



**HAL**  
open science

# La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers

Laëtitia Lemière

► **To cite this version:**

Laëtitia Lemière. La réalité augmentée pour faciliter la conception de systèmes agroforestiers. Sylviculture, foresterie. Montpellier SupAgro, 2023. Français. NNT : 2023NSAM0024 . tel-04238319

**HAL Id: tel-04238319**

**<https://hal.inrae.fr/tel-04238319>**

Submitted on 9 Feb 2024

**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.

# THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER ET DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En écologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA - Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau

Porté par l'unité de recherches ABSys

## LA RÉALITÉ AUGMENTÉE POUR FACILITER LA CONCEPTION DE SYSTÈMES AGROFORESTIERS

Présentée par Laëtitia LEMIERE

le 15 septembre 2023

Sous la direction de  
Marie GOSME et Marc JAEGER  
et l'encadrement de Gérard SUBSOL

Devant le jury composé de

Alexandra BAC, Maitre de conférence, Aix-Marseille Université  
Frederick GARCIA, Directeur de recherche, INRAE  
Marie GOSME, Directrice de recherche, INRAE  
Marc JAEGER, Directeur de recherche, CIRAD  
François PINET, Directeur de recherche, INRAE  
Frédérique SANTI, Chargée de recherche, INRAE  
Gérard SUBSOL, Chargé de recherche, CNRS  
Marc TCHAMITCHIAN, Directeur de recherche, INRAE

Examinatrice  
Rapporteur  
Co-directrice  
Co-directeur  
Président du jury  
Examineur  
Membre invité  
Rapporteur





## REMERCIEMENTS

Je remercie Marie Gosme, Marc Jaeger et Gérard Subsol pour leurs supervisions et la confiance qu'ils m'ont accordée. Ils m'ont permis d'explorer de nombreux domaines hors de ma spécialisation initiale et de la leur. Je suis reconnaissante envers les différents membres de mon jury d'avoir acceptés d'évaluer ce travail de thèse.

Je suis aussi reconnaissante envers tous mes amis doctorants des trois laboratoires au sein desquels j'ai pu travailler. Notamment, mes super co-bureaux, Houssem et Joachim. Leur bonne humeur et les parties de Magic m'ont permis de décompresser quand c'était nécessaire. Je remercie Bianca et Thibault de l'équipe Icar pour nos discussions à propos de nos chiens respectifs et de nos balades ensemble. Les photos de chiens sont la meilleure source de dopamine.

Je remercie aussi tous mes amis hors monde de la recherche. Nina et Marie, notre club de lecture m'a permis de garder un lien avec l'une de mes passions et nos rencontres pour discuter du livre en cours sont un moment de pause que j'adore. Merci beaucoup à Manon et à Eric aussi. Nos soirées et séances d'escalade m'ont permis de cultiver mes autres centres d'intérêt (sport, jeux de société, jeux vidéos) que j'ai dû mettre un peu en retrait le temps de la thèse.

Je remercie ma famille qui m'a beaucoup moins vue depuis le début de la thèse et qui malgré tout, m'a soutenue et aidée notamment lorsque j'avais besoin de faire relire des documents (comme cette thèse).

Je remercie énormément Cédric, mon amoureux, qui m'a soutenue dans cette étape. Cela inclut de bons et des mauvais moments notamment lors des pics de stress.

Je suis aussi reconnaissante envers moi-même pour tout le travail que j'ai fait mais aussi d'avoir pris l'une des meilleures décisions en début de thèse : adopter Néo. Je remercie ce démon, cette mascotte occasionnelle de bureau, qui à sa manière m'a aidée à terminer cette thèse.



## AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée d'octobre 2020 à septembre 2023 au sein de l'UMR ABSys (INRAE), de l'UMR AMAP (Cirad) et de l'équipe ICAR du LIRMM (CNRS et Université de Montpellier) sous la co-direction de Marie Gosme (UMR ABSYS, INRAE) et de Marc Jaeger (UMR AMAP, Cirad) et de l'encadrement de Gérard Subsol (Icar, Lirmm, CNRS). Elle a été financée par l'INRAE et #DigitAg, l'Institut Convergences Agriculture Numérique. Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont fait l'objet des publications et communications scientifiques qui sont détaillées plus bas.

### Valorisation des travaux de thèse

#### Publication dans des revues internationales à comité de lecture

**Laetitia Lemière**, Marc Jaeger, Marie Gosme, Gérard Subsol. Combinatorial maps, a new framework to model agroforestry systems. (Accepté dans Plant Phenomics)

**Laetitia Lemière**, Jacques Etsri Enyo Kuzo, Marie Gosme, Julie Labatut. Agroforestry system design in France: practices and recommendations for digital tools. (Soumis à European Journal of Agronomy)

#### Présentation en conférence internationale avec actes :

Laetitia Lemière, Marie Gosme, Gérard Subsol, Marc Jaeger. FSPM applied to agroforestry system co-design. PMA 2022 - 7th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization, and Applications, Oct 2022, Wuxi, China.

#### Posters présentés en conférences internationales :

Laetitia Lemière, Marc Jaeger, Gérard Subsol, Marie Gosme. Augmented reality for agroforestry system design. EURAF 2020 Agroforestry for the transition towards sustainability and bioeconomy, May 2021, Nuoro, Italy.

Laetitia Lemière, Marc Jaeger, Gérard Subsol, Marie Gosme. Graph theory applied to agroforestry system co-design. 5th World Congress on Agroforestry, Jul 2022, Québec, Canada.

#### Vulgarisation :

Ma thèse en 180s secondes : Participation en finale régionale, lien vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=HJTcaWqzF6w>

PhdPub (03/04/22) : présentation des travaux de thèse devant le grand public dans un bar

#### Encadrement et enseignement :

DigiFille 2022 (Digit'Ag) : tutrice de collégiennes pendant une semaine pour faire découvrir les métiers du numérique et de la recherche

Encadrement de stagiaires :



- Jacques Kuzo (6 mois) : M2 en économie (Université Clermont Auvergne)
- Gabriel Masson (2,5 mois) : 2ème année BUT GEII ESE (IUT Nîmes)
- Clément Dahan (6 mois) : 5ème année école d'ingénieur (Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées)

Cours « Intelligence artificielle dans les jeux vidéo » : 12h dispensées aux étudiants en 4ème année de Game Design à IAD-3D à Montpellier.

### **Financements :**

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-16-CONV-0004. Il a également bénéficié d'un cofinancement par le département AgroEcoSystèmes (Agronomie et sciences de l'environnement pour les agroécosystèmes)





# Table des matières

REMERCIEMENTS . . . . .	1
AVANT-PROPOS . . . . .	2
LISTE DES FIGURES . . . . .	7
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	8
<b>I Introduction générale</b>	<b>11</b>
1 Agroforesterie . . . . .	14
2 Services écosystémiques . . . . .	14
2.1 Définition . . . . .	14
2.2 Représentation des services écosystémiques . . . . .	16
3 Motif agroforestier . . . . .	17
3.1 Importance de la structure spatiale des systèmes agroforestiers . . . . .	17
3.2 Définition . . . . .	17
<b>II Méthodologie de conception de systèmes agroforestiers</b>	<b>19</b>
1 Conception en agriculture . . . . .	22
2 Analyse des méthodes et outils utilisés par les conseillers agroforestiers pour la conception de systèmes agroforestiers . . . . .	25
3 Bilan . . . . .	45
<b>III Modélisation</b>	<b>47</b>
1 Motivation . . . . .	50
2 Modélisation des systèmes agroforestiers sous forme de cartes combinatoires . . . . .	50
<b>IV Implémentation</b>	<b>73</b>
1 Description de l'outil . . . . .	76
2 Module d'acquisition . . . . .	77
2.1 Dispositif physique . . . . .	77
2.2 Reconnaissance des marqueurs par un réseau de neurones convolutionnel . . . . .	78
3 Modélisation . . . . .	83
4 Visualisation en réalité augmentée . . . . .	84



4.1	Réalité augmentée . . . . .	84
4.2	Visualisation en réalité augmentée avec marqueurs . . . . .	86
4.3	Visualisation en réalité augmentée selon des coordonnées GPS . . . . .	87
5	Informations à visualiser . . . . .	88
5.1	Techniques possibles . . . . .	88
5.2	Retours utilisateurs . . . . .	88
<b>V</b>	<b>Discussion Générale</b>	<b>93</b>
1	Aspects novateurs du travail réalisé . . . . .	96
2	Limites des travaux . . . . .	97
2.1	Limites techniques . . . . .	97
2.2	Limites scientifiques . . . . .	98
3	Perspectives de développement . . . . .	98
3.1	Amélioration du prototype . . . . .	98
3.2	Du motif agroforestier à la parcelle agroforestière . . . . .	99
3.3	Théorie des graphes au service du motif agroforestier . . . . .	99
3.4	Couplage des modèles . . . . .	100
3.5	Nouvelles utilisations envisageables . . . . .	100
4	Conclusion . . . . .	100
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>103</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>111</b>
<b>Annexe A</b>	<b>Listes des articles concernant les services écosystémiques</b>	<b>113</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Questionnaire du test de visualisations en réalité augmentée</b>	<b>117</b>
<b>Annexe C</b>	<b>Diagramme de classes de l'implémentation des cartes combinatoires</b>	<b>133</b>



# Table des figures

2	Exemples de systèmes agroforestiers . . . . .	15
3	Étapes d'un atelier participatif en agriculture extrait de (CHIEZE, CASAGRANDE et ALAPHILIPPE 2021) . . . . .	23
4	Maquette réalisée lors d'un atelier de conception de systèmes agroforestiers . . . . .	24
5	Schéma récapitulant les différentes fonctionnalités dans le cahier des charges . . . . .	45
6	Schéma des modules et de leurs échanges de données . . . . .	76
7	Exemple de maquette de parcelle agroforestière adaptée aux outils développés . . . . .	77
8	Schéma du dispositif initialement prévu prenant une photographie de la maquette et un ordinateur avec un ordinateur pour l'analyse de la vue . . . . .	78
9	Exemple de détection. Source : <a href="https://www.mygreatlearning.com/blog/yolo-object-detection-using-opencv/">https://www.mygreatlearning.com/blog/yolo-object-detection-using-opencv/</a> . . . . .	79
10	Schéma d'un réseau de neurones . . . . .	80
11	Matrice de confusion issue de l'entraînement de Yolo v8 . . . . .	81
12	Exemple de mauvaise prédiction de Yolov8 . . . . .	81
13	(13a) Photographie d'une maquette (13b) Résultat obtenu après application de Yolo sur l'image . . . . .	82
14	Captures écrans d'utilisation du Yolo dans l'application . . . . .	82
15	Exemples d'applications utilisant la réalité augmentée . . . . .	85
16	(16a) Marqueur à scanner permettant l'affichage de la parcelle en réalité augmentée (16b) Parcelle en réalité augmentée . . . . .	86
17	Capture d'écran de la parcelle en réalité augmentée avec deux couches d'informations colorées . . . . .	87
18	Capture d'écran de la parcelle en réalité augmentée projetée dans un champ . . . . .	87
19	Captures d'écran des visualisations testées . . . . .	89
20	Test de visualisation . . . . .	90
21	Résultats préliminaires des tests de visualisations . . . . .	91
22	Diagramme de classes du module des cartes combinatoires . . . . .	133





# Liste des tableaux

1	Récapitulatif des recherches réalisées sur Google Scholar . . . . .	16
2	Récapitulatif du nombre d'images et d'annotations par jeux de données . . . . .	80





---

Première partie  
Introduction générale

---





# Introduction générale

Dans cette section, je présente le contexte de ma thèse. Pour cela, je rappelle les définitions de l'agroforesterie, des services écosystémiques et du motif spatial dans un système agroforestier. A partir de ces différents éléments, j'expose les problématiques auxquelles répond ma thèse. Ma thèse étant pluridisciplinaire, chaque chapitre relève d'une discipline différente (agronomie, modélisation des systèmes, informatique). Aussi, j'ai choisi de distribuer l'analyse bibliographique au sein de chaque chapitre, afin de faciliter la lecture.

