



**DEXi AF : outil d'aide à la conception et à l'évaluation multicritère de systèmes agroforestiers performants.
Analyse critique et amélioration d'un outil préexistant pour les systèmes agroforestiers grandes cultures / bois d'œuvre**

Aurélie Augis

► **To cite this version:**

Aurélie Augis. DEXi AF: outil d'aide à la conception et à l'évaluation multicritère de systèmes agroforestiers performants. Analyse critique et amélioration d'un outil préexistant pour les systèmes agroforestiers grandes cultures / bois d'œuvre. Sciences agricoles. 2017. dumas-01706975

HAL Id: dumas-01706975

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01706975v1>

Submitted on 5 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AGROCAMPUS
OUEST

☐ CFR Angers

☒ CFR Rennes



Année universitaire : 2016 - 2017

Spécialité :

Ingénieur Agronome

Spécialisation / option :

Sciences des Productions Végétales /
Ingénierie des Agrosystèmes

Mémoire de Fin d'Études

- ☒ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- ☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

DEXi AF : outil d'aide à la conception et à l'évaluation multicritère de systèmes agroforestiers performants

Analyse critique et amélioration d'un outil préexistant pour les systèmes agroforestiers grandes cultures / bois d'œuvre

Par : Aurélie AUGIS



Soutenu à Rennes, le 13 septembre 2017

Devant le jury composé de :

Président : Édith LE CADRE

Maître de stage : David GRANDGIRARD

Enseignant référent : Matthieu CAROF

Autres membres du jury

Rapporteur : Valérie VIAUD

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

☐ Non ☒ Oui si oui : ☒ 1 an ☐ 5 ans ☐ 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : le 28/08/2017



A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ **AUGIS Aurélie**

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☒ Oui ☐ Non

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☒ la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) ☐ accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-Nc-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur : le 28/08/2017



Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

☐ Oui ☐ Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

☐ la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

☐ la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

☐ la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3).Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(4) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé

Remerciements

Mes premiers remerciements vont aux membres du comité de pilotage : David Grandgirard, Aude Alaphilippe, Delphine Mézière, François Warlop et Laurie Castel ; pour le partage de leurs connaissances au sujet de l'agroforesterie pour les uns en verger / maraichage, pour les autres en bois d'œuvre / grandes cultures et le temps qu'ils nous ont consacré pendant ces six mois. Leur disponibilité et leurs conseils nous ont été précieux.

Plus particulièrement, je remercie David Grandgirard, mon maître de stage pour son temps et son enthousiasme toujours renouvelé pour ce modèle. Mes remerciements vont également à Aude Alaphilippe pour sa disponibilité et son implication dans l'aspect technique de ce stage.

Un grand merci à Claire Vaskou. Notre complicité et notre complémentarité nous ont permis de travailler dans une ambiance agréable. Plus qu'une collègue, ce fut une belle rencontre.

Je remercie tout particulièrement Jacques-Éric Bergez, de l'INRA UMR AGIR qui nous a fourni le script R utilisé pour l'analyse de sensibilité et qui a su prendre de son temps personnel pour m'expliquer le déroulement d'une analyse de sensibilité et d'un test de Monte Carlo.

Je tiens également à remercier Yann Pivain de la Chambre d'Agriculture de l'Eure (28) ainsi que les agriculteurs de l'Association pour une Dynamique Agroforestière en Normandie : Pierre Lelong, Pierre Gégou, Didier Duedal, Michel Galmel, Patrick Brière, Philippe Gouéry, Caroline Charpentier pour le précieux temps qu'ils ont su m'accorder (pour certains à trois reprises). Grâce à eux j'ai pu appréhender ce qu'étaient à leurs yeux les « performances d'un système agroforestier » et tester, en partie, le modèle sur leurs propres systèmes agroforestiers. Nos échanges, toujours pertinents ont été utiles à la progression de l'outil.

Je tiens également à remercier Antoine Marin de la SCOP AGROOF, d'abord pour avoir partagé son bureau avec moi et contribué à créer une ambiance agréable de travail, ensuite pour m'avoir fait sortir de mon bureau à la rencontre d'agriculteurs passionnés et m'avoir enseigné beaucoup sur les arbres en agroforesterie et le montage de projet agroforestier.

Je salue par la même occasion mes parents, mon frère, ma sœur et mon compagnon qui m'ont toujours soutenue dans mes choix et au cours de mon parcours à Agrocampus Ouest.

Table des matières

Introduction	1
Partie A : État de l’art, contexte et problématique de stage	2
1. Les concepts de durabilité et de développement durable	2
2. L’agriculture durable et ses enjeux	3
3. L’agroforesterie, un système durable ?	3
a. Qu’est-ce que l’agroforesterie ?	3
b. Quelles réponses de l’agroforesterie aux enjeux de l’agriculture durable ?	4
c. Quels freins et limites pour l’adoption de l’agroforesterie ?	4
4. Méthodes et outils d’évaluation multicritère	5
a. Principes et objectifs de l’évaluation multicritère	5
b. Modèles d’évaluation multicritère	5
5. Contexte des projets et objectifs de la mission	6
a. Le projet SCA0PEST	6
b. Le projet VERTiCAL	6
c. Structure du modèle DEXi VERTiCAL	6
d. Problématique et objectifs du stage	7
Partie B : Matériel et méthodes	7
1. Le modèle dans la démarche de conception et d’évaluation globale de SAF	7
a. Positionnement du modèle DEXi AF dans la démarche de conception	7
b. Objectifs et finalités du modèle DEXi AF	8
c. Le cadre d’évaluation	8
2. Méthodologie et organisation du travail	8
3. Méthodologie de construction de DEXi AF	8
a. Prise en main et approche critique avec propositions d’amélioration	9
b. Étude d’une proposition commune	9
c. Confrontation aux modèles existants	9
d. Finalisation de la structure de DEXi AF	9
e. Choix des pondérations et des classes	10
4. Méthodologie d’entretiens auprès d’agriculteurs	10
a. Première phase d’entretiens : vérifier l’exhaustivité du modèle	10
b. Deuxième phase d’entretiens : vérifier la faisabilité de remplissage de l’outil et évaluer la valeur prédictive du modèle	11

5. Évaluation et amélioration de DEXi AF	11
a. Vérification du modèle	11
b. Analyse de sensibilité	11
c. Améliorations du modèle à partir des résultats de l'analyse de sensibilité	12
d. Validation du modèle par les SAF d'agriculteurs et parcelles expérimentales	12
Partie C : Résultats	13
1. Le modèle DEXi-VERTiCAL, ses points forts et ses faiblesses	13
a. Les points forts du modèle DEXi-VERTiCAL	13
b. Les faiblesses et limites de DEXi-VERTiCAL	13
i. Une structure déséquilibrée et profonde	13
ii. Critiques sur le fond	13
iii. Les limites du modèle	14
2. Construction du modèle DEXi AF à partir de DEXi VERTiCAL et des DEXiPM	14
a. Choix des critères de DEXi AF	14
i. Branche sociale	14
ii. Branche économique	15
iii. Branche environnementale	16
b. Choix des classes de DEXi AF	17
c. Choix des pondérations de DEXi AF	18
3. Résultats de l'évaluation du modèle	18
a. Analyse de sensibilité : test de Monte Carlo sous R	18
b. Durabilité de la plateforme d'expérimentation agroforestière SCAOPEST	19
c. Durabilité des SAF d'agriculteurs mobilisés	19
Partie D : Discussion	20
1. Les forces du modèle DEXi AF	20
2. Les faiblesses du modèle	20
3. Pistes d'amélioration	21
Conclusion et perspectives	22
Bibliographie	23
Annexes	
Résumé - Abstract	

Glossaire

Agriculture durable : « Un ensemble de pratiques qui permettent à un système de production de satisfaire, dans la durée, aux conditions d'amélioration de la qualité de vie des populations et de préservations des écosystèmes » (Lairez et al., 2015)

Agroforesterie : « L'agroforesterie est l'association d'arbres et de cultures ou pâtures sur une même parcelle. Elle ne doit cependant pas être réduite aux systèmes associant les cultures et pâtures à des arbres en plein champ (agroforesterie intraparcellaire). Les systèmes intégrant des éléments arborés productifs en bordure de champ (ex. systèmes bocagers) sont également des systèmes agroforestiers à part entière » (RMT AgroforesterieS, 2014)

Critère : « Les critères sont des variables [quantitatives ou qualitatives] qui décompensent les dimensions du développement durable. [...] Les indicateurs permettent de les mesurer ou de les estimer. » (Lairez et al., 2015)

Développement durable : Lors de la commission mondiale sur l'environnement et le développement, en 1987, le développement durable est défini comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Brundtland, 1987)

DEXi : Programme permettant le développement de modèles qualitatifs en vue d'aider à la prise de décision face à des problématiques composées de caractéristiques multiples (Bohanec, 2011)

Durabilité : Elle désigne « le caractère soutenable d'un modèle quel qu'il soit (économique, social, technique, etc.). Elle caractérise donc l'état d'un système et ses capacités à perdurer dans le temps. » (Lairez et al., 2015)

Évaluation ex ante : Évaluation *a priori*, réalisée avant la mise en œuvre de l'objet évalué

Évaluation ex post : Évaluation *a posteriori*, soit après la mise en œuvre de l'objet évalué

Évaluation multicritère : Évaluation rassemblant de nombreuses variables issues de savoirs divers et permettant de trier et classer des systèmes après analyse et interprétation des résultats de l'ensemble des critères (Lairez et al., 2015)

Fonction d'utilité : Une fonction d'utilité est composée de règles de décision de type « Si... alors » et permettent de renseigner les valeurs de classes de critères agrégés.

Indicateur : Valeur à laquelle on a donné un sens (Aude Alaphilippe, *communication personnelle*)

Système de culture : Sebillotte (1990) (Papy, 2013) propose la définition suivante : « Un système de culture est l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés. »

Liste des abréviations

AB Agriculture Biologique

AF Agroforesterie

ADAN Association pour une Dynamique Agroforestière en Normandie

AS Analyse de Sensibilité

BO/GC Bois d'œuvre / Grandes Cultures

CA Chambre d'Agriculture

FU Fonction d'utilité

GIEE Groupement d'Intérêt Économique et Environnemental

GRAB Groupe de Recherche en Agriculture Biologique

IFT Indice de Fréquence de Traitement

INRA Institut National de la Recherche Agronomique

MAAF Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

MASC Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems

PAC Politique Agricole Commune

RESOPEST RESeau « Zéro Pesticide »

RMT Réseau Mixte Technologique

SAF Système AgroForestier

SCAOPEST Système de Culture Agroforestier « zéro PESTicide »

SdC Système de Culture

VERTiCAL VERgers et Cultures AssoLées

Liste des annexes

Annexe I : Fonctionnement du logiciel DEXi

Annexe II : Outil DEXi VERTiCAL (sans arbres satellites)

Annexe III : Partie haute de la structure hiérarchique commune aux DEXiPM

Annexe IV : Structure finale de DEXi AF : Branche sociale

Annexe V : Structure finale de DEXi AF : Branche économique

Annexe VI : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Biodiversité

Annexe VII : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Utilisation des ressources

Annexe VIII : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Qualité du milieu

Annexe IX : Résultats de SCAOPEST – Branche sociale

Annexe X : Résultats de SCAOPEST – Branche économique

Annexe XI : Résultats de SCAOPEST – Branche environnementale

Liste des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Les trois piliers de la durabilité

Figure 2 : Avantages de l'agroforesterie revendiqués par le MAAF

Figure 3 : Aspects négatifs de l'AF mentionnés lors des enquêtes d'agriculteurs du projet SAFE

Figure 4 : Méthode de conception de novo d'un système de culture

Figure 5 : Parcelle agroforestière d'UniLasalle

Figure 6 : Parcelle SCAOPEST

Figure 7 : Structure haute de l'arbre de décision DEXi VERTiCAL

Figure 8 : Calendrier des tâches exécutées pendant la mission de stage

Figure 9 : Exemples d'un profil de performance déséquilibré (à gauche) et d'un profil équilibré légèrement décalé vers les classes les moins bonnes (à droite)

Figure 10 : Schéma décisionnel relatif à l'analyse des résultats des analyses de sensibilité du modèle

Figure 11 : Trois premiers niveaux de la branche sociale de DEXi AF

Figure 12 : Trois premiers niveaux de la branche économique de DEXi AF

Figure 13 : Trois premiers niveaux de la branche environnementale de DEXi AF

Figure 14 : Systèmes économes en produits phytosanitaires selon le réseau DEPHY

Figure 15 : Profil de performance du critère « Lien avec la société » avant toute modification (AS1) puis au fil des AS : amélioration par remaniement de la fonction d'utilité de « Accessibilité aux produits » (AS2) puis de sa propre fonction d'utilité (AS3, 4, 5, 7)

Figure 16 : Profil de performance du critère « Biodiversité » avant toute modification (AS1), puis après le remaniement des fonctions d'utilité de « Flore », « Faune » et « Microorganismes » (AS5), puis de sa propre FU (AS6) et enfin après suppression d'une classe et remaniement de sa FU (AS7 et 8)

Figure 17 : Résultats du niveau 2 de la branche économique obtenus par les systèmes agroforestiers des agriculteurs enquêtés. Résultats ramenés sur une échelle de 0 à 1

Figure 18 : Résultats du niveau 1 de la branche environnementale obtenus par les systèmes agroforestiers des agriculteurs enquêtés. Résultats ramenés sur une échelle de 0 à 1

Liste des tableaux

Tableau 1 : Organisation des COPILS : dates, membres présents et sujets abordés

Tableau 2 : Bilan des branches testées lors des enquêtes d'agriculteurs

Tableau 3 : Récapitulatif des analyses de sensibilité pratiquées sur chaque branche et sous-branche

Tableau 4 : Classes des critères « *Lien avec les agriculteurs voisins* », « *Contribution à l'emploi* » et « *Pression en produits phytosanitaires* »

Tableau 5 : Nombre d'occurrences des classes du critère agrégé « *Lien avec la société* » au fil des analyses de sensibilité

Introduction

Fort est de constater les conséquences négatives de l'agriculture productiviste et intensive de la fin du XX^{ème} et du début du XXI^{ème} siècle. Durant ces décennies, la recherche de productivité a certes permis d'augmenter la production agricole mais elle s'est faite au détriment des sols, de l'eau, de l'air, des ressources non renouvelables et de la biodiversité (Ramonet, 2003, cité par Zahm et al., 2015). Inverser ces tendances et limiter ces impacts négatifs sont les enjeux actuels de l'agriculture, auxquels s'ajoutent les préoccupations sociétales au sujet de la qualité et l'innocuité des productions agricoles. En réponse à cela, des systèmes de cultures innovants, qui s'avèrent parfois plus durables, voient le jour, incluant des pratiques innovantes ou des combinaisons de ces pratiques, comme la réduction du travail du sol, le semis-direct, la protection intégrée des cultures, la réintroduction de légumineuses dans les rotations ou la plantation d'arbres. Ces pratiques sont englobées sous le terme d'agroécologie.

C'est sur cette voie de l'agroécologie que le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (MAAF) s'est engagé pour enclencher la transition de l'agriculture française vers des pratiques et des modèles de production combinant à la fois des performances économiques, sociales et environnementales (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2015). Identifiée comme un levier de l'agroécologie, l'agroforesterie consiste en l'association délibérée d'arbres et de cultures et/ou de pâtures et d'animaux d'élevage sur une même parcelle, dans l'espace ou dans le temps. Pourtant l'arbre n'est pas toujours le bienvenu dans les parcelles agricoles. En effet depuis 1950, l'agriculture a énormément évolué notamment du fait de l'agrandissement des parcelles, la mécanisation du travail et la spécialisation des exploitations par une simplification des rotations et des assolements (INRA, 2014). Les arbres ont alors été progressivement éliminés du paysage agricole pour ne rester cantonnés qu'aux paysages forestiers (Dupraz, Liagre, 2011). C'est ainsi qu'on estime une destruction de 70 % des 2 millions de km de haies présentes en France au début du XX^{ème} siècle (INRA, 2014). Cette pratique pourtant ancestrale profite actuellement d'un regain d'intérêt aux niveaux européen et national. De 2001 à 2005, le projet européen SAFE (« Silvoarable Agroforestry For Europe ») s'est donné pour missions de comprendre les réticences et motivations des agriculteurs pour les systèmes agroforestiers (SAF), fournir des références, proposer des modèles et faire avancer la réglementation européenne alors en défaveur de l'agroforesterie (Dupraz et al., 2005). En 2005, le projet SAFE estimait à 65 millions d'ha, la surface européenne potentiellement appropriée pour y accueillir des productions agroforestières (Dupraz et al., 2005), soit en France en 2012, 25 millions d'ha (Liagre et al., 2012).

Des projets voient régulièrement le jour permettant de faire valoir l'agroforesterie qui bénéficie désormais d'un plan de développement national pour la période 2015-2020 (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2016). Cependant parmi les projets réalisés certains sont peu aboutis ce qui a pour conséquence l'implantation précipitée de parcelles agroforestières, alors vitrines des écueils non prévus. Prenons l'exemple d'une parcelle sur laquelle la majorité des arbres ne pourront pas être valorisés en bois d'œuvre. La raison est la proximité d'une forêt présentant une forte densité de gros gibiers. Ces derniers se frottent aux arbres provoquant des dégâts irrémédiables sur les fûts. Ainsi l'emplacement peu judicieux prédestinait ce projet à l'échec. Or chaque projet, pour réussir, doit être mûri, adapté aux contextes pédoclimatique et socioéconomique locaux et doit répondre aux objectifs du porteur de projet. Il apparaît alors nécessaire d'évaluer *a priori* les performances de ces systèmes agroforestiers du point de vue de leur durabilité afin d'augmenter leur probabilité de succès et l'adhésion des agriculteurs.

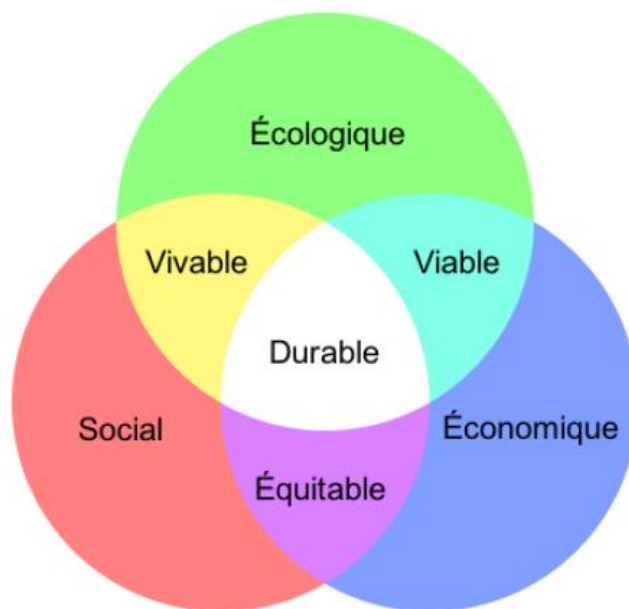


Figure 1 : Les trois piliers de la durabilité

Les systèmes agroforestiers ayant la particularité de s'envisager sur du moyen-long terme (15 à 80 ans), leurs performances sociales, économiques et environnementales demeurent difficiles à évaluer et donc à mobiliser lors de la construction d'un projet agroforestier.

Des outils d'évaluation multicritère comme le modèle MASC (Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems) (Sadok et al., 2009 ; Craheix et al., 2012) et le modèle DEXi PM (Pelzer et al., 2012) sont régulièrement mobilisés dans des démarches de conception de systèmes de culture innovants. Ils permettent de décomposer des problèmes complexes (la durabilité des systèmes de culture (SdC) selon les trois piliers du développement durable) en sous-problèmes plus simples à résoudre (les caractéristiques contextuelles et du système). Cependant les domaines de validité de ces modèles sont souvent restreints à un type de production : les grandes cultures, les vergers à pommes, les productions légumières ou encore les vignes. En 2014, pour pallier l'absence de modèle de ce type en agroforesterie, un premier outil d'aide à la conception de systèmes agroforestiers durables – appelé DEXi VERTiCAL – a été élaboré dans le cadre du projet Ecophyto DEPHY EXPE VERTiCAL (2013-2018) puis testé sur les plateformes expérimentales de la TAB (CA26) et de la DURETTE (GRAB) (Bernard, 2014a). L'outil permet une évaluation qualitative de la durabilité du système agroforestier testé et l'identification des aspects pour lesquels le système est peu performant et mériterait optimisation. Cet outil DEXi-VERTiCAL a été pensé et développé pour des SAF en maraîchage / arboriculture et des SAF en grandes cultures / arboriculture et n'est par conséquent pas intégralement compatible avec des SAF en grandes cultures / bois d'œuvre.

En étroite collaboration avec Claire Vaskou, étudiante en Master 2 à l'ISARA de Lyon qui a travaillé à l'optimisation de la version maraîchage / arboriculture, ma mission consistait à critiquer, adapter et améliorer le modèle d'évaluation multicritère existant (DEXi-VERTiCAL) pour en faire un outil générique d'aide à la conception de systèmes agroforestiers (tout système agroforestier confondu à l'exception de ceux incluant le pastoralisme) qui soit performant et capable de prendre en compte les spécificités spatiales et temporelles de tels systèmes. Dans cette optique, nous présenterons un état de l'art sur l'agroforesterie et l'évaluation multicritère avant d'exposer la méthodologie mise en œuvre et les modifications apportées au modèle initial. Suivra la présentation des résultats. Puis une discussion des résultats permettra de clôturer ce mémoire.

Partie A : État de l'art, contexte et problématique de stage

1. Les concepts de durabilité et de développement durable

Le concept de développement durable a été formalisé par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement en 1987 comme étant « un processus dynamique ayant pour vocation d'améliorer le bien-être des générations actuelles et futures, tout en préservant la qualité des écosystèmes » (Brundtland, 1987). C'est lors du troisième sommet de la Terre à Rio en 1992, que le développement durable est défini selon les trois piliers désormais admis par la majorité du monde scientifique (Figure 1) : il « doit être économiquement performant, socialement équitable et respectueux de l'environnement » (Lichtfouse et al., 2009). Lairez et al. définissent la durabilité comme étant distincte de la notion de développement durable car elle « désigne le caractère soutenable d'un modèle quel qu'il soit (économique, social, technique, etc.) [et] caractérise donc l'état d'un système et ses capacités à perdurer dans le temps ». Le développement durable est le concept alors que la durabilité est l'état d'un système vis-à-vis du développement durable.

2. L'agriculture durable et ses enjeux

Comme le concept de développement durable, l'agriculture durable est une notion vague et variable selon les auteurs (Lichtfouse et al., 2009). Il y a deux approches pour caractériser l'agriculture durable. Selon la première approche, elle se conçoit à l'échelle de l'exploitation agricole, alors que la seconde considère une échelle plus large, où l'agriculture contribue au développement durable de son territoire et de ses habitants (Lichtfouse et al., 2009). Elle s'envisage donc à des échelles locales (exploitation et parcelle) mais aussi à des échelles régionales, nationales et internationales. L'agriculture n'a plus pour fonction unique de produire des denrées alimentaires, elle a désormais une multitude de fonctions comme l'entretien du paysage, la gestion et la lutte contre les risques naturels, le maintien de la particularité des territoires (Lairez et al., 2015), la qualité de l'environnement et le maintien et la création d'emploi. Désormais, l'enjeu est de « produire mieux » et non plus de « produire plus » (Lairez et al., 2015). Actuellement les initiatives en faveur de pratiques agricoles plus durables sont de plus en plus nombreuses et portent sur des thématiques comme la réduction des intrants, la réduction du travail du sol (l'agriculture de conservation), une réflexion plus approfondie sur les successions culturales et l'optimisation des services écosystémiques (soit l'agroécologie en général).

3. L'agroforesterie, un système durable ?

a. Qu'est-ce que l'agroforesterie ?

