimensions de l'AFDM.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4
R^2	0,7384	0,07853	0,1949	Non-significatif

A l'aide du cercle de corrélation, des relations entre variables peuvent être identifiées. De plus, cela permet de visualiser le contenu des composantes principale. Sur la Dim.1,

apparaît une corrélation entre le nombre d'espèces forestières et de plantes agricoles avec le nombre de variétés de cacaoyers. Apparaît également une corrélation négative de ces variables avec le nombre de parcelles sans cacaoyers. Les pratiques agroécologiques à l'installation et les interventions phytotechniques agroécologiques semblent corrélées positivement à la Dim. 3 et corrélées négativement à la taille de la sphère de transmission et aux étapes de transformation (Figure 15).

Les coordonnées des groupes dans le plan des CP permet de connaître la corrélation de ceux-ci avec les dimensions de l'AFDM et donc des variables qu'elles représentent. Ici, le groupe 3 semble corrélé positivement à la CP1 alors que le groupe 2 l'est négativement. Tous deux paraissent indépendants de la CP3. A l'inverse, le groupe 1 est indépendant de la CP1 mais corrélé positivement à la CP3 (Figure 15).

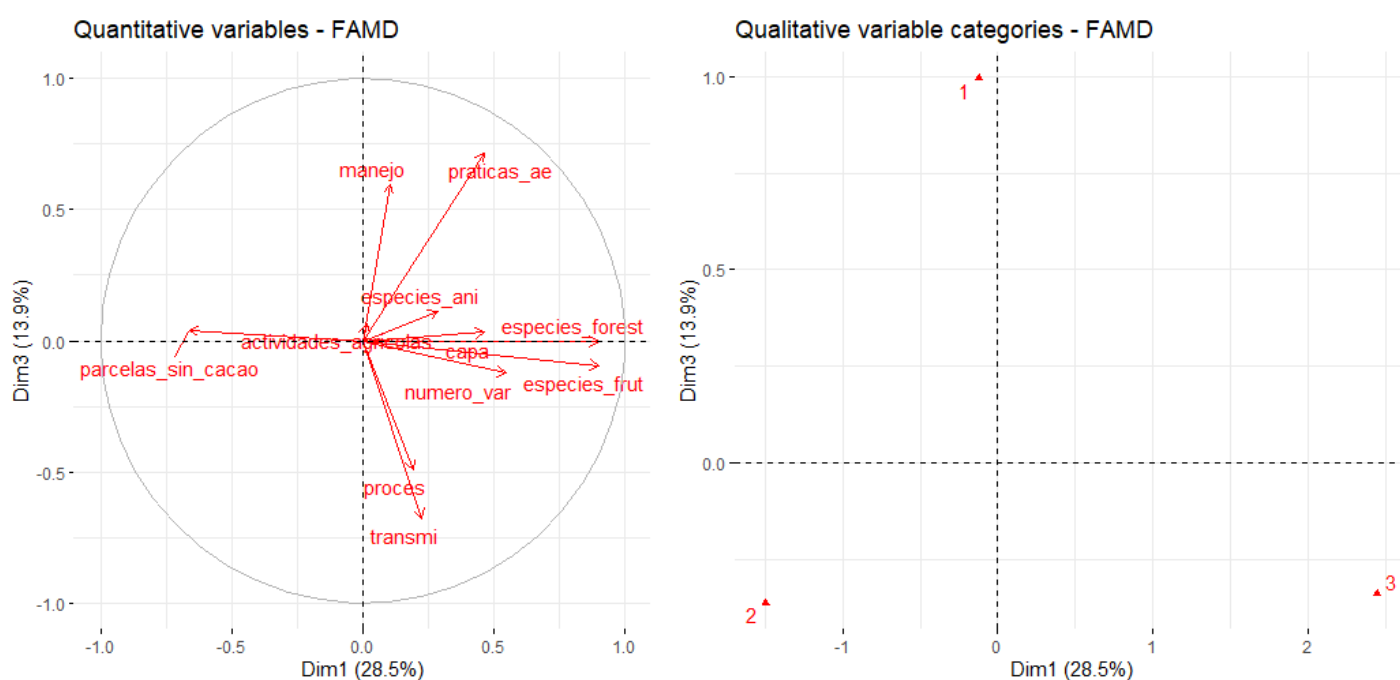


Figure 15 : Cercle de corrélation des variables quantitatives et coordonnées des variables qualitatives de l'AFDM.

De manière plus détaillées, il est possible de définir les corrélations significatives entre variables et dimensions.

Pour la Dim. 1 (Tableau 21), une corrélation positive forte existe avec le nombre d'espèces d'arbres forestiers et de plantes agricoles, le nombre de variétés, le nombre de certifications et les pratiques agroécologiques à l'installation ; une corrélation négative forte existe avec le nombre de parcelles du producteur sans cacaoyers. Des corrélations positives faibles avec le nombre de personnes dans la sphère de transmission et le nombre d'espèces animales existent également.

Pour la Dim.3 (Tableau 22), il y a une corrélation positive forte avec les pratiques agroécologiques à l'installation et les interventions phytotechniques agroécologiques et une corrélation forte négative avec le nombre d'étapes de transformation réalisées et le nombre de personnes dans la sphère de transmission.

Tableau 21 : Corrélation entre variables agroécologiques synthétiques et la CP1 de l'AFDM.

Dim.1	Corrélation	p. valeur
Especies_frut	0,9004	$6,28.10^{-30}$
Especies_forest	0,8987	$1,19.10^{-29}$
Numero_var	0,5471	$1,51.10^{-7}$
Capa	0,4646	$1,42.10^{-5}$
Praticas_ae	0,4628	$1,54.10^{-5}$
Especies_aní	0,2854	$1,03.10^{-2}$
Transmi	0,2260	$4,38.10^{-2}$
Parcelas_sin_cacao	-0,6593	$2,9347.10^{-11}$

Tableau 22 : Corrélation entre variables agroécologiques synthétiques et la CP3 de l'AFDM.

Dim.3	Corrélation	p. valeur
Praticas_ae	0,7163	$8,00.10^{-14}$
Manejo	0,5959	$5,51.10^{-9}$
Proces	-0,4920	$3,58.10^{-6}$
Transmi	-0,6771	$5,37.10^{-12}$

16.1.2. Corrélations

Les corrélations entre variables de l'inventaire, VAS et l'indice agroécologique (IAE) ont été calculées sur l'ensemble des placettes. On ne s'intéresse donc ici qu'aux données de l'inventaire.

La matrice de corrélations (annexe) donnent plusieurs informations différentes, illustrées dans le graphe de corrélation (Figure 16). La première est la corrélation de certaines VAS (phase 1) avec des variables de l'inventaire (phase 2). La deuxième information est l'existence de corrélation entre différentes VAS. Et la dernière est la corrélation entre l'indice agroécologique et les VAS, montrant quelles sont celles qui influencent le plus l'IAE.

Des corrélations positives existent entre le nombre d'individus et d'espèces d'arbres forestiers et de plantes agricoles identifiés lors de l'inventaire avec le nombre d'espèces d'arbres et de plantes agricoles renseigné par l'enquête. De plus, il y a des corrélations

positives entre les pratiques d'installation, les interventions phytotechniques, le nombre d'individus et d'espèces d'arbres forestiers et de plantes agricoles ainsi qu'avec l'ombrage. La pente et l'altitude sont corrélées négativement aux pratiques d'installation et aux interventions phytotechniques. L'âge des cacaoyers est corrélé positivement avec le nombre d'étapes de transformations réalisées mais négativement avec la taille de la sphère de transmission, le nombre de parcelles sans cacaoyers et le nombre d'espèces animales élevées par le producteur. Le nombre d'espèces animales est également corrélé négativement avec le diamètre des troncs d'arbres forestiers et positivement avec le taux de carbone.

Parmi les VAS, le nombre de variétés de cacaoyers est corrélée aux nombres d'espèces de plantes agricoles et d'arbres forestiers. Il existe une corrélation positive forte entre ces deux variables entre-elle et également une corrélation avec les pratiques agroécologiques à l'installation et les interventions phytotechniques agroécologiques. Le nombre de certifications est négativement corrélé avec le nombre de parcelles sans cacaoyers.

L'IAE est influencé positivement par le nombre d'espèces de plantes agricoles et d'arbres forestiers et dans une moindre mesure avec le nombre de variété de cacaoyers, les pratiques d'installation, les interventions phytotechniques, la transformation, les espèces animales élevées et les autres activités agricoles. Les corrélations avec les variables de l'inventaire confirme cette influence de la diversité des espèces et montre également une corrélation négative assez forte avec la pente.