## Plan du chapitre

1. Agroforesterie
2. Services écosystémiques
3. Motif agroforestier



# 1 Agroforesterie

L'agroforesterie est un mode d'exploitation des terres agricoles où des arbres, des cultures et des animaux se partagent l'espace. C'est un mode de culture traditionnel existant depuis le Moyen Âge en Europe et présent dans toutes les régions du monde (NAIR 1993). On distingue plusieurs catégories de systèmes agroforestiers :

- sylvopastoral : des animaux pâturent au milieu des arbres (cf. figure 2a),
- sylvoarable : système associant des arbres et des cultures arables (cf. figure 2b),
- agrosylvopastoral : système variant dans le temps d'un système sylvopastoral à sylvoarable,
- agroforesterie linéaire : les arbres ne sont pas une des productions principales, ils apportent des services comme dans le cas des haies qui peuvent, entre autres, délimiter les parcelles ou avoir un effet brise-vent pour protéger la culture (cf. figure 2c).

Par rapport à la monoculture, l'agroforesterie limite la perte du sol ou de l'eau (ZHU et al. 2020) et impacte positivement la faune du sol (MARSDEN et al. 2020) ainsi que la fertilité de celui-ci (CASTLE, MILLER, ORDONEZ et al. 2021). L'agroforesterie permet en général une meilleure productivité à l'hectare que la séparation cultures/forêts (CASTLE, MILLER, ORDONEZ et al. 2021 ; LEHMANN et al. 2020) et améliore le revenu des producteurs (LEHMANN et al. 2020).

## 2 Services écosystémiques

### 2.1 Définition

L'agroforesterie est un levier de l'agroécologie. D'après l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, l'agroécologie est « une approche intégrée qui applique concomitamment des notions et des principes écologiques et sociaux à la conception et à la gestion des systèmes alimentaires et agricoles. Elle vise à optimiser les interactions entre les végétaux, les animaux, les humains et l'environnement, sans oublier les aspects sociaux dont il convient de tenir compte pour qu'un système alimentaire soit durable et équitable » (FAO 2018). Ces interactions sont à l'origine de la production de services écosystémiques.

Les services écosystémiques sont définis comme les bénéfices d'un écosystème pour l'Homme. D'après le CICES (Common International Classification for Ecosystem Services) (HAINES-YOUNG et POTSCHEIN-YOUNG 2018), les services écosystémiques sont catégorisés en :

- services de production : création de ressources (bois, céréale...),
- services de régulation : aide au fonctionnement de l'écosystème (purification de l'eau, pollinisation...),
- services culturels : bénéfices liés à la sensibilité humaine comme la beauté du paysage.

Comprendre les services écosystémiques est primordial pour avoir des systèmes agroforestiers performants et résilients. En effet, les performances du système ne sont plus uniquement déterminées par la production des cultures ou des arbres mais elles doivent aussi comprendre la production des services





(a) Exemple de système sylvopastoral où des moutons pâturent © Tomsen



(b) Exemple de système sylvoarable avec des arbres d'ombrage © Paul Burgess



(c) Exemple d'agroforesterie avec des haies le long des parcelles © WTML

**FIGURE 2** Exemples de systèmes agroforestiers



de régulation (amélioration de la qualité de l'eau, du sol...) et des services culturels. D'après l'état de l'art de CASTLE, MILLER, MERTEN et al. (2022), les services de régulation sont les plus étudiés en termes de nombre de publications. Toutefois, ce sont les services de production et de régulation qui sont les plus évalués économiquement.

## 2.2 Représentation des services écosystémiques

J'ai réalisé une recherche bibliographique sur la représentation des services écosystémiques. Pour chaque recherche, j'ai regardé les deux premières pages de résultats de Google Scholars. Les mots-clés utilisés sont récapitulés dans la table 1. J'ai ainsi identifié 61 articles. La liste détaillée est disponible en annexe A.

Type de service	Mot clés	Nombre d'articles	Duplicata
Général	Plot ecosystem service	5	0
Service de production	Service crop	6	3
	Service timber	9	0
Service de régulation	Servie clean air	1	2
	Service pollination	9	5
	Service climate regulation	8	0
	Service pest regulation	6	2
Représentation	Ecosystem service representation	1	5
	Ecosystem service visualization	2	7
Synergy/trade-off	Synergy ecosystem	6	1
	Trade-off ecosystem	7	0
Total		61	-

**TABLE 1** Récapitulatif des recherches réalisées sur Google Scholar

Comme dans l'état de l'art de CASTLE, MILLER, MERTEN et al. (2022), les services de régulation sont les plus présents dans ce jeu de données : sur les 61 articles, 24 sont liés à des services de régulations et 15 à des services de production. Comme l'un de leurs résultats, les services de régulation sont les plus présents dans ce jeu de données. 28 articles étudient un service spécifique et 33 en étudient plusieurs en même temps pour comprendre les synergies. D'un point de vue chronologique, on observe un basculement en 2016, avec initialement des études se focalisant plutôt sur un seul service, alors qu'après cette date, plusieurs services sont généralement étudiés simultanément.

Dans 43 articles, les services sont représentés avec des graphiques qui sont généralement des courbes, de histogrammes, des nuages de points. Les cartes sont aussi utilisées mais plus rarement. Dans ce jeu d'articles, seulement 13 représentations de systèmes et de services ont été trouvées. Ces représentations sont des cartes 2D. Cette faible occurrence des représentations par cartes est regrettable car les cartes sont d'une grande aide pour expliquer des mécanismes complexes (BURKHARD et al. 2014). Bien que KLEIN, CELIO et GRÊT-REGAMEY (2015) insistent sur le fait qu'une visualisation unique ne convient pas à toutes les situations, leurs résultats montrent que les représentations de paysages en 3D et les cartes en 2D sont pertinentes dans 4 cas parmi les 5 applications impliquant des discussions autour des services écosystémiques (exploration d'information, support de discussions, de scénarios, d'estimations ou encore d'analyses).

## 3 Motif agroforestier

### 3.1 Importance de la structure spatiale des systèmes agroforestiers

Les interactions biotiques à l'origine de la production de services écosystémiques agissent souvent à l'échelle locale. Outre la nature des espèces en interaction, leur agencement spatial a donc un impact très important sur le fonctionnement des systèmes agroforestiers et leur production de services. Par exemple, dans leur travail, TZUK, UECKER et MERON (2020) montrent que l'organisation spatiale du système impacte sa résilience face à la sécheresse. Une difficulté majeure pour bien comprendre les services écosystémiques est l'identification de leur zone d'effet (lieu bénéficiaire) et de leur lieu de création (lieu de production) qui ne sont pas toujours avoisinants (ALA-HULKKO 2020). Par exemple, la pollinisation a lieu dans la parcelle agricole mais les insectes ne proviennent pas forcément de la parcelle ; ils peuvent arriver de l'extérieur. On note aussi un décalage à l'échelle temporelle où les effets du service ne sont pas forcément ressentis au moment de sa création. Cela complexifie la prise en compte de tous les éléments impliquant des interactions pour le système agroforestier.

Il est donc important, lorsqu'on étudie les systèmes agroforestiers et leur production des services écosystémiques, de bien définir les limites spatiales du système et de caractériser l'agencement spatial des plantes. Les notions classiquement utilisées en agronomie de parcelle et de couvert végétal ne sont pas forcément les plus pertinentes.

### 3.2 Définition

La notion de motif agroforestier cherche à associer les plantes et les éléments physiques du système ainsi que leur organisation spatiale avec les services écosystémiques produits par le système. Cette notion transparaît dans l'« éco-unit » définie par OLDEMAN (1992) où l'unité regroupe les plantes à des étapes de développement similaires. La définition d'Oldeman prend en compte la croissance globale du système mais oublie les services écosystémiques. La notion d'« Ecosystem Service Spatial Unit » (RAFFLEGEAU et al. 2023) pallie à cette absence. Cette unité est définie comme l'ensemble des espèces et des éléments fonctionnels du système qui produisent ensemble des services écosystémiques. Elle peut regrouper des cultures, des arbres, des animaux d'élevage, de la végétation spontanée ou des habitats semi-naturels (comme des haies, des fossés et des parcelles de forêt). Cette définition regroupe à la fois les éléments structuraux et fonctionnels du système agroforestier, et ce sera donc celle qui sera utilisée dans cette thèse.





---

## Deuxième partie

# Méthodologie de conception de systèmes agroforestiers

---





# Méthodologie de conception

Le nombre important de combinaisons des variétés de plantes et de leur organisation dans la parcelle rend la conception agroforestière difficile. De surcroît, la prise en compte des multiples services écosystémiques requiert des changements de pratique dans la conduite agricole. C'est pourquoi les agriculteurs peuvent être aidés par les conseillers agroforestiers lors de la conception des parcelles agroforestières.

La première partie de ce chapitre contient les méthodologies de conception présentes dans la littérature scientifique. La seconde partie expose les retours de conseillers agroforestiers relevés lors d'interviews que nous avons organisées. Ce travail fait l'objet d'une publication soumise à *European Journal of Agronomy*. Ces informations permettent de définir un cahier des charges pour proposer des outils facilitant la conception de parcelles agroforestières.

## Plan du chapitre

1. Conception en agriculture
2. Analyse des méthodes et outils utilisés par les conseillers agroforestiers pour la conception de systèmes agroforestiers
3. Bilan



# 1 Conception en agriculture

La conception de systèmes agricoles a évolué au cours du temps. Son histoire a été retracée par Salembier *et al.* (2018), qui a identifié plusieurs phases où les agriculteurs ont été perçus par les agronomes soit comme un groupe appliquant une méthode, soit comme des optimiseurs d'une méthode donnée ou encore comme des preneurs de décisions mieux placés pour déterminer les techniques à utiliser. Aujourd'hui, ils sont perçus comme des sources d'idées et de connaissances. L'intérêt de la complémentarité des agriculteurs avec les chercheurs a d'ailleurs été démontrée dans l'étude de Cerdan *et al.* (2012) sur la conception de plantations de caféiers. Ainsi, les agronomes cherchent donc à travailler avec eux et à les inclure dans les travaux de conception. Cela a mené à la conception participative.