L'agroforesterie est souvent confondue avec le boisement de terres agricoles du fait du suffixe « foresterie » (Liagre et al., 2005). Le boisement de terres agricoles consiste en la plantation forestière d'arbres sur des terres agricoles qui passeront au statut forestier. L'agroforesterie consiste à planter des arbres à faible densité sur des terres agricoles ou bien à aménager des terres forestières pour y permettre une production agricole souvent animale (Liagre, 2005). La définition de Fabien Liagre et Christian Dupraz en 2011 explicite l'agroforesterie comme étant « l'association, sur une même surface, d'arbres et de productions agricoles » dont l'art réside dans la maîtrise des « interactions entre les arbres et les cultures pour mieux produire ». Classiquement, les systèmes agroforestiers sont classés selon les composantes dominantes : l'agrosylviculture pour des associations de cultures et d'arbres, le sylvopastoralisme concernant les associations d'animaux et d'arbres et l'agrosylvopastoralisme lorsque ces trois composantes sont réunies sur une même parcelle (Torquebiau, 2000). Toutefois le RMT AgroforesterieS, F. Liagre et C. Dupraz (2011) incluent les haies, les ripisylves, les arbres isolés, les pré-vergers normands, la *Dehesa* ibérique, les peupleraies, les truffières et d'autres systèmes traditionnels dans la définition de l'agroforesterie. C'est pour prendre en compte cette vaste définition que Torquebiau classifie les systèmes agroforestiers en 6 catégories sur la base de critères physiologiques (Torquebiau, 2000) : (1) les cultures sous couvert arboré regroupant les arbres dispersés, les parcs arborés et les arbres d'ombrage abritant des cultures, (2) les agroforêts où les arbres constituent un ensemble dense, (3) les dispositions linéaires : haies et bocage, haies brise-vent, (4) l'agroforesterie animale lorsque les animaux pâturent ou sont nourris avec les jeunes pousses d'arbres, (5) l'agroforesterie séquentielle qui associe dans le temps et non pas dans l'espace des arbres et des cultures et pour finir (6) les techniques agroforestières mineures : c'est-à-dire celles associant des arbres à des cultures d'animaux particuliers comme les vers à soie, les insectes producteurs de laque, les poissons.

L'AGROFORESTERIE

PLANTATION D'ARBRES ET DE HAIES AU SEIN DES CULTURES

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

AGRICULTURES
PRODUISONS
AUTREMENT



Figure 2 : Avantages de l'agroforesterie revendiqués par le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2015)

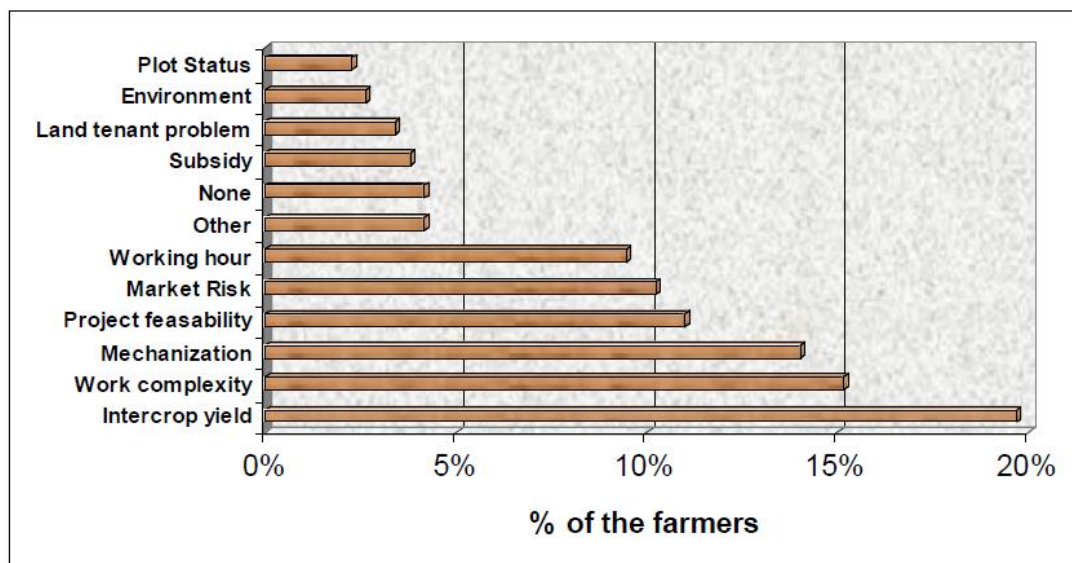


Figure 3 : Aspects négatifs de l'agroforesterie mentionnés lors des enquêtes d'agriculteurs du projet SAFE

En France, deux dominantes d'agroforesterie se distinguent. Les systèmes agroforestiers majoritaires du sud de la France associent des arbres fruitiers à des cultures maraichères et/ou des plantes à parfum et/ou des plantes médicinales. Dans le Nord de la France, en dehors des parcours arborés et des pré-vergers, les systèmes majoritaires se composent de grandes cultures et d'arbres à destination bois d'œuvre et bois de chauffe. Dans le cadre de ce stage et de celui de Claire Vaskou, seuls ces deux types d'agroforesterie ont été considérés, les systèmes agroforestiers incluant du pastoralisme n'ont pas été abordés.

b. Quelles réponses de l'agroforesterie aux enjeux de l'agriculture durable ?

Le MAAF revendique plusieurs vertus à l'agroforesterie sur le plan environnemental (Figure 2). En effet le MAAF met en avant la lutte contre l'érosion, les régulations microclimatiques et hydriques mais aussi la résilience face au changement climatique et la fourniture de zone refuge pour la biodiversité (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2016). Les arbres permettent également de faciliter le recyclage de la matière organique et des nutriments (Dupraz, Liagre, 2011). Par la diversification de ses productions, l'agroforesterie répond, sur le plan social, aux enjeux alimentaires tout en maximisant l'utilisation des surfaces agricoles. Elle s'insère parfaitement dans les thématiques liées à l'éthique en productions animales en favorisant le bien-être animal. Par ailleurs les parcours arborés font déjà partie intégrante des cahiers des charges de Label Rouge et de l'Agriculture Biologique (Béral et al., 2014). Cette image des animaux sous les arbres ou simplement d'arbres sur une parcelle agricole renvoie à l'idée de la beauté du paysage et du rôle des agriculteurs dans l'entretien et la valorisation du paysage à l'échelle de leur territoire. À une échelle plus globale, Liagre et Dupraz (2011) revendiquent un bénéfice supplémentaire. Cette pratique pourrait permettre de « freiner la déforestation en milieu tropical » en produisant du bois de qualité équivalente au bois tropical importé, sous condition du dynamisme des filières bois locales.

L'acquisition de connaissances scientifiques en la matière est enclenchée depuis les années 2000 ; les objectifs étant de combler les gaps de connaissances et de démontrer les impacts positifs mais aussi négatifs identifiés empiriquement sur les parcelles agroforestières existantes.

Alors face à tous les impacts potentiellement positifs de l'agroforesterie, quels risques y aurait-il à implanter un projet agroforestier sur une exploitation et quels freins sont le plus souvent évoqués par les agriculteurs ?

c. Quels freins et limites pour l'adoption de l'agroforesterie ?

Dans le cadre du projet européen SAFE, un sondage auprès d'agriculteurs ignorants des pratiques agroforestières, a été réalisé dans le but d'identifier, à leurs yeux, les contraintes de l'agroforesterie et son potentiel. Les agriculteurs sont généralement plus enclins à lister les points négatifs (Figure 3) qu'à percevoir les potentiels bénéfices apportés par les arbres (Liagre et al., 2005). La principale crainte exprimée (à près de 20%) est une chute du rendement du fait de la compétition avec les arbres (Figure 3). Pour justifier cette crainte, les agriculteurs font appel au rendement plus faible en limite de haie, forêt, bois ou bosquet. Les autres craintes principales sont liées au travail qui est accru et plus complexe (demande un savoir-faire supplémentaire) et aux problèmes de la mécanisation de la parcelle qui se trouve compliquée par la fixité des arbres (Figure 3). Une préoccupation importante à l'époque du sondage est la politique changeante de la PAC à propos des subventions et aides au maintien et à la plantation d'arbres sur les parcelles agricoles (Liagre et al., 2005).

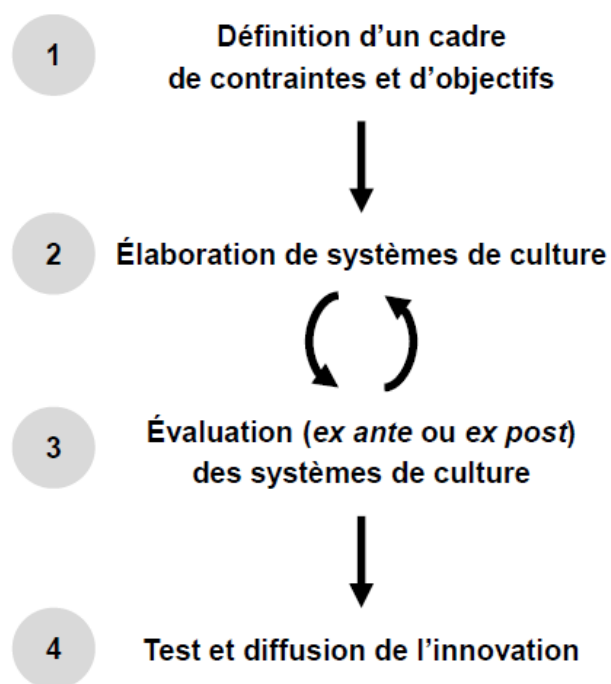


Figure 4 : Méthode de conception de novo d'un système de culture
(d'après Vereijken, 1997 ; Doré et al., 2006 ; Lançon et al., 2007)

Les conseillers agroforestiers (Yann Pivain et Antoine Marin, communications personnelles) constatent que la complexité du système et le manque de connaissance et de références technico-économiques sont des facteurs majeurs d'abandon de projets agroforestiers. À cela s'ajoute parfois une certaine lourdeur administrative (Yann Pivain, communication personnelle) : les dossiers de demande de financement du projet sont complexes et les délais administratifs peuvent parfois retarder une plantation et ainsi mettre en péril le projet.

Entre les bénéfices et les limites de l'agroforesterie, il est important de trouver un juste milieu. Des travaux et programmes de R&D sont encore nécessaires pour l'acquisition de références scientifiques et techniques utiles dans l'accompagnement des agriculteurs. Le développement d'outil(s) mettant à disposition les connaissances actuelles serait un plus et permettrait de lever partie des freins et limites en les anticipant et en ajustant le projet en fonction des objectifs visés par le porteur de projet.

4. Méthodes et outils d'évaluation multicritère

a. Principes et objectifs de l'évaluation multicritère

L'aide multicritère est définie par Roy, 1985 comme « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision [...] ». Ainsi l'objectif premier de l'aide à la décision multicritère est d'accompagner le décideur dans sa prise de décisions face à des critères multiples et souvent contradictoires (Zanakis et al., 1998) en lui proposant des outils développés pour cet usage.

En agronomie, l'émergence de systèmes de culture innovants (Figure 4 : point 2) est permise en partie par une phase d'évaluation (Figure 4 : point 3) *a priori* des systèmes candidats. Cette évaluation met en lumière les points à améliorer et conduit à la proposition de nouveaux systèmes candidats qui seront à nouveau évalués jusqu'à obtenir le meilleur système possible pour le cadre de contraintes et d'objectifs fixé (Figure 4 : point 1). C'est à ce stade (Figure 4 : point 3) que les méthodes et outils d'évaluation multicritère sont mobilisables afin de déterminer le niveau de contribution au développement durable du système évalué. L'évaluation d'un système permet d'identifier ces points forts et ces points faibles du point de vue du concept de durabilité choisi par les concepteurs de la méthode utilisée (Lairez et al., 2015).

b. Modèles d'évaluation multicritère

MASC (Sadok et al., 2009 ; Craheix et al., 2012) considère le développement durable comme étant basé sur les trois dimensions sociale, environnementale et économique de la durabilité. Ce modèle évalue la contribution globale de systèmes de culture de type grandes cultures au développement durable. Cette méthode est utilisable *ex post* (*a posteriori* sur des systèmes existants) pour évaluer des systèmes existants mais aussi *ex ante* (*a priori* sur des systèmes non mis en place) pour évaluer des systèmes alternatifs. MASC a été développé sur le logiciel support DEXi (Bohanec, 2011) (Annexe I) apte à agréger des valeurs qualitatives. Il est complété par le logiciel CRITER, qui permet de prendre en considération des valeurs quantitatives issues des systèmes testés et des indicateurs calculés (surtout utile en *ex post*).



Figure 5 : Parcelle agroforestière d'UniLasalle (SCAOPEST, (s.d))



Figure 6 : Parcelle SCAOPEST (SCAOPEST, (s.d))

Dans la continuité de MASC, le modèle DEXiPM® (DEXi Pest Management) (Pelzer et al., 2012) a été développé pour des systèmes de grandes cultures avant d'être adapté à des systèmes de culture spécifiques comme DEXiPM-Pomefruit (Alaphilippe et al., 2013), DEXiPM-Vigne (Delmotte et al., 2008) et DEXiPM-Légumes (Salles, 2007). Ces modèles sont tous conçus à l'échelle du système de culture pour être utilisés en *ex ante* ou en *ex post* selon les objectifs des concepteurs et sont relativement simples d'utilisation car entièrement qualitatifs. Chaque modèle étant développé pour un type de culture et les pratiques agricoles qui lui sont associées, aucun n'est adapté pour évaluer la durabilité de systèmes agroforestiers. Cependant tous ces outils possèdent un tronc commun récemment mis en évidence par Angevin et al., 2016 (Annexe III) et sur lequel nous pourrions nous appuyer.

5. Contexte des projets et objectifs de la mission

a. Le projet SCA0PEST

L'institut Polytechnique UniLaSalle dispose d'une parcelle agroforestière conduite en grandes cultures / bois d'œuvre de 34 ha depuis janvier 2010 (Figure 5). Au total, 3 000 arbres de dix essences forestières ont été plantés, à une densité commune dans la région, sur une parcelle sujette à l'érosion et au ruissellement et comportant une grande diversité de sols à potentiels restreints. Trois témoins forestiers et trois témoins agricoles compris au sein de la parcelle permettent de comparer le fonctionnement des arbres forestiers à ceux de plein champ et de visualiser les bénéfices et inconvénients des arbres sur les cultures. Au sein de cette parcelle, un îlot de 5 ha est dédié au dispositif expérimental SCA0PEST (Figure 6), projet dans lequel s'inscrit mon stage. SCA0PEST signifie Système de Culture Agroforestier « Zéro PESTicide » et est apparenté au réseau INRA RESOPEST financé par DEPHY ECOPHYTO 2013-2018. Les objectifs de cet essai système sont de « maximiser une production commerciale [...], limiter les impacts environnementaux [...] et maintenir un revenu pour l'agriculteur » (SCA0PEST, (s.d)). La parcelle dédiée au projet SCA0PEST est découpée en six unités de 50 ares qui accueillent chacune un terme d'une rotation co-conçue, diversifiée et innovante (Figure 6).

b. Le projet VERTiCAL

Le projet VERTiCAL (Ecophyto DEPHY EXPE 2013-2018) : VERger et Cultures AssoLées en systèmes agroforestiers, dans lequel s'inscrit le stage de Claire Vaskou, est déployé sur deux sites expérimentaux, celui de la ferme pilote de la DURETTE (Vaucluse) coordonné par le GRAB et celui de la plateforme TAB (Drôme) coordonné par la Chambre d'agriculture de la Drôme (26). Ces dispositifs expérimentaux se concentrent sur les associations d'arbres fruitiers avec des cultures maraichères ou des grandes cultures. Pour répondre à l'un des objectifs du projet VERTiCAL « évaluer les performances de systèmes de production associant des arbres fruitiers, des cultures assolées et des infrastructures agroécologiques en agriculture biologique » (Chambre d'agriculture de la Drôme, 2016), un outil d'évaluation multicritère *ex ante* a été co-construit pour évaluer la durabilité des deux sites expérimentaux TAB et DURETTE : DEXi VERTiCAL.

c. Structure du modèle DEXi VERTiCAL

Développé dans le cadre du projet VERTiCAL (ECOPHYTO DEPHY EXPE 2013-2018), DEXi-VERTiCAL a été conçu pour les SAF verger / grandes cultures et verger / maraichage en agriculture biologique. Il a été adapté de la méthode MASC 2.0 (Craheix et al., 2012) et plus particulièrement du modèle MASC-AB (Colomb et al., 2011) (Bernard, 2014a).

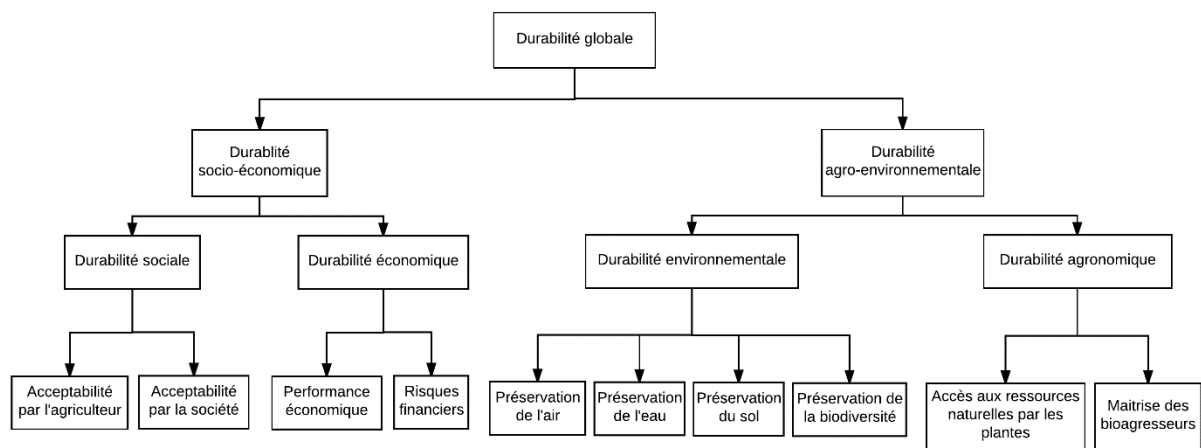


Figure 7 : Structure haute de l'arbre de décision DEXi VERtiCAL (Bernard, 2014b)

Ainsi l'arbre de décision DEXi VERTiCAL est constitué de deux branches : la durabilité socio-économique composée d'une part de l'acceptabilité par l'agriculteur et l'acceptabilité par la société et d'autre part de la performance économique et du risque financier ; la durabilité agro-environnementale composée d'une part de la préservation de la biodiversité, la préservation de l'air, la préservation de l'eau et la préservation du sol et d'autre part de la maîtrise des bioagresseurs et l'accès aux ressources naturelles par les plantes (Figure 7 et Annexe II). L'arbre de décision DEXi VERTiCAL est renseigné par 101 critères d'entrées. Ces critères sont aussi bien des critères contextuels que des critères liés aux pratiques agricoles et à la rotation culturale. Leur agrégation conduit à 80 critères agrégés, dont celui de la durabilité globale du système.

d. Problématique et objectifs du stage

En 2014, MASC 2.0 est utilisé pour évaluer la parcelle SCAOPEST et en rechercher des pistes d'amélioration (Lançon, 2014). Cependant les sorties obtenues ne sont pertinentes que pour les dimensions propres aux cultures. En effet les arbres, leurs bénéfices et les interactions avec les cultures ne sont pas pris en compte par MASC 2.0 du fait de son domaine de validité. Malgré les pistes de réflexion suscitées par cette étude, la nécessité de faire appel à des outils plus spécifiques aux SAF s'est fait ressentir. En parallèle, un premier travail avait permis d'aboutir en 2014 (Bernard, 2014a) au modèle DEXi VERTiCAL ; néanmoins ce modèle préliminaire restait non valide pour les systèmes conventionnels comme pour les SAF grandes cultures / bois d'œuvre.

Dès lors ma mission consistait à proposer et appliquer une méthode d'analyse critique du modèle multicritère d'aide à la conception et à l'évaluation DEXi-VERTiCAL, tel qu'existant en février 2017, puis de l'améliorer en cherchant à prendre en compte au mieux la diversité des usages et attentes des porteurs de projet de SAF en grandes cultures / bois d'œuvre. En parallèle de mon travail et dans le même temps, Claire Vaskou, a entrepris elle aussi de critiquer et d'améliorer DEXi-VERTiCAL pour des SAF en maraîchage / arboriculture. Ce travail a abouti à un nouveau modèle appelé DEXi AF.

Partie B : Matériel et méthodes

1. Le modèle dans la démarche de conception et d'évaluation globale de SAF

Comme explicité par plusieurs auteurs (Lairez et al., 2015 ; Craheix et al., 2015), les étapes préliminaires à la construction d'un outil d'aide à la décision sont (i) de positionner l'outil dans la démarche de conception de SdC, (ii) de décider les objectifs et finalités du modèle et (iii) de définir le cadre de l'évaluation.

a. Positionnement du modèle DEXi AF dans la démarche de conception

La démarche de conception *de novo* d'un SdC s'effectue en plusieurs étapes (Figure 4). Le modèle développé dans le cadre de ma mission est inclus dans la phase d'évaluation et d'amélioration itérative (étape 3) des SdC élaborés (étape 2) selon le cadre des contraintes et objectifs définis au préalable par les porteurs de projet (étape 1). Il se positionne après la phase de propositions de prototypes. La phase d'évaluation, définie par une démarche d'évaluation, s'entend de la définition du cadre d'évaluation à l'interprétation et la représentativité des résultats (Lairez et al., 2015).

Tableau 1 : Organisation des COPILS : dates, membres présents et sujets abordés

Date du COPIL	Membres présents	Sujets traités
10 mars 2017	David Grandgirard, Aude Alaphilippe, François Warlop, Delphine Mézière, Laurie Castel, Camille Béral	Listing des avantages et inconvénients de DEXi VERTiCAL. Discussion sur le cadre d'évaluation, les objectifs de l'outil DEXiAF et les utilisations envisageables.
13 avril 2017	David Grandgirard, Aude Alaphilippe, Laurie Castel	Présentation des deux propositions indépendantes d'arbres : SAF verger/maraichage (d'un côté) et BO/GC (de l'autre)
19 mai 2017	David Grandgirard, Aude Alaphilippe, François Warlop	Discussion et validation de l'arbre hiérarchique commun et générique aux deux grands types de SAF et des critères qu'il contient
28 juin 2017	David Grandgirard, Aude Alaphilippe, François Warlop	Pondérations des branches économiques, sociales et des sous branches environnementales biodiversité et qualité du sol
18 juillet 2017	David Grandgirard, Aude Alaphilippe, François Warlop, Delphine Mézière	Bilan du travail effectué, listing des points faibles et forts et des améliorations possibles de DEXiAF

b. Objectifs et finalités du modèle DEXi AF

Il a été convenu par consensus que DEXi AF serait développé pour des porteurs de projet accompagnés d'un conseiller, soit dans le cadre d'élaboration de projets personnels, soit dans le cadre d'ateliers participatifs. L'évaluation du ou des SAF envisagé(s) permettra de mettre en lumière les points positifs comme les points à améliorer. Cet outil n'a pas pour vocation d'explicitier la faisabilité de SAF aux vues des objectifs de l'agriculteur et du contexte pédoclimatique de la parcelle choisie, c'est-à-dire qu'il ne sert pas au design du SAF. Il intervient après l'étude de faisabilité, le choix du design et des essences les mieux adaptées pour évaluer la durabilité du système selon les premiers choix effectués.

c. Le cadre d'évaluation

Comme pour MASC (Sadok et al., 2009 ; Craheix et al., 2012) et les DEXiPM (Angevin et al., 2016), le développement durable correspond aux trois piliers communément admis, c'est-à-dire les piliers environnemental, social et économique (Figure 1). Tous les systèmes agroforestiers incluant le pastoralisme ne sont pas considérés dans le modèle. L'échelle spatiale de l'outil est définie par la parcelle, ses éléments intraparcélaires ainsi que les bordures immédiates contigües à cette dernière. Cette définition de l'échelle spatiale permet de prendre en compte les haies de bordures de parcelle, souvent considérées comme extraparcélaires. D'autre part, pour évaluer un système agroforestier en *ex ante*, il est nécessaire de considérer les interactions entre arbres et cultures comme établies, autrement dit considérer le système agroforestier comme ayant atteint sa première phase de maturité (environ 12-20 ans). L'évaluation s'effectuera donc pour un âge donné du système.