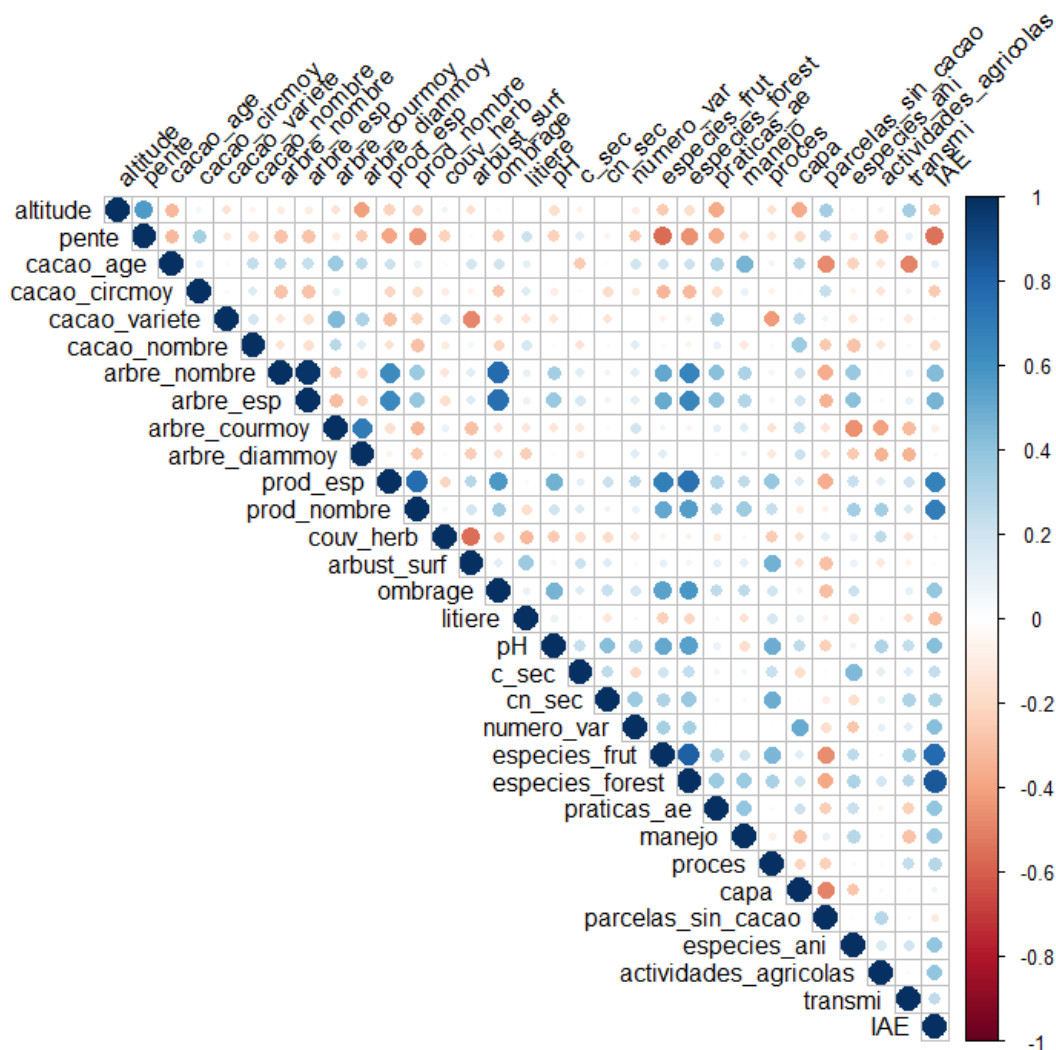


Figure 16 : Graphe de corrélation entre variables de l'enquête, VAS et IAE.

16.1.3. Comparaisons des groupes

En comparant les valeurs des groupes obtenus pour la phase 2 pour les variables agroécologiques synthétiques de la phase 1, des différences significatives ont pu être mises en évidence (Tableau 23).

Le groupe 1 est significativement différent des deux quant au nombre d'espèces agricoles ; celui-ci étant intermédiaire et proche de la moyenne générale.

Le groupe 2 se distingue par un nombre de variétés de cacaoyers et un nombre d'espèces de plantes agricoles plus faibles que la moyenne.

Le groupe 3 est celui qui possède le plus de différences par rapport aux deux autres. Le nombre d'espèces de plantes agricoles est près d'1,5 fois plus élevé que la moyenne et le nombre d'espèces forestières est proche du double. Les producteurs des placettes du groupe 3 réalisent plus d'étapes de transformation et possèdent moins de parcelles qui ne sont pas dédiées à la production de cacao.

Tableau 23 : Statistiques descriptives des variables agroécologiques synthétiques et IAE. Les groupes différents significativement des deux autres pour une variable sont annotés d'un « (*) »

	Données complètes (N=80)			Groupe 1 (N=21)			Groupe 2 (N=36)			Groupe 3 (N=23)		
	Moyenne	Ecart- type	Médiane	Moyenne	Ecart- type	Médiane	Moyenne	Ecart- type	Médiane	Moyenne	Ecart- type	Médiane
Variétés	3,45	±1,62	4	3,67	±1,28	4	2,72 (*)	±1,28	3	4,39	±1,88	4
Espèces agricoles	5,11	±3,69	4	5,29 (*)	±2,35	5	2,61 (*)	±2,21	2	8,87 (*)	±3,32	9
Espèces forestières	4,24	±3,02	3	3,67	±2,56	3	2,53	±1,84	3	7,43 (*)	±2,37	8
Pratiques agroécologiques à l'installation	4,98	±1,29	5	5,26	±1,04	5	4,43	±1,55	5	5,59	±0,43	5.5
Interventions phytotechniques agroécologiques	1,19	±0,37	1,17	1,21	±0,44	1.17	1,18	±0,45	1.17	1,17	0	1.17
Transformation du cacao	5,64	±0,88	6	5,29	±1,42	6	5,61	±0,65	6	6 (*)	0	6
Certification	0,8	±0,56	1	0,86	±0,65	1	0,56	±0,50	1	1,13	±0,34	1
Parcelles sans cacao	3,14	±0,98	3	3,19	±0,87	3	3,58	±0,69	4	2,39 (*)	±1,03	2
Espèces animales	0,75	±0,80	1	0,52	±0,75	0	0,69	±0,75	1	1,04	±0,88	1
Activités agricoles	1,91	±0,78	2	2	±0,55	2	1,83	±0,85	2	1,96	±0,88	2
Sphère de transmission	3,96	±0,86	4	3,67	±0,97	4	4	±0,93	4	4,17	±0,58	4
IAE	5,45	±0,91	5,36	5,59 (*)	±0,92	5,70	4,91 (*)	0,59	4,87	6,20 (*)	0,77	6,36

16.2. Indice Agroécologique

Les trois groupes ont des indices agroécologiques significativement différents. Le groupe 3 a l'indice le plus élevé et le groupe 2 l'indice le plus faible. Le groupe 1 a un score intermédiaire mais supérieur à la moyenne. Il possède cependant un écart-type important, pouvant montrer une hétérogénéité des indices parmi les placettes du groupe.

16.3. Variables socio-économiques

Parmi les variables socio-économiques (Tableau 26), seules des différences significatives entre le groupe 3 et le reste des placettes ont été observées. Ces différences sont :

- Une surface dédiée aux cacaoyers 1,5 fois plus importante que la moyenne générale.
- Un pourcentage de la surface de l'exploitation dédiée aux cacaoyers 10% plus élevé que la moyenne générale et de près du double du groupe 2.
- De revenus de la vente, en absolu et par hectare de cacaoyers, presque deux fois plus importants.
- Un temps de trajet jusqu'au marché le plus proche plus long que pour les autres groupes mais un temps de trajet jusqu'au lieu de livraison trois fois plus proche que la moyenne générale.
- 74% des placettes ont bénéficiées d'un accompagnement par une association, contre 45% en moyenne.
- Les producteurs des placettes du groupes 3 trouvent plus de bienfaits à l'écologie et au SAF que les autres producteurs.

De plus, même si la majorité des producteurs des différents groupes se considèrent comme écologiques (Tableau 24), ceux du groupe 3 se considèrent tous comme pratiquant l'agroforesterie alors qu'ils ne sont que 72,22% dans le groupe 1 et 38,88% dans le groupe 3 (Tableau 25).

Tableau 24 : Auto-considération comme écologique.

Se considère écologique	Non	Partiellement	Oui
Groupe 1	0/21 (0%)	2/21 (9.52%)	19/21 (90.48%)
Groupe 2	0/36 (0%)	2/36 (5.55%)	34/36 (94.44%)
Groupe 3	0/23 (0%)	0/23 (0%)	23/23 (100%)

Tableau 25 : Auto-considération comme producteur en SAF.

Se considère SAF	Non	Partiellement	Oui
Groupe 1	1/18 (5.55%)	4/18 (22.22%)	13/18 (72.22%)
Groupe 2	8/36 (22.22%)	14/36 (38.88%)	14/36 (38.88%)
Groupe 3	0/23 (0%)	0/23 (0%)	23/23 (100%)

Tableau 26 : Statistiques descriptives des variables socio-économiques. Les groupes différents significativement des deux autres pour une variable sont annotés d'un « (*) ».