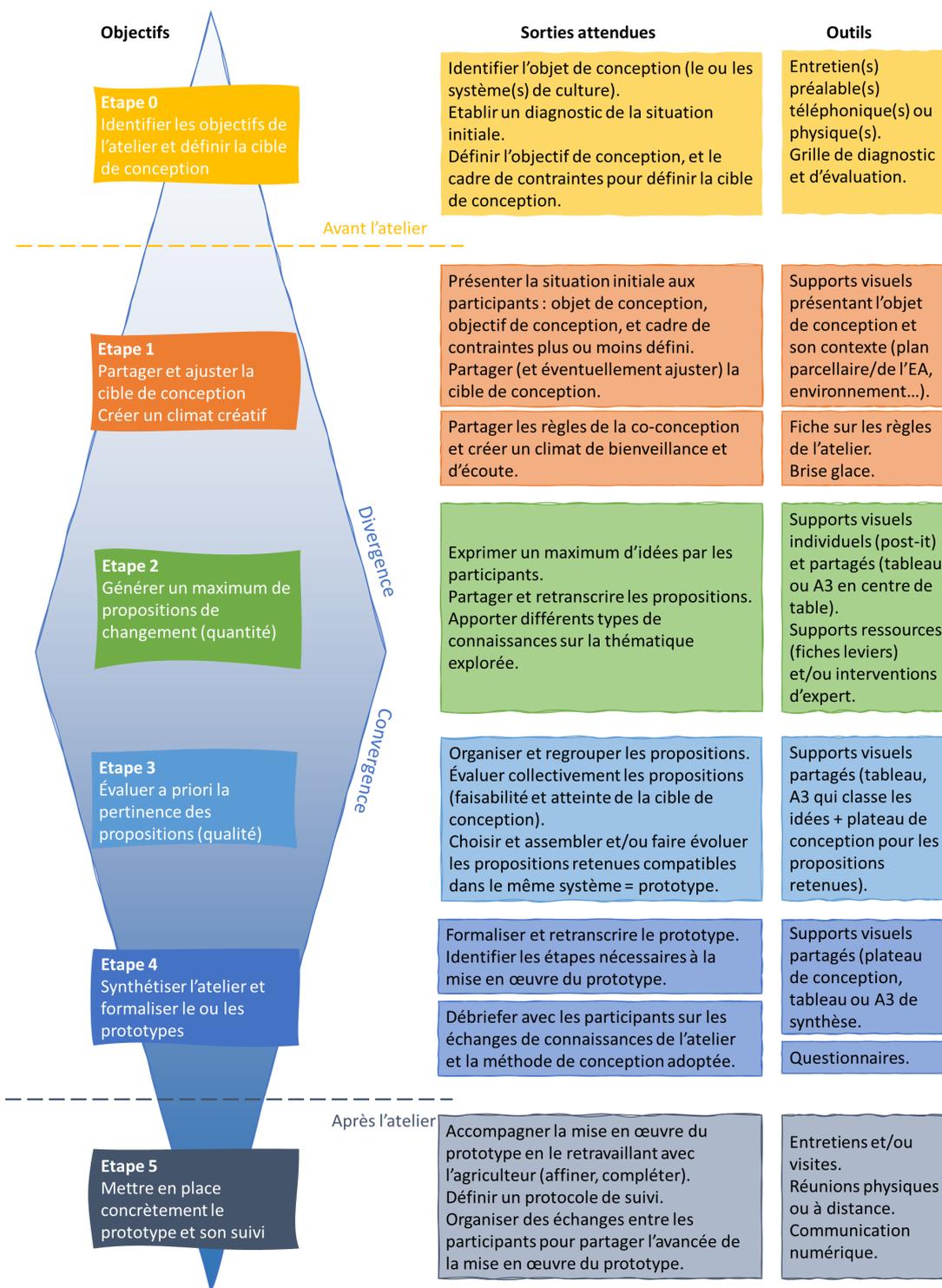
La conception participative est basée sur la conception par prototype (VEREIJKEN 1997) où un groupe de personnes (scientifiques, agriculteurs, décideurs) est rassemblé lors d'ateliers pour concevoir un « prototype » répondant aux différents objectifs et contraintes identifiées par le porteur de projet (LANÇON et al. 2007). Le groupe de participants est généralement animé par un facilitateur dont le rôle est de s'assurer du bon déroulé de l'atelier et de favoriser l'émergence d'idées par la prise de parole de tous.

Les ateliers suivent généralement les étapes suivantes : définition des objectifs, émergence d'idées, convergence et proposition d'un prototype (CHIEZE, CASAGRANDE et ALAPHILIPPE 2021 ; LANÇON et al. 2007). La figure 3 schématise le processus temporel de la conception participative en y précisant les différentes étapes. Cette conception permet effectivement de créer des systèmes innovants comme le montrent CASTEL et al. (2019), qui présentent deux systèmes agroforestiers innovants issus de conception participative dont le but était de réduire l'usage de pesticides. Ce type de conception favorise les échanges et l'innovation.



### Les 6 étapes d'un atelier de co-conception

Fiche aide-mémoire du facilitateur

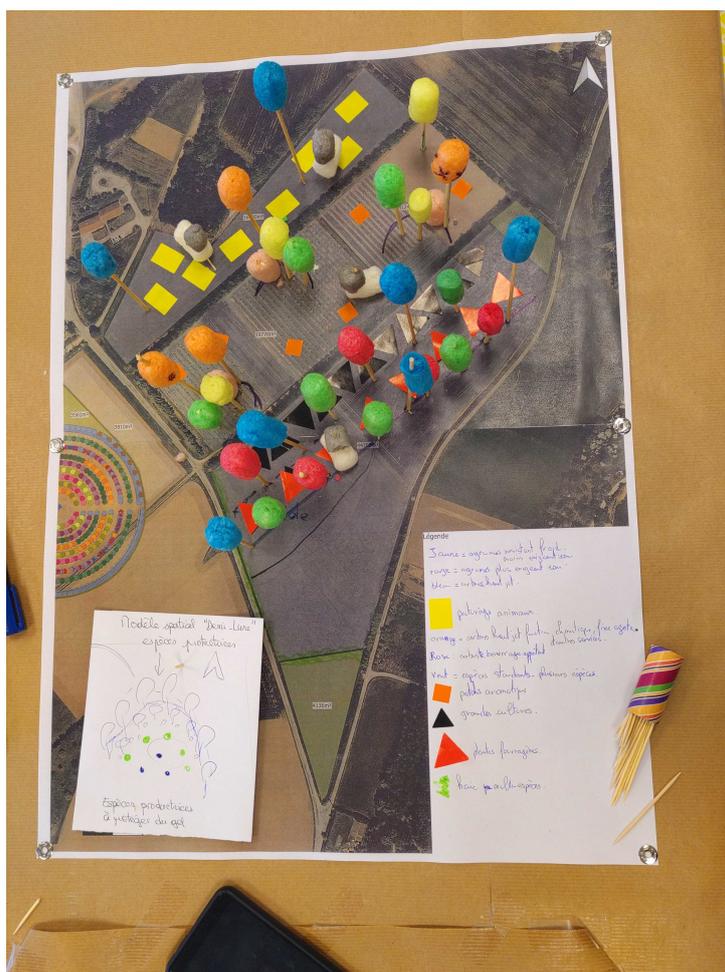


14

FIGURE 3 Étapes d'un atelier participatif en agriculture extrait de (CHIEZE, CASAGRANDE et ALAPHILIPPE 2021)



Lors des ateliers participatifs en agroforesterie, le prototype est souvent une maquette physique du système comme celle visible dans la figure 4. Sur cette maquette, l'espace de travail a été divisé en 3 zones correspondant à 3 systèmes agroforestiers différents répondant aux contraintes spatiales (dénivelé, accès à l'eau, qualité du sol). Une première zone est reconnaissable avec les nombreux rectangle jaunes, la seconde est au milieu avec les boules de polyester orange et vert. La troisième zone est composée de polyester bleu, rouge et vert. Les piques avec les boules de polystyrènes correspondent aux arbres à ajouter. Les autocollants représentent les cultures. Chaque couleur est associée à une espèce ou une famille de plantes. Les sculptures de polystyrènes en forme de mouton indiquent la volonté d'instaurer du pâturage d'ovins.



**FIGURE 4** Maquette réalisée lors d'un atelier de conception de systèmes agroforestiers. Chaque pique représente un arbre et chaque autocollant une zone de culture. Les couleurs sont associées à une espèce ou une famille de plantes. Les sculptures d'animaux indiquent la possibilité de faire du pâturage.

Ces maquettes ont l'avantage d'être un support de communication permettant aux participants d'échanger plus facilement leurs idées. En plus d'être ludiques, ces supports permettent une représentation spatiale avec peu de matériel. Toutefois, leur pérennité n'est pas assurée si la légende est perdue et les maquettes ne sont pas assez précises pour directement générer un plan de plantation du système. De plus, une seule maquette ne permet pas de représenter l'évolution du système. Par ailleurs, l'illustration d'interactions entre les éléments de la maquette, si elle est souhaitée, ne peut se faire qu'à l'aide de dessins sur la maquette. En résumé, ces supports sont de bons outils pour faciliter les échanges d'idées mais

ont des lacunes pour illustrer les dynamiques temporelles et fonctionnelles du système agroforestier.

Ces études définissent des méthodes de conception participative qui ne sont pas spécifiques à l'agroforesterie ou à l'agroécologie. Or, l'agroécologie entraîne des changements dans la conception participative (JEUFFROY, PROST et SCOPEL 2021) car elle nécessite de questionner à l'intégralité des éléments présents dans la conception. Or, une meilleure prise en compte de l'ensemble de l'écosystème implique de prendre conscience de nouveaux domaines comme la gestion de l'eau et la culture des arbres. Il faudrait donc une plus grande diversité d'acteurs durant les ateliers pour rassembler plus de connaissances. De plus, l'intégration de plantes pérennes ou de pâturages dans les systèmes a pour conséquence la nécessité de penser à de nouvelles échelles spatiales et temporelles (GAUDIO et al. 2022). Ce changement implique de proposer de nouvelles méthodes de conception participative adaptées au contexte agroforestier. Par exemple, étant donné l'importance de l'aspect spatial dans les systèmes agroforestiers, leur conception doit prendre en compte l'agencement spatial des espèces à associer. Les concepteurs de systèmes agroforestiers utilisent donc souvent des maquettes comme celle présentée dans la figure 4.

Cependant, les pratiques de conception agroforestière ne sont pas ou peu connues. De plus, le métier de conseillers agroforestiers est une spécialisation relativement récente et les chercheurs n'ont pas encore étudié leurs méthodes. Aussi, avec l'aide d'autres chercheurs, j'ai défini une méthode d'interview, identifié une liste de conseillers agricoles en France et mené les entretiens. Dans la section suivante, je présente le résultat de mon étude sur leurs méthodes et les outils qu'ils utilisent.

## 2 Analyse des méthodes et outils utilisés par les conseillers agroforestiers pour la conception de systèmes agroforestiers



# 1 Agroforestry system design in France: 2 practices and recommendations for digital 3 tools

4 Laetitia Lemiere<sup>1,2</sup>, Marie Gosme<sup>1\*</sup> Jacques Etsri Enyo Kuzo<sup>3</sup>, & Julie Labatut<sup>4</sup>  
5 0009-0000-2567-1300, 0000-0003-1848-9230, -----, 0000-0002-5526-4914

6 <sup>1</sup> ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier,  
7 France

8 <sup>2</sup> CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France

9 AMAP, Univ Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France

10 <sup>3</sup> School of Economics – University of Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France

11 <sup>4</sup> INRAE, UMR LISIS CNRS, INRAE, Université Gustave Eiffel, GABI, CGS, Mines Paris,  
12 France

13

14 \* Corresponding author: [marie.gosme@inrae.fr](mailto:marie.gosme@inrae.fr) UMR ABSys, INRAE, 2 place Pierre Viala,  
15 34060 Montpellier cedex 2

16

## 17 **Abstract:**

18 Agroforestry is a complex farming system with many possible combinations of trees, crops and  
19 animals. Because of this complexity, the design phase is crucial for the success of the system.  
20 In this study, we interviewed French advisors to learn more about their practices and the tools  
21 they use. Regarding their practices, our results show that advisors view design as a thinking  
22 process that does not systematically include a planting step. In terms of the tools advisors use,  
23 we found that they lacked visualization features to represent plots and complex phenomena  
24 within the plots. We also identified a lack of models that could compute indicators, despite  
25 existing models in the scientific literature. Further work is needed to understand why advisors  
26 do not include the planting step in their design process as well as to develop suitable tools with  
27 scientific models and visualization features.