2. Méthodologie et organisation du travail

Mon stage comme celui de Claire Vaskou a été piloté par un comité dédié (COPIL) constitué de David Grandgirard de l'institut UniLasalle (maître de stage), d'Aude Alaphilippe de l'INRA de Gothenon, de Laurie Castel de la Chambre d'Agriculture de la Drôme, de François Warlop du GRAB et de Delphine Mézière de l'UMR System de l'INRA de Montpellier. En six mois de stage, cinq réunions « comité de pilotage » ont eu lieu, soit environ une par mois. Le tableau 1 retrace l'historique des réunions et les membres présents. Ces réunions en présentiel (ou le cas-échéant *via* vidéo conférence) permettaient de débattre de points précis et de prendre des décisions pour progresser dans le développement du modèle. Ainsi ces réunions avaient plusieurs buts : (i) discuter de l'avancée des stages et de leurs orientations, (ii) valider des propositions communes, (iii) discuter puis trancher les points de discorde, (iv) organiser la suite du travail. Le choix des critères, leur organisation hiérarchique et le jeu de pondérations affecté à l'ensemble de l'arbre de décision ont été présentés, discutés puis validés par consensus d'experts lors de ces réunions. Toutes les décisions ont bénéficié d'une traçabilité et sont compilées dans un document dédié, livrable du projet.

3. Méthodologie de construction de DEXi AF

La construction du modèle DEXi AF s'est faite en plusieurs temps (Figure 8). La première phase correspond à la prise en main de l'outil existant (DEXi VERTiCAL) et à son appropriation par une déconstruction – reconstruction de l'arbre de décision. S'en suit une phase de confrontation avec le travail effectué par Claire dans l'optique de produire un modèle générique à tous les SAF. Nous avons poursuivi en effectuant un parallèle avec la structure commune des DEXiPM (Annexe III).

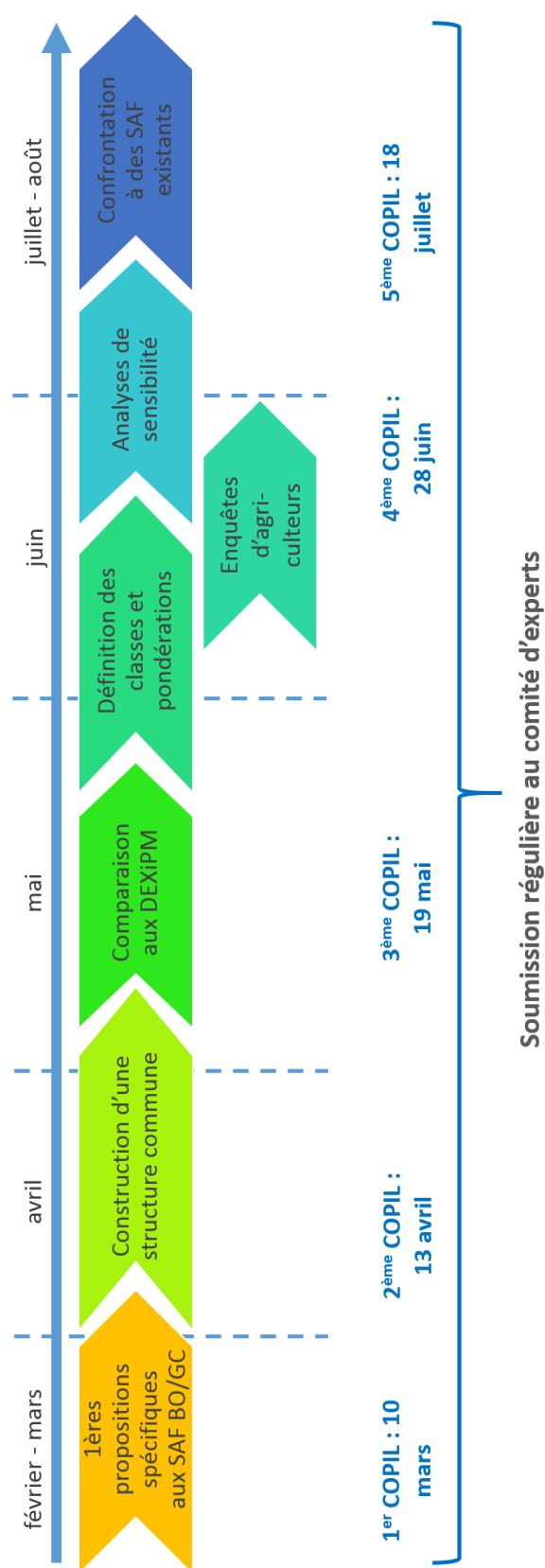


Figure 8 : Calendrier des tâches exécutées pendant la mission de stage
COPIL = Comité de Pilotage

Une fois la structure hiérarchique fixée, nous sommes passés à la phase de détermination des classes et des pondérations de chaque critère.

a. Prise en main et approche critique avec propositions d'amélioration

Dans un premier temps, la critique de l'outil DEXi VERTiCAL s'est déroulée sans *a priori*, selon une démarche descendante, c'est-à-dire en partant de la racine de l'arbre (durabilité du SAF) puis en descendant jusqu'aux critères d'entrée (aussi appelés feuilles) (Annexe I pour le vocabulaire). Une approche par les propriétés systémiques comme celle de l'Indicateur de Durabilité des Exploitations (IDEA) (Zahm et al., 2013) nous semblait plus parlante pour des agriculteurs, cependant dans le temps imparti, il convenait de conserver la notion de la durabilité communément admise puis de repartir de sa définition. J'ai alors questionné les premiers niveaux de l'arborescence de DEXi-VERTiCAL (Figure 7) en m'interrogeant sur le premier : « *Durabilité socio-économique* » et « *Durabilité agro-environnementale* », puis sur les suivants et ainsi de suite jusqu'aux critères d'entrée. En parallèle, Claire Vaskou a travaillé avec une démarche ascendante, allant des critères d'entrée jusqu'à la racine de l'arbre, critiquant ainsi les plus bas niveaux d'agrégation de DEXi-VERTiCAL.

b. Étude d'une proposition commune

L'objectif était de créer, si possible, un modèle générique à tous les systèmes agrosylvicoles. Ainsi un porteur de projet ne serait pas obligé de choisir le modèle adéquat parmi un panel de modèles relativement similaires. Par ailleurs, il n'est pas impossible qu'un porteur de projet imagine un système agroforestier mêlant des fruitiers en verger, des grandes cultures et des arbres conduits pour la production de bois. Ainsi la mise en commun de notre première phase de travail indépendante, a conduit à un arbre le plus exhaustif possible et explicitant tous les critères d'entrée, identifiés comme communs entre les deux grands types d'agroforesterie.

c. Confrontation aux modèles existants

Une fois la proposition commune à tous les SAF établie, nous l'avons confronté à la structure hiérarchique haute commune aux DEXiPM (Annexe III). Si rien ne justifiait de construire le modèle différemment, alors la structure commune des DEXiPM était adoptée. Au contraire lorsqu'un critère d'entrée ou un critère agrégé de l'arbre nous semblait spécifique aux SAF, nous le conservions. Les rencontres d'agriculteurs ont confirmé la nécessité de critères présents dans DEXiPM. Cette confrontation aux DEXiPM (Angevin et al., 2016) et plus spécifiquement à DEXiPM-Pomefruit, DEXiPM-Légumes et DEXiPM-Vigne, a permis dans une large mesure de faire appel à un travail colossal d'une centaine d'experts sur plusieurs années tant du point de vue de l'organisation des critères, que des pondérations choisies pour ces critères (ou à défaut, l'ordre de priorisation).

d. Finalisation de la structure de DEXi AF

Pour finaliser la structure hiérarchique de DEXi AF, nous avons (i) ajouté des critères identifiés comme importants lors des entretiens menés auprès d'agriculteurs, (ii) restreint le nombre de critères renseignant un critère agrégé pour limiter l'explosion des règles de décision (Craheix et al., 2015), (iii) harmonisé les critères et supprimé les doublons. Cette phase de finalisation a permis l'obtention de l'arbre hiérarchique de décision DEXi AF (Annexes IV à VIII).

e. Choix des pondérations et des classes

Une fois les critères d'entrée et leurs agrégations en critères agrégés décidés, le travail a consisté à définir des pondérations et des classes pour chacun des critères d'entrée et agrégés. Il s'agit alors de choisir un nombre approprié de classes par critère d'entrée pour que le modèle représente la diversité des systèmes sans devenir inutilisable du fait de sa complexité (Craheix et al., 2015). Pour certains critères d'entrée liés au contexte et communs aux DEXiPM (Angevin et al., 2016) les classes ont été réutilisées en l'état ou bien légèrement modifiées pour s'adapter au contexte spécifique de l'agroforesterie. Il en est de même avec des critères plus spécifiques à l'agroforesterie et présents dans DEXi VERTiCAL. Pour les quelques critères issus d'entretiens avec les agriculteurs, les classes proposées sont tirées des échanges avec ces mêmes agriculteurs. Quelques classes, plus difficiles à définir ont été décidées par consensus lors de COPIL. Les critères sont pour la grande majorité renseignés par des classes qualitatives, quelques critères le sont par des classes quantitatives mais cela reste marginal.

Concernant les critères agrégés, nous avons toujours respecté la règle suivante : un critère agrégé ne peut avoir un nombre de classes inférieur au nombre maximal de classes possédées par les critères qui le renseignent (Aude Alaphilippe, communication personnelle).

Le choix des pondérations a été discuté en COPIL le 28 juin 2017. Pour les branches non abordées ce jour-là, des experts du COPIL ont été sollicités individuellement pour proposer les pondérations manquantes.

4. Méthodologie d'entretiens auprès d'agriculteurs

La mobilisation des utilisateurs finaux accroît l'appropriation du modèle et donc son utilisation (Craheix et al., 2015). L'outil étant à destination d'agriculteurs et de manière plus générale, de porteurs de projet, il nous a donc semblé indispensable de les mobiliser au cours de cette mission pour développer un outil pertinent qui corresponde à leurs attentes. Dans cette optique nous avons fait appel à Yann Pivain, conseiller agroforestier de la chambre d'agriculture de l'Eure (27) et aux agriculteurs qu'il accompagne dans le cadre de l'Association pour une Dynamique Agroforestière en Normandie (ADAN) et d'un groupement d'intérêt économique et environnementale (GIEE). Deux temps de rencontres ont été menés pour remplir, chacun, un objectif particulier. La première phase d'entretiens consistait à vérifier l'exhaustivité des aspects des SAF abordés dans l'outil. La deuxième phase avait pour but de tester l'outil sur des SAF existants afin (i) de vérifier la faisabilité de remplissage de l'outil et (ii) d'évaluer sa valeur prédictive.

a. Première phase d'entretiens : vérifier l'exhaustivité du modèle

Lors des phases de choix des critères et de leur hiérarchisation, la consultation d'agriculteurs a permis d'ajouter des critères et des thématiques non abordés dans DEXi VERTiCAL. Au cours d'une réunion collective organisée mi-avril, six agriculteurs de l'ADAN et leur conseiller, Yann Pivain ont été consultés. Répartis en deux groupes, nous avons discuté collectivement de ce qu'étaient, pour eux, les performances d'un système agroforestier. Premièrement chacun a présenté succinctement son projet et sa parcelle agroforestière, puis les motivations ayant conduit à l'implantation d'arbres sur l'exploitation. Chacun a, par la suite, explicité ce qu'était pour lui les performances globales d'un SAF avant de s'attarder sur les performances du point de vue des aspects sociaux, économiques et environnementaux. De plus une présentation sommaire de l'état de l'arbre de décision au moment de cette réunion a permis de susciter la discussion et d'identifier les notions et critères absents.

Tableau 2 : Bilan des branches testées lors des enquêtes d'agriculteurs

Code agriculteurs	Branche sociale	Branche économique	Branche environnementale
Agri 1	x	x	
Agri 2	x	x	
Agri 3	x		X
Agri 4	x	x	
Agri 5	x	x	X
Agri 6			X
Agri 7	x	x	
SCA0PEST	x	x	X
Total	7	6	4

b. Deuxième phase d'entretiens : vérifier la faisabilité de remplissage de l'outil et évaluer la valeur prédictive du modèle

Une fois le modèle relativement avancé, nous avons souhaité vérifier sa faisabilité de remplissage en le testant auprès d'agriculteurs. Sept entretiens individuels ont donc été menés auprès d'agriculteurs, pour certains mobilisés dans la « phase aval » (5/7). Les branches économique, sociale et environnementale de l'arbre n'ont pas pu être toutes testées avec chacun des agriculteurs enquêtés du fait de leurs disponibilités. Ainsi la branche sociale a été testée 5 fois, la branche économique 4 fois et la branche environnementale 3 fois (Tableau 2). Seul un agriculteur a testé l'ensemble du modèle. Pour chaque critère d'entrée, l'agriculteur devait choisir parmi les classes proposées, celle qui convenait le mieux à son système agroforestier. Le modèle n'étant, à cette époque, pas finalisé et non disponible en version numérique, les entretiens ont eu lieu sur support papier ; ce qui s'est traduit, lors de l'évaluation des systèmes, par le choix de la valeur moyenne lorsque l'information n'était pas disponible ou incertaine. Pour conclure l'entretien, quelques questions étaient posées à l'agriculteur concernant son opinion sur l'outil et le contexte dans lequel il envisagerait de l'utiliser.

Les agriculteurs sollicités avaient tous la particularité d'avoir déjà planté au moins un système agroforestier sur leur ferme. L'avantage principal est qu'ils disposent d'un peu de recul sur leurs projets et sont en capacité d'évaluer leurs systèmes sur bon nombre d'aspects. Dans ce contexte, les agriculteurs sont critiques vis-à-vis des résultats issus de l'outil, ce qui permet d'améliorer la valeur prédictive du modèle afin qu'elle corresponde mieux à la réalité des systèmes en place.

5. Évaluation et amélioration de DEXi AF

Un modèle n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité. « Cette représentation est-elle fidèle et fiable ? » Tout concepteur de modèle se pose cette question qui fait partie intégrante des processus de construction et validation d'un modèle. L'évaluation d'un modèle permet de soulever les améliorations possibles et de connaître le degré de confiance que l'on peut lui accorder (Qureshi et al., 1999). Elle se déroule en trois phases : la vérification, la validation et l'analyse de sensibilité (Qureshi et al., 1999).

a. Vérification du modèle

La vérification consiste à s'assurer que le modèle est construit correctement afin de fonctionner de manière optimale dans sa version numérique, sous le logiciel choisi (Qureshi et al., 1999). Cette vérification a eu lieu lors du passage au format numérique sous les logiciels DEXi (Bohanec, 2011) et IZI EVAL.

b. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité (AS) permet d'examiner comment la valeur prédictive du modèle est impactée par la variation quantitative ou qualitative des paramètres d'entrée (Carpani et al., 2012 ; Qureshi et al., 1999), elle consiste donc à évaluer la capacité du modèle à discriminer les SdC. L'analyse de sensibilité du modèle peut s'effectuer selon trois méthodes : un plan factoriel couplé à une analyse de variance (ANOVA), des probabilités conditionnelles et une analyse de Monte Carlo (Carpani et al., 2012). Les deux premières méthodes sont très chronophages car dépendantes d'un temps de calcul élevé conséquence directe d'un grand nombre de critères et donc de simulations.

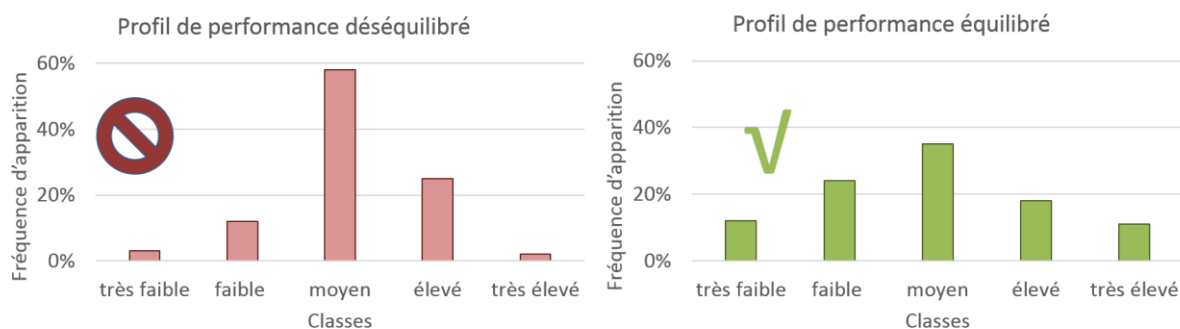


Figure 9 : Exemples d'un profil de performance déséquilibré (à gauche) et d'un profil équilibré légèrement décalé vers les classes les moins bonnes (à droite)

Tableau 3 : Récapitulatif des analyses de sensibilité pratiquées sur chaque branche et sous-branche

Branches soumises à l'analyse de sensibilité	Nombre de simulations	Nombre d'AS pratiquées
Branche sociale	5 000	8
Branche économique	5000	7
Biodiversité	10 000	7
Utilisation des ressources	10 000	8
Qualité du milieu	10 000	8
Branche environnementale complète	5 000	3

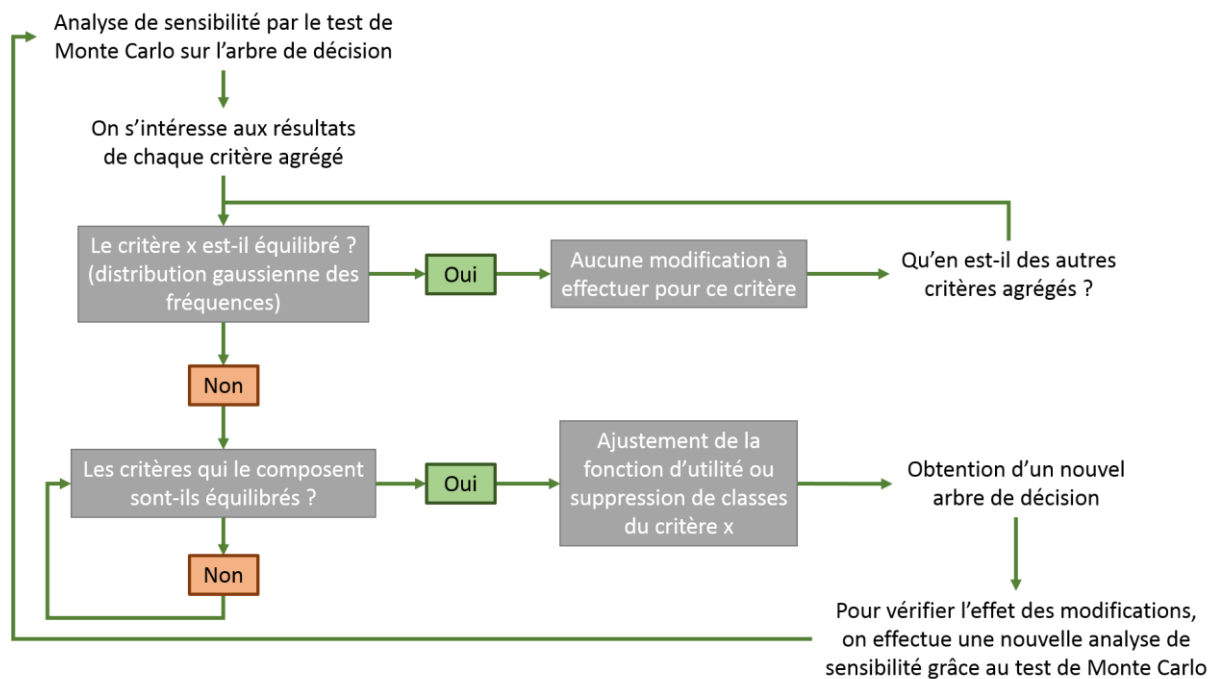


Figure 10 : Schéma décisionnel relatif à l'analyse des résultats des analyses de sensibilité du modèle

L'AS par la méthode de Monte Carlo permet de simuler un grand nombre de scénarii, autrement dit un grand nombre de combinaisons aléatoires de valeurs de tous les critères d'entrée. Toutes les classes d'un même critère sont simulées de manière équiprobable. Grâce aux fonctions d'utilité définies au préalable, une valeur de classe est calculée pour tous les critères agrégés. Des histogrammes permettent ensuite de visualiser et d'identifier les critères au profil déséquilibré (Figure 9, gauche) et ceux au profil équilibré (Figure 9, droite). Cette méthode d'AS est réalisable grâce au script R développé par Jacques-Éric Bergez de l'UMR AGIR (non publié). Ce script permet de transposer l'arbre de décision structuré sous le logiciel DEXi dans le langage R avant de réaliser l'analyse de Monte Carlo et de visualiser les résultats. Quelques ajustements de structure ont dû être réalisés pour permettre son utilisation. En effet celui-ci ne prend pas en compte les critères agrégés dupliqués. Ces derniers ont par conséquent été transformés en critères d'entrée, laissant à un unique endroit de l'arbre de décision le critère agrégé déployé dans son intégralité. L'analyse de Monte Carlo a été réalisée sur toutes les branches de l'arbre de décision. Cependant du fait de la taille de DEXi AF, ce test a été effectué sur chacune des branches (économique, sociale et environnementale) indépendamment des autres. De même, la branche environnementale a été subdivisée en « Biodiversité, Utilisation des ressources et Qualité du milieu » pour lesquelles 10 000 simulations ont été réalisées, contre 5 000 simulations pour les autres branches moins développées (Carpani et al., 2012)) (Tableau 3).

c. Améliorations du modèle à partir des résultats de l'analyse de sensibilité

L'analyse de Monte Carlo consiste à mettre en évidence les critères déséquilibrés, c'est-à-dire les critères pour lesquels une classe apparaît plus fréquemment, au détriment des autres peu représentées (Figure 9). Dans le cadre d'une évaluation de SdC, une répartition gaussienne des fréquences de classes est à rechercher. Cependant, l'objectif de ce modèle est d'identifier les SAF les plus prometteurs, à savoir ceux ayant obtenus la meilleure note de durabilité globale ou à défaut les meilleures notes de durabilités économique, sociale et environnementale. L'objectif est donc d'obtenir des courbes gaussiennes légèrement décalées vers la classe la moins bonne (Figure 9, droite).

Afin d'améliorer l'équilibre des critères de DEXi AF, il s'agit de pratiquer de manière itérative l'analyse de Monte Carlo jusqu'à obtenir les répartitions optimales de fréquences de classes (Figures 9 et 10). À cet effet, nous avons suivi le schéma décisionnel de la figure 10 en rééquilibrant les critères ou en supprimant des classes au besoin. Comme le rééquilibrage de critères les moins agrégés peut avoir une conséquence sur la fréquence d'apparition des classes des critères qu'ils renseignent (Aude Alaphilippe, communication personnelle), nous avons commencé par ceux-là en remontant jusqu'au critère racine.

d. Validation du modèle par les SAF d'agriculteurs et parcelles expérimentales

La validation du modèle consiste à vérifier que l'on a construit le modèle approprié, capable de mimer la réalité par des prédictions valables (Qureshi et al., 1999). Cette phase d'évaluation a eu lieu auprès des agriculteurs, lors de la deuxième phase d'entretiens. Les données alors recueillies ont été utilisées pour procéder à l'évaluation par DEXi AF de leurs SAF. Une restitution des résultats a eu lieu en présence de 3 des 7 agriculteurs enquêtés et de leur conseiller. Afin d'améliorer la qualité prédictive du modèle, les résultats obtenus ont alors été confrontés à l'image qu'avaient les agriculteurs de leurs SAF. De même, DEXi AF a été utilisé sur la station d'expérimentation de la TAB, pilotée par la CA26 (résultats non présentés) et la parcelle expérimentale SCAOPEST d'UniLaSalle dans l'optique de confronter les résultats du modèle avec la réalité connue du terrain.