	Données complètes (N=80)			Groupe 1 (N=21)			Groupe 2 (N=36)			Groupe 3 (N=23)		
	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Médiane
Age de mise en culture (an)	16,82	±10,97	14,12	16,36	±11,52	15	15,68	±11,22	9	19,03	±10,20	13,25
Surface en cacaoyers (ha)	2,94	±1,42	3	2,51	±1,18	3	2,43	±1,13	2,75	4,12 (*)	±1,38	4
Surface de l'exploitation (ha)	11,83	±3,67	11,25	11,20	±4,22	10	11,80	±2,77	11,5	12,47	±4,38	11,5
Surface de cacaoyers/surface de l'exploitation (%)	27,80	±15,74	23,61	27,36	±15,81	33,33	22,55	±14,03	18,87	36,43 (*)	±15,03	40,00
Revenus de la vente (Bol.)	20107	±20141	18002	10503	±10743	4499	12249	±9804	8199	41177 (*)	±23358	31096
Revenus par surface de cacaoyers (Bol./ha)	6510	±4761	6133	4269	±3796	1656	5567	±3722	6133	10032 (*)	±5198	8887
Main d'œuvre (pers.)	2,16	±0,79	2	2,14	±0,36	2	1,86	±0,64	2	2,65	±1,03	2
Outils motorisés (-)	1,56	±0,57	2	1,57	±0,74	1	1,44	±0,50	1	1,78	±0,42	2
Véhicules (-)	1,28	±1,08	2	1,28	±1,19	2	1,17	±1	1	1,43	±1,12	2
Temps de trajet jusqu'au marché (min)	38,43	±40,56	25	29,90	±27,34	30	20,44	±23,37	12,5	74,35 (*)	±49,09	90
Temps de trajet jusqu'au lieu de livraison (min)	15,65	±20,26	5	20,86	±22,36	20	17,67	±23,56	7,5	7,74 (*)	±6,22	5
Appui d'une organisation	0,45	±0,5	0	0,43	±0,51	0	0,28	±0,45	0	0,74 (*)	±0,45	1
Bienfaits présumés de l'écologie	9,05	±1,69	9	8,48	±1,21	8	8,86	±1,91	9	9,87 (*)	±1,42	11
Bienfaits présumés du SAF	7,82	±3,87	8	6,95	±3,93	7	7,05	±4,30	8	9,83 (*)	±2,10	11

Discussion

L'objectif de ce mémoire est de déterminer s'il est possible de distinguer des parcelles conduites selon des principes agroécologiques parmi d'autres à partir de données agronomiques et écologiques ainsi que d'en distinguer les caractéristiques. Dans un premier temps, les relations entre variables seront interprétées afin d'en comprendre les influences. Dans un second temps, une caractérisation des trois groupes définis par le clustering sera faite, à partir de leurs données écologiques, VAS et variables socio-économiques et la littérature. Pour finir, ces résultats seront comparés à ceux de la phase 1 du projet.

17. Relations entre variables

17.1. Cacaoyers

La majorité des variables semblent dépendre de l'âge de la cacaoyère mais sans pour autant qu'il existe une corrélation forte, qu'elle soit positive ou négative. Dans les cacaoyères plus âgées, on retrouve un nombre élevé d'individus d'arbres forestiers ainsi qu'une diversité élevée d'espèces d'arbres forestiers et de plantes agricoles. Deux explications peuvent être avancées ; la première est que la diversité et le nombre de plantes associées augmente au cours du temps, soit par régénération naturelle soit par l'action du producteur (Jacobi, 2013). La deuxième est l'augmentation de l'installation de cacaoyères en monocultures dans la région (Andres et al., 2016). Malgré une population végétale plus élevée dans les parcelles les plus anciennes, le taux de C est négativement corrélé à l'âge. Cela montre un manque de renouvellement de l'humus et donc une consommation de la « rente forestière » par la culture de cacaoyers. Jagoret et al. (2020) parlent d'un seuil minimal de population forestière pour entretenir le taux de matière organique qui ne semble donc pas atteint dans l'ensemble.

Les diamètres des troncs et des couronnes des arbres forestiers augmentent avec l'âge des placettes. Cela peut être dû à la croissance naturelle des arbres forestiers depuis le défrichage de la forêt, ou alors, les arbres trop larges n'ont pas pu être abattus à l'aide d'outils manuels lors de l'installation des parcelles les plus anciennes. Une comparaison de ces variables à partir d'un échantillonnage plus important permettrait de voir si la relation entre âge et diamètres est linéaire, signe d'une croissance naturelle, ou si l'on peut déterminer un « saut » dans la fonction, synonyme d'accès à des moyens de défrichage plus conséquents, tels que les tronçonneuses. En revanche, il est assez surprenant de voir qu'il n'y a pas de corrélation entre l'âge des cacaoyers et leur circonférence. Une hypothèse pouvant expliquer cela est que la coopérative « El Ceibo » a encouragé les producteurs à greffer ou surgreffer leurs arbres avec des variétés de cacaoyers qu'ils ont sélectionnées et qu'ils distribuent afin d'améliorer la quantité et la qualité de la production de cacao. Dans ce travail, la date utilisée pour définir l'âge des cacaoyers est celle de la plantation et non celle d'un potentiel renouvellement - d'une partie ou de la totalité - de la cacaoyère. De là peut venir une discordance entre l'âge considéré et l'âge réel du tronc. Pour l'éviter, il aurait fallu distinguer l'âge de la plantation

de l'âge du porte-greffe et de l'âge du greffon dans le cas de cacaoyers greffés. Cependant, cela complexifie fortement l'analyse, peut-être inutilement.

La circonférence des troncs de cacaoyers est plus faible lorsque que le nombre d'arbres forestiers et de plantes agricoles augmente. Cela pourrait être causé par une concurrence pour les ressources nutritives ou par une concurrence pour l'accès à la lumière (Blaser et al., 2017). Comme la circonférence est également plus faible lorsque l'ombrage augmente, la deuxième hypothèse peut être favorisée.

17.2. Ombrage, arbres forestiers et plantes agricoles

La taille des arbres est inversement proportionnelle au nombre d'individus et d'espèces d'arbres forestiers et de plantes agricoles dans les plantations. Cela illustre une observation faite sur le terrain, où les producteurs distinguent deux types d'agroforesterie : les SAF simples et les SAF complets ou « multi-étagés ». Le premier contient seulement quelques individus dans la plantation, de grande taille et ne formant pas toujours une réelle canopée continue. Le second système est, quant à lui, composé d'une grande diversité d'espèces occupant plusieurs niveaux différents. L'ombrage est plus important dans ce système complet ; il est fortement corrélé au nombre d'individus et à la diversité des espèces d'arbres forestiers et de plantes agricoles.

17.3. pH

Le pH est lié positivement au nombre d'arbres forestiers, à leur diversité et à la diversité des espèces de plantes agricoles. Il est également corrélé positivement à l'ombrage. La quantité et la diversité des sources de matière organique semble tamponner le pH (Delvaux & Biolders, 2020). Cet effet tampon semble un avantage car le pH des sols inventorié présente une valeur dans la moyenne basse de la plage optimale pour la culture du cacaoyer, une acidification pourrait rapidement être délétère.

De plus, un pH plus haut est corrélé à un C/N plus élevé, signifiant un taux de matière organique plus élevé. Le taux optimal de matière organique pour assurer la fertilité de la cacaoyère est de 3,5% (Mossu, 1990). Or, plus de la moitié des placettes inventoriées ont un taux de matière organique inférieur à 3%⁸, la valeur médiane étant de 2,9% pour l'ensemble des placettes.

17.4. Litière, couverture herbacée et surface arbustive

La couverture herbacée est opposée à la surface arbustive et dépend en fait de la conduite de la plantation. Une strate arbustive se développe lorsque le producteur ne désherbe que peu fréquemment sa parcelle. Lorsque les arbustes sont détruits, une couverture de plantes herbacées prend leur place. À noter que beaucoup de parcelles ne présentent ni arbustes ni plantes herbacées.

⁸ Le taux de matière organique est obtenu en multipliant le taux de carbone par 2 (Pribyl, 2010).

La couverture herbacée est donc indicatrice d'un désherbage régulier ; celui-ci se fait souvent à l'aide d'une débroussailleuse et broie en même temps la couche de feuille présente sur le sol, expliquant la corrélation négative entre la couverture herbacée et la litière.

17.5. Altitude et pente

La pente et l'altitude sont fortement corrélées entre elles car les cacaoyères se situent dans deux écotypes différents : la plaine et les versant des montagnes. La topographie de la région ne présente pas de plateau d'altitude. Toutes les parcelles cultivées sur une surface plane se trouvent dans la plaine et réciproquement, toutes les parcelles situées à une altitude plus élevée que la plaine sont sur un versant, avec une pente plus ou moins forte.