28

29 **Keywords:** Agroforestry, System Design, Advisory Services

30

## 31 Highlights (mandatory)

- 32 • We surveyed the methods and tools used by advisors to design agroforestry systems
- 33 • The diversity of methods illustrates a lack of standardization in AF design
- 34 • The design process rarely include the final steps of system implementation
- 35 • Advisors use a range of tools to facilitate their work, but few digital tools
- 36 • We make recommendations to improve digital tools to meet the advisor's needs

37

38

39

## 40 Introduction

41 Agroforestry is a complex farming system in which trees, crops, and sometimes animals can  
42 share the same land. It provides many benefits and ecosystem services (García de Jalón et al.  
43 2018; Udawatta and Gantzer 2022) and can enhance various ecosystem services (Udawatta and  
44 Jose 2021) such as soil and water quality (Udawatta and Gantzer 2022). Compared to  
45 conventional agriculture, agroforestry systems are more complex to understand, design and  
46 manage due to the numerous elements they contain (e.g., trees, crops, understory vegetation  
47 strips) and the ecological interactions between spontaneous and domestic species. In fact,  
48 farmers willing to implement agroforestry practices have to manage a range of crops and trees,  
49 taking into account increased spatial heterogeneity, longer time scales, and a hierarchy of  
50 several time scales in their production system. The design of agroforestry systems consists not  
51 only on choosing the components of the system, but also their spatial arrangement (Gassner and  
52 Dobie 2022), and must consider the management of both crops and trees as well as the  
53 ecological interactions between plant and animal communities associated with those crops and  
54 trees. Because of this complexity and the lack of formalized knowledge and training in  
55 agroforestry compared to conventional agricultural systems, the support of advisors in the  
56 design process of such systems is critical to project success (Udawatta and Jose 2021).

57 To help farmers implement innovative cropping systems, especially agroecological systems,  
58 different advisory services propose various design methods. As described in the review of  
59 Martin et al. (2013), these methods can be divided into two categories: optimization approaches  
60 and participatory approaches. The optimization approaches aim at solving a problem submitted  
61 by the farmer through a computational exploration of the solution space. Participatory design  
62 focuses on using the tacit knowledge of stakeholders to invent new solutions (Spinuzzi 2005).  
63 By gathering many different stakeholders, it allows leveraging a range of skills and expertise  
64 (Auricoste et al. 2010; Cerf et al. 2012). Chieze et al. (2021) distinguish six steps in the  
65 participatory design process: identifying the objective, establishing a creative climate,  
66 generating proposals, evaluating the proposals, and synthesizing and implementing the  
67 prototype.

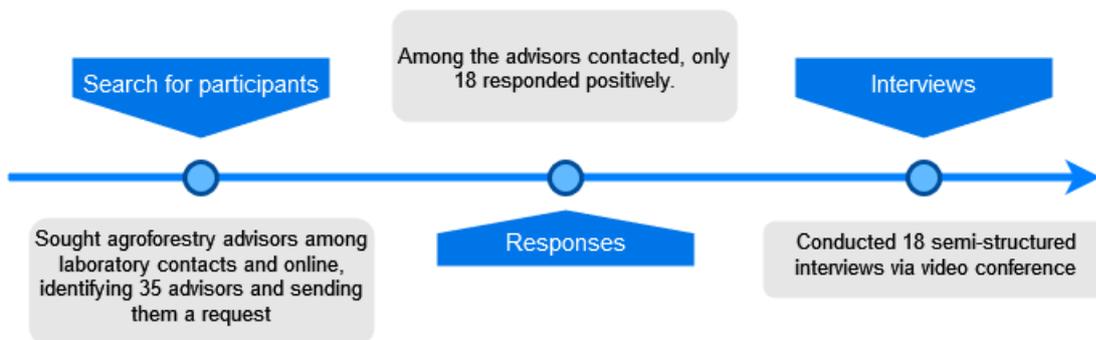
68 The design process is not well-known in the specific case of agroforestry systems. For example,  
69 none of the 39 research projects on the codesign of agroecological systems reviewed in  
70 Lacombe et al. (2018) were related to agroforestry systems, and we could only find gray  
71 literature on the topic (e.g., Chieze et al. 2021, Chambre d'agriculture de l'Hérault 2020).  
72 Moreover, most of the knowledge on agroforestry systems is produced in tropical latitudes  
73 (García de Jalón et al. 2018), which raises the question, what about agroforestry design  
74 processes in temperate latitudes?

75 In this article, we study the practices of agroforestry advisors in France when they work on the  
76 design of a new plot. This qualitative study aims to describe the current practices of agroforestry  
77 design among technical advisors in France through the methods and tools they use. We were  
78 particularly interested in the use of digital tools, as, to our knowledge, there has been no study  
79 on how digital tools are used in agroforestry design processes or the expectations agroforestry  
80 advisors have for such tools, despite the general trend for digitization in agriculture (Bellon  
81 Maurel et al. 2022).

## 82 Materials and methods

### 83 Participants

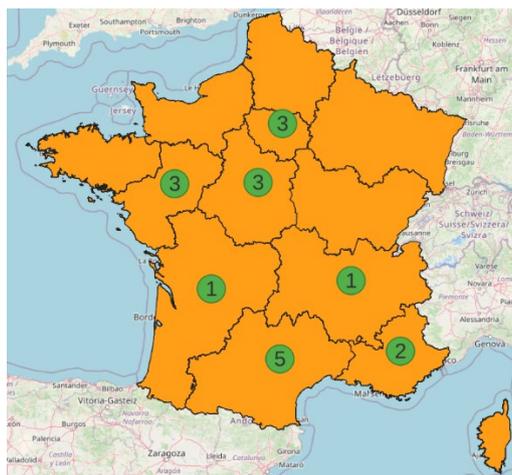
84 Our method, shown in Fig. 1, consisted of a qualitative study of advisors' practices and their  
85 use of digital tools in agroforestry design processes, conducted through semi-structured  
86 interviews by videoconference. To draw up a list of possible advisors, we identified contacts  
87 from among our team and performed an online search. We found 35 people and contacted them  
88 by email, assuming that they represented a large share of agroforestry advisors in France, as  
89 this is a new activity and relatively unknown profession. Twelve never replied, and of the 19  
90 people who agreed to answer to our questions, only 18 could be interviewed (a technical  
91 problem prevented one person from being interviewed).



92

93 *Fig. 1: Diagram of the process to identify and select advisors.*

94 The advisors on our panel were located in seven different French regions; their geographical  
95 distribution is shown in Fig. 2. In addition to being located in various areas, they work for a  
96 range of different organizations, such as private companies, public agencies and associations.  
97 Their distribution is shown in Table 3.



98

99

*Fig. 2: Geographical locations and numbers of advisors interviewed.*

100

101

102 *Table 1: Number of participants from the various types of organizations*

	<b>Association</b>	<b>Public agencies</b>	<b>Private organization</b>	<b>Research institute</b>
<b>Number of participants</b>	8	5	4	1

## 103 Method

104 To conduct the interviews, we used a semi-directive survey (cf. Annex 1). The survey was  
105 divided into three parts. First, we asked the respondents to introduce themselves. Second, we  
106 asked several questions about their current practices in terms of agroecosystem advisory  
107 services, and more specifically how they handle their design processes, the tools they use to  
108 support these processes and how they use those tools. Finally, we asked about how digital tools  
109 support their design processes with more specific questions about new visualizations created  
110 using augmented reality.

111 Interviews were recorded using Audacity and then transcribed into Word. We analyzed the data  
112 based on the cited tools and the description of their methods. For each question, the answers  
113 were recorded in an Excel table.

## 114 Results

115 First, we will focus on what “design” means for the interviewed advisors, based on the  
116 assumption that not everyone shares the same definition and that it may differ from the  
117 definition according to the state of the art. Second, we will show the different steps of the design  
118 process. Third, we will analyze the tools (digital or not) used during the process.

### 119 Definition of design in agroforestry systems in France

120 The interview results confirmed that not all agroforestry advisors shared a common definition  
121 of the term “agroforestry system design”. Participants suggested three different definitions. The  
122 most common (n = 11) answer was that the agroforestry system design is a thought process  
123 about the project. For these participants, “design” means identifying the farmer’s goals,  
124 thinking about (a)biotic interactions between all the elements present, and integrating technical  
125 and regulatory constraints. Design is a process of reflection that does not necessarily include  
126 making a decision about the plot.

127 For five other participants, the design process also includes the instantiation of different  
128 propositions with a map. For this definition, the map makes the project more concrete in terms  
129 of planting. However, the planting phase is not included in the process.

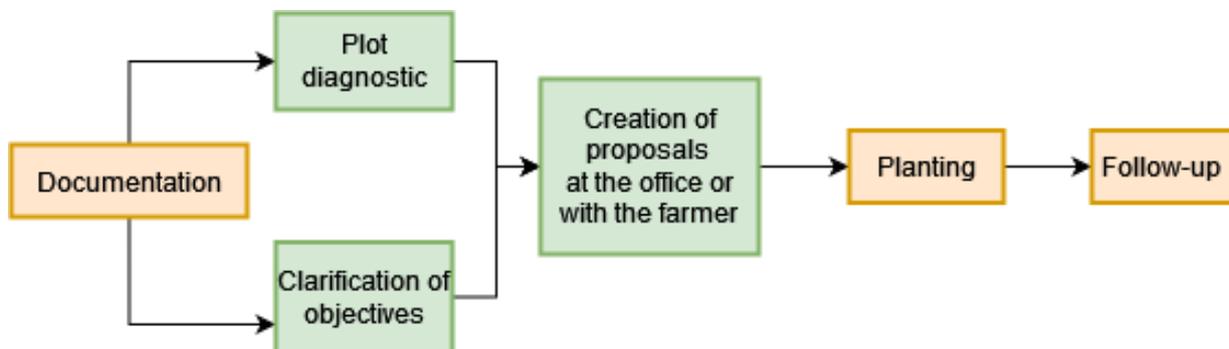
130 Meanwhile, only one participant linked design and planting. The eighteenth answer considers  
131 design as a project, without explaining whether it includes a proposal or a planting phase. It is  
132 interesting to note that the first definition indicated by participants is included in the second and  
133 the second is included in the third. Thus, for the participants, design is a thinking process in  
134 which the instantiation of the agroforestry system is not the main goal. These answers tend to

135 indicate that the advisors do not always work by considering the whole process (such as the  
136 problems related to the plantation), but only deal with the early stage of the project.

137 Whatever their definition of design, most of the surveyed advisors practice design following  
138 the optimization approach sensu Martin et al. (2013). Indeed, among our respondents, 12  
139 conducted only individual consultations, 2 conducted only participatory workshops and 4 used  
140 both types of design methods.