Partie C : Résultats

1. Le modèle DEXi-VERtiCAL, ses points forts et ses faiblesses

a. Les points forts du modèle DEXi-VERtiCAL

La force principale de DEXi VERtiCAL réside dans le choix du logiciel et des modèles d'inspiration MASC 1.0 (Sadok et al., 2009) et MASC-AB (Colomb et al., 2011). Le logiciel DEXi (Bohanec, 2011) facile à prendre en main, offre une transparence totale vis-à-vis de l'organisation hiérarchique des critères, des classes et pondérations qui leur sont attribuées ainsi que pour toutes les règles de décision. DEXi VERtiCAL est assez exhaustif et permet de mettre en lumière de nombreux aspects, surtout environnementaux, amenant à la discussion. Un autre point fort est que la plupart des critères de DEXi VERtiCAL sont qualitatifs, ce qui facilite la récolte des données et permet d'évaluer *ex ante* les systèmes.

b. Les faiblesses et limites de DEXi-VERtiCAL

i. Une structure déséquilibrée et profonde

Avant tout, DEXi-VERtiCAL est composé de deux branches « durabilité agro-environnementale » et « durabilité socio-économique », inspirées de MASC-AB (Figure 7). Cependant le contenu de la branche agronomique diffère par rapport à celui de MASC-AB qui développe les aspects de « *Maitrise de la fertilité du sol* », « *Maitrise des adventices* » et « *Maitrise des bioagresseurs* ». DEXi VERtiCAL se concentre sur « *la maitrise des bioagresseurs* » regroupant les adventices, les ravageurs et les maladies et « *l'accès aux ressources naturelles par les plantes* », les ressources étant l'eau, la lumière et les nutriments nécessaires pour la croissance des arbres et des cultures. Or si ces aspects conditionnent la durabilité définie selon les trois piliers, ils n'en sont pas des composantes. Ils relèvent par contre de la phase de design d'un SAF pendant laquelle l'agencement de la parcelle sera réfléchi selon les ressources présentes afin de mieux maîtriser les bioagresseurs et de limiter les compétitions entre les arbres et les cultures. Ainsi en l'état, la branche agronomique de DEXi-VERtiCAL a plus pour objectif d'aider au prototypage du SAF alors que les branches économique, sociale et environnementale ont pour objectif d'évaluer la durabilité des prototypes envisagés.

Par ailleurs, un fort déséquilibre s'observe entre les branches agronomique et environnementale d'une part, représentant les 2/3 du modèle et les branches sociale et économique d'autre part. Ces dernières sont moins développées que les premières dans lesquelles le niveau de profondeur de 7 est atteint. Ceci s'explique par la présence initiale d'une majorité de spécialistes de l'environnement plutôt que des experts en sciences humaines et sociales dans le comité d'experts du modèle DEXi VERtiCAL.

ii. Critiques sur le fond

Quelques critiques peuvent être émises sur le contenu de DEXi VERtiCAL. Premièrement les critères relatifs aux arbres sont très peu nombreux, ce qui laisse une place largement prédominante aux cultures. Deuxièmement, quelques critères suscitent dès leur lecture un jugement de valeur. C'est, notamment le cas pour les critères « *Surcharge de travail* », « *Hétérogénéité des cultures* » et « *Hétérogénéité du paysage* ». Enfin, par manque de temps, l'harmonisation de critères proches n'a pas été effectuée ce qui conduit à une redondance de certains critères comme « *Effet du travail du sol* », « *Fréquence de retournement du sol* » et « *Effet du labour* » (branche agronomique).

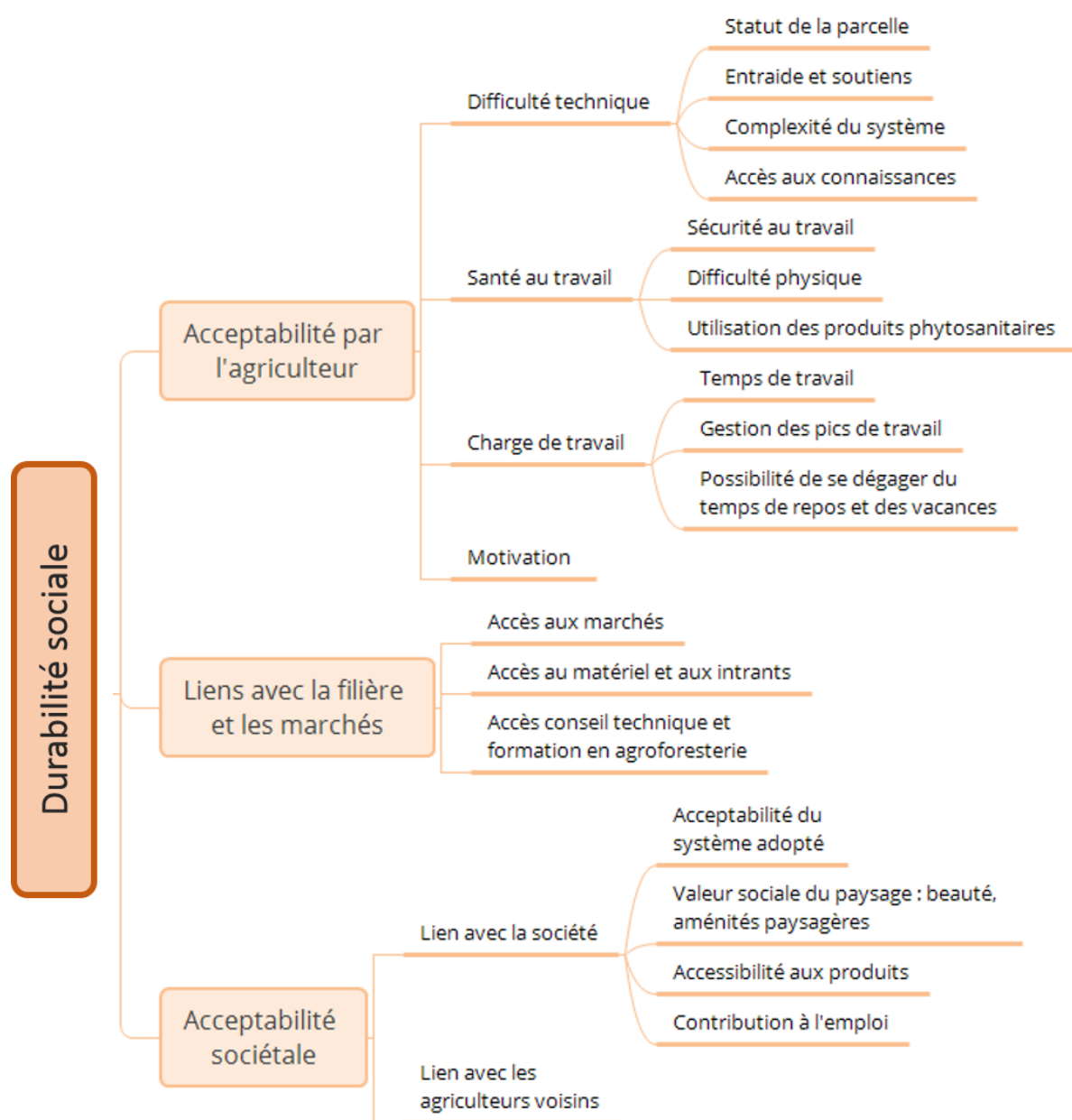


Figure 11 : Trois premiers niveaux de la branche sociale de DEXi AF

iii. Les limites du modèle

Quatre limites principales transparaissent. En premier lieu, quelques critères comme « Intensité de l'irrigation » ou « Efficience de l'eau [d'irrigation] » sont très précis pour de l'évaluation *ex ante* ce qui les rend difficiles à renseigner lors de l'utilisation du modèle. En second lieu, les commanditaires de DEXi AF (communications personnelles, février et mars 2017) ont souligné que la spatialité et la temporalité des systèmes agroforestiers transparaissent peu dans DEXi VERTiCAL. La troisième limite est liée à la non-adaptation des classes à chacun des critères, qui conservent pour la plupart d'entre eux, les classiques « faible – moyen – fort ». L'ultime limite relevée est liée à la structure déséquilibrée de l'arbre de décision. En effet, plus un modèle est profond et moins il est sensible (Carpani et al., 2012). Une évaluation du modèle par une analyse de sensibilité aurait permis de mettre en lumière cette limite et de fournir des pistes d'amélioration.

2. Construction du modèle DEXi AF à partir de DEXi VERTiCAL et des DEXiPM

Nous avons souhaité baser DEXi AF sur les trois piliers de la durabilité et sur la structure haute et commune aux modèles basés sur DEXi identifiée par Angevin et al., 2016 (Annexe III). Les trois branches de DEXi AF sont détaillées en annexes (Annexes IV à VIII). Dans un souci de clarté, nous ne présenterons que quelques critères de chacune des branches.

a. Choix des critères de DEXi AF

i. Branche sociale (Figure 11)

La durabilité sociale étant peu développée dans DEXi VERTiCAL, nous l'avons étoffée et avons explicité certains critères importants, identifiés notamment grâce aux entretiens d'agriculteurs.

♣ Lien avec la filière et les marchés

Sur la base de la structure commune des DEXiPM (Annexe III), la durabilité sociale de DEXi VERTiCAL a été complétée par le critère agrégé « *Lien avec la filière et les marchés* » repris dans son intégralité : « *Accès aux matériels et aux intrants* », « *Accès à la connaissance* » renommé « *Accès au conseil technique et à la formation en AF* » et « *Accès aux marchés* ».

♣ Acceptabilité sociétale

Ce critère agrégé a été remanié et étoffé suite aux retours d'agriculteurs enquêtés qui soulevaient l'importance du lien avec les agriculteurs voisins. Ainsi nous avons ajouté ce critère comme un critère d'entrée en parallèle du critère agrégé « *Lien avec la société* » pour lequel la structure a été reprise des DEXiPM (Annexe III). Les critères « *Relation avec le consommateur* » et « *Acceptabilité par le voisinage urbain* » de DEXi VERTiCAL ont été redispachés dans les critères de « *Lien avec la société* » : « *Valeur sociale du paysage* » et « *Acceptabilité du système adopté* ».

♣ Acceptabilité par l'agriculteur

Le critère « *Acceptabilité par l'agriculteur* » comporte une composante supplémentaire « *Charge de travail* » par rapport aux DEXi PM (Annexe III), autrement présente dans « *Difficulté opérationnelle* » de DEXi Fruits (Vélu et al., [sans date]). La charge de travail est, en effet, un point d'attention en agroforesterie car celle-ci peut rapidement devenir élevée du fait de la double gestion des arbres et des cultures. Elle s'évalue par le temps de travail mais aussi par la manière dont l'agriculteur gère les pics de travail et sa capacité à se dégager du temps de repos et des vacances.

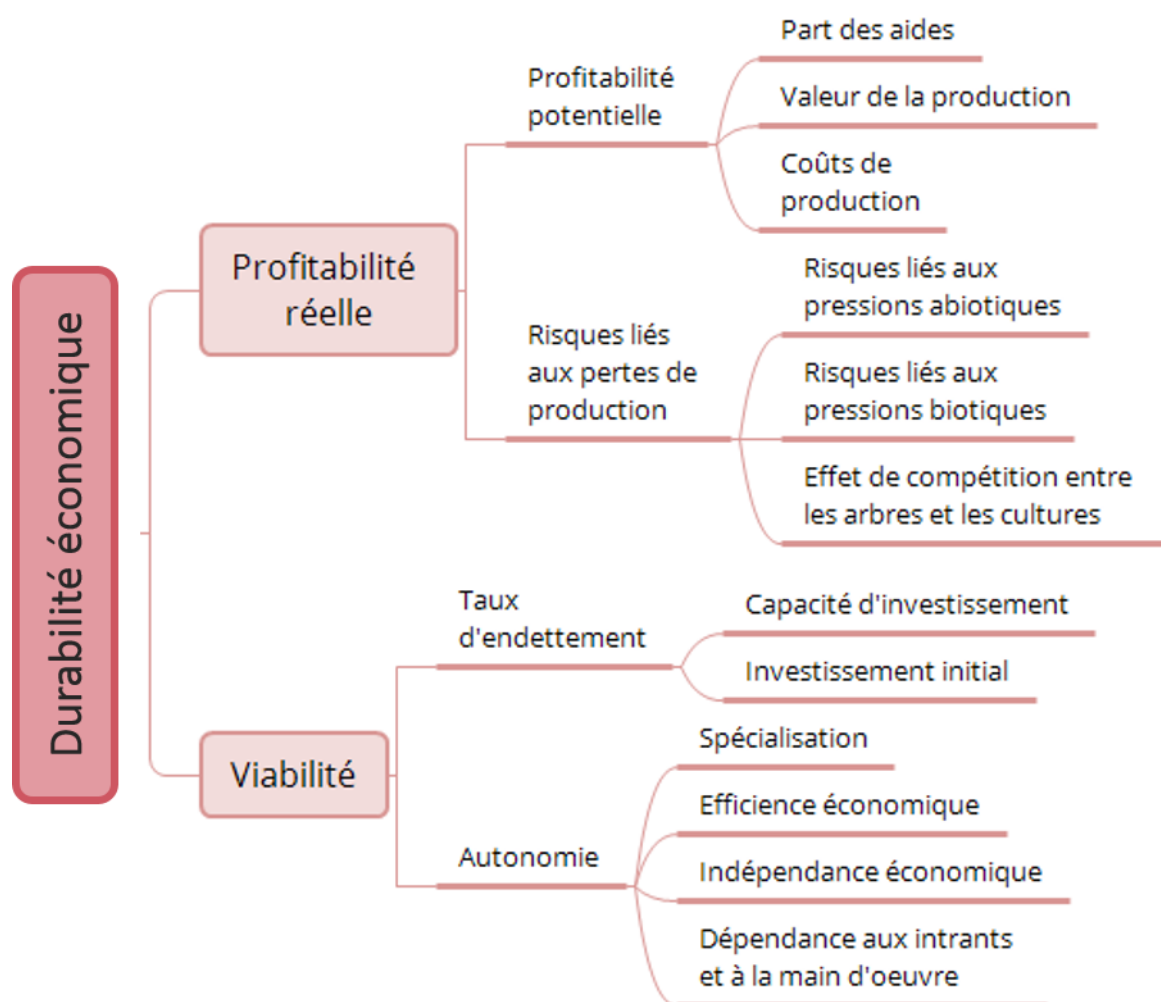


Figure 12 : Trois premiers niveaux de la branche économique de DEXi AF

L'évaluation du temps de travail moyen par année et par personne est très subjective, ce critère est donc complété par le critère « *Adéquation aux attentes* » et permet d'exprimer l'appréciation de l'agriculteur sur cet aspect.

Le critère « *Épanouissement au travail* » de DEXi VERTiCAL proche de « *Satisfaction au travail* » des DEXiPM (Annexe III) semblait très subjectif et difficile à estimer en *ex ante*. Il a été transformé en « *Motivation* », qui évalue les raisons poussant l'agriculteur à implanter un SAF.

ii. Branche économique (Figure 12)

La branche économique de DEXi AF a été entièrement reconstruite à partir de la structure commune des DEXiPM (Annexe III). Elle est donc désormais dichotomique « *Viabilité* » et « *Profitabilité réelle* ». La plupart des critères de DEXi VERTiCAL ont été renommés et réorganisés sous cette nouvelle architecture.

♣ Profitabilité potentielle

L'évaluation de la profitabilité potentielle consiste à estimer la totalité des revenus perçus par l'agriculteur pour sa production et de la minorer des coûts de production. Ainsi les revenus perçus sont aussi bien ceux liés à la valeur de la production que les potentielles aides qui peuvent considérablement améliorer les revenus de l'agriculteur. À l'avenir, ces aides pourraient être complétées par les crédits « carbone », c'est-à-dire que dans un futur plus ou moins proche, les agriculteurs pourraient être rémunérés pour stocker du carbone dans les arbres (et le système agroforestier en général) quand d'autres activités en rejettent dans l'atmosphère.

♣ Coût de la production

Les coûts de production sont assez divers, ils sont liés à la charge de main d'œuvre, aux prix des intrants mais aussi à la charge de mécanisation et à l'existence d'une assurance récolte qui peut avoir un coût élevé. Le coût en intrants est relativement similaire à celui proposé dans DEXi VERTiCAL. Les différences résident dans la simplification des critères. Le « *Coût en protection phytosanitaire* » a été généralisé à la protection des cultures car le prix de la confusion sexuelle peut être élevé en fonction des méthodes mobilisées. Le « *Surcoût en matériel végétal* » a été simplifié à l'achat des semences car l'achat des plants est pris en compte comme un investissement dans « *Coût du projet* ». Le « *Coût en eau d'irrigation* » très développé de DEXi VERTiCAL a été simplifié dans DEXi AF car les critères le renseignant étaient trop précis et détaillés pour de l'évaluation *ex ante* ; d'autant plus qu'en agroforesterie BO/GC, l'irrigation est moins fréquente qu'en verger/maraichage.

♣ Risques liés aux pertes de production

La profitabilité potentielle du système peut être altérée par des pertes de production. En agriculture, ces pertes sont classiquement liées aux événements climatiques, à la présence d'adventices et aux attaques de ravageurs et maladies. Or en agroforesterie, les pertes de production peuvent être le résultat d'une compétition entre les arbres et les cultures pour l'accès aux nutriments, à l'eau et à la lumière, d'où l'ajout d'un critère spécifique « *Effet de compétition entre les arbres et les cultures* ».

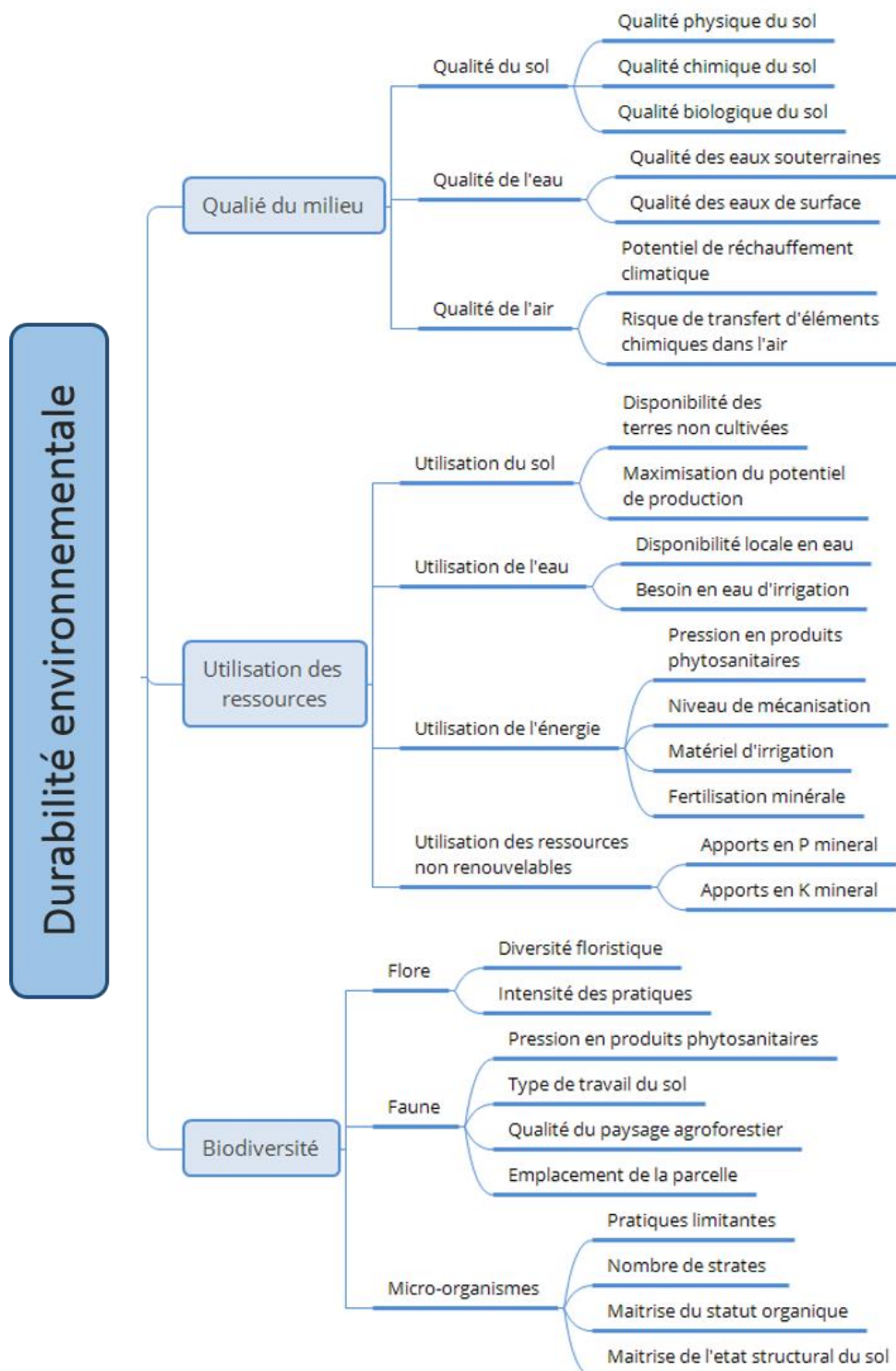


Figure 13 : Trois premiers niveaux de la branche environnementale de DEXi AF

iii. Branche environnementale (Figure 13)

La durabilité environnementale de DEXi VERTiCAL (Figure 7) se découpait en quatre volets, soient la préservation de l'eau, de l'air, du sol et de la biodiversité. Après harmonisation avec les DEXiPM (Annexe III), DEXi AF se décompose en « *Qualité du milieu* », « *Utilisation des ressources* » et « *Biodiversité* ».

♣ Biodiversité

❖ Faune

La faune était dichotomique dans DEXi VERTiCAL « *Vertébrés / Invertébrés* » et est distinguée selon les catégories « *Pollinisateurs / Ennemis aériens et du sol* » dans les DEXiPM (Annexe III). Aucune de ces organisations ne convenaient car ces catégories sont peu distinctes les unes des autres : par exemple, les ennemis aériens ont parfois une phase de développement dans le sol. Dès lors, l'organisation « *Macrofaune / Mésofaune / Microfaune* » a été envisagée mais cela créait des répétitions peu utiles et alourdissait le modèle. Ainsi et dans un souci de simplification, aucune distinction n'est faite au sein de la faune et seules quatre composantes permettent de l'évaluer. Il s'agit d'une part des pratiques de l'agriculteur en termes de travail du sol et de pression en produits phytosanitaires, du fait des impacts négatifs sur la vie du sol et la faune en général. D'autre part et pour contrebalancer ces pratiques, il s'agit d'évaluer la qualité du paysage (parcelles et structures boisées à proximité) dans lequel la faune évolue avec pour hypothèse qu'une parcelle agroforestière située au milieu d'une plaine nue d'arbres serait bien moins favorable pour la faune qu'une parcelle située à proximité d'un bosquet, de haies ou de d'autres parcelles agroforestières.

❖ Flore

Distinguer la flore dite cultivée de la flore dite non cultivée ou spontanée n'est pas une mince affaire, car ce qui l'est pour un système ne l'est plus pour un autre. En conséquence et plus simplement, la flore s'évalue par sa diversité, en termes de diversité génétique, de quantité et de répartition spatiale et par l'intensité des pratiques de gestion qui lui sont liées.

❖ Microorganismes

Là où DEXi VERTiCAL n'évaluait que les aspects impactant négativement les microorganismes, nous avons ajouté les aspects qui les favoriseraient comme la structure du sol et la disponibilité en nutriments explicités dans des critères de « *Qualité du sol* ».

♣ Utilisation des ressources

Ce critère agrégé était absent de DEXi VERTiCAL, or il n'est désormais plus possible d'envisager la durabilité environnementale sans évaluer l'impact des systèmes sur l'utilisation des ressources naturelles et énergétiques. L'organisation générale de ce critère a été reprise des DEXiPM (Annexe III).

♣ Qualité du milieu

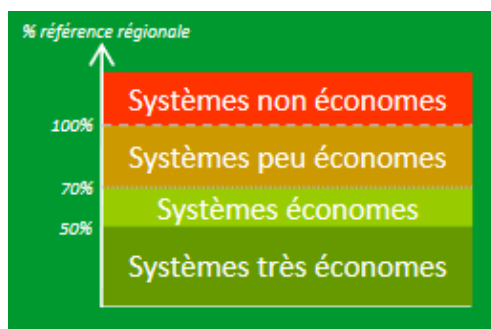
La qualité du milieu s'appuie sur la structure commune des DEXiPM (Annexe III). Elle est ainsi composée de la qualité de l'air, de la qualité du sol et de la qualité de l'eau. Toute notion d'utilisation et d'efficience (de l'eau notamment) présente dans DEXi VERTiCAL a été supprimée de cette partie car elle ne relève pas de la qualité du milieu mais de l'utilisation des ressources.