L'âge des cacaoyères diminue avec la pente et l'altitude. Cela signifie que les versants ont été mis en culture plus récemment que la plaine du fait que l'espace disponible dans celle-ci est pleinement exploité, par la cacaoculture, mais également par l'élevage ou l'urbanisation. Il serait intéressant d'étudier si cette colonisation des versants est due à une augmentation nette de la surface occupée par les cacaoyères ou si elle est causée par une « ceinture cacaoyère⁹ ». Le diamètre des troncs des arbres forestiers est également plus faible avec l'altitude, montrant un défrichement plus récent de ces parcelles.

Lorsque la pente augmente, le nombre d'espèces et d'individus d'arbres forestiers et de plantes agricoles diminue. La pente et l'âge des cacaoyers étant négativement liés, l'explication de cette opposition entre pente et diversité est probablement similaire à la relation entre l'âge et la diversité (17.1). Une autre hypothèse est, qu'à cause de la pente, la conduite de la parcelle est moins aisée. Le producteur est donc davantage amené à simplifier son système, tendant vers la monoculture.

17.6. Conclusion

Beaucoup de variables sont liées à l'âge de la cacaoyère. Avec les résultats obtenus, il n'est cependant pas possible de déterminer si les différences existant au sein d'une variable en fonction de l'âge est le fruit d'une évolution au cours du temps de la parcelles, et que les plantations les plus récentes seront amenées à avoir les mêmes valeurs une fois qu'elles auront atteint le même âge, ou bien si ces différences sont dues à un changement de pratiques dans l'installation et/ou la conduite des parcelles les plus récentes.

La relation probablement la plus surprenante est l'influence de la pente et de l'altitude sur de nombreuses autres variables. Par des recherches supplémentaires, notamment via des entretiens semi-structurés, il pourrait être intéressant de comprendre si cette influence de la topographie est causée par des conditions géologiques et microclimatiques différentes à la plaine ou plutôt par un changement dans la conduite de la plantation, à

⁹ Front de progression des cultures de cacaoyers sur la forêt, laissant derrière lui les cacaoyères abandonnées car plus assez productives.

cause de la praticité moindre de la parcelle ou de son éloignement des centres urbains, situés dans la plaine ou encore pour d'autres raisons que celles présumées.

18. Caractérisation des groupes

18.1. Interprétation des variables agronomiques et écologiques

18.1.1. Groupe 1

Le groupe 1 est caractérisé par un faible nombre d'arbres dans les parcelles, environ 34 arbres par hectares. Cela représente 81% d'arbres en moins que la moyenne générale des placettes, qui se situe à 181 arbres par hectares. Le nombre d'espèces d'arbres à l'hectare est inférieur à 1, montrant que la majorité des placettes de ce groupe ne comportent aucun arbre. Les arbres forestiers présents ont un diamètre des troncs 40% supérieur et un diamètre des couronnes 67% supérieur à la moyenne générale. L'âge moyen des cacaoyers de ce groupe, intermédiaire par rapport aux valeurs des deux autres, est de 19 ans.

A partir des données de population forestière, on peut conclure que ce groupe n'est pas cultivé en agroforesterie agroécologique telle que définie dans l'état de l'art (4.1). Même si quelques gros arbres subsistent, ils ne sont pas assez nombreux pour créer un microclimat et exercer une influence sur la culture de cacaoyers ou sur le sol. D'ailleurs, celui-ci est couvert par la litière la moins épaisse (- 23% par rapport à la moyenne¹⁰) et le taux de carbone est le plus faible des trois groupes, sans que la différence de ce dernier ne soit statistiquement significative. Il serait intéressant, dans une recherche future et avec un échantillonnage représentatif, d'étudier la variation du taux de carbone en fonction du groupe et de l'âge de la cacaoyère afin de déterminer si la différence augmente avec le temps, signifiant une consommation plus importante et/ou plus rapide de la « rente forestière ».

D'autres variables montrent une conduite plus intensive dans ce groupe 1, telles que la faible diversité de plantes agricoles avec en moyenne deux espèces en plus que le cacaoyers (- 28%), un ombrage faible de 40% (- 20%) et un nombre de variétés de cacao plus élevé (+ 46%), signifiant l'usage de cultivars greffés plutôt que d'hybrides issus de semis¹¹.

18.1.2. Groupe 2

Le groupe 2 est très fortement défini par la pente et l'altitude, qui sont supérieures aux deux autres groupes. En fait, ce groupe reprend la majorité des parcelles situées sur les versants car la pente moyenne des autres groupes est inférieure à 2% alors que celle du groupe est de 16% en moyenne. Il est également le groupe avec l'âge moyen le plus faible des trois (- 11%).

Le nombre d'arbres forestiers est inférieur à la moyenne, avec 65 arbres/ha (- 64%) mais, contrairement au groupe 1, il n'est pas compensé par des diamètres de troncs et de couronnes supérieurs à la moyenne générale. Il s'agit d'ailleurs du groupe au diamètres

¹⁰ A partir d'ici, les pourcentages indiqués entre parenthèse correspondent à la différence par rapport à la moyenne générale.

¹¹ Les hybrides issus de semis sont considérés comme une seule et même variété.

moyens les plus petits (- 28% pour les troncs et - 25% pour les couronnes). L'ombrage reste inférieur à la moyenne générale (- 16%) et est intermédiaire aux deux autres groupes, avec 42% d'ombrage. De plus, le nombre d'espèces (- 36%) et d'individus (- 40%) de plantes agricoles sont les plus faibles des trois groupes. Cette faible concurrence et le faible taux d'ombrage sont probablement responsables de la supériorité de la circonférence des cacaoyers par rapport aux autres groupes (+ 17% par rapport au groupe 1, + 29% par rapport au groupe 3) ; l'écart-type de cette valeur est toutefois assez élevée.

Le pH du groupe 2 est inférieur aux groupes 1 et 3 et, avec une valeur de 6, se situe à la limite inférieure de la plage optimale pour le cacaoyer (Mossu, 1990).

De manière générale, on retrouve l'écart-type le plus élevé et le plus grand écart entre moyenne et médiane par rapport aux autres groupes, montrant une forte variabilité au sein des résultats de ce groupe 2. Il semble que le regroupement des placettes est dû principalement à leur situation topographique commune, sur les versants des montagnes. Les autres paramètres sont variables et ne permettent pas une identification précise du système, même si une tendance aux SAF simples ou aux monocultures semble être présente.

18.1.3. Groupe 3

Le groupe 3 est caractérisé par des variables typiquement agroforestières ; une diversité supérieure (+ 147% d'espèces d'arbres, + 82% d'espèce de plantes agricoles), ainsi qu'un nombre d'individus d'arbres (+ 174%) et de plantes agricoles (+ 62%) également supérieurs. Cela exerce une influence sur l'ombrage qui est fortement plus élevé que pour les deux autres groupes. Il est à 72% alors que la moyenne générale est de 50%. A cause de cet ombrage, la couverture herbacée de ce groupe est la plus faible, avec 32% alors que la moyenne générale est de 49%. De même, la circonférence moyenne des troncs de cacaoyers est plus petite (- 13%), et ce malgré des cacaoyères plus âgées (+ 29%).

Selon Saj et al. (2017), les systèmes agroforestiers sont plus à même de conserver la fertilité du sol via une production plus importante de matière organique. Cela semble se vérifier dans ce groupe-ci ; le taux de C est le plus élevé des trois avec une valeur de 1,76 %, la moyenne générale étant à 1,52 (+16 %). En multipliant ces valeurs par un facteur 2 pour obtenir le taux de matière organique, on arrive à une valeur de 3,44% pour le groupe 3 et de 3,04 pour la moyenne générale. Pour rappel, le taux de MO idéal pour la culture du cacaoyers est de 3,5% (Mossu, 1990). Pour le rapport C/N ainsi que pour le pH, le groupe 3 possède des valeurs moins proches des limites basses que les deux autres groupes, même si tous les trois sont dans les zones optimales de culture pour le cacaoyer.

18.1.4. Conclusion

La classification des placettes en fonction de leurs variables écologiques et agronomiques a permis de distinguer le groupe 3 comme pratiquant d'avantage l'agroforesterie agroécologique telle qu'elle a été définie dans l'état de l'art. Ses données de peuplement

sont supérieures aux deux autres groupes et les conséquences sur les paramètres du sol présumées à l'aide de la littérature s'en trouvent confirmées.

La distinction des systèmes sur base des paramètres écologiques entre les groupes 1 et 2 est plus difficile. Elle réside principalement dans le diamètre de la couronne et du tronc des arbres forestiers.

En outre, le groupe 2 est très fortement caractérisé par sa situation topographique, sur les versants alors que les deux autres groupes sont situés dans la plaine.

Pour résumer, sur base des critères écologiques et agronomiques, les placettes peuvent se distinguer en un système de plaine fortement agroforestier¹² (groupe 3), un système de plaine peu agroforestier (groupe 1) et un système de versant peu agroforestier (groupe 2).