#### 141 Description of the different steps of agroforestry design processes in practice

142 We identified six different steps in the process of individual advisory services. Among these,  
143 only three were common to most of the participants (n = 10): **clarification of objectives**, **field**  
144 **diagnostic**, and **creation of a proposal**. The clarification of objectives and the diagnostic  
145 involve a discussion with the farmer about their goals and constraints, and the diagnostic is  
146 mainly carried out during a field visit. Developing a proposal involves creating one or more  
147 proposals while working directly with the farmer (n = 1) or alone in the office (n = 9) and then  
148 sending the proposal(s) to the farmer. A proposal is mainly a map of the agroforestry system  
149 with the spatial location of the trees, and does not always include an economic projection.  
150 Among our participants, only three advisors talked with farmers about economic projections.  
151 Some of the participants indicated a lack of tools to compute economic indicators. The last three  
152 steps are not common to all participants' methods. Some have a **documentation** step before the  
153 meeting (n = 5) where they seek out information about the plot. As shown in the definition  
154 given by participants, the **planting step** is not always included. Our respondents mentioned it  
155 four times. The last step is the **planting follow-up** (n = 4), which consists in checking changes  
156 in the plot.



157

158 *Fig. 3: Individual advisory process (optional steps in orange, mandatory steps in green).*

159 Regarding participatory design, six advisors indicated that they held workshops, but two of  
160 them indicated that they did so only rarely. The workshops included up to two steps: preparation  
161 (n = 3) and workshop (n = 6). Participants did not specify the internal steps during the  
162 workshop.

#### 163 Tools

164 We review the tools used by our respondents according to the steps of individual advisory  
165 activities and participatory design workshops. A comprehensive list of tools grouped by step is  
166 presented in Table 2.

167 In individual advisory services

168 Prior to the advisory meeting, some advisors (n = 4) carry out research on the plot based on the  
 169 Land Parcel Identification System accessed through Géoportail (n = 3), a website created by  
 170 the French government.

171 During the diagnostic step, advisors refer to guides provided by their organizations (n = 4). One  
 172 advisor explained that his digital guide is made with KoboToolbox, a private solution for data  
 173 collection. Participants use paper, pen and sketches to take notes or draw during this step  
 174 (mentioned seven times), sometimes in addition to using a digital tool (mentioned only once)..  
 175 A visual representation is needed and some advisors use sketches (n = 2), a photograph (e.g.,  
 176 aerial photographs) (n = 2), or a whiteboard (n = 1).

177 For the proposal step, we identified many digital tools but they vary depending on whether the  
 178 advisor is working at the office or at the farmer's home. When advisors are at the office, they  
 179 mainly use digital maps (n=11), generally with QGIS (n = 5) (a free and open source geographic  
 180 information system) and Géoportail (n = 4). To explain and present the results to the farmer,  
 181 these maps are sometimes reused in Microsoft PowerPoint (n = 2). When the design is drawn  
 182 on the farm, there is no recurring tool. Advisors (n = 2) work from sketches or photos because  
 183 of their ease of use. Among digital tools, we find two generic tools (Excel and LibreOffice) and  
 184 two computer-aided design (CAD) software programs (Archicad and DesignCAD). The two  
 185 generic tools are easy to use; the CAD tools are more complex but very suitable for 2D mapping  
 186 and 3D representation.

187 As mentioned previously the planting stage is rarely considered as being part of the design  
 188 process. Accordingly, the number of tools mentioned for this step is limited. Only GPS (n = 3)  
 189 was mentioned as a digital tool; other tools cited were agronomic equipment such as stakes  
 190 (n = 2), an odometer (n = 1), and twine (n = 1).

	Type of tool	Documentation	Diagnostic	Proposal creation		Plantation
				At the office	On the farm	
<b>GeoPortail</b>	Mapping tool	3		4	1	
Land registry	Mapping tool	1				
Sheet of paper	Generic tool		4			
Diagnostic guide	Agroforestry tool		2			
Ph meter	Agronomic tool		2			
Picture	Generic tool		2			
Sketch	Generic tool		2		1	
<b>KoboToolBox</b>	Generic tool		1	1		
Whiteboard	Generic tool		1			
<b>QGIS</b>	Mapping tool			5		
<b>Powerpoint</b>	Generic tool			2		
<b>Archicad</b>	Computer-aid design tool			1	1	
<b>Excel</b>	Generic tool			1	1	
<b>Internal database</b>	Agroforestry tool			1		
<b>Maps</b>	Mapping tool			1		
<b>Computer</b>	Generic tool				1	

<b>DesignCAD</b>	Computer-aid design tool		1	
Historical picture	Generic tool		1	
<b>LibreOffice/</b>				
<b>OpenOffice</b>	Generic tool		1	
<b>GPS</b>	Mapping tool			3
Stakes	Agronomic tool			3
Construction equipment	Agronomic tool			1
Odometer	Agronomic tool			1
Twine	Agronomic tool			1

191 *Table 2: Tools used in individual advisory services by 16 participants grouped by process step. Tools in bold are digital tool*  
192 *and the numbers indicate the number of times a tool was cited for that particular step.*

193 In participatory design workshops

	Type of tool	Preparation	Workshop
<b>GeoPortail</b>	Mapping tool	1	
<b>Land registry</b>	Mapping tool	1	
<b>QGIS</b>	Mapping tool	1	
Game	Agroforestry tool		3
Sketch	Generic tool		2
Physical mock-up	Agroforestry tool		2
Sheet of paper	Generic tool		1

194 *Table 3: Tools used in participatory design by 6 participants. Tools in bold are digital tool and the numbers indicate the*  
195 *number of times a tool was cited for that particular step.*

196 To prepare their workshops, advisors use different tools to visualize plots: the Land Parcel  
197 Identification System (n = 1), QGIS (n=1), or Géoportail (n=1). During the workshops, the tools  
198 they use vary. Working with a serious game as a support tool was the most frequently mentioned  
199 (n = 3). However, none of the advisors could remember the name of the tool. They also use  
200 sketches (n = 2) or a mock-up (n = 2). Sketches are a 2D representation of the agroforestry  
201 system, drawn by hand, and a mock-up is a 3D representation using different tokens to represent  
202 the positions of trees or other system elements. The figure 4 is an example of mock-up.



Figure 4: Example of mock-up created during a workshop

203

204

205

## 206 Consideration of dynamics in an agroforestry system

207 Because an agroforestry system is composed of perennial plants, it must be considered over a  
 208 time span covering several decades. We therefore asked the advisors how they considered the  
 209 temporal dynamics. Nine said they only talked about it and two drew sketches. Some of the  
 210 advisors indicated that videos (n = 1) or photos (n = 1) of other systems can be used to help  
 211 farmers imagine their agroforestry plot. One advisor talked about technical documents on tree  
 212 management (n = 1) given to the farmer where the temporal evolution is mentioned. Like the  
 213 temporal evolution, the interactions between the elements of the system are described orally  
 214 (n = 9) or with sketches (n = 3). However, the evolution of the agroforestry system depends on  
 215 interactions both within and outside the system. In general, temporal evolution and interactions  
 216 are considered in an informal way and without specific tools.

## 217 Discussion

218 In this article, we studied the current processes, methods and tools used in the design of  
 219 agroforestry systems by agroforestry advisors in France. Agroforestry consulting is not a  
 220 widespread activity and we restricted our study to France. As such, the number of people  
 221 available to respond to us was limited, which explains the small number of participants. While  
 222 our panel size was small, it was similar to that of another study (Stanek et al. 2019). Our  
 223 objective was to focus on the diversity of design practices rather than on the representativeness  
 224 of each practice. Thus, we tried to have participants from a variety of geographical locations  
 225 and employers.

## 226 The specific considerations (and challenges) of agroforestry system design

227 While people seem to be willing to develop agroforestry on their farms, actual implementation  
228 of this practice is not systematic. Management and socioeconomic issues are seen as the greatest  
229 barriers for agroforestry system development (García de Jalón et al. 2018). Another reason that  
230 came up during our study could be that advisors considered the design process as a thinking  
231 process without an obligation to include tree planting (only six participants spoke of maps or  
232 planting when they defined “agroforestry design”). However, the planting step is an important  
233 and complex task. In the United States, Atwell et al. (2009) showed that farmers are enthusiastic  
234 about adding perennial crops, but practical constraints hinder implementation.

235 Moreover, we identified several important specific considerations in the design of agroforestry  
236 systems that should be accounted for to support these processes. First, the available scientific  
237 knowledge is quite scarce, and even more so for systems in temperate latitudes. Very few  
238 models or serious games that include all the agronomical, environmental and economical  
239 dimensions of agroforestry systems have been developed compared to conventional agriculture,  
240 and they mainly stay within the confines of the research community, with limited dissemination  
241 to agroforestry advisory stakeholders (Stewart et al. 2022).

242 Second, the long temporality of perennial crops associated with annual crops adds many  
243 constraints with regard to the possibilities of system adaptation and redesign after system  
244 implementation. To anticipate, advisors use spatial representation with sketch or digital map.  
245 However, few specialized tools propose a user-friendly interface with spatial representation.  
246 The lack of visualization support is unfortunate because the literature shows that visualization  
247 is useful when modeling complex systems (Bellon Maurel et al. 2022). Indeed, visualization  
248 helps users understand complex phenomena (Burkhard et al. 2014) and make decisions (de  
249 Groot et al. 2010) when dealing with ecosystem services. In their review of agroecological  
250 design with farmers, Lacombe et al. (2018) highlighted that digital tools help predict the impact  
251 of decisions or visualize agroecological systems, but they did not include any example covering  
252 agroforestry systems.

253 Third, because agroforestry systems are geographically dispersed across a territory, and  
254 sometimes very far from each other without any identified and structured production area, it  
255 can be difficult for advisors and farmers to directly share knowledge and experiences about  
256 their local area. However, Schnebelin (2022) discussed how farmers use digital communication  
257 tools to search for information and share knowledge through social media. Fourth, models and  
258 digital tools are usually designed for one animal production or one plant species. In agroforestry  
259 system design, the association of and interactions between a highly diverse ranges of species  
260 need to be taken into account.

## 261 Discrepancies between available tools and their uses

262 Previous work has identified many complex factors contributing to the lack of implementation  
263 of agroforestry systems, including lack of time, knowledge and money. Digital tools could  
264 facilitate agroforestry design despite the fact that farmers often feel apprehensive about digital  
265 tools (Bellon Maurel et al. 2022) and tools must be adapted to different profiles among farmers  
266 (Schnebelin 2022). Moreover, there is a lack of study of the uses of digital tools in agroforestry

267 design, although such tools are considered in the literature to be useful tools to help farmers  
268 redesign their practices.

269 Our study thus reveals discrepancies between the tools available to advisors and farmers and  
270 their actual uses. The DigitAF European project try to identify available tools for agroforestry  
271 design and management (<https://digitaf.eu/tools-database/>). In September 2023, the catalogue  
272 listed 39 tools (although not all of them have the same relevance for agroforestry system  
273 design). When we compare the tools cited by participants of our study and those from the  
274 DigitAF database (see annex 2), only QGIS and Google Maps/Google Earth are common. This  
275 shows a large ignorance of advisors regarding available tools, and its corollary, a failure by the  
276 tool producers to reach one category of their potential users, namely the advisors. The lack of  
277 accessibility of scientific tools has already been mentioned by Stewart et al. (2022). In  
278 particular, our participants reported a lack of tools to compute the agroforestry system output  
279 (production, economic valuation, etc.) despite the fact that some specialized tools actually often  
280 compute environmental (light, carbon sequestration, etc.) and agronomic indicators (see annex  
281 2). Granted, tools rarely simulate all elements of an agroforestry system but Stewart et al. (2022)  
282 noted that a single tool cannot be adapted to quantify all aspects and situations, and advocated  
283 for using a combination of different tools to help in the design process. Furthermore, tools listed  
284 in the catalogue often represent crops and/or trees but rarely animals, which could limit their  
285 applicability for some agroforestry systems. Nevertheless, digital tools might prove useful for  
286 advisors and the main limitation here seems to be the low user friendliness: participants who  
287 were aware of specialized tools expressed a lack of time to learn how to use digital tools.