*Tableau 4 : Classes des critères "Lien avec les agriculteurs voisins", "Contribution à l'emploi",
"Pression en produits phytosanitaires"*

Critères	Classes			
Lien avec les agriculteurs voisins	très mauvais : marginalisation	mauvais : moqueries	neutre : curiosité, indifférence	bon à très bon : soutien, intérêt
Contribution à l'emploi	pas d'emploi supplémentaire créé	emploi(s) maintenu(s) ou créé(s)		
Pression en produits phytosanitaires	système non économe IFT > référence régionale	système peu économe IFT < référence régionale	système économe IFT < 70% de la référence régionale	système très économe IFT < 50% de la référence régionale

Légende

classe la plus basse	classe intermédiaire	classe la plus haute
----------------------	----------------------	----------------------



*Figure 14 : Systèmes économes en produits phytosanitaires selon le réseau DEPHY
(ECOPHYTO Réseau DEPHY - FERME, 2014)*

❖ Qualité de l'air

L'avantage de l'agroforesterie est de disposer d'un réservoir capable de stocker du carbone. Absent des DEXiPM (Annexe III), nous avons ajouté un critère estimant le potentiel de stockage du système qui pourrait venir contrebalancer les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère du fait de la mécanisation et de la fertilisation azotée. Les contaminations atmosphériques liées aux émissions de NH₃ et à la volatilisation des produits phytosanitaires sont regroupées dans un seul critère « *Risque de transfert d'éléments chimiques dans l'air* ».

❖ Qualité de l'eau

Nous avons conservé la dichotomie proposée dans DEXi VERTiCAL (Figure 7) entre la qualité des eaux souterraines contaminables par les produits phytosanitaires et les nitrates et la qualité des eaux de surface pouvant subir l'eutrophisation et être sources de toxicité pour la faune aquatique. Sont pris en compte systématiquement les pratiques en termes de produits phytosanitaires, d'éléments traces métalliques, de fertilisations azotée et phosphorée, ainsi que les aspects contextuels liés aux caractéristiques de la parcelle.

❖ Qualité du sol

Ce critère est celui qui a été le plus remanié depuis DEXi VERTiCAL (Figure 7). La division en trois volets « *Qualité chimique* », « *Qualité physique* » et « *Qualité biologique* » (DEXiPM en Annexe III) a été adoptée. La qualité biologique se distingue selon 4 composantes : la qualité du paysage agroforestier favorise la vie du sol, de même que son état structural, son intégrité chimique et la présence de nutriments. La qualité physique du sol s'évalue par la maîtrise de l'érosion et la maîtrise de l'état structural dépendantes des caractéristiques intrinsèques du sol et des pratiques de l'agriculteur. La qualité chimique s'entend quant à elle par la maîtrise du risque de contamination chimique, la maîtrise de la fertilité du sol et la maîtrise du statut acido-basique.

b. Choix des classes de DEXi AF

Le nombre de classes d'un critère agrégé est obligatoirement supérieur ou égal au nombre de classes maximal pris par les critères qui le renseignent (A. Alaphilippe, communication personnelle). La définition des classes de critères agrégés (nombres et noms) suit cette règle et s'est inspirée des classes de DEXi Fruits, DEXiPM et DEXiPM-Pomefruit.

Concernant les critères d'entrée, nous avons rectifié plusieurs classes pour les faire correspondre à celles des DEXiPM comme « *Vente directe ou circuits courts* » pour lequel la classe « oui » a un impact négatif sur l'accessibilité aux produits, du fait de sa faible présence sur le marché. La plupart des classes des critères d'entrée de DEXi AF sont reprises de DEXi VERTiCAL, d'autres sont issues de discussions avec des agriculteurs et certaines résultent de décisions de COPIL. Trois exemples sont présentés ci-après (Tableau 4).

♣ Lien avec les agriculteurs voisins

Il est apparu, lors d'entretiens, que certains agriculteurs étouffaient leurs projets dans l'œuf dès lors qu'ils étaient moqués ou marginalisés par leurs collègues. Sur le long terme, le sentiment d'isolement qui en résulte pourrait engendrer un désamour voire un abandon des arbres. Au contraire, les agriculteurs soutenus par leurs pairs se sentent encouragés et inscrivent leur projet dans la durée. L'indifférence, la neutralité correspondent à une perception neutre du projet (Tableau 4).

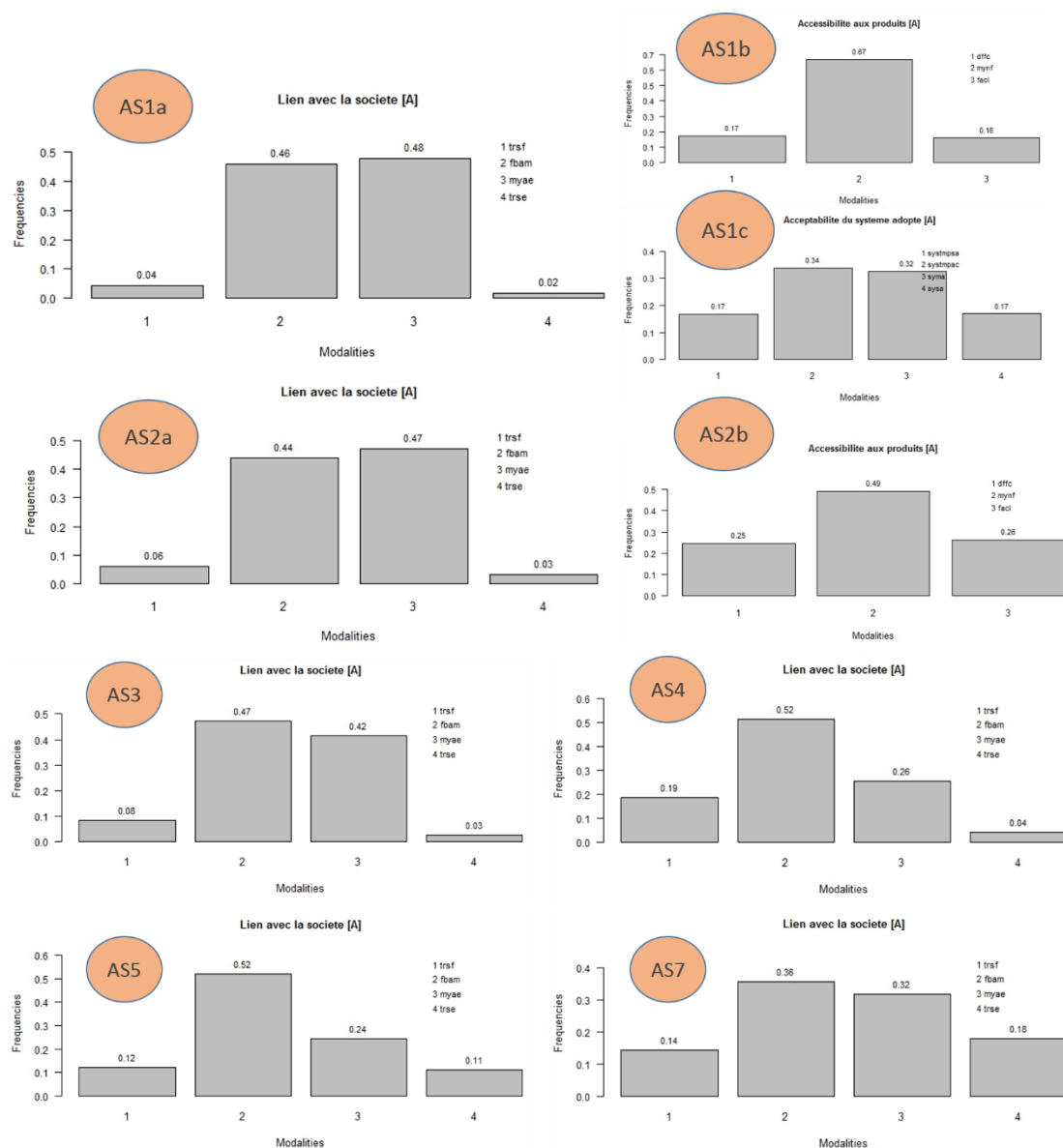


Figure 15 : Profil de performance du critère « Lien avec la société » avant toute modification (AS1) puis au fil des AS : amélioration par remaniement de la fonction d'utilité de « Accessibilité aux produits » (AS2) puis de sa propre fonction d'utilité (AS3, 4, 5, 7)

Tableau 5 : Nombre d'occurrences des classes du critère agrégé « Lien avec la société » au fil des analyses de sensibilité

Classes \ AS	AS1 & AS2	AS3	AS4	AS5 & AS6	AS7
très faible	6	8	15	11	12
faible à moyen	30	32	32	32	24
moyen à élevé	33	29	21	20	23
très élevé	3	3	4	9	13

♣ Pression en produits phytosanitaires

L'IFT n'étant pas disponible en *ex ante*, nous avons choisi de définir quatre classes correspondant à quatre niveaux d'objectifs d'IFT. Ces quatre niveaux sont repris du classement utilisé par le réseau de ferme DEPHY (ECOPHYTO Réseau DEPHY - FERME, 2014) (Tableau 4 et Figure 14).

♣ Contribution à l'emploi

Envisagé parfois sur de faibles surfaces, l'agroforesterie en grandes cultures / bois d'œuvre est rarement source directe d'emploi. Elle peut par contre favoriser le maintien d'un emploi. En verger / maraichage, la création d'emploi est plus probable. Les classes ont donc été définies comme suit « Pas d'emploi supplémentaire créé – emploi(s) maintenu(s) ou créé(s) du fait de l'AF » (Tableau 4).

c. **Choix des pondérations de DEXi AF**

Dans DEXi VERTiCAL, le parti pris était de ne pas définir de jeux de pondérations et de laisser ce soin à l'utilisateur. Ainsi par défaut, toutes les pondérations étaient équivalentes. Pour DEXi AF nous avons choisi de définir un jeu de pondérations sur la base de dires d'expert et des pondérations préétablies pour des systèmes très spécialisés comme dans le modèle DEXi Fruits. Ces pondérations sont celles faisant consensus pour les deux types d'agroforesterie étudiés : grandes cultures / bois d'œuvre et verger / maraichage. Néanmoins nous avons identifié des critères pour lesquels des pondérations spécifiques seraient plus judicieuses, notamment dans la branche économique en ce qui concerne le coût des intrants.

3. **Résultats de l'évaluation du modèle**

a. **Analyse de sensibilité : test de Monte Carlo sous R**

L'analyse de sensibilité a permis d'identifier les erreurs éventuelles et les déséquilibres entre les classes de critères. Lorsque nécessaire, les fonctions d'utilité (FU) étaient rééquilibrées et si cela ne suffisait pas, la suppression de classe(s) était envisagée et testée (Figure 10).

C'est le cas du critère « *Lien avec la société* » pour lequel la FU a été rééquilibrée plusieurs fois. A la première analyse de sensibilité (AS1), il est apparu que ce critère était déséquilibré – c'est-à-dire que les classes extrêmes étaient peu représentées au détriment des classes moyennes – or parmi les 4 critères qui le renseignent, seul « Accessibilité aux produits » nécessite un rééquilibrage de sa FU (Figure 15, AS1b). Après cela, « *Lien avec la société* » étant toujours déséquilibré (Figure 15, AS2a), il s'agit alors de modifier sa FU jusqu'à obtenir une répartition optimale des fréquences d'apparition de ses classes (Tableau 5), soit finalement après l'AS7 (Figure 15, AS3, 4, 5 et 7).

Passons à l'exemple « *Biodiversité* » pour lequel une classe a été supprimée. Ce critère était composé de 6 classes (Médiocre, Très mauvaise, Mauvaise, Bonne, Très Bonne, Excellente) avant l'AS1, qui a révélé que les classes « Médiocre » et « Excellente » n'étaient pas représentées, à l'avantage de la classe « Mauvaise » (65%) (Figure 16, AS1). Les trois critères renseignant « *Biodiversité* », à savoir « *Flore* », « *Faune* » et « *Microorganismes* » ont subi des rééquilibrages de leurs FU, aboutissant à une nouvelle répartition des classes de « *Biodiversité* ». Les classes « Très mauvaise, Mauvaise et Bonne » étaient alors mieux représentées (respectivement 0,29 – 0,46 – 0,21), mais toujours au détriment des classes plus extrêmes (Figure 16, AS5). Après un remaniement sans conséquence de la FU (Figure 16, AS6), une classe est supprimée et les autres sont renommées pour faire apparaître une classe moyenne : Très mauvaise, Mauvaise, Moyenne, Bonne, Très Bonne (Figure 16, AS7). Une ultime modification de la FU permet de rééquilibrer définitivement ce critère (Figure 16, AS8).

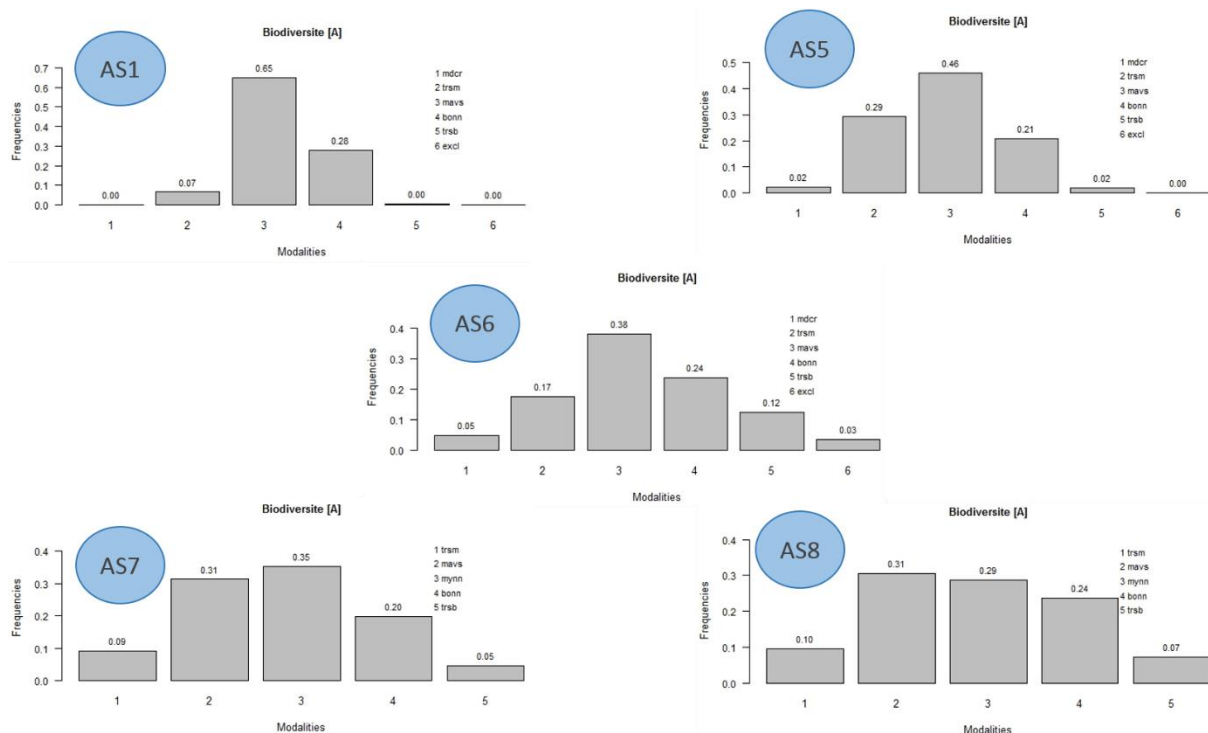


Figure 16 : Profil de performance du critère « Biodiversité » avant toute modification (AS1), puis après le remaniement des fonctions d'utilité de « Flore », « Faune » et « Microorganismes » (AS5), puis de sa propre FU (AS6) et enfin après suppression d'une classe et remaniement de sa FU (AS7 et 8)

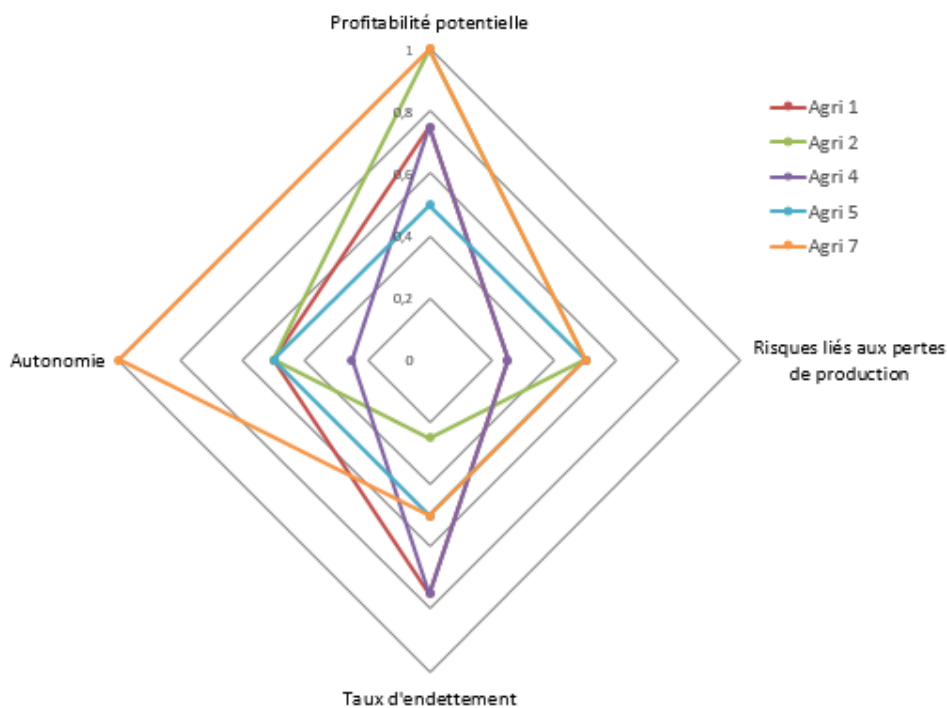


Figure 17 : Résultats du niveau 2 de la branche économique obtenus par les systèmes agroforestiers des agriculteurs enquêtés. Résultats ramenés sur une échelle de 0 à 1

Pour poursuivre l'évaluation du modèle DEXi AF, nous avons utilisé les données de systèmes agroforestiers existants, notamment celles de la plateforme expérimentale SCAOPEST d'UniLasalle et des parcelles d'agroforestiers. Ces systèmes ont été évalués par branche (sociale, économique, environnementale) sans agrégation finale et donc sans obtention d'une note de durabilité globale. Les résultats de ces systèmes seront donc présentés pour les branches testées et indépendamment les unes des autres.

b. Durabilité de la plateforme d'expérimentation agroforestière SCAOPEST

Faisant écho aux résultats issus de l'évaluation *ex post* par MASC 2.0 (Lançon, 2014), la durabilité économique de SCAOPEST est évaluée comme très mauvaise (Annexe X). Ce mauvais résultat s'explique par une rentabilité réelle « très mauvaise » et une viabilité estimée « très faible ». Le premier point se comprend par des coûts de production élevés qui sont peu compensés par la rémunération issue des rendements, souvent inférieurs aux rendements objectifs. Le second point s'explique par une forte dépendance de la structure qui décide, valide les investissements et fournit les ressources financières. À cela, peut s'ajouter une autonomie très faible due à une « très forte dépendance économique » et une « très mauvaise efficacité économique », reflète d'une faible valorisation des productions et une dépendance aux marchés et aux intrants importante.

La durabilité sociale est, quant à elle, élevée (Annexe IX). Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce bon résultat : l'absence de produits phytosanitaires garantit une santé « préservée » et l'acceptabilité sociétale est très élevée, du fait d'un lien avec la société très élevé. En outre la charge de travail, bien qu'importante au moment de la taille, peut être répartie entre les employés.

La durabilité environnementale de la plateforme est évaluée comme élevée car l'utilisation des ressources est faible, la biodiversité du système est moyenne et la qualité du milieu est très élevée (Annexe XI). Tout d'abord, c'est la note accordée à la flore (mauvaise) qui vient minorer la note de la biodiversité. En effet, la diversité floristique est estimée faible du fait d'une occupation du sol non permanente, de pratiques de fertilisation organique et de gestion de l'enherbement intenses. Ensuite, la plateforme étant gérée avec « zéro pesticide », elle n'utilise aucun intrant minéral ni aucun produit phytosanitaire et ne mobilise que l'eau présente dans les sols. Seule l'extensivité du système vient compromettre une utilisation optimale du sol. Enfin la non-utilisation de pesticides favorise la qualité à la fois de l'air, de l'eau et du sol, d'où la bonne évaluation de la qualité du milieu.

Globalement selon DEXi AF, SCAOPEST est très performant sur les plans environnemental et social, ce qui s'explique par le fonctionnement de la plateforme et l'exclusion de pesticides sur le système agroforestier. Seul l'aspect économique reste à améliorer, notamment la valorisation économique des productions et la diminution des coûts de production qui peut passer par le recyclage des fumiers de bovins produits sur l'atelier « vache laitière » de la ferme.

c. Durabilité des SAF d'agriculteurs mobilisés

Sur les six agriculteurs enquêtés sur la branche sociale, deux sont notés comme ayant une durabilité sociale « élevée » et trois « très élevée ». Le 6^{ème} agriculteur est évalué « faible ». Ceci s'explique par une charge de travail très importante, endossée seul et une accessibilité aux produits difficile pour le consommateur du fait de la certification biologique de la parcelle.

Pour la branche économique, la parcelle certifiée AB a une durabilité « très élevée », du fait de sa grande indépendance et de la forte valorisation des productions face à un coût de production réduit. Les quatre autres SAF évalués sont notés, pour l'un « moyen », pour les autres « mauvais » (Figure 17).

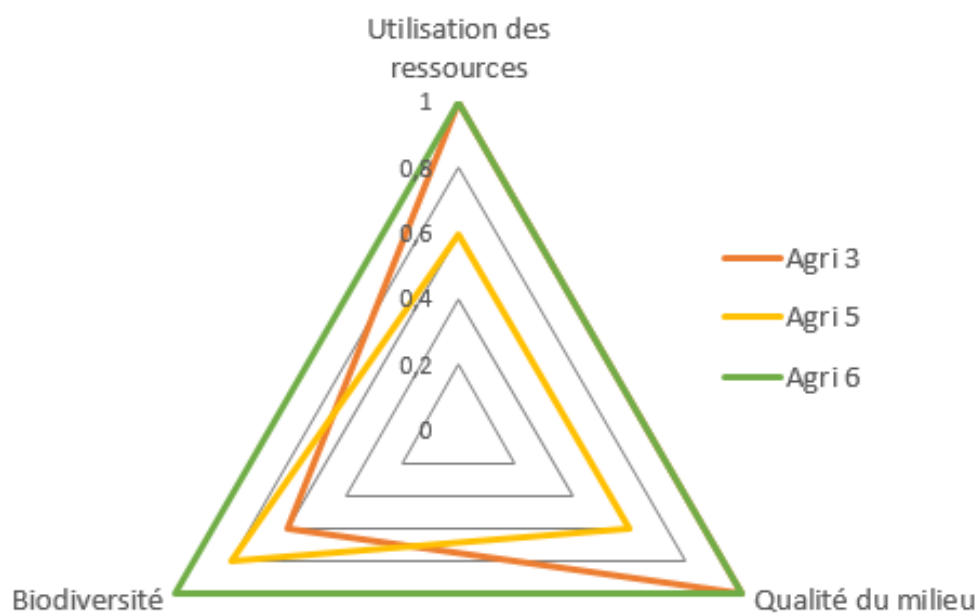


Figure 18 : Résultats du niveau 1 de la branche environnementale obtenus par les systèmes agroforestiers des agriculteurs enquêtés. Résultats ramenés sur une échelle de 0 à 1

Concernant la branche environnementale (Figure 18), les trois agriculteurs rencontrés travaillent avec une démarche de réduction totale ou partielle des produits phytosanitaires et en semis direct (parfois sous couvert végétal). Comme pour la plateforme SCAOPEST, cela se traduit par une bonne évaluation de la durabilité environnementale, « très élevée » pour deux d'entre eux et « moyenne » pour le troisième. Selon DEXi AF, ils limitent leurs utilisations des ressources et leurs impacts sur le milieu (air, eau et sol) tout en favorisant la biodiversité (Figure 18).

Partie D : Discussion

1. Les forces du modèle DEXi AF

Nous avons identifié plusieurs points positifs de DEXi AF. Premièrement, l'outil a l'avantage d'être relativement exhaustif et similaire aux DEXi PM (Annexe III) dans sa structure haute. De plus c'est un outil qui se veut générique à tous les systèmes agrosylvicoles. Deuxièmement et par rapport à DEXi VERTiCAL, les redondances entre critères sont évitées, les classes de chaque critère (y compris les critères agrégés) sont définies et explicitées. Troisièmement, une évaluation du modèle a été effectuée, permettant d'augmenter le degré de confiance accordé à l'outil dans sa capacité à discriminer des systèmes agroforestiers.