18.2. Interprétation des variables agroécologiques synthétiques et de l'indice agroécologique

L'analyse de l'indice agroécologique de la Phase 1 appliqué à chacun des trois groupes permet de confirmer le caractère agroécologique du groupe 3 (Figure 1). L'analyse des VAS confirme que la diversité cultivée est supérieure dans ces parcelles. Elle montre aussi

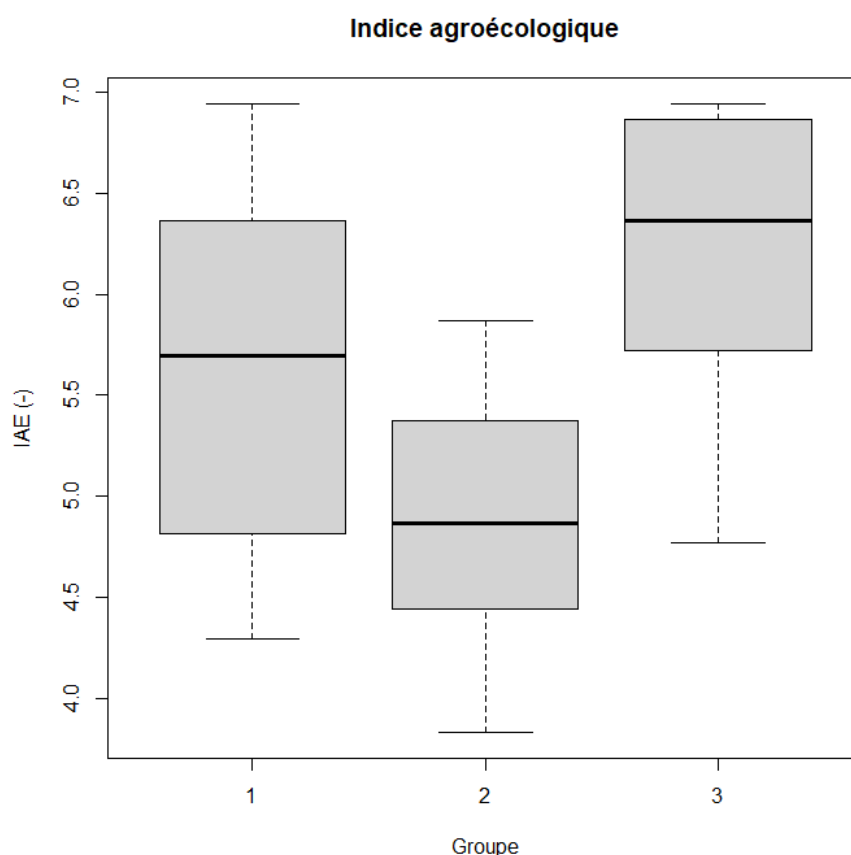


Figure 17 : Boxplot des indices agroécologiques des trois groupes

¹² Au sens agroécologique du terme.

que les trois groupes ont sensiblement le même nombre d'activités agricoles sur l'exploitation. Or, le groupe 3 possède un nombre plus faible de parcelles ne contenant pas de cacaoyers. Cela semble signifier une intégration plus grande des différentes activités de l'exploitation grâce à des cultures d'avantages associées et moins de parcelles dédiées à une seule production.

Une autre information intéressante est la corrélation négative entre la pente et les interventions phytotechniques agroécologiques ainsi qu'avec les pratiques d'installation de la parcelle. La topographie apparaît comme une réelle contrainte pour la mise en place de systèmes agroforestiers agroécologiques, comme l'illustre également la corrélation négative entre la pente et l'IAE.

Pour finir, les IAE (Figure 17) confirment la distinction du groupe 3 comme étant le plus agroécologique et le groupe 2 le moins. Le groupe 1 a un indice intermédiaire aux deux autres groupes. Cette affirmation est confirmée par la position des groupes dans le plan des composantes principales de l'AFDM (Figure 18). Le groupe 3 est corrélé positivement à la dimension 1, représentant le plus de variables agroécologiques ; le groupe 1 est corrélé positivement à la Dim. 3 mais est indépendant des variables de diversité agroforestières ; le groupe 2 est opposé à la majorité des VAS compte tenu de sa corrélation négative avec les deux CP du plan.

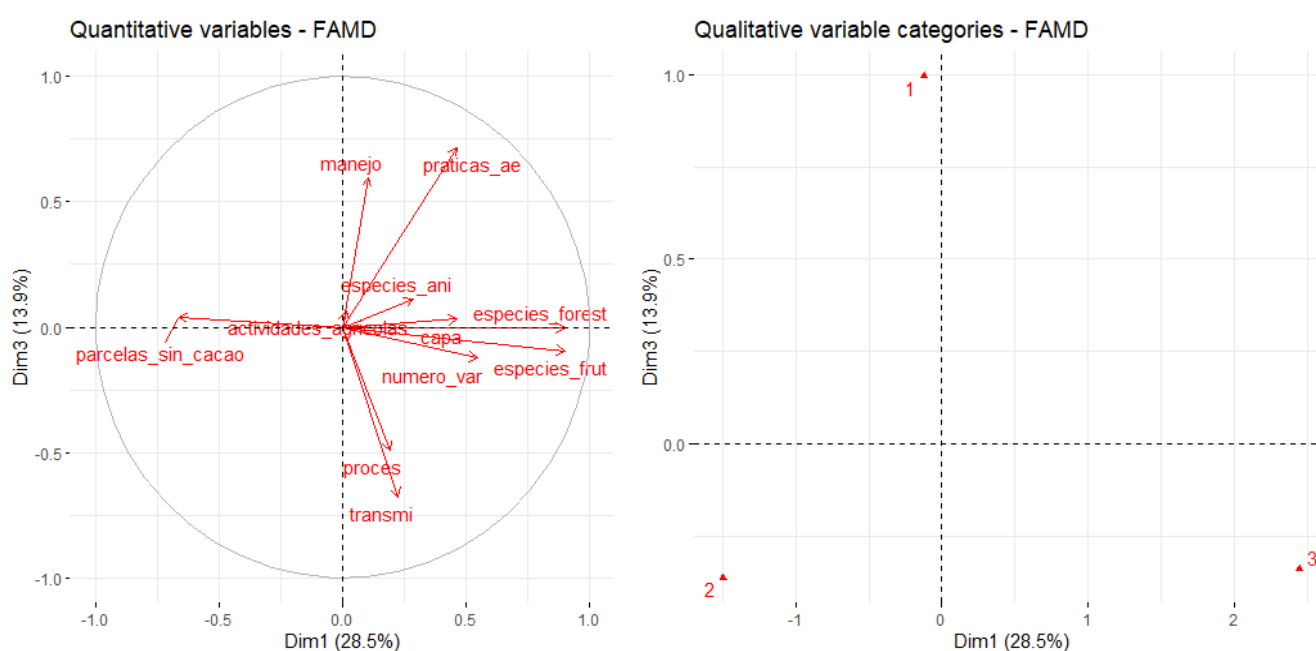


Figure 18 : Cercle de corrélation des variables quantitatives et coordonnées des variables qualitatives de l'AFDM.

18.3. Interprétation des variables socio-économiques

Encore une fois, le groupe 3 se distingue des deux autres ; les producteurs en faisant partie ont un revenu issu de la vente de cacao, net et par hectare, beaucoup plus élevé. En net, ils touchent en moyenne entre 3 et 4 fois plus que les producteurs des groupes 2 et 1,

respectivement. Comme les producteurs du groupe 3 possèdent une surface de cacaoyers significativement plus grande que celle des deux autres groupes, la différence de revenus à l'hectare diminue, mais reste environ deux fois supérieure. L'influence des organisations « El Ceibo » et « AOPEB » semble avoir un rôle dans cette différence car le nombre de producteurs du groupe 3 ayant été accompagnés est beaucoup plus élevé (+ 25%) que dans les deux autres groupes. Le groupe 2, le moins agroécologique, est celui qui en bénéficie le moins, avec seulement 30% de producteurs accompagnés. Cette influence sur le revenu par les organisations peut être double. D'une part, par un soutien technique permettant une meilleure production, et d'autre part, grâce à un meilleur prix accordé aux producteurs, « El Ceibo » étant certifié « Fairtrade ». Comme l'ombrage est fortement supérieur chez le groupe 3 et qu'il pénalise le rendement, on peut supposer que la deuxième raison est prépondérante (Jacobi, 2013).

La totalité des producteurs du groupe 3 disent cultiver leurs cacaoyères en SAF et, alors que les analyses tendent à montrer que le groupe 1 ne présente pas beaucoup de caractéristiques de l'agroforesterie, la grande majorité de ses producteurs considèrent la pratiquer aussi. En revanche, moins de 40% des producteurs du groupe 2 se considèrent en SAF. En outre, le groupe 3 trouve significativement plus de bienfaits au SAF et à l'écologie que les deux autres.