288 As we have seen in the previous section, visualization is very important to understand complex  
289 systems, and some advisors use spatial representations (hand-drawn or drawn using generalist  
290 tools such as powerpoint or more specialized software such as ArchiCAD or designCAD).  
291 However, most tools in the DigitAF catalogue use non-spatial visualizations such as tables and  
292 charts (line and bar charts) to display results (see annex 3). Some tools can produce 2D maps  
293 of the plot or area of interest, but few tools offer 3D visualizations of the plot. Future  
294 development of tools should therefore strive to develop or improve the user-friendliness and in  
295 particular include visual representations of the system and/or its performances. In order to go  
296 beyond the simple diagnosis of discrepancy between advisors needs and perceived lack of  
297 available tools, more research is needed to design digital tools in conjunction with farmers and  
298 advisors to create solutions adapted to farmers' and advisors' goals and constraints. Also, it is  
299 important to find the right balance between high energy-consuming technologies and an  
300 agroecological production paradigm in which drastically reducing reliance on fossil fuels is  
301 essential (Leveau et al. 2019). Digital tools for agroforestry should be seen and developed as  
302 tools for promoting collective learning between farmers, advisors and scientists on agroforestry  
303 instead of tools for diffusing "good practices" (Aggeri and Labatut 2010), which are mostly  
304 unknown or uncertain in such systems.

## 305 Conclusion

306 Agroforestry design is a complex task, and careful design of agroforestry systems is paramount  
307 for their future performances, as the fact that they include perennial plants limits their  
308 possibilities to evolve at later stages. Here, we have showed a very limited knowledge and use  
309 of digital tools to help in this process, despite the availability of tools that could help in some  
310 way. We make recommendations for the development of future digital tools, emphasizing the  
311 importance of user friendliness, communication towards agroforestry advisory stakeholders,

312 spatial representation, opportunities for collective learning, and ability to account for the  
313 interactions taking place within agroforestry systems.

#### 314 Acknowledgements

315 This work was supported by the French National Research Agency under the Investments for  
316 the Future Program, referred as ANR-16-CONV-0004.

#### 317 Statements and declarations

318

- 319 • Total number of words (including references): 4193
- 320 • Total number of words (excluding references): 3644
- 321 • Abstract number of words: 142
- 322 • Number of words in Supplementary Information: 1241
- 323

324 Bibliography

- 325 Aggeri F, Labatut J (2010) La gestion au prisme de ses instruments : Une analyse généalogique  
326 des approches théoriques fondées sur les instruments de gestion
- 327 Atwell RC, Schulte LA, Westphal LM (2009) Landscape, community, countryside: linking  
328 biophysical and social scales in US Corn Belt agricultural landscapes. *Landsc Ecol*  
329 24:791–806. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9358-4>
- 330 Auricoste CC, Bordeaux C, Guerin O, et al (2010) Accompagnement par la formation du  
331 renouvellement des compétences dans l'offre de conseil: l'exemple du conseil en  
332 agronomie pour “les systèmes de culture intégrés”
- 333 Basso B, Antle J (2020) Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nat*  
334 *Sustain* 3:254–256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>
- 335 Bellon Maurel V, Garcia F, Brossard L, et al (2022) Agriculture and Digital Technology:  
336 Getting the most out of digital technology to contribute to the transition to sustainable  
337 agriculture and food systems. <https://doi.org/10.17180/WMKB-TY56-EN>
- 338 Burkhard B, Kandziora M, Hou Y, Müller F (2014) Ecosystem service potentials, flows and  
339 demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *Landsc Online*  
340 34:1–32. <https://doi.org/10.3097/LO.201434>
- 341 Burns S, Dittmer KM, Shelton SW, Wollenberg E (2022) Exemplary features of digital tools  
342 for agroecology: A global review
- 343 Cerf M, Jeuffroy M-H, Prost L, Meynard J-M (2012) Participatory design of agricultural  
344 decision support tools: taking account of the use situations. *Agron Sustain Dev* 32:899–  
345 910. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0091-z>
- 346 Chieze B, Casagrande M, Alaphilippe A (2021) Guide pratique de Co-conception.  
347 <https://doi.org/10.15454/HZW1-AA02>
- 348 de Groot RS, Alkemade R, Braat L, et al (2010) Challenges in integrating the concept of  
349 ecosystem services and values in landscape planning, management and decision  
350 making. *Ecol Complex* 7:260–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
- 351 García de Jalón S, Burgess PJ, Graves A, et al (2018) How is agroforestry perceived in Europe?  
352 An assessment of positive and negative aspects by stakeholders. *Agrofor Syst* 92:829–  
353 848. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0116-3>
- 354 Gassner A., Dobie P. (2022) Principles of agroforestry desing. In: *Agroforestry: A Primer.*  
355 *World Agroforestry*
- 356 Lacombe C, Couix N, Hazard L (2018) Designing agroecological farming systems with  
357 farmers: A review. *Agric Syst* 165:208–220. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014>

- 358 Leveau L, Bénéol A, Cahier J-P, et al (2019) Information and Communication Technology (ICT)  
359 and the Agroecological Transition. pp 263–287
- 360 Marion TJ, Fixson SK (2021) The Transformation of the Innovation Process: How Digital Tools  
361 are Changing Work, Collaboration, and Organizations in New Product Development\*.  
362 *J Prod Innov Manag* 38:192–215. <https://doi.org/10.1111/jpim.12547>
- 363 Martin G, Martin-Clouaire R, Duru M (2013) Farming system design to feed the changing  
364 world. A review. *Agron Sustain Dev* 33:131–149. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0075-4>  
365
- 366 Schnebelin É (2022) Linking the diversity of ecologisation models to farmers’ digital use  
367 profiles. *Ecol Econ* 196:107422. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107422>
- 368 Spinuzzi C (2005) The Methodology of Participatory Design. *Tech Commun* 52:163–174
- 369 Stanek EC, Lovell ST, Reisner A (2019) Designing multifunctional woody polycultures  
370 according to landowner preferences in Central Illinois. *Agrofor Syst* 93:2293–2311.  
371 <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00350-2>
- 372 Stewart SB, O’Grady AP, Mendham DS, et al (2022) Digital Tools for Quantifying the Natural  
373 Capital Benefits of Agroforestry: A Review. *Land* 11:1668.  
374 <https://doi.org/10.3390/land11101668>
- 375 Udawatta RP, Gantzer CJ (2022) Soil and water ecosystem services of agroforestry. *J Soil*  
376 *Water Conserv* 77:5A-11A. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.1028A>
- 377 Udawatta RP, Jose S (eds) (2021) *Agroforestry and Ecosystem Services*. Springer International  
378 Publishing, Cham
- 379
- 380

381 **Annex**

382 **Annex 1: Questionnaire translated in English (only the results of part II are presented in**  
383 **this article)**

384 **I. I. Identification of the respondent**

385 Can you tell me about your background?

386 - Surname & first name(s)

387 - Job title

388 - Professional experience

389 **II. Description of current methods**

390

391 1. In In your practice, do you work with farmers or others who want to develop or are  
392 already operating agroforestry systems? Can you tell me what you work on, how and  
393 with whom?

394

395 2. What type of assistance do farmers seek from you for their projects?

396

397 3. What types of agroforestry systems have you worked on? Can you tell me more about  
398 them?

399

400 4. In your opinion, what are farmers' main motivations for agroforestry?

401

402 5. Does agroforestry systems "design" mean anything to you? If so, what?

403

404 6. Do farmers face difficulties in designing and managing their systems? If so, what kind  
405 of difficulties do they face?

406

407 7. Do you conduct these design activities through workshops or other formats?

408

409 8. Which actors are taking part or have taken part in this design process? What is the role  
410 of each actor in these workshops? What about your role?

411

412 9. Do you use dedicated methods or tools to support people who want to develop these  
413 systems?

414

415 10. What agroforestry design steps did you follow during your design sessions? What is the  
416 purpose of each step? What is your role at each stage?

417

418 11. What are the outputs of the design process? (Systems? Choice criteria? Decision support  
419 system? Learning? etc....)

420

- 421 12. Do you use tools (media) during these design processes, both face-to-face and in  
422 workshops? By tools, I mean models, stakes, paper, tokens, software, sheets etc. ...  
423
- 424 13. Do you specifically use mock-ups? If so, in what form? How do you build them?  
425
- 426 14. In these processes, do you manage to explore new things with farmers? If so, every time  
427 or rarely? How do you get out of the usual systems?  
428
- 429 15. Is there a final system selection stage? If so, how do you go about selecting the final  
430 design system? (Decision criteria, voting, etc.). Are there often widely divergent  
431 opinions in the process and in the final choice? If so, on what and why? How are these  
432 divergent opinions overcome?  
433
- 434 16. Do you think there is a gap to be filled or a weakness to be strengthened in the methods  
435 used?  
436
- 437 17. Are there particular moments in the design process when a visualization of the system  
438 is required? Are they visualizations in time? in space? How does each participant  
439 manage to communicate the various aspects, whether related to the plot or to ecosystem  
440 services, for the other members of the group?  
441
- 442 18. Do you represented the spatial aspect of the plot? If so, in what form and what role does  
443 this spatial aspect play in the design?  
444
- 445 19. Do you use digital media? If so, how do you manage to record the result?  
446
- 447 20. Are digital tools used to design agroforestry systems?  
448 a. If so, which tools? What are their roles and when are they used? Why did you  
449 opt for these tools?  
450 b. If not, why not?  
451
- 452 21. Are interactions between trees and crops represented? If so, how are they represented?  
453
- 454 22. How is the temporal evolution of the plot taken into account? Over what time frame ?  
455
- 456 23. Are there any other difficulties you've had to face apart from those already mentioned?  
457 If so, what were they and how did you go about overcoming them?  
458
- 459 **III. Imagining new methods**
- 460 1. Do you think these design processes could be improved? If so, how?