Concernant son utilisation, il est ressorti, lors des entretiens, que les agriculteurs étaient plutôt favorables à son utilisation et que la présence d'un conseiller à leurs côtés était jugée nécessaire pour mieux appréhender les critères et débriefer des résultats. Le nombre de critères d'entrée ($n = 92$) ne les effraie pas et est même, selon eux, gage de qualité car signe d'exhaustivité. Un autre atout concerne le document technique explicitant les critères, leurs définitions et les classes de chacun pour aider au remplissage du modèle sous DEXi.

Enfin la force principale de l'outil réside dans la transparence totale qui l'accompagne, aussi bien dans le choix des critères, leur organisation hiérarchique (visible sous DEXi), les classes et les pondérations attribuées à chaque critère. Chaque décision est retracée dans des documents de traçabilité, explicitant la date et les sources. Dans l'idée d'une poursuite de ce travail, ces documents seront précieux et permettront de se réapproprier rapidement le travail déjà effectué.

2. Les faiblesses du modèle

Comme pour tout modèle, des faiblesses peuvent être soulevées. Elles concernent la construction du modèle, le support utilisé (DEXi) et la valorisation de ses sorties.

Par manque de temps lors des COPIL, certaines branches ont été moins travaillées. C'est le cas des branches « *Qualité de l'air* », « *Utilisation des ressources* » et « *Qualité de l'eau* » que nous avons travaillées avec des experts isolés, *a contrario* des branches économique et sociale (Tableau 1).

Nous pouvons également citer les biais engendrés par la démarche de conception choisie, celle de travailler avec un groupe restreint d'experts aux compétences complémentaires représentant les deux grands types de SAF étudiés. Le modèle et ses composantes sont issus d'un travail commun, reflet de l'opinion et de l'état actuel des connaissances au sein de ce groupe d'experts. Même si ce travail et les connaissances mobilisées sont relativement complets, ils ne peuvent être représentatifs de la totalité des connaissances actuelles en agroforesterie.

L'aspect temporel des SAF n'a pas pu être pris en compte, car difficile à exprimer dans un modèle basé sous DEXi. Actuellement, DEXi AF s'utilise pour un système défini à une phase de maturité (12-20 ans en GC/BO). La solution envisagée est d'utiliser le modèle plusieurs fois pour simuler la durabilité du système à plusieurs dates et donc âges de maturité. Il serait envisageable de définir des jeux de pondérations voire des classes différentes dans ce but.

Un problème propre aux modèles basés sur le système DEXi est les transitions abruptes entre classes, causées par l'utilisation de variables discrètes (Craheix et al., 2015). La conséquence majeure est le classement différent de deux systèmes proches. Certains critères de DEXi AF ne présentant que deux classes comme « *Moyens mis en œuvre contre les bioagresseurs* » ou « *Effet de compétition entre les arbres et les cultures de l'interligne* » peuvent être la raison d'une hiérarchisation différente entre systèmes proches.

Concernant la valorisation des sorties du modèle, nous pouvons relever le fait que l'outil semble mieux valoriser les systèmes en agriculture biologique sur le plan économique que des systèmes en agriculture raisonnée, ce qui pourrait véhiculer un message faux : celui d'une agroforesterie économiquement viable seulement si le système est en AB. À dire de conseiller, ce modèle serait peu discriminant car encore centré sur les cultures. Il serait alors difficile de l'utiliser pour améliorer ce qui a trait aux arbres.

3. Pistes d'amélioration

Le modèle peut être amélioré de plusieurs manières. Sur la forme, le nom de certains critères est peu représentatif du sens que nous lui donnons et pourrait être modifié, comme pour le critère agrégé « *Taux d'endettement* ». Sur le fond, la matrice arbre pourrait être plus explicitée et prise en compte dans un plus grand nombre de critères. Des propositions pour la détermination des classes de critères peuvent être étudiées, comme celle d'utiliser la notion de Beaufort 3 pour définir « *Conditions pédoclimatiques vent* » et « *Conditions d'application* », de même pour la création d'outils annexes calculant la valeur de la production et le temps de travail qui sont des notions importantes pour les agriculteurs en phase d'élaboration de projet agroforestier.

Par ailleurs, une analyse de sensibilité a été menée pour augmenter la stabilité du modèle et sa capacité discriminante. Cependant, le script R utilisé (Jacques-Éric Bergez) ne permet pas encore de prendre en compte la répétition de critères à plusieurs endroits dans l'arbre de décision, ce qui peut affecter les résultats de cette analyse de sensibilité. De plus il est à noter qu'aucune règle de décision (Annexe 1) n'a été validée par expertise, alors que cela augmenterait considérablement la valeur de l'outil.

En outre nous avons été régulièrement interrogés sur la possibilité de définir ses propres pondérations. Il pourrait être envisageable comme pour MASC 2.0 (Craheix et al., 2012) de proposer à l'utilisateur deux jeux de pondérations : l'un standard, l'autre composé de pondérations minimales en deçà desquelles il ne faut pas descendre sous peine de dénaturer l'outil et les résultats qu'il propose.

Enfin l'objectif serait à terme d'inclure les systèmes pastoraux dans ce modèle afin d'être le plus exhaustif possible par rapport aux multiples possibilités offertes aux agriculteurs.

En définitive toutes ces améliorations s'entendent par la mobilisation régulière de groupes d'expert. Cette expertise est au centre de la validation des connaissances présentes dans le modèle et de la poursuite du développement de l'outil. Ce développement de l'outil pourrait d'ailleurs intégrer, en amont, une aide au design du projet agroforestier en se basant sur la branche agronomique de DEXi VERTiCAL retravaillée en début de mission, ce qui permettrait d'accompagner les agriculteurs dans leur étude de faisabilité de projet.

Conclusion et perspectives

Ce stage associé à celui de Claire Vaskou, a permis de proposer une amélioration de DEXi VERTiCAL (Annexe II) qui soit plus proche de la structure commune des DEXiPM (Annexe III) et générique aux SAF agrosylvicoles : le modèle DEXi AF (Annexes IV à VIII). Ce modèle composé de 182 critères dont 90 critères agrégés et 92 critères d'entrée, est issu d'une expertise consensuelle et d'une analyse de sensibilité. Il prend également en compte l'avis d'agriculteurs et de leur conseiller à propos des performances d'un système agroforestier et des résultats obtenus sur leurs propres systèmes.

Au cours de la construction du modèle, chaque critère a suscité une volonté de développement maximal or cela engendre une complexité importante qui, à terme, réduit la sensibilité des critères les plus agrégés. Il a donc fallu simplifier l'arbre de décision au maximum. De même il est nécessaire de limiter le nombre de classes affectées à un critère car, plus elles sont nombreuses et plus il y aura de règles de décision. Quelques critères sont, en cela, définis par des classes qualitatives entre lesquelles la transition est abrupte. Des systèmes proches mais divergents sur ces critères pourraient alors être évalués différemment, d'où la nécessité de comprendre comment réagi le modèle selon les situations.

Comme pour tout modèle, il est important de ne pas perdre de vue l'aspect fictif de DEXi AF qui ne fait que mimer la réalité. Un modèle n'exprime pas la vérité absolue et il est primordial de l'utiliser comme un moyen d'amener à la réflexion et à la discussion (Craheix et al., 2015). DEXi AF n'a en rien vocation à supplanter le conseil technique, il est au contraire le complément de ce conseil, support visuel et prétexte à discussions sur des aspects précis du projet.

Le développement de ce type d'outil s'inscrit souvent dans la durée et DEXi AF sera certainement retravaillé et amélioré, en vue d'enrichir l'outil grâce aux points mentionnés ci-avant. En ce sens, la mobilisation d'une grande expertise sera nécessaire pour vérifier, valider et parfaire l'outil. Il est évident que le test de systèmes agroforestiers matures divers et variés sera un point clé dans la validation de l'outil. De manière générale, la poursuite du développement des logiciels d'interface et de visualisation des résultats spécifiques aux modèles basés sous DEXi sera une avancée majeure dans l'appropriation et l'utilisation de ces outils par les utilisateurs finaux.

Il est apparu que, plus encore que l'outil lui-même, l'intérêt d'une telle démarche réside dans la confrontation et la convergence de connaissances diverses. Il a pour moi été très enrichissant, tant sur la mobilisation de connaissances diverses, l'appropriation des outils DEXi et IZI EVAL, que sur la gestion de projet et le travail à distance en binôme. La construction de DEXi AF n'est qu'un début pour le groupe d'experts pour lequel ce travail préliminaire servira de base à un projet de plus grande envergure dont l'objectif premier est le déploiement d'outils aidant les agriculteurs à réfléchir et mettre en œuvre des projets agroforestiers performants.

Construit dans le but d'accompagner des porteurs de projet dans la réflexion et l'élaboration de projets agroforestiers, le modèle DEXi AF pourrait être déployé *via* des partenaires ou lors d'événements promotionnels. Ainsi, DEXi AF serait confronté à la réalité du terrain et au panel d'usages possibles. Cela permettrait de le tester et l'évaluer à plus grande échelle et de l'améliorer en conséquence.

Bibliographie

- ALAPHILIPPE A., ANGEVIN F., BUURMA J., CAFFI T., CAPOWIEZ Y., FORTINO G., HEIJNE B., HELSEN H., HOLB I., MAYUS M., ROSSI V., SIMON S. et STRASSEMAYER J., 2013. Application of DEXiPM as a tool to co-design pome fruit systems towards sustainability. In : *Proceedings of the 8th International Conference on Integrated Fruit Production* [en ligne]. S.l. : s.n. 2013. p. 531–535. [Consulté le 23/08/2017]. Disponible sur : <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/441744>.
- ANGEVIN F., FORTINO G., BOCKSTALLER C., PELZER E. et MESSÉAN A., 2016. Assessing the sustainability of crop production systems: Toward a common framework? In : *Crop Protection* [en ligne]. 2016. [Consulté le 6/03/2017]. DOI 10.1016/j.cropro.2016.11.018. Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219416303404?via%3Dihub>
- BÉRAL C., GUILLET P. et BRUN V., 2014. *Guide technique - Aménagements arborés des parcours de volailles* [en ligne]. 2014. S.l. : s.n. [Consulté le 6/06/2017]. Disponible sur : <http://www.itavi.asso.fr/download/8917>.
- BERNARD H., 2014a. *Construction d'un outil d'évaluation multicritère de durabilité en ex ante adapté aux systèmes agroforestiers associant arbres fruitiers et cultures assolées conduits en AB*. S.l.
- BERNARD H., 2014b. *Guide d'aide au remplissage des données dans l'outil : Explication des critères, choix des modes d'évaluation, classes qualitatives des indicateurs*. 2014. S.l. : s.n.
- BIGO M-A., 2013. *Évaluation et améliorations de DEXiPM-Pomme, un modèle d'évaluation multicritère de la durabilité de systèmes de culture de pommes à couteau*. S.l.
- BOHANEK M., 2011. *DEXi : Program for Multi-Attribute Decision Making. User's Manuel. Version 3.03* [en ligne]. 2011. S.l. : s.n. [Consulté le 23/08/2017]. Disponible sur : <http://kt.ijs.si/MarkoBohanec/pub/DEXiManual303.pdf>.
- BRUNDTLAND Gro Harlem, 1987. Rapport Brundtland. [en ligne]. 1987. [Consulté le 23/03/2017]. Disponible sur : <http://www.stephanedefis.com/arch/brundtland.pdf>.
- CARPANI M., BERGEZ, J-E. et MONOD H., 2012. Sensitivity analysis of a hierarchical qualitative model for sustainability assessment of cropping systems. In : *Environmental Modelling & Software*. [en ligne] 2012. Vol. 27-28, p. 15-22. DOI 10.1016/j.envsoft.2011.10.002.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA DRÔME, 2016. *ECOPHYTO DEPHY EXPE VERTiCAL : Vergers et cultures associées en systèmes agroforestiers* [en ligne]. 2016. S.l. : s.n. [Consulté le 2/03/2017]. Disponible sur : http://ecophytopic.fr/sites/default/files/actualites_doc/Fiche_Projet_2-33.pdf.
- COLOMB B., AVELINE A. et CAROF M., 2011. Une évaluation multicritère qualitative de la durabilité de systèmes de grandes cultures biologiques, Quels enseignements? In : [en ligne]. 2011. [Consulté le 27/02/2017]. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00729405/>.
- CRAHEIX D., ANGEVIN F., BERGEZ J-E., BOCKSTALLER C., COLOMB B., GUICHARD L., REAU R. et DORÉ T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. In : . 2012. Vol. 20, p. 35-48.
- CRAHEIX D., BERGEZ J-E., ANGEVIN F., BOCKSTALLER C., BOHANEK M., COLOMB B., DORÉ T., FORTINO G., GUICHARD L., PELZER E., MÉSSEAN A., REAU R. et SADOK W., 2015. Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system. In : *Agronomy for Sustainable Development*. 2015. Vol. 35, n° 4, p. 1431-1447. DOI 10.1007/s13593-015-0315-0.
- DELMOTTE S., RIPOCHE A. et GARY C., 2008. A multiple criteria tool for on farm ex ante evaluation of the sustainability of innovative cropping systems with low pesticide use in viticulture. In : [en ligne]. 2008. [Consulté le 11/08/2017]. Disponible sur : https://www.researchgate.net/profile/Sylvestre_Delmotte/publication/242455650_O52_-_A_multiple_criteria_tool_for_on_farm_ex_ante_evaluation_of_the_sustainability_of_innovative_cropping_systems_with_low_pesticide_use_in_viticulture/links/56cccad908ae85c8233bc1fb.pdf.

DORE T., 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Éditions Quae. ISSN : 1777-4624. ISBN : 978-2-7592-0000-9.

DUPRAZ C., BURGESS P. J., GAVALAND A., GRAVES A., HERZOG F., INCOLL L., JACKSON N., KEESMAN K., LAWSON G., LECOMTE I., LIAGRE F., MANTZANAS K., MAYUS M., MORENO G., PALMA J., PAPANASTASIS V., PARIS P., PILBEAM D., REISNER Y., VINCENT G. et WERF VAN DER W., 2005. *Synthesis of the Silvoarable Agroforestry For Europe project* [en ligne]. 2005. S.I. : INRA-UMR System Éditions. [Consulté le 9/08/2017]. Disponible sur : http://www.agrooof.net/agrooof_dev/documents/safe/SAFE_Final_Synthesis_Report.pdf.

DUPRAZ C. et LIAGRE F., 2011. *Agroforesterie, des arbres et des cultures*. 2ème édition. S.I. : Éditions France Agricole. Agriproduction, ISSN 2117-9786. ISBN 978-2-85557-205-5.

ECOPHYTO RÉSEAU DEPHY - FERME, 2014. *Synthèse des premiers résultats à l'échelle nationale* [en ligne]. 2014. S.I. : s.n. [Consulté le 4/06/2017]. Disponible sur : http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/201411_Synthese_Resultats_DEPHY_cle438e79.pdf.

INRA, 2014. *L'agroforesterie à l'INRA. Des recherches ancrées dans l'Agroécologie, au cœur d'enjeux sociétaux*. [en ligne]. 2014. S.I. : s.n. [Consulté le 30/05/2017]. Disponible sur : <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/259872-7d33c-resource-plaquette-agroforesterie-inra.html>.

LAIREZ J., FESCHET P., AUBIN J., BOCKSTALLER C. et BOUVAREL I., 2015. *Agriculture et développement durable : Guide pour l'évaluation multicritère*. S.I. : Dijon/Versailles : Educagri Éditions/Éditions Quae. ISBN 978-2-7592-2439-5

LANCON J., WERY J., RAPIDEL B., ANGOKAYE M., GERARDEAUX E., GABOREL C., BALLO D., FADEGNON B., 2007. *An improved methodology for integrated crop management systems*. Agron. Sustain. Dev. Disponible sur : <https://doi.org/10.1051/agro:2006037>

LANÇON L., 2014. *Construction et évaluation de systèmes de culture sans pesticide, insérés au sein d'une matrice agroforestière, pour une meilleure gestion des bioagresseurs et une optimisation des performances globales* [en ligne]. S.I. [Consulté le 2/08/2017]. Disponible sur : https://sca0pest.files.wordpress.com/2015/01/mfe_lancon_asd2014.pdf.

LIAGRE F., 2005. *Quel statut pour les parcelles agroforestières en France ? Fiche de synthèse dans le cadre de la Loi d'Orientation Agricole* [en ligne]. 2005. S.I. : s.n. [Consulté le 9/08/2017]. Disponible sur : http://www.agrooof.net/agrooof_dev/documents/safe/statut_agroforesterie_APCA_mars05.pdf.

LIAGRE F., SANTI F. et VERT J., 2012. *Analyse : L'agroforesterie en France : intérêts et enjeux*. N°37 [en ligne]. 2012. S.I. : s.n. [Consulté le 29/05/2017]. Disponible sur : http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents//Analyse_37_CEP_Agroforesterie.pdf.

LIAGRE F., PISANELLI A., MORENO G., BELLIDO M., MAYUS M., POSTMA M., SCHINDLER B., GRAVES A., MANTZANAS K. et DUPRAZ C., 2005. Survey of farmers' reaction to modern silvoarable systems. In : URL http://www.agrooof.net/agrooof_dev/documents/safe/Deliverable23final.pdf. [en ligne]. 2005. Vol. 10. [Consulté le 8/08/2017]. Disponible sur : http://www.agrooof.net/agrooof_dev/documents/safe/Deliverable23final.pdf.

LICHTFOUSE E., NAVARRETE M., DEBAEKE P., SOUCHÈRE V., ALBEROLA C. et MÉNASSIEU J., 2009. Agronomy for sustainable agriculture. A review. In : *Agronomy for Sustainable Development*. 2009. Vol. 29, n° 1, p. 1-6. DOI 10.1051/agro:2008054.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT, 2015. *Synthèse du Plan de développement de l'agroforesterie* [en ligne]. 2015. S.I. : s.n. [Consulté le 30/03/2017]. Disponible sur : <http://www.reseaurural.fr/files/1512-ae-agroforesterie-synthese-bd.pdf>.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'AGROALIMENTAIRE ET DE LA FORÊT, 2016. *Plan de développement de l'agroforesterie. Pour le développement et la gestion durable de tous les systèmes*

agroforestiers. [en ligne]. 2016. S.l. : s.n. [Consulté le 29/05/2017]. Disponible sur : <http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/160517-ae-agrofesterie.pdf>.

PELZER E., FORTINO G., BOCKSTALLER C., ANGEVIN F., LAMINE C., MOONEN C., VASILEIADIS V., GUÉRIN D., GUICHARD L., REAU R. et MESSÉAN A., 2012. Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. In : *Ecological Indicators*. 2012. Vol. 18, p. 171-182. DOI 10.1016/j.ecolind.2011.11.019.

QURESHI M.E., HARRISON S.R. et WEGENER M.K., 1999. Validation of multicriteria analysis models. In : *Agricultural Systems*. 1999. Vol. 62, n° 2, p. 105–116.

ROY B., 1985. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. S.l. : s.n. ISBN 2-7178-0901-5.

SADOK W., ANGEVIN F., BERGEZ J-E, BOCKSTALLER C., COLOMB B., GUICHARD L., REAU R., MESSÉAN A. et DORÉ T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. In : *Agronomy for Sustainable Development*. 2009. Vol. 29, n° 3, p. 447-461. DOI 10.1051/agro/2009006.

SALLES P., 2007. *Conception d'un outil d'évaluation multicritère de la durabilité des successions en systèmes légumiers de plein champ : DEXi-Légumes*. S.l.

TORQUEBAU E., 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. In : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*. 2000. Vol. 323, n° 11, p. 1009–1017.

VÉLU A., ALAPHILIPPE A., ANGEVIN F., GUÉRIN A., GUILLERMIN P. et ZAVAGLI F., [sans date]. *Tutoriel d'utilisation et fiches critères DEXiFruits*. S.l. : s.n. Disponible sur : <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/DEXiFruits/1-%20Accueil>

VEREIJKEN P., 1997. *A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I.EAFS) in interaction with pilot farms*. In : *European Journal of Agronomy*. p. 235-250.

ZAHM F., UGAGLIA A., BOUREAU H., DEL'HOMME B., BARBIER J. M., GASSELIN P., GAFSI M., GUICHARD L., LOYCE C., MANNEVILLE V. et OTHERS, 2015. Agriculture et exploitation agricole durables : état de l'art et proposition de définitions revisitées à l'aune des valeurs, des propriétés et des frontières de la durabilité en agriculture. In : *Innovations Agronomiques*. 2015. Vol. 46, p. 105–125.

ZAHM F., UGAGLIA A. et DEL'HOMME, B., 2013. L'évaluation de la performance globale d'une exploitation agricole. Synthèse des cadres conceptuels, des outils de mesure et application avec la méthode IDEA. In : *8ème Congrès du RIODD* [en ligne]. S.l. : s.n. 2013. p. 32–p. [Consulté le 27 février 2017]. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00862865/>.

ZANAKIS S., SOLOMON A., WISHART N. et DUBLISH S., 1998. Multi-attribute decision making : a simulation comparison of select methods. In : *European journal of operational research*. 1998. Vol. 107, n° 3, p. 507–529.

Sitographie

CRAHEIX, D., [sans date]. Évaluation Multicritères - Construction d'un modèle décisionnel sur DEXi. In : [en ligne]. [Consulté le 27/02/2017]. Disponible sur : http://www.supagro.fr/ress-pepites/EvaluationMulticritere/co/3_1_4_2_2ConstructionModele.html.

PAPY F., 2013. Système de culture - Les Mots de l'agronomie. In : [en ligne]. [Consulté le 13/06/2017]. Disponible sur : http://mots-agronomie.inra.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Syst%C3%A8me_de_culture

RMT AGROFORESTERIES, [sans date]. Réseau Mixte Technologique en Agroforesterie. In : [en ligne]. [Consulté le 12/06/2017]. Disponible sur : <http://rmt.agroforesterie.fr/>.

SCA0PEST, [sans date]. SCA0PEST. [en ligne]. [Consulté le 2/03/2017]. Disponible sur : <https://sca0pest.wordpress.com/>.

Annexes

Annexe I : Fonctionnement du logiciel DEXi (Bigo, 2013) et (Craheix, [sans date])

Le logiciel DEXi permet d'organiser hiérarchiquement les déterminants d'un problème. Ce problème est appelé racine de l'arbre et les déterminants sont des critères. Il existe deux types de critères :

- Les critères d'entrée sont renseignés par l'utilisateur
- Les critères agrégés sont obtenus par l'agrégation d'autres critères

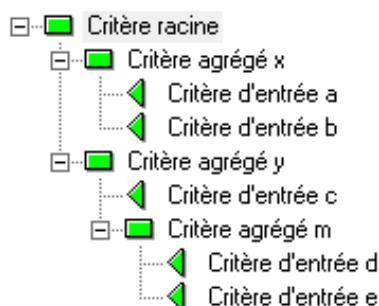


Figure a : Exemple de hiérarchisation sous DEXi d'un problème complexe

Chaque critère est doté de classes, qui peuvent être quantitatives ou qualitatives, généralement de type « faible – moyen – fort ». Les valeurs de classes des critères agrégés sont obtenues grâce à des fonctions d'utilité présentées dans des tables d'agrégation. Une fonction d'utilité est composée de règles de décision du type « Si..., alors... ».

Plusieurs options sont possibles pour remplir les tables d'agrégation :

- ❖ Remplissage manuel : les concepteurs renseignent chaque règle de décision une par une. Le logiciel calcule par la suite, les poids de chaque critère.
- ❖ Remplissage automatique : les concepteurs renseignent le poids de chaque critère à agréger et définissent les deux règles de décision extrêmes. Le logiciel se charge alors de proposer des règles de décision en accord avec les poids fournis.
- ❖ Remplissage semi-automatique : le principe est identique au remplissage automatique, à la simple différence que les concepteurs ont renseigné au moins trois règles de décision.

Pour une même pondération, il existe plusieurs combinaisons de règles de décision et ainsi plusieurs manières de discriminer des systèmes de culture, d'où l'importance de vérifier manuellement les tables d'agrégation.