18.4. Comparaison avec les résultats de la phase 1

Dans l'analyse des résultats la phase 1, les 360 producteurs ont été classés en 5 groupes par classification ascendante hiérarchique et trois systèmes différents parmi eux se distinguent ; le groupe considéré comme le plus agroécologique appelé « G5.4 », le groupe le moins agroécologique appelé « G5.2 », et le groupe « G5.3 » qui se caractérise par des producteurs réalisant beaucoup moins d'étapes de transformation sur le cacao avant de le commercialiser. Les deux groupes restants étant intermédiaires au niveau de leurs pratiques agroécologiques ; le groupe « G5.1 » étant proche du « G5.2 » et le groupe « G5.5 » de « G5.4 » (Bertin, 2020).

La répartition des placettes dans chacun des clusterings a été comparée (Tableau 27) et il apparaît que :

- Aucune placette de l'inventaire n'appartient au « G5.5 »
- Le « G5.3 » contient uniquement des placettes du groupe 1. A noter que ces placettes sont toutes issues du même producteur. Ce résultat ne paraît donc pas assez significatif pour en tirer des conclusions.
- La moitié des autres placettes du groupe 1 fait partie du « G5.4 », le plus agroécologique, et le tiers appartient aux « G5.1 » et « G5.2 », les moins agroécologiques.
- 80% des placettes du groupe 2 se retrouvent dans les deux « G5 » les moins agroécologiques et les deux-tiers sont même dans le groupe le moins agroécologique, le « G5.2 ».

- Les trois-quarts des placettes du groupe 3, celui qui paraît le plus agroforestier et agroécologique, sont également placées dans le groupe « G5.4 », le plus agroécologique de ce clustering.
- Le quart restant des placettes du groupe 3 appartient au « G5.1 », aucune placette n'a été catégorisée comme appartenant au « G5.2 ».

Tableau 27 : Comparaison des résultats des clusterings pour les placettes de l'inventaire.

Comparaison des groupes des placettes	G5.1	G5.2	G5.3	G5.4
Groupe 1	3/21 (14,29%)	4/21 (19,05 %)	3/21 (14,29%)	11/21 (52,38%)
Groupe 2	6/36 (16,67%)	24/36 (66,67%)	0/36 (0,00%)	6/36 (16,67%)
Groupe 3	6/23 (26,09%)	0/23 (0,00%)	0/23 (0,00%)	17/23 (73,91%)

Ces résultats sont cohérents avec la définition du groupe 3 comme le plus agroécologique et le groupe 2 comme l'étant le moins. La distinction pour le groupe 1 est plus mitigée et paraît intermédiaire aux deux autres groupes, de manière semblable aux résultats obtenus pour l'IAE.

18.5. Conclusion

Le caractère agroforestier déterminé par les variables écologiques et agronomiques est confirmé par les VAS. De plus, le groupe 3, le plus agroforestier, apparaît comme étant également le plus agroécologique, confirmant la définition de ce système comme étant en agroforesterie agroécologique. La comparaison des groupes avec les VAS et l'IAE a permis de déterminer une différence significative dans le degré d'adhésion à l'agroécologie entre les groupes 1 et 2.

Elle a permis de déterminer aussi que la différence d'adhésion entre les groupes 1 et 3 se situe au niveau des VAS relatives à l'agroforesterie. Cette différence est probablement provoquée par la potentielle concurrence entre le SAF et la production de cacao, limitant sa mise en place chez certains producteurs (Jacobi, 2013). Or, le revenu des producteurs du groupe 3 est bien supérieur à celui des producteurs du groupe 1. Si diminution de production il y a, elle est largement compensée par une meilleure valorisation de celle-ci.

Les deux clusterings donnent des résultats cohérents, à part quelques différences, et ceci malgré des approches parfois assez différentes. Tout d'abord, le nombre de producteurs (24) chez qui des placettes ont été inventoriées est très faible par rapport au nombre de producteurs de la phase 1 (360), ils n'en représentent que 6,7%. Ensuite, la méthodologie

de ces deux phases d'étude est très différente puisqu'il s'agit uniquement d'enquête, donc de questions posées au producteur pour la première phase, et d'inventaires, donc de mesures prises sur le terrain pour la deuxième phase. Enfin, les unités d'analyse sont sensiblement différentes puisque la phase 1 porte sur la ferme tout entière et la phase 2 sur des placettes, ce qui aurait pu conduire à des problèmes liés à la représentativité.

19. Perspectives et améliorations

Cette recherche a permis de montrer l'existence d'une cohérence entre l'adhésion à l'agroécologie des producteurs et certains paramètres agronomiques et écologiques directement inventoriés dans les parcelles de cacaoyers. Elle a permis d'identifier un groupe de producteurs dont les placettes présentaient des caractères spécifiques à l'agroforesterie agroécologique.

Elle a permis également de montrer que certains paramètres associés à l'agroforesterie agroécologique, susceptibles de diminuer le rendement, tels qu'une concurrence potentielle des arbres et plantes agricoles associées, ne se traduisent pas par une diminution de revenus, en tous cas lorsque la commercialisation est certifiée « commerce équitable ».

Ce mémoire a également mis en lumière l'influence du caractère topographique des parcelles dans l'adoption de pratiques agroécologiques sans pour autant pouvoir en identifier la cause. De manière similaire, d'autres relations entre variables ont été mises en évidence sans pouvoir en expliquer la raison ; les hypothèses étant souvent autant d'ordre agronomique qu'économique et social.

Pour améliorer la compréhension des résultats, une fois les groupes de producteurs identifiés et caractérisés, des entretiens semi-dirigés pourraient être réalisés afin d'enrichir l'analyse et de passer du descriptif, comme ce fut le cas dans ce mémoire, à l'explicatif. De plus, cela permettrait d'avoir un historique détaillé de la plantation, sur les pratiques utilisées et les raisons du choix de celles-ci.

De plus, un échantillonnage plus rigoureux et plus étendu aurait permis une analyse de meilleure qualité statistique. Cela pourrait être particulièrement intéressant quant à l'âge des parcelles afin de déterminer de manière plus précise la potentielle évolution des paramètres écologiques au cours du temps.

La surface terrière¹³ ou surface basale (Saj et al., 2019), n'a pas été utilisée dans ce mémoire car découverte dans la littérature malheureusement après la réalisation du terrain. Elle n'a pas pu être calculée à partir des données inventoriées car la circonférence des plantes agricoles n'a pas été mesurée. De plus, il aurait fallu l'adapter afin d'inclure les plantes agricoles herbacées telles que les bananiers, très présents dans les placettes. Cependant, elle aurait permis d'établir des relations intéressantes entre cacaoyers, plantes associées, paramètres de sol et indicateurs de production, tels que le revenu.

¹³ « Surface terrière : surface de la section d'un arbre à hauteur de poitrine (130 cm). Ici, on a sommé les surfaces terrières du peuplement cacaoyer d'une parcelle échantillonnée. La surface terrière totale de la parcelle correspond à la somme de l'ensemble des arbres constituant la parcelle échantillonnée. » (Saj et al., 2019)

Conclusion

La production de cacao est l'une des cultures tropicales d'exportation les plus importantes au monde, faisant vivre un grand nombre de personnes. La demande en cacao, toujours croissante, augmente la pression qu'exercent les cacaoyères sur l'environnement, déjà responsables d'une déforestation de plus de 10 millions d'hectares de forêt tropicale. Afin d'augmenter encore la production, les systèmes agroforestiers traditionnels sont remplacés par de la monoculture. Or, pour maintenir les rendements dans le temps, ce mode de production est dépendant des engrais minéraux et des produits phytosanitaires, généralement inaccessibles pour les producteurs. Sans cela, les sols s'épuisent plus rapidement et finissent par s'éroder, accentuant d'avantage la pression sur la forêt.

L'agroforesterie agroécologique apparaît alors comme une opportunité de pérenniser d'avantage les cacaoyères grâce à une meilleure protection de la fertilité des sols, tout en offrant une autonomie alimentaire supérieure au producteur, une diversification de ses revenus ainsi qu'une meilleure sauvegarde de la biodiversité. Elle se différencie de l'agroforesterie traditionnelle par sa conception et sa gestion active des associations d'espèces, cherchant à optimiser les relations qu'elles ont entre elles.

Dans ce contexte, un projet de promotion de l'agroécologie et de l'agroforesterie dans la région de l'Alto Beni, en Bolivie, a été mis en place par divers acteurs dont notamment les ONG bolivienne et belge « AOPEB » et « SOS Faim ». 10 ans après le début de ce projet, une étude a été lancée afin de faire un état des lieux des systèmes de productions en cacaoculture et en caféiculture. C'est dans ce cadre que s'est inscrit ce mémoire, avec comme objectif de voir s'il était possible de caractériser les pratiques agroforestières et agroécologiques de producteurs de cacao dans une parcelles, grâce à un inventaire de paramètres écologiques et agronomiques. Les variables inventoriées concernent le peuplement de cacaoyers, le peuplement forestiers et de plantes agronomiques associées, l'ombrage, la couverture du sol, le pH, le taux de carbone et le rapport C/N.