- 461 2. Would you need new tools to help you support these processes and the farmers who  
 462 have these projects? If so, at which design phase? What will these new tools be used  
 463 for?  
 464
- 465 3. Perhaps you don't have any tool ideas in mind, but could you tell me more specifically  
 466 what you would need to help represent these systems?  
 467 a. In time  
 468 b. In space  
 469
- 470 4. In your opinion, what are the most important features for a design support tool?  
 471 a. A tool that is not very complex, not very precise, but easy to use and flexible?  
 472 b. Or rather a very precise tool to meet specific expectations?  
 473
- 474 5. Does talking about "augmented reality" mean anything to you? If so, what?  
 475
- 476 6. Do you think augmented reality could be useful in designing agroforestry systems? If  
 477 so, what kind of reality do you think it should represent? Which augmented reality  
 478 medium do you find most practical? By support, I mean, for example, the phone, tablet  
 479 and glasses...  
 480
- 481 7. Would you like to discuss other aspects of visualization? Of design?  
 482
- 483 8. Do you know any design professionals who would be willing to help us with the  
 484 questionnaire?  
 485

486 [Annex 2: List of agroforestry software programs from the DigitAF database with their](#)  
 487 [modeling characteristics](#)

Name	Crop	Tree	Animal	Abiotic	Biotic	Agronomic	Economic	Technical	Environment	Social
<a href="#">AFOLU Carbon Calculator</a>		X		X					X	
<a href="#">Agrecalc</a>				X					X	
<a href="#">AgroforestAR-Indoor</a>										
<a href="#">AgroforestryX</a>		X				X				
<a href="#">APSIM Agroforestry</a>	X	X		X		X			X	

<a href="#">ARCHIMED</a>		X		X		X			X	
<a href="#">Biodiversity Metric</a>					X				X	
CARAT		X							X	
<a href="#">CO2FIX</a>						X	X		X	
<a href="#">DEXI-AF</a>							X		X	X
<a href="#">DynACof</a>	X	X		X		X				
<a href="#">EcoAF</a>		X		X						
<a href="#">Ecological Site Classification</a>			X				X		X	
<a href="#">Farm Carbon Calculator</a>				X					X	
<a href="#">Farm Forestry Toolbox</a>		X				X			X	
<a href="#">Farm-SAFE</a>	X	X					X			
<a href="#">FarmTree</a>	X	X				X	X		X	X
<a href="#">Forage-SAFE</a>	X	X	X	X		X	X		X	
<a href="#">Google Earth Pro</a>										
<a href="#">Hi-sAFe</a>	X	X		X		X			X	
<a href="https://agroforestry.ugent.be/">https://agroforestry.ugent.be/</a>		X				X				
<a href="#">InVEST</a>				X		X			X	X
<a href="#">i-Tree Eco</a>		X		X			X		X	
<a href="#">JRC Carbon Calculator</a>				X					X	
<a href="#">LUCI</a>				X		X			X	
<a href="#">Maespa</a>		X		X	X					
<a href="#">META-AfS</a>	X	X		X		X	X		X	
<a href="#">Overyield</a>		X				X	X		X	
<a href="#">PlantShoe</a>		X		X		X		X		
<a href="#">QGIS</a>										
<a href="#">RegenWorks Pro</a>	X	X	X	X		X	X	X	X	
SCUAF										
<a href="#">Shade Tree Advice</a>	X	X				X			X	

<a href="#">ShadeMotion</a>		X		X		X			
<a href="#">SoIVES</a>									X
<a href="#">VRD Agroforestry app</a>		X						X	
<a href="#">WaNuLCAS</a>	X	X		X					
<a href="#">Woodland Carbon Code dataset</a>			X					X	
<a href="#">Yield-SAFE</a>	X	X		X		X		X	

488

489 Annex 3: List of agroforestry software programs from DigitAF with their method of  
490 displaying information

Name	Visualization of one criterion	Multi-criteria assessment	2D/3D scene	Type
<a href="#">AFOLU Carbon Calculator</a>		Time series		Web app
<a href="#">Agrecalc</a>				
<a href="#">AgroforestAR-Indoor</a>				Mobile application
<a href="#">AgroforestryX</a>			2D view	Web app
<a href="#">APSIM Agroforestry</a>		Time series		Software
<a href="#">ARCHIMED</a>			3D plant	Software
<a href="#">Biodiversity Metric</a>	Table			Spreadsheet
CARAT			2D	
<a href="#">CO2FIX</a>	Table	Time series, Line chart		Software
<a href="#">DEXI-AF</a>	Bar chart	Radar plot		Software
<a href="#">DynACof</a>	Table	Line chart		Software
<a href="#">EcoAF</a>			2D and 3D	Software
<a href="#">Ecological Site Classification</a>	Table			Web app

<a href="#">Farm Carbon Calculator</a>	Pie chart, bar chart, table			Web app
<a href="#">Farm Forestry Toolbox</a>				Software
<a href="#">Farm-SAFE</a>	Table	X		Spreadsheet
<a href="#">FarmTree</a>	Bar chart	Line chart		Web app
<a href="#">Forage-SAFE</a>		Graph		Spreadsheet
<a href="#">Google Earth Pro</a>			2D map	Web app
<a href="#">Hi-sAFe</a>				Software
<a href="https://agroforestry.ugent.be/">https://agroforestry.ugent.be/</a>			3D scene	Web app
<a href="#">InVEST</a>	Table	Graph	With GIS software	Software
<a href="#">i-Tree Eco</a>		Graph		Software
<a href="#">JRC Carbon Calculator</a>	Table			Spreadsheet
<a href="#">LUCI</a>				Software
<a href="#">Maespa</a>			3D trees	Software
<a href="#">META-AfS</a>	Bar chart	X	QGIS view	Software
<a href="#">Overyield</a>		Time series	2D aerial view	Software
<a href="#">PlantShoe</a>			2D aerial view	Web app
<a href="#">QGIS</a>			2D map	Software
<a href="#">RegenWorks Pro</a>			2D realistic & schematic map	Software
SCUAF				
<a href="#">Shade Tree Advice</a>		Bar chart	World map	Web app
<a href="#">ShadeMotion</a>		X	3D plot	Software + web app
<a href="#">SoLVES</a>		Graph	2D map with color scale	Software
<a href="#">VRD Agroforestry app</a>	Color scale		2D map	Smartphone app
<a href="#">WaNuLCAS</a>	Table	Line chart		Spreadsheet

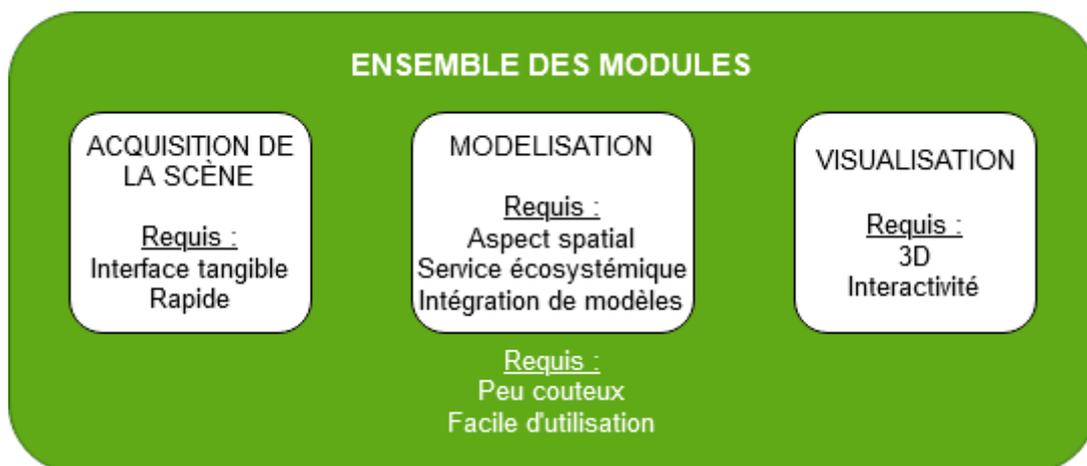
### 3 Bilan

Dans cette publication et grâce aux interviews, un cahier des charges a été créé. Il décrit les fonctionnalités que doit rassembler un outil pour aider les conseillers. Cet outil doit être facile d'utilisation et transportable car la conception se réalise chez l'agriculteur pour le conseil individuel ou en salle polyvalente pour les ateliers. De plus, il doit permettre de voir immédiatement les propositions faites pendant les ateliers. L'interactivité est un point très important de la conception participative et Juřík et al. (2020) ont montré que la visualisation 3D fonctionnait très bien avec les processus interactifs. Donc, un outil alliant interactivité et visualisation 3D avec la maquettes tangible est un autre point très prometteur. En plus, si on pouvait utiliser les marqueurs physiques existants, l'outil s'insérerait facilement dans les processus de conception. De plus, il est nécessaire de pouvoir importer dans l'outil des simulations de l'évolution de la parcelle ou de ses services. Ce n'est pas possible avec les outils existants car la croissance du système ou des interactions entre les éléments ne sont pas représentés dans les maquettes.

On peut donc ainsi constituer un cahier des charges organisé selon trois grandes fonctionnalités :

- une fonction d'acquisition et d'interprétation de maquettes employées dans les ateliers de conception,
- une fonction de modélisation du système offrant une représentation numérique de la structure du système mais aussi des services,
- une fonction de visualisation interactive permettant la projection du système dans le temps et dans l'espace.

Ces fonctionnalités doivent être ergonomiques et économiquement accessibles. La figure 5 schématise ce cahier des charges.



**FIGURE 5** Schéma récapitulant les différentes fonctionnalités dans le cahier des charges





---

# Troisième partie

## Modélisation

---





# Modélisation

Une conclusion du chapitre précédent est le besoin de modéliser un système agroforestier permettant de représenter spatialement le système ainsi que les services écosystémiques qu'il produit. De plus, ces éléments doivent pouvoir être représentés à différentes étapes de croissance du système. Dans ce chapitre, je propose d'introduire un concept de représentation générique informatique appelée carte combinatoire.

## Plan du chapitre

1. Motivation
2. Modélisation des systèmes agroforestiers sous forme de cartes combinatoires



# 1 Motivation

L'un de mes premiers questionnements a été de savoir comment sont modélisés des services écosystémiques et des parcelles agroforestières dans les modèles existants. Cette question a permis de mettre en évidence une différence de sémantique sur le mot "modèle" entre les domaines de l'agronomie et de l'informatique. En effet, en informatique, la modélisation est une représentation simplifiée d'un objet ou d'un phénomène. En agronomie, cette définition est connue mais l'usage est d'utiliser le mot modèle pour parler, de façon implicite, uniquement des méthodes qui permettent de simuler. Par conséquent, la définition utilisée en pratique par les agronomes est plus restrictive que celle des informaticiens. Dans mon travail, j'ai gardé la première définition, la plus générale, pour prendre en compte les représentations des systèmes agroforestiers et des services écosystémiques.

D'après le cahier des charges établi à partir des interviews des conseillers agroforestiers, la modélisation des systèmes agroforestiers doit permettre de modéliser l'aspect spatial et temporel du système ainsi que les services écosystémiques. Comme définie dans le chapitre ??, le motif agroforestier regroupe l'ensemble de éléments produisant des services écosystémiques. Il faut donc une modélisation permettant d'au moins représenter ce motif afin de contenir tous les éléments fonctionnels et structuraux du système. De plus, comme l'expliquent GAUDIO et al. (2022), pour modéliser les système multi-espèces, il faut pouvoir prendre en compte les éléments à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Il faut donc concevoir des systèmes composés de plusieurs modèles et non d'un seul modèle global. J'ai donc cherché un modèle permettant une représentation hiérarchique du système, et pouvant se coupler avec d'autres.

## 2 Modélisation des systèmes agroforestiers sous forme de cartes combinatoires

Le modèle développé durant ma thèse repose sur les cartes combinatoires. Cette structure est un graphe particulier. Le choix d'utiliser des graphes a été inspiré de travaux à l'échelle du paysage où les graphes sont utilisés pour comparer et identifier des lieux présents dans une zone d'étude (CANTWELL et FORMAN 1993) ainsi que pour décrire l'évolution du paysage (DEGENNE et LO SEEN 2016 ; GAUCHEREL et al. 2012). Le détail de cette modélisation est présenté dans un article accepté dans Plant Phenomics. L'introduction explique l'apport de ce modèle par rapport aux modèles existants. La partie matériels et méthodes introduit les notions nécessaires pour comprendre les cartes combinatoires. La partie résultats explique l'apport des cartes combinatoires dans la modélisation des systèmes agroforestiers et l'apport du graph dual pour la modélisation de services écosystémiques ainsi que les perspectives de l'utilisation des algorithmes de recherche de motif issus de la théorie des graphes.