	Critère d'entrée a	Critère d'entrée b	Critère agrégé x
1	faible	très faible	très faible
2	faible	faible	faible
3	faible	moyen	faible
4	faible	élevé	moyen
5	moyen	très faible	très faible
6	moyen	faible	faible
7	moyen	moyen	moyen
8	moyen	élevé	élevé
9	élevé	très faible	faible
10	élevé	faible	moyen
11	élevé	moyen	moyen
12	élevé	élevé	élevé

Rules: 2/12 (16,67%), determined: 100,00% [très faible:2,faible:4,moyen:4,élevé:2]

Figure b : Table d'agrégation du critère agrégé x, renseigné par les critères d'entrée a et b. La troisième colonne est obtenue par combinaison des deux premières.

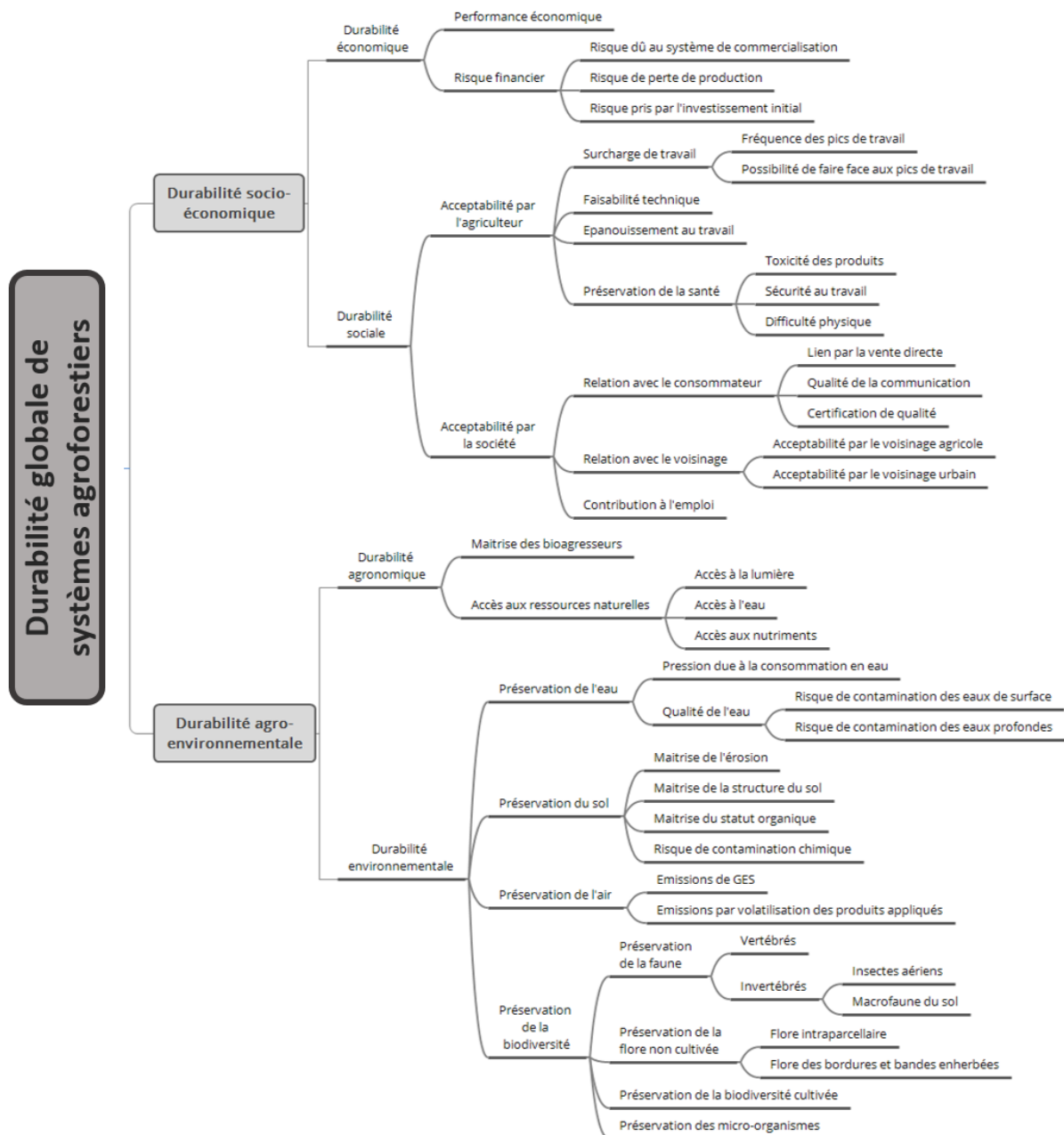
Attribute	0	50	100	Required	Current
Critère d'entrée a				40	41
Critère d'entrée b				60	59

Rounding: ☐ down ☒ no ☐ up

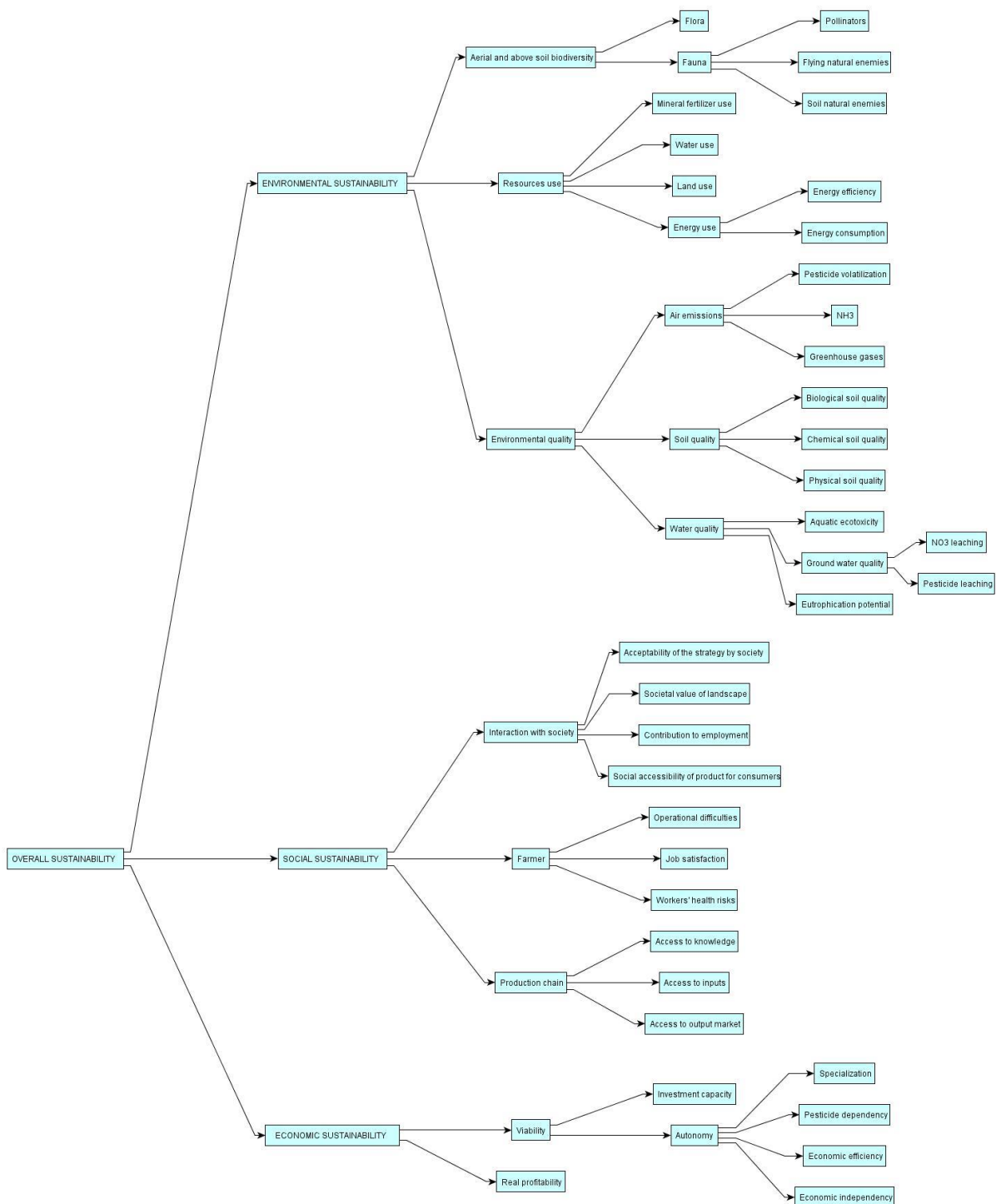
Normalization:

Figure c : Pondérations attribuées aux critères d'entrée a et b qui renseignent le critère agrégé x

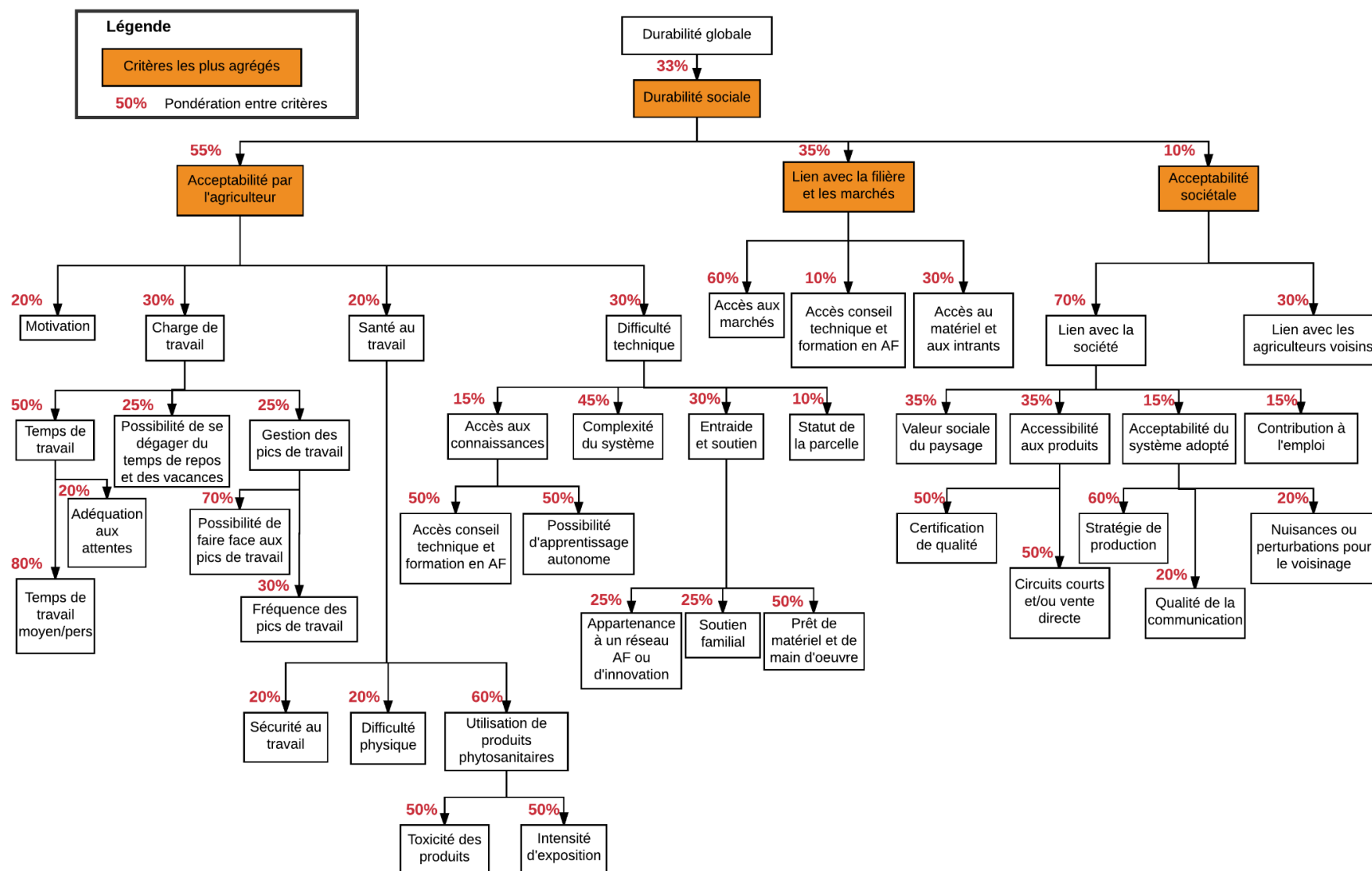
Annexe II : Outil DEXi VERTiCAL (sans arbres satellites) (H. Bernard, 2014)



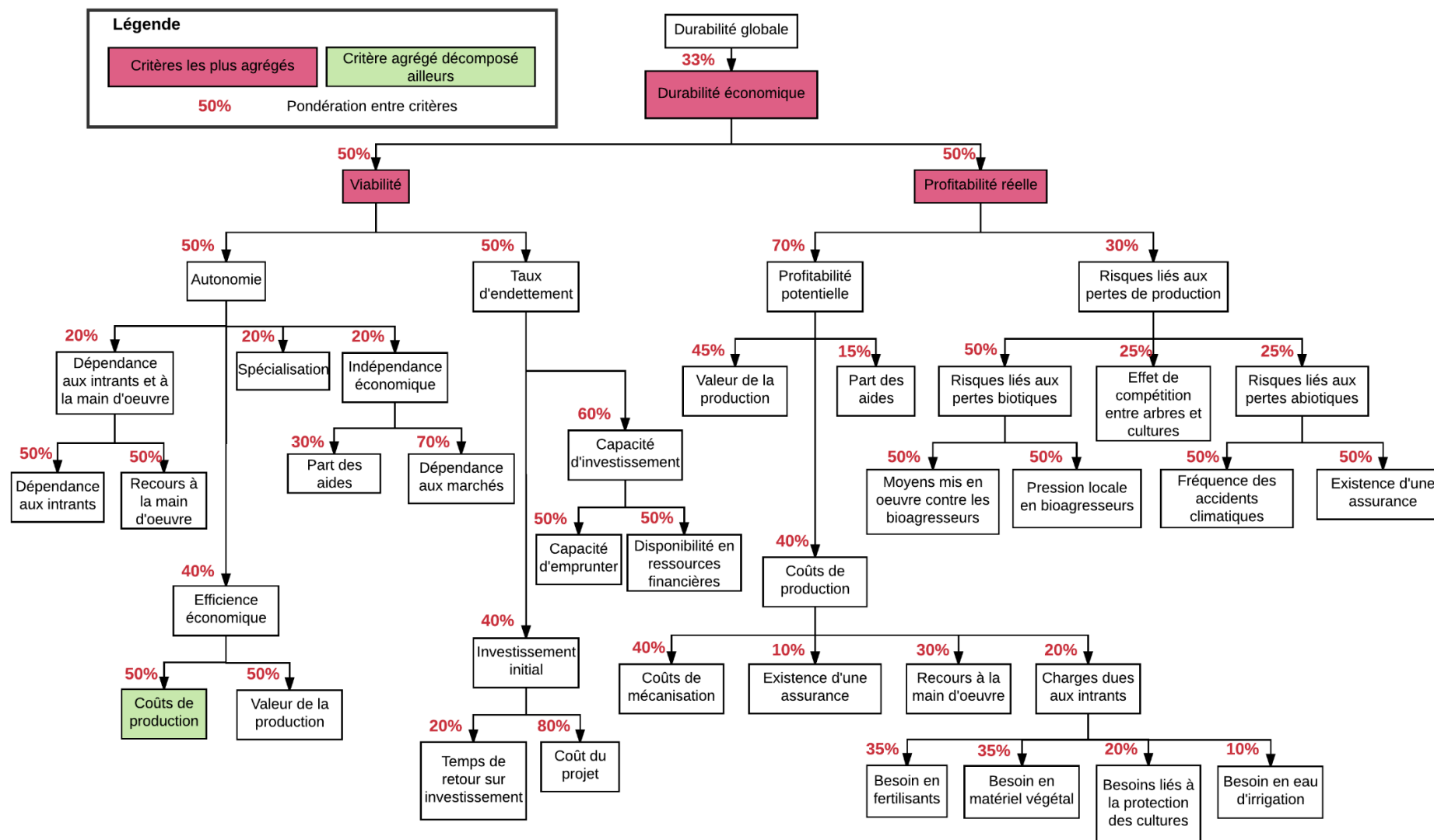
Annexe III : Partie haute de la structure hiérarchique commune aux DEXiPM (Angevin et al., 2016)



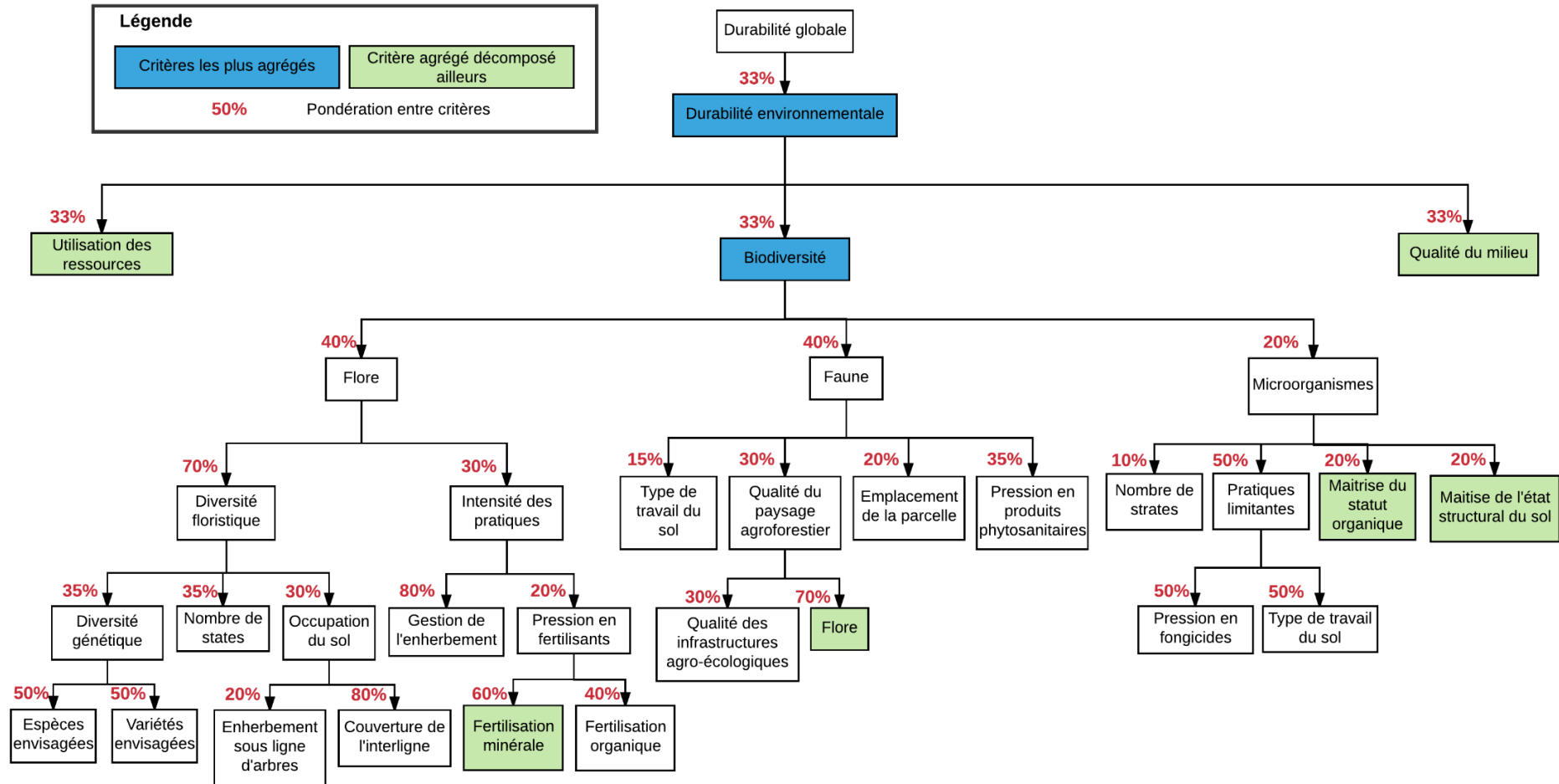
Annexe IV : Structure finale de DEXi AF : Branche sociale



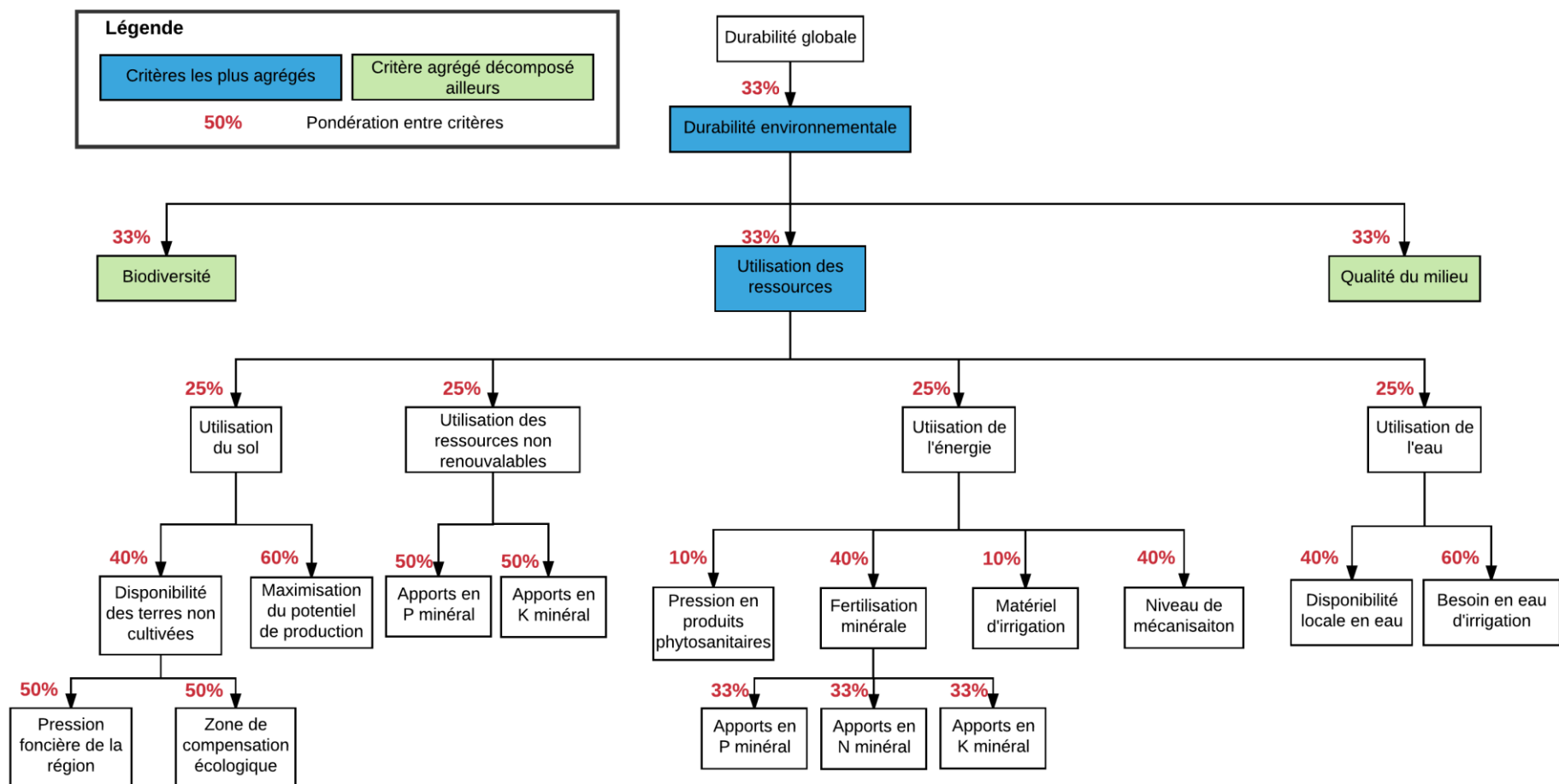
Annexe V : Structure finale de DEXi AF : Branche économique