À partir des résultats des analyses des données récoltées, les placettes d'inventaires ont pu être divisées en trois groupes distincts, de 21, 36 et 23 placettes. Un groupe (groupe 3) a pu être déterminé comme le plus agroforestier et le plus agroécologique, à la fois à partir des données de l'inventaire et à partir des données de l'enquête préliminaire. Au niveau agroforestier, il se caractérise par un nombre d'arbres et de plantes agricoles plus élevé par hectares ainsi que par une diversité végétale nettement supérieure aux autres groupes. Au niveau des paramètres écologique, cela se traduit par un ombrage supérieur, un taux de MO et un rapport C/N plus proches des valeurs optimales.

Les variables agroécologiques synthétiques, résumées par l'indice agroécologique, ont permis de montrer le caractère agroécologique de l'agroforesterie pratiquée par les

producteurs du groupe 3. De plus, elles ont permis de différencier l'adhésion à l'agroécologie des deux autres groupes, le groupe 2 étant le groupe avec le score le plus faible. Quant au groupe 1, sa différence par rapport au groupe 3 est principalement due aux VAS agroforestières. La mise en évidence de la corrélation négative entre l'IAE et la pente est inattendue et la question mériterait d'être approfondie.

Les résultats de ce mémoire montre qu'il est possible de déterminer l'intérêt pour l'agroécologie des producteurs à partir des données écologiques et agronomiques, pouvant être inventoriées directement dans les parcelles. Cependant, certains liens entre variables restent sans explications précises. La raison de la forte influence des variables topographiques reste également inconnue. Si le travail était à refaire, une attention particulière serait apportée au niveau de la collecte d'informations socio-économiques, par exemple via des entretiens semi-dirigés, et au couplage de ces données avec celles des inventaires. Un échantillonnage plus rigoureux permettrait d'avoir une analyse statistique plus solide. De plus, en assurant une meilleure représentativité de la diversité des parcelles, les influences de l'âge des plantations ou de la situation géographique et topographique pourrait être mieux interprétée.

Bibliographie

- Ahenkorah, Y., Halm, B. J., Appiah, M. R., Akrofi, G. S., & Yirenkyi, J. E. K. (1987). Twenty Years' Results from a Shade and Fertilizer Trial on Amazon Cocoa (*Theobroma cacao*) in Ghana. *Experimental Agriculture*, 23(1), 31-39.
<https://doi.org/10.1017/S0014479700001101>
- Andres, C., Comoé, H., Beerli, A., Schneider, M., Rist, S., & Jacobi, J. (2016). Cocoa in Monoculture and Dynamic Agroforestry. In E. Lichtfouse (Éd.), *Sustainable Agriculture Reviews* (Vol. 19, p. 121-153). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_3
- Armengot, L., Barbieri, P., Andres, C., Milz, J., & Schneider, M. (2016). Cacao agroforestry systems have higher return on labor compared to full-sun monocultures. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(4), 70.
<https://doi.org/10.1007/s13593-016-0406-6>
- Beg, M. S., Ahmad, S., Jan, K., & Bashir, K. (2017). Status, supply chain and processing of cocoa—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 66, 108-116.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.007>
- Bertin, P. (2019). *Análisis de sistemas agroforestales en la producción agroecológica de café y cacao : Sus aportes en predios de agricultores familiares en zonas tropicales de Bolivia* [Rapport interne].
- Bertin, P. (2020). *Segundo informe interno provisorio y resultados de la encuesta en sistemas de producción en cacao, región de Alto Beni, Bolivia* [Rapport interne].
- Bertin, P. (2021a). *LBRAI2216 : Phytotechnie tropicale* [Cours].
- Bertin, P. (2021b). *Variables sintéticas y originales usadas en el análisis* [Rapport interne].

- Bhullar, G., Bautze, D., Adamtey, N., Armengot, L., Cicek, H., Goldmann, E., Riar, A., Rüegg, J., Schneider, M., & Huber, B. (2021). *What is the contribution of organic agriculture to sustainable development ? A synthesis of twelve years (2007–2019) of the “long-term farming systems comparisons in the tropics (SysCom)”*. Research Institute of Organic Agriculture FiBL.
- Blaser, W. J., Oppong, J., Yeboah, E., & Six, J. (2017). Shade trees have limited benefits for soil fertility in cocoa agroforests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 243, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.007>
- Clough, Y., Faust, H., & Tschardt, T. (2009). Cacao boom and bust : Sustainability of agroforests and opportunities for biodiversity conservation. *Conservation Letters*, 2(5), 197-205. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2009.00072.x>
- Cornejo, O. E., Yee, M.-C., Dominguez, V., Andrews, M., Sockell, A., Strandberg, E., Livingstone, D., Stack, C., Romero, A., Umaharan, P., Royaert, S., Tawari, N. R., Ng, P., Gutierrez, O., Phillips, W., Mockaitis, K., Bustamante, C. D., & Motamayor, J. C. (2018). Population genomic analyses of the chocolate tree, *Theobroma cacao* L., provide insights into its domestication process. *Communications Biology*, 1(1), 167. <https://doi.org/10.1038/s42003-018-0168-6>
- DataCamp. (2021a). *Hmisc package—RDocumentation*. <https://www.rdocumentation.org/packages/Hmisc/versions/4.6-0>
- DataCamp. (2021b). *rcorr function—RDocumentation*. <https://www.rdocumentation.org/packages/Hmisc/versions/4.5-0/topics/rcorr>
- Datanovia. (2018). Test de Kruskal-Wallis dans R : Excellente Référence. *Datanovia*. <https://www.datanovia.com/en/fr/lessons/test-de-kruskal-wallis-dans-r/>
- Delvaux, B., & Biélers, C. (2020). *Gestion et aménagement des sols en régions chaudes* [Cours].

- Dinno, A. (2017). *Package "dunn.test"*. <https://cran.r-project.org/web/packages/dunn.test/dunn.test.pdf>
- Draye, X., & Govaerts, B. (2020). *LBIRA2110—Modélisation et exploration de données multivariées* [Cours].
- El Ceibo. (2022). *EL CEIBO*. <http://www.elceibo.com/>
- FAOSTAT. (2021). *FAOSTAT*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoeft, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M., Flora, C., & Poincelot, R. (2003). Agroecology : The Ecology of Food Systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(3), 99-118. https://doi.org/10.1300/J064v22n03_10
- Franzen, M., & Borgerhoff Mulder, M. (2007). Ecological, economic and social perspectives on cocoa production worldwide. *Biodiversity and Conservation*, 16(13), 3835-3849. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9183-5>
- Givron, C. (2021). *Communication personnelle* [Communication personnelle].
- Gliessman, S. R., Engles, E., & Krieger, R. (1998). *Agroecology : Ecological processes in sustainable agriculture*. Ann Arbor Press.
- Gold, M. A., & Garrett, H. E. (2015). Agroforestry Nomenclature, Concepts, and Practices. In H. E. "Gene" Garrett (Éd.), *ASA, CSSA, and SSSA Books* (p. 45-56). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/2009.northamericanagroforestry.2ed.c3>
- Husson, F. (2018). *R pour la statistique et la science des données*. Presses universitaires de Rennes.

- Husson, F., Josse, J., & Pages, J. (2017). *Principal component methods—Hierarchical clustering—Partitional clustering: Why would we need to choose for visualizing data?* 17.
- Husson, F., Lê, S., & Pagès, J. (2016). *Analyse de données avec R* (2e éd. revue et augmentée). Presses universitaires de Rennes.
- ICCO. (2022). Growing Cocoa. *International Cocoa Organization*.
<https://www.icco.org/growing-cocoa/>
- ISO. (1993). *Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau—Méthode gravimétrique* (ISO11465:1993).
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/20886/4c8fa4a2b649499eb7351ef3e4f27a75/ISO-11465-1993.pdf>
- Jacobi, J. (2013). *The Contribution of Organic Cocoa Production to Social-ecological Resilience in a Changing Climate: A Comparison of Organic and Non-organic Cocoa Cultivation Systems in Alto Beni, Bolivia*.
<https://books.google.be/books?id=32rdoQEACAAJ>
- Jacobi, J., Andres, C., Schneider, M., Pillco, M., Calizaya, P., & Rist, S. (2014). Carbon stocks, tree diversity, and the role of organic certification in different cocoa production systems in Alto Beni, Bolivia. *Agroforestry Systems*, 88(6), 1117-1132.
<https://doi.org/10.1007/s10457-013-9643-8>
- Jacobi, J., Schneider, M., Bottazzi, P., Pillco, M., Calizaya, P., & Rist, S. (2015). Agroecosystem resilience and farmers' perceptions of climate change impacts on cocoa farms in Alto Beni, Bolivia. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(2), 170-183.
<https://doi.org/10.1017/S174217051300029X>