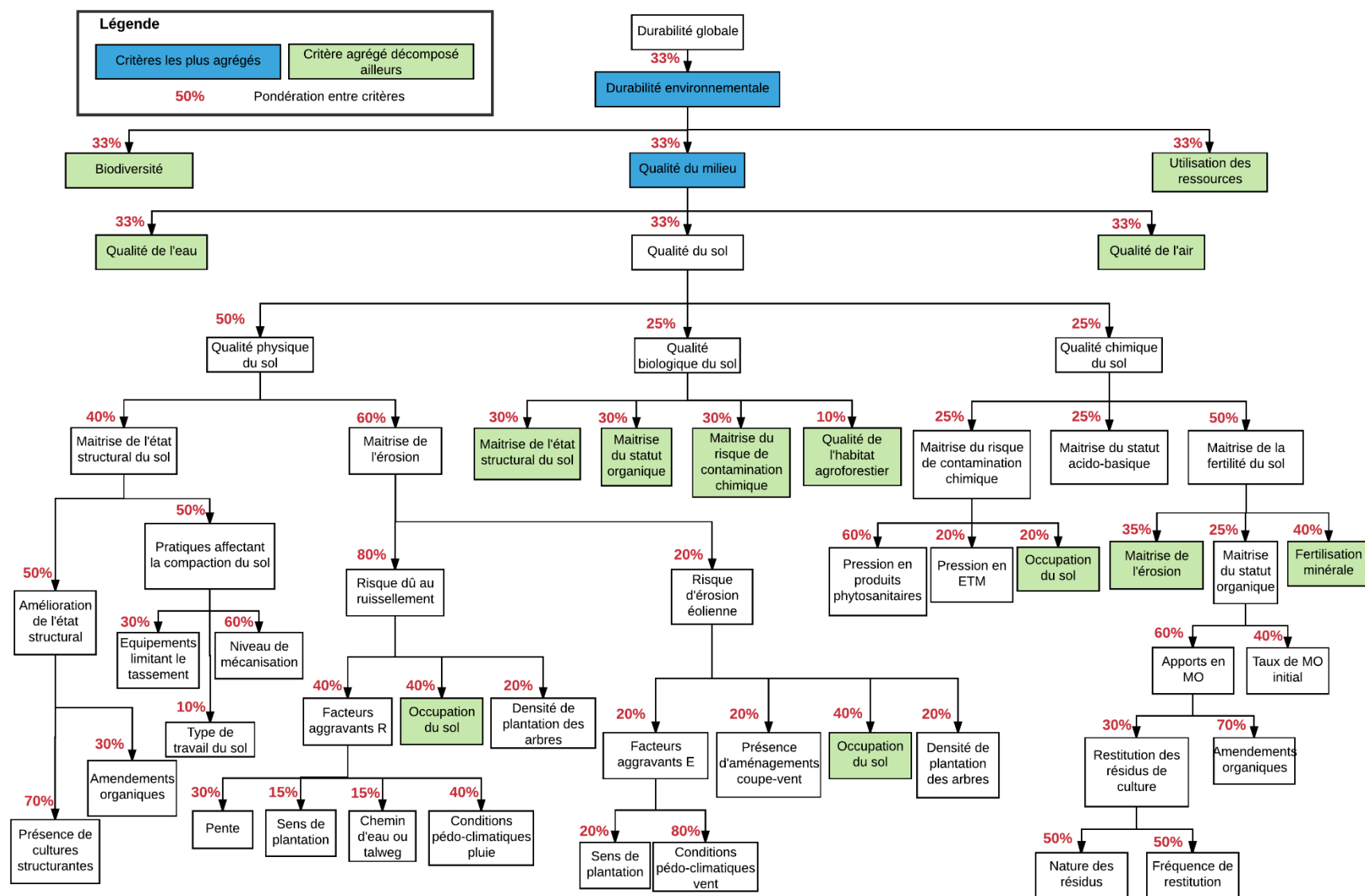
Annexe VI : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Biodiversité



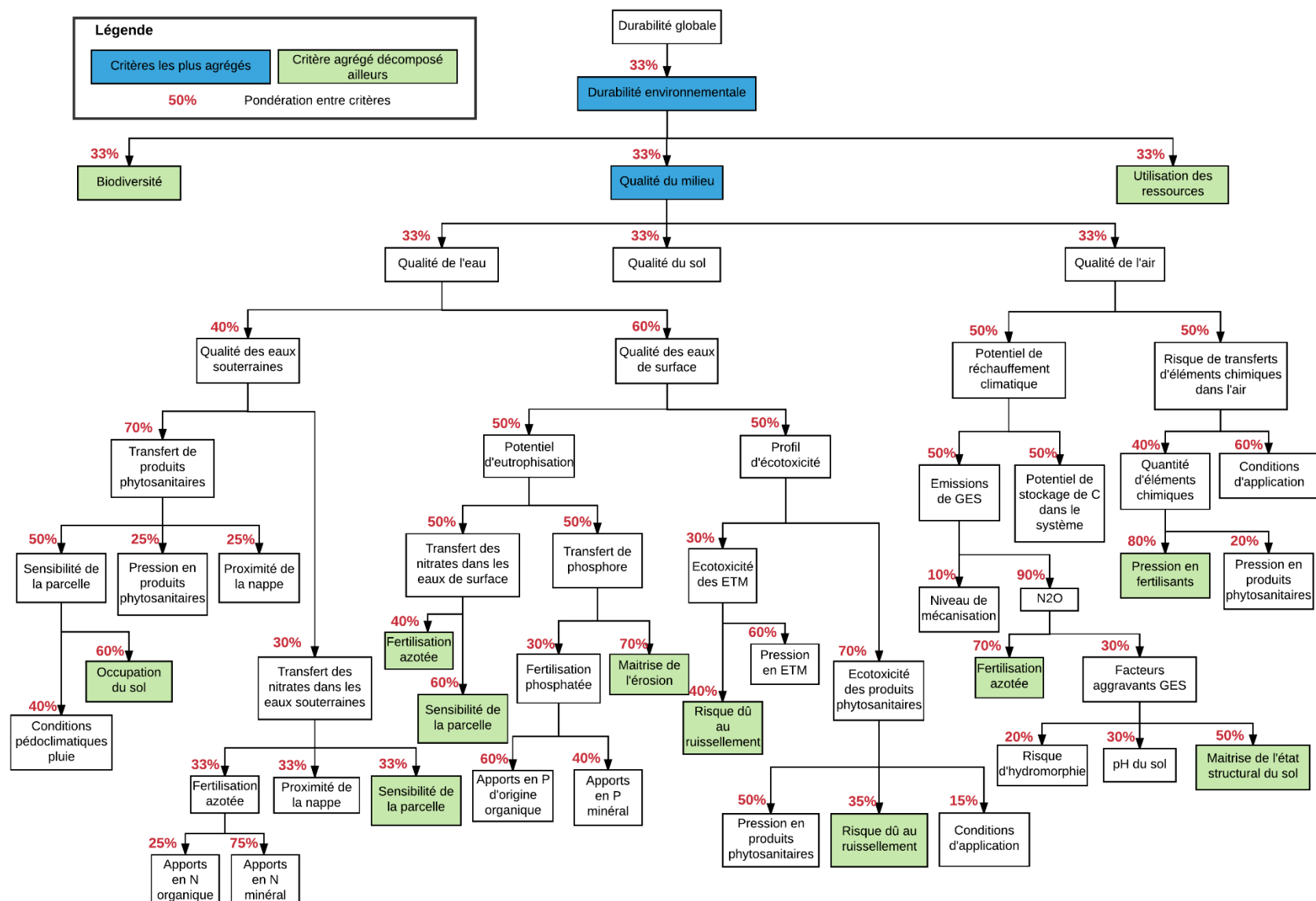
Annexe VII : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Utilisation des ressources



Annexe VIII : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Qualité du milieu (1/2)



Annexe VIII : Structure finale de DEXi AF : Branche environnementale – Qualité du milieu (2/2)



Annexe IX : Résultats de SCAOPEST – Branche sociale

DEXi

DEXiAF socio SCAOPEST.dxi 28/08/2017

Evaluation results

Attribute	SCAOPEST
Durabilite sociale	elevee
Acceptabilite par l'agriculteur	moyenne a elevee
Difficulte technique	difficile
Statut de la parcelle	<i>en propriete</i>
Entraide et soutien	entraide moyenne
Pret materiel et main d oeuvre	pret de materiel ou echange de main d oeuvre
Appartenance a un reseau agroforestier ou d innovation	<i>oui</i>
Soutien familial	absence de soutien
Complexite du systeme	complexe
Acces aux connaissances	<i>acces eleve</i>
Acces conseil technique et formation en agroforesterie	<i>acces complet</i>
Possibilite d apprentissage autonome	<i>oui</i>
Sante au travail	<i>sante preservee</i>
Securite au travail	<i>securite moyenne a elevee</i>
Difficulte physique	une difficultee
Utilisation de produits phytosanitaires	<i>utilisation sans risque</i>
Toxicite des produits	<i>0</i>
Intensite d exposition	<i>faible ou nulle</i>
Charge de travail	charge de travail normale
Temps de travail	difficilement supportable
Temps de travail moyen par personne	eleve 41-50h/semaine
Adequation aux attentes	surcharge de travail
Gestion des pics de travail	<i>gestion optimale</i>
Frequence des pics de travail	plusieurs semaines avec pics de travail
Possibilite de faire face aux pics de travail	<i>aisement ou aucun pic</i>
Possibilite de se degager du temps de repos et des vacances	<i>des jours de repos et des vacances</i>
Motivation	<i>passion ou evidence</i>
Acceptabilite societale	<i>tres elevee</i>
Lien avec la societe	<i>tres eleve</i>
Valeur sociale du paysage	<i>bonne perception</i>
Contribution a l'emploi	<i>emplois maintenus ou crees</i>
Accessibilite aux produits	<i>facile</i>
Circuits courts et ou vente directe	<i>non</i>
Certification de la qualite	<i>aucune certification</i>
Acceptabilite du systeme adopte	systeme moyennement accepte
Nuisances ou perturbation pour le voisinage	<i>non</i>
Qualite de la communication	<i>site internet documents et accueil de groupe</i>
Strategie de production	agriculture raisonnee
Lien avec les agriculteurs voisins	perception neutre
Lien avec la filiere et les marches	moyennement facile
Acces aux marches	moyennement accessible
Acces au materiel et aux intrants	<i>assez facile a facile</i>
Acces conseil technique et formation en agroforesterie	<i>acces complet</i>

Annexe X : Résultats de SCA0PEST – Branche économique

DEXi

DEXiAF eco SCA0PEST.dxi 28/08/2017

Evaluation results

Attribute	SCA0PEST
Durabilite economique	tres mauvaise
Profitabilite reelle	tres mauvaise
Profitabilite potentielle	mauvaise
Part des aides	elevées
Valeur de la production	moyenne
Couts de production	cout eleve
Charges dues aux intrants	charges moyennes a faibles
Besoin en fertilisants	fertilisants externes a la ferme
Besoin en materiel vegetal	achat de semences cheres ou bio
Besoins lies a la protection des cultures	<i>besoin faible</i>
Besoin en eau d irrigation	<i>besoins faibles ou nuls</i>
Couts de mecanisation	eleve
Existence d une assurance	non
Recours a la main d oeuvre	exploitant et stagiaires ou saisonniers
Risques lies aux pertes de production	risque eleve
Risques lies aux pressions abiotiques	risque eleve
Frequence des accidents climatiques	moyenne
Existence d une assurance	non
Risques lies aux pressions biotiques	risque moyen
Moyens mis en oeuvre contres les bioagresseurs	<i>SdC adapte contre les bioagresseurs</i>
Pression locale en bioagresseurs	pression moderee
Effet de competition entre les arbres et les cultures	competition potentielle
Viabilite	tres faible
Taux d endettement	important
Capacite d investissement	mauvaise
Disponibilite en ressources financieres	aucune disponibilite
Capacite d emprunter	faible
Investissement initial	faible a moyen
Cout du projet	<i>cout faible a moyen</i>
Temps de retour sur investissement	long terme
Autonomie	tres faible
Dependance aux intrants et a la main d oeuvre	moyennement dependant
Dependance aux intrants	dependance forte
Recours a la main d oeuvre	exploitant et stagiaires ou saisonniers
Independance economique	tres dependante
Dependance aux marches	tres dependant
Part des aides	elevées
Specialisation	non
Efficience economique	tres mauvaise
Couts de production	cout eleve
Valeur de la production	moyenne

Annexe XI : Résultats de SCA0PEST – Branche environnementale (1/3)

DEXi

DEXiAF enviro SCA0PEST.dxi 28/08/2017

Evaluation results

Attribute	SCA0PEST
Durabilite environnementale	elevée
Utilisation des ressources	faible
Utilisation des ressources non renouvelables	<i>faible ou nulle</i>
Apports en P mineral	<i>faible ou nul</i>
Apports en K mineral	<i>faible ou nul</i>
Utilisation du sol	moyenne
Disponibilite des terres non cultivees	terres non disponibles
Pression fonciere de la region	forte
Zone de compensation ecologique	non
Maximisation du potentiel de production	<i>systeme intensif</i>
Utilisation de l'eau	moyenne
Disponibilite locale en eau	faible
Besoin en eau d'irrigation	<i>besoin faible ou inexistant</i>
Utilisation de l'énergie	moyenne
Fertilisation minerale	<i>fertilisation faible</i>
Apports en N mineral	<i>faible ou nul</i>
Apports en K mineral	<i>faible ou nul</i>
Apports en P mineral	<i>faible ou nul</i>
Pression en produits phytosanitaires	<i>systeme tres economique</i>
Niveau de mecanisation	elevé
Matériel d'irrigation	<i>pas d'irrigation</i>
Biodiversite	moyenne
Flore	mauvaise
Diversite floristique	faible
Nombre de strates	inferieur ou egal a 2
Diversite genetique	<i>diversite elevee</i>
Especes envisagees	<i>grande diversite</i>
Varietes envisagees	<i>grande diversite</i>
Occupation du sol	occupation moyenne (sol semi nu)
Enherbement sous ligne d'arbres	oui mais fauche reguliere
Couverture de l'interligne	presence reguliere de cultures d'hiver ou de couvert d'interculture
Intensite des pratiques	intense
Gestion de l'enherbement	>= 2 desherbages meca par an ou >=1 desherbage X par an
Pression en fertilisants	pression moyenne
Fertilisation minerale	fertilisation faible
Fertilisation organique	lisier, fumier porcins et bovins, boues
Faune	bonne
Pression en produits phytosanitaires	<i>systeme tres economique</i>
Type de travail du sol	labour occasionnel <= 2 ans sur 5
Emplacement de la parcelle	<i>tres favorable</i>
Qualite du paysage agroforestier	faible
Qualite des infrastructures agroecologiques	habitats favorables
Flore	mauvaise
Microorganismes	moyen
Nombres de strates	inferieur ou egal a 2
Pratiques limitantes	pratiques moyennement limitantes
Type de travail du sol	labour occasionnel <= 2 ans sur 5
Pression en fongicides	<i>faible</i>
Maitrise du statut organique	moyenne
Maitrise de l'état structural du sol	mauvaise

Annexe XI : Résultats de SCA0PEST – Branche environnementale (2/3)

Qualite du milieu	<i>tres elevee</i>
Qualite du sol	<i>tres elevee</i>
Qualite physique du sol	elevee
Maitrise de l etat structural du sol	mauvaise
Amelioration de l etat structural	amelioration moyenne
- Presence de cultures structurantes annuelles	<i>oui</i>
- Amendements organiques	lisier, fumier de porcins et bovins, boues
Pratiques affectant la compaction du sol	pratiques tres defavorables
- Niveau de mecanisation	eleve
- Equipements limitant le tassement	abs d equipement limitant le tassement
- Type de travail du sol	labour occasionnel <= 2 ans sur 5
Maitrise de l erosion	<i>bonne</i>
Risque d erosion eolienne	<i>risque faible</i>
Facteurs aggravants E	<i>facteurs peu aggravants</i>
- Sens de plantation	<i>70 a 90 degres par rapport a la pente majeure</i>
- Conditions pedoclimatiques vent	<i>conditions peu ou pas aggravantes</i>
- Presence d aménagement coupe vent	<i>oui</i>
- Densite de plantation des arbres	<i>SAF en BO et/ou fruitiers majoritairement</i>
- Occupation du sol	occupation moyenne (sol semi nu)
Risque du au ruissellement	risque moyen
Facteurs aggravants R	facteurs moyennement aggravants
- Pente	pente moyenne entre 7 et 15pourcent
- Sens de plantation	<i>70 a 90 degres par rapport a la pente majeure</i>
- Chemin d eau et ou talweg	<i>oui</i>
- Conditions pedoclimatiques pluie	<i>conditions peu ou pas aggravantes</i>
- Densite de plantation des arbres	<i>SAF en BO et/ou fruitiers majoritairement</i>
- Occupation du sol	occupation moyenne (sol semi nu)
Qualite chimique du sol	<i>tres elevee</i>
Maitrise du risque de contamination chimique	<i>bonne</i>
- Pression en produits phytosanitaires	<i>systeme tres econome</i>
- Pression en ETM	<i>utilisation faible ou nulle</i>
- Occupation du sol	occupation moyenne (sol semi nu)
Maitrise de la fertilite du sol	<i>tres bonne</i>
Maitrise du statut organique	moyenne
- Taux de MO initial	compris entre 1.5 et 3.5
- Apports en MO	apports moyens
- Restitution des residus de cultures	<i>restitution elevee</i>
- Nature des residus	parties souterraines et ou paille
- Frequence de restitutions	<i>systematiquement ou tres regulierement</i>
- Amendements organiques	lisier, fumier de porcins et bovins, boues
- Fertilisation minerale	fertilisation faible
- Maitrise de l erosion	<i>bonne</i>
- Maitrise du statut acido basique	moyenne
Qualite biologique du sol	elevee
- Maitrise de l etat structural du sol	mauvaise
- Maitrise du risque de contamination chimique	<i>bonne</i>
- Maitrise du statut organique	moyenne
- Qualite du paysage agroforestier	faible

Annexe XI : Résultats de SCA0PEST – Branche environnementale (3/3)

Qualite de l'eau	<i>tres elevee</i>
Qualite des eaux souterraines	<i>tres elevee</i>
Transfert de produits phytosanitaires	<i>faible</i>
Proximite de la nappe	<i>> 10m</i>
Pression en produits phytosanitaires	<i>systeme tres economique</i>
Sensibilite de la parcelle	parcelle moyennement sensible
Conditions pedoclimatiques pluie	<i>conditions peu ou pas aggravantes</i>
Occupation du sol	occupation moyenne (sol semi nu)
Transfert des nitrates dans les eaux souterraines	<i>faible</i>
Proximite de la nappe	<i>> 10m</i>
Fertilisation azotee	<i>fertilisation faible</i>
Apports en N organique	<i>faible ou nul</i>
Apports en N mineral	<i>faible ou nul</i>
Sensibilite de la parcelle	parcelle moyennement sensible
Qualite des eaux de surface	<i>tres elevee</i>
Potentiel d'eutrophisation	<i>faible</i>
Transfert des nitrates dans les eaux de surface	moyen
Fertilisation azotee	<i>fertilisation faible</i>
Sensibilite de la parcelle	parcelle moyennement sensible
Transfert de phosphore	<i>faible</i>
Fertilisation phosphatee	<i>fertilisation faible</i>
Apports en P d'origine organique	<i>faible ou nul</i>
Apports en P mineral	<i>faible ou nul</i>
Maitrise de l'erosion	<i>bonne</i>
Profil d'ecotoxicite	<i>tres faible</i>
Ecotoxicite des ETM	<i>faible</i>
Pression en ETM	<i>utilisation faible ou nulle</i>
Risque du ruissellement	risque moyen
Ecotoxicite des produits phytosanitaires	<i>faible</i>
Conditions d'application	moyennes
Pression en produits phytosanitaires	<i>systeme tres economique</i>
Risque du ruissellement	risque moyen
Qualite de l'air	moyenne
Potentiel de rechauffement climatique	eleve
Emissions de GES	elevees
N2O	emissions moyennement elevees
Facteurs aggravants GES	facteurs aggravants
Risque d'hydromorphie	<i>non</i>
pH du sol	<i>basique a neutre</i>
Maitrise de l'etat structural du sol	mauvaise
Fertilisation azotee	<i>fertilisation faible</i>
Niveau de mecanisation	<i>eleve</i>
Potentiel de stockage de C dans le systeme	potentiel moyen
Risque de transfert d'elements chimiques dans l'air	moyen
Quantite d'elements chimiques	moyenne
Pression en produits phytosanitaires	<i>systeme tres economique</i>
Pression en fertilisants	pression moyenne
Conditions d'application	moyennes

	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, horticoles et du Paysage Spécialité : Ingénieur Agronome Spécialisation : Sciences des Productions Végétales Option : Ingénierie des Agrosystèmes Responsable d'option : Matthieu CAROF	
Auteur(s) : AUGIS Aurélie Date de naissance* : 29/01/1993		Organisme d'accueil : Unilasalle Beauvais Adresse : Rue Pierre Waguet 60000 BEAUVAIS
Nb pages : 71 Annexe(s) : 11		Maître de stage : David GRANDGIRARD
Année de soutenance : 2017		
Titre français : DEXi AF : outil d'aide à la conception et à l'évaluation multicritère de systèmes agroforestiers performants. Analyse critique et amélioration d'un outil préexistant pour les systèmes agroforestiers grandes cultures / bois d'œuvre		
Titre anglais: DEXi AF: a tool for design and evaluation of performant agroforestry systems. Critical analysis and improvement of a pre-existent tool for lumber – arable crops agroforestry systems		
Résumé : Face aux conséquences négatives de l'agriculture productiviste, des systèmes agricoles alternatifs voient le jour. Parmi eux, l'agroforesterie (AF). Malgré un regain d'intérêt, l'AF reste peu développée car elle s'envisage sur du moyen-long terme (15-80 ans) et ne dispose que de références incomplètes. Afin d'augmenter la probabilité de succès des systèmes agroforestiers (SAF) et l'adhésion des agriculteurs, il est nécessaire d'évaluer <i>a priori</i> leurs performances. Or aucun modèle d'évaluation de la durabilité ne tient compte des connaissances relatives à l'AF et n'est compatible avec une trame AF. Pour y remédier, un premier outil DEXi VERTiCAL est développé en 2014 par le groupe Ecophyto DEPHY EXPE VERTiCAL. Pensé pour évaluer la durabilité de vergers biologiques maraichers ou en grandes cultures, il n'est néanmoins pas intégralement compatible avec des SAF conventionnels et/ou en grandes cultures/bois d'œuvre. Un travail a donc été mené pour le rendre plus générique et l'améliorer, autant sur le choix des critères, leur hiérarchisation que sur les classes et pondérations qui leur sont attribuées. Le résultat est un nouvel outil : DEXi AF plus proche des DEXiPM. Il a été construit par expertise consensuelle, complétée d'avis d'agriculteurs et de leur conseiller. Des analyses de sensibilité (test de Monte Carlo) ont été réalisées et ont permis d'améliorer le modèle jusqu'à lui conférer une bonne capacité à discriminer des SAF candidats. La confrontation du modèle avec des SAF existants a permis de valider en partie le modèle tout en identifiant des pistes d'amélioration.		
Abstract: Facing the negative consequences of intensive and modern agriculture, new alternative cropping systems are being developed. Among them, agroforestry (AF). Despite a renewed interest, AF remains poorly developed because it is considered on the medium-long term (15-80 years) and is only based on incomplete knowledge. To increase the success probability of agroforestry systems (AFS) and the farmer's support, the performances of such systems shall be assessed <i>ex ante</i>. Yet, no model gathers all current agroforestry knowledge and is compatible with AF. A first tool was then developed in 2014 by the Ecophyto DEPHY EXPE VERTiCAL group, to overcome the non-existence of a specialised model. Nonetheless, it was developed to assess the sustainability of organic orchard - market gardening and orchard - arable crops systems. Thus it is not entirely compatible with conventional systems and lumber - arable crops systems. A work has been carried out to improve the model and make it more generic: the choice of attributes as well as their ranking, modalities and weights have been reviewed. As a result, a new tool has been created: DEXi AF, closer to the DEXiPM models. It has been built thanks to consensual expertise and farmers and counsellor's advice. Sensibility analyses (SA) have been performed (Monte Carlo sampling) to improve the model step by step and make it more reliable in its ability to discriminate AFS. Confrontation with existing AFS should partially validate the model while opening up areas for improvement.		
Mots-clés : agroforesterie / évaluation multicritère / <i>ex ante</i> / DEXi / analyse de sensibilité		
Key Words: agroforestry / multi-criteria assessment / <i>ex ante</i> / DEXi / sensitivity analysis		