- Jagoret, P., Ruf, F., Castel, C. D., Rafflegeau, S., Saj, S., Snoeck, D., & Wibaux, T. (2018). *L'agroforesterie : Des pratiques diversifiées pour la transition agro-écologique de la cacaoculture africaine*. 26.
- Jagoret, P., Saj, S., & Carimentrand, A. (2020). Cacaoculture agroforestière en Afrique : L'art de concilier production durable et services écologiques. *Perspective*, 54, 1-4.
<https://doi.org/10.19182/perspective/31915>
- Killeen, T. J., García, E., & Beck, S. G. (1993). *Guía de Arboles de Bolivia*. Herbario Nacional de Bolivia.
- Läderach, P., Martinez-Valle, A., Schroth, G., & Castro, N. (2013). Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Côte d'Ivoire. *Climatic Change*, 119(3-4), 841-854.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0774-8>
- Leveau, L. (2016). *Caractérisation des états chimiques, physiques et biologiques de sols limoneux belges de grande culture travaillés selon des systèmes culturels avec ou sans labour (Chaumont-Gistoux, Belgique)*.
- López, A., & Somarriba, E. (2005). *Árboles frutales en fincas de cacao orgánico del Alto Beni, Bolivia*. 8.
- MacFarland, T. W., & Yates, J. M. (2021). *Using R for Biostatistics*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62404-0>
- Mialet, I. (1990). *Le cacaoyer, Theobroma cacao L.. Modélisation de son architecture et de sa croissance. Exemple de l'hybride UPA402 x C410* [Thesis, USTL].
<https://agritrop.cirad.fr/350585/>
- Middendorp, R. S., Vanacker, V., & Lambin, E. F. (2018). Impacts of shaded agroforestry management on carbon sequestration, biodiversity and farmers income in cocoa

- production landscapes. *Landscape Ecology*, 33(11), 1953-1974.
<https://doi.org/10.1007/s10980-018-0714-0>
- Mossu, G. (1990). *Le Cacaoyer*. Agence de Coopération culturelle et technique
 Maisonneuve et Larose Centre technique de coopération agricole et rurale.
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., da Silva e Mota, J. W., Looor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., &
 Schnell, R. J. (2008). Geographic and Genetic Population Differentiation of the
 Amazonian Chocolate Tree (*Theobroma cacao* L). *PLoS ONE*, 3(10), e3311.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- Nair, K. P. P. (2010). Cocoa (*Theobroma cacao* L.). In *The Agronomy and Economy of
 Important Tree Crops of the Developing World* (p. 131-180). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384677-8.00005-9>
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry
 systems versus monocultures : A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental
 Research Letters*, 15(10), 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- Ofori-Frimpong, K., Asase, A., Mason, J., & Danku, L. (2007). Shaded versus un-shaded
 cocoa : Implications on litter fall, decomposition, soil fertility and cocoa pod
 development. *CATIE Turrialba*.
- O'Loughlin, C., Courtney Jones, S., Jenkins, M., & Gordon, C. E. (2020). The effects of inter-
 fire interval on flora-fauna interactions in a sub-alpine landscape. *Forest Ecology
 and Management*, 473, 118316. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118316>
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor.
Geoderma, 156(3-4), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Ruf, F., & Zadi, H. (1998). *Cocoa : From Deforestation to Reforestation*. 36.
- Saj, S., Durot, C., Mvondo Sakouma, K., Tayo Gamo, K., & Avana-Tientcheu, M.-L. (2017).
 Contribution of associated trees to long-term species conservation, carbon storage

- and sustainability : A functional analysis of tree communities in cacao plantations of Central Cameroon. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 15(3), 282-302. <https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1311764>
- Saj, S., Jagoret, P., Mvondo Sakouma, K., Essobo Nieboukaho, J.-D., Bouambi, E., & Todem Ngnogue, H. (2019). Compromis entre séquestration de carbone, conservation et productivité dans les systèmes agroforestiers à base de cacaoyers au Centre-Cameroun. In *Agroforesterie et services écosystémiques en zone tropicale : Recherche de compromis entre services d'approvisionnement et autres services écosystémiques* (Quae). CIRAD. http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=592700
- Sémhur. (2021). Cacao. In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cacao&oldid=189415178>
- Siebert, S. F. (2002). *From shade- to sun-grown perennial crops in Sulawesi, Indonesia : Implications for biodiversity conservation and soil fertility*. 14.
- Toledo, M. (Éd.). (2005). *Plántulas de 60 especies forestales de Bolivia : Guía ilustrada*. WWF : IBIF.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hertel, D., Hölscher, D., Juhrendt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., & Wanger, T. C. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review : Multifunctional shade-tree management. *Journal of Applied Ecology*, 48(3), 619-629. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01939.x>
- Vaast, P., Harmand, J.-M., Rapidel, B., Jagoret, P., & Deheuvels, O. (2016). Coffee and Cocoa Production in Agroforestry—A Climate-Smart Agriculture Model. In E. Torquebiau

- (Éd.), *Climate Change and Agriculture Worldwide* (p. 209-224). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7462-8_16
- Vaast, P., & Somarriba, E. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: The role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, 88(6), 947-956. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x>
- Villegas Nava, P. (2012). *Los recursos naturales en Bolivia*. Centro de Documentación e Información Bolivia. <https://cedib.org/wp-content/uploads/2012/04/Libro-RRNN-2012.pdf>
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement, and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), 503-515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Wilkes, H. R., Alave, P., & Chavez, E. (Éds.). (2007). *Guía metodológica para la implementación, el manejo y el aprovechamiento de sistemas agroforestales de la Interinstitucional Alto Beni (IIAB), Sapecho, 2006* (2. ed). Servicio Alemán de Cooperación Social-Técnica.
- World Agroforestry Centre, M. Cerrón-Macha, J., D. del Castillo, J., C. Valverde-Quiroz, J., & P. Cornelius, J. (2018). *Especies agroforestales del Perú: Listado anotado y contribución a la priorización para la conservación genética*. World Agroforestry Centre. <https://doi.org/10.5716/WP18029.PDF>
- Yana, W. (2004). *Técnicas de sistemas agroforestales multiestrato—Manual práctico*. PIAF - El Ceibo.

Détermination du caractère agroécologique de parcelles de cacaoyers sur base de paramètres écologiques et agronomiques. Étude dans la région de l'Alto Beni

Présenté par Nicolas Bourgois.

Afin de répondre à la demande croissante de cacao, les surfaces de cacaoyères augmentent, au détriment des forêts tropicales. La cacaoculture est responsable de la déforestation de plus de 10 millions d'hectares. On assiste également au développement de la conduite de cacaoyères en monoculture alors que le cacaoyer était traditionnellement cultivé sous un couvert forestier. La monoculture permet une augmentation des rendements à court-terme, mais malheureusement, sans apport de fertilisation minérale et de gestion des maladies et ravageurs à l'aide de produits phytosanitaires, la productivité s'effondre rapidement. De plus, le manque de production de matière organique causé par l'abattage du couvert forestier conduit à la diminution du taux d'humus et à l'érosion des sols. Rapidement, la plantation n'est plus rentable et le producteur doit défricher une nouvelle parcelle forestière, accentuant encore la pression de déforestation. L'agroforesterie agroécologique permet d'augmenter la longévité des cacaoyères grâce à l'entretien de la fertilité organique des sols, tout en offrant divers avantages aux producteurs. La diminution de la production de cacao peut être largement compensée par ceux-ci.

L'objectif de ce mémoire est de déterminer s'il est possible d'estimer le degré d'adhésion de producteurs à l'agroforesterie et à l'agroécologie à partir de données écologiques et agronomiques, inventoriées directement dans les plantations. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à une enquête préliminaire à large spectre, reprenant tant des questions agronomiques qu'économiques ou sociales, réalisée auprès de 360 producteurs de cacao de la région de l'Alto Beni en Bolivie. Certains producteurs de cette région ont bénéficié de l'appui d'ONG telles que l'AOPEB ou SOS Faim.

Pour ce faire, des inventaires ont été faits dans les parcelles de 24 producteurs ayant participé à l'enquête. Les placettes expérimentales ont été classifiées par une fonction statistique en trois groupes. Une fois caractérisés, ces groupes ont été comparés aux résultats de l'enquête préliminaires.

Les résultats montrent qu'un groupe se distingue clairement des autres quant à ses paramètres agroécologiques et agroforestiers supérieurs. Un autre présente très peu de caractéristiques agroforestières mais une certaine adhésion à l'agroécologie. Le dernier est celui présentant le moins d'adhésion à l'agroforesterie agroécologique mais se distingue fortement par sa situation topographique, sur les versants des montagnes. Les parcelles des deux autres groupes sont, quant à elles, toutes situées dans la plaine.

Les paramètres écologiques et agronomiques permettent donc de donner un aperçu du système de production d'une parcelle de cacaoyers. Cependant, les relations existantes entre variables restent parfois mal comprises et mériteraient d'être d'avantage investiguées afin de mieux comprendre les raisons de l'adoption ou non d'une production de cacao agroforestière et agroécologique par le producteur.