1 **FRONT MATTER**

2  
3 **Full title: Combinatorial maps, a new framework to model agroforestry systems**

4 **Short title: Spatial graphs for agroforestry systems**

5  
6 **Authors**

7 Laëtitia Lemiere<sup>\*1,2</sup>, Marc Jaeger<sup>2</sup>, Marie Gosme<sup>1</sup>, Gérard Subsol<sup>3</sup>

8 **Affiliations**

9 <sup>1</sup> ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro,  
10 Montpellier, France.

11 <sup>2</sup> CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, France

12 AMAP, Univ Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France.

13 <sup>3</sup> Research-Team ICAR, LIRMM, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France.

14 \* Address correspondence to: [laetitia.lemiere@inrae.fr](mailto:laetitia.lemiere@inrae.fr)

15 **Abstract**

16 Agroforestry systems are complex due to the diverse interactions between their elements,  
17 and they develop over several decades. Existing numerical models focus either on the  
18 structure or on the functions of agroforestry systems. However, these both aspects are  
19 necessary, as function influences structure and vice versa. Here, we present a representation  
20 of agroforestry systems based on combinatorial maps (which are a type of multidimensional  
21 graphs), that allows conceptualizing the structure-function relationship at the  
22 agroecosystem scale. We show that such a model can represent the structure of agroforestry  
23 systems at multiple scales and its evolution through time. We propose an implementation  
24 of this framework, coded in Python, which is available on GitHub. In the future, this  
25 framework could be coupled with knowledge based or with biophysical simulation models  
26 to predict the production of ecosystem services. The code can also be integrated into  
27 visualization tools. Combinatorial maps seem promising to provide a unifying and generic  
28 description of agroforestry systems, including their structure, functions and dynamics, with  
29 the possibility to translate to and from other representations.

30  
31 **MAIN TEXT**

32  
33 **1. Introduction**

34 **1.1. Agroforestry**

35 Agroforestry systems (AFS) are composed of a mixture of trees, crops, and/or animals [1]  
36 providing many ecosystem services beneficial to humans [2]. These systems are complex  
37 due to the high level of biodiversity that they contain (both planted and spontaneous), and  
38 the interactions between the different species. Since interactions between species act locally,  
39 agroforestry systems are characterized by a high level of spatial heterogeneity and the  
40 spatial arrangement of the components of the system is a crucial driver of its functioning

1 [3]. Therefore, the spatial design of these systems determines the production of ecosystem  
2 services [4]. Furthermore, agroforestry systems develop over a long period due to the slow  
3 growth of trees. Agroforestry systems evolve through time due to

- 4 • internal dynamic processes (tree growth is an example, which results in increased  
5 shade)
- 6 • farmers' management, which can have an impact on the system's structure (for  
7 instance tree thinning).

8 Some choices made at plantation time (such as tree row distance and orientation) have  
9 consequences over the whole lifetime of the system. Conversely, some aspects of the  
10 management of these systems must be adaptive over time. In fact, as the trees grow and the  
11 shade becomes more important, the cultivated species and management change.

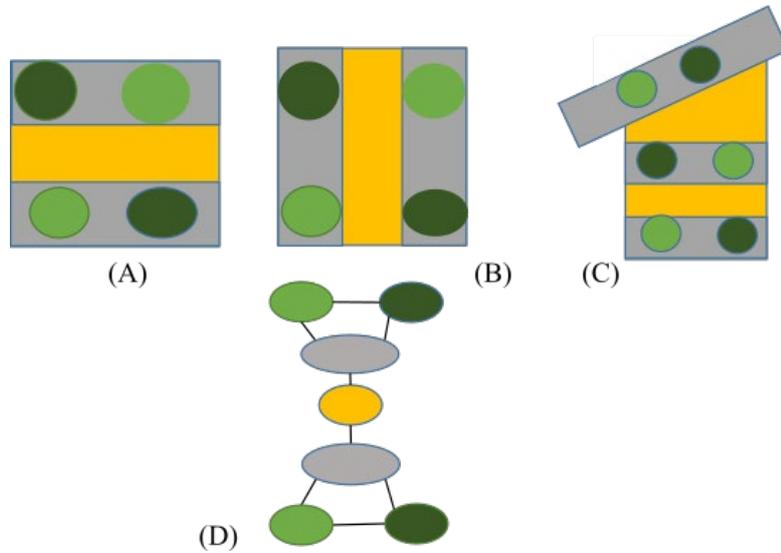
## 12 **1.2. Models: from crop models to FSPM**

13 Due to the diversity of possible combinations between tree, crop, animal species, and the  
14 associated management, and to the long development time of agroforestry systems,  
15 experimental evidence is scarce to understand the functioning, measure the performance  
16 and optimize the design of agroforestry systems. Simulation models would be of great help  
17 in this respect. Plant modelling has a long history, starting in the 60's ([5], [6]) aiming to  
18 predict crop yields in relation to environmental conditions. Such models, designed at the  
19 crop level (and thus so-called crop models), became mature in the late 90's [7] and have  
20 since been used to evaluate cropping systems, including systems based on diversified  
21 rotations [8]. However, these models fail to explain within field variability, cannot be  
22 employed when secondary growth must be considered (trees), and, are not adapted to crop  
23 mixtures beyond simple two-species mixtures ([9], [10]).

24 In these cases, structural aspects should be considered, downscaling the model at the  
25 individual plant level. This can be effective using Functional-Structural Plant Models  
26 (FSPM), whose development started in the late 90s [11]. FSPM rely on the strong mutual  
27 links between the plant architecture (related to structure) and the ecophysiological processes  
28 (related to functions, and specifically production) [12]. FSPM are often used to model and  
29 visualize plants [13], but also to predict the production of ecosystem services, either one by  
30 one [14] or several at a time [15]. FSPM can be used as a decision support tool [16] to help  
31 farmers make decisions to optimize crop performance. However, FSPM often face the  
32 drawback of complexity in their calibration and validation, thus limiting their use in  
33 agroecology, which relies on species diversification. Subject to specific assumptions, it is  
34 possible to use an approach based on cohorts to overcome this limitation, as was done in the  
35 Greenlab model [17], thus bridging the scale from individual plant to crop scale [18].  
36 Nevertheless, they fail to give a conceptual modeling framework for agroforestry systems,  
37 since traditionally they were not able to address simultaneously different species. Recently,  
38 they have been used to optimize mixtures of several plants [19], but these works remain  
39 limited, in scope and genericity. Agroforestry models have rarely used a FSPM approach  
40 [20]. When they did, they focused on individual plant architecture (for instance to define  
41 tree structural plasticity from local environmental conditions [21], [22]) and not the spatial  
42 organization of the system itself.

## 43 **1.3. Limits of existing models of the structure of agroforestry systems**

1



2

3

*Fig 1: Three different agroforestry plots (A, B, C) represented by the same graph (D).*

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

Existing agroforestry models (both simulation models and models aiming at visualization) have used a variety of ways to represent the structure of agroforestry systems. In the most abstract representations, tree positions are not explicitly represented, but only the topology, i.e. the adjacency relationships between the elements composing the agroforestry system. This results in graph representations of agroforestry systems [23]. Graphs are built from nodes, representing the elements composing the system, and directional edges linking them, representing node relations such as adjacency. Graphs offer a structural description of composition and adjacency, as presented in Figure 1, and can also be mobilized to represent the dynamics of the system. However, contrary to FSPM, they do not emphasize nor take advantage of the strong link between structure and function. An in-between could be to associate interactions between elements (including ecosystem services) to edges between the nodes. Then, simple algorithms can be applied to model the evolution of the plot [24] or the ecosystem services [25]. However, this representation is not sufficient to explicit the spatial arrangement of an agroforestry system. For example, Figures 1 A, B and C show that three different plots may share the underlying graph (Figure 1D).

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

One possible solution to this problem is to explicit the distances between the elements of the system and their relative positions, for a representative part of the system, i.e., to identify the Ecosystem Services Spatial Unit. The ESSU is the smallest spatial unit encompassing all the interacting species and other functional components that together provide a specified set of ecosystem services in a farming landscape [26]. This is the option chosen in WaNulCas [27] and Hi-sAfe [28]. They simulate the functioning of a simple pattern (3 trees maximum for WaNulCas; any number, but the smallest possible for computational costs, for Hi-sAfe), which can then be reproduced by defining periodic boundary conditions to simulate an infinite space and avoid edge effects. Then the spatial heterogeneity of agroforestry systems is modeled thanks to a discretization of space. WaNulCas operates in 2D, using the distances from the tree locations and the depth in soil, while Hi-sAFe operates in 3D, allowing representation of soil layers as well as distance and orientation to the tree.

1 The advantage of these methods is that they reduce the computation cost: instead of  
2 simulating the whole plot, only the pattern is simulated. The disadvantage is that these  
3 models cannot represent constraints at the plot level, such as the width of the headlands to  
4 allow farm machinery to turn.

5 Other agroforestry models focus only on the structure and do not have the capacity to  
6 represent the functioning. This is the case with EcoAf [29], or RegenWorks [30] which use  
7 a rule-based description. In these cases, the agroforestry system is described by the  
8 combination of a pattern (e.g. repetition of lines with a certain orientation and distance  
9 between lines, with a succession of trees along the lines) and rules (e.g., "the first line must  
10 be at least 20 m from the plot boundary" to allow for machine maneuvers, "no line should  
11 be shorter than 10 m" to avoid having trees in the corners of the plot). The pattern and rules  
12 can then be applied to any georeferenced plot to generate an instantiation of an agroforestry  
13 system, obtaining the geographical coordinates of trees to be used when planting in the field.  
14 The advantage of this method is that it takes into account some of the constraints at the plot  
15 level, but it does not simulate the links between structure and function. For example, in  
16 EcoAF, tree growth is simulated by simple look-up tables that predict the size of a tree as a  
17 function of its age, but it does not take into account its environment. Furthermore, rule-  
18 based models are not able to represent irregular systems such as scattered trees found in  
19 traditional agroforestry systems, or even in modern agroforestry systems, when tree  
20 mortality creates more or less random gaps in the initial pattern after a few years.

21 To overcome this problem and to represent accurately an agroforestry system, models can  
22 use the coordinates of each individual tree, either with local coordinates [31] or with a  
23 geographic coordinate system. To date, there are few examples employing formal  
24 approaches from the GIS world to agroforestry system design. A formalism can be derived  
25 from a dedicated language as proposed by Degenne *et al.* [32] and can also be implemented  
26 as graphs in the generic Ocelet platform [33]. This way of representing agroforestry systems  
27 is close to field reality, but simulating the functioning of agroforestry systems can become  
28 very expensive in terms of computational time in the case of large plots. Moreover, models  
29 using this representation of space often rely on basic relationships to simulate functions as  
30 a linear function between tree size and age as shown in Agroforestryx [34], or ShadeMotion  
31 [35].

32 Table 1 compares these different spatial representations in terms of complexity, spatial, and  
33 time criteria. Not surprisingly, there is a trade-off between realism in the spatial  
34 representation of agroforestry system and versatility, i.e., the ability to be applied to  
35 different plots/AFS with minimal additional effort. There seems to be an opposition between  
36 those focusing on the structure of agroforestry systems (GIS-based, rule-based) and the ones  
37 focusing on the functioning of agroforestry systems: realistic representations lack many  
38 features that would be desirable for the simulation of agronomic performance and ecosystem  
39 service production, such as the representation of interactions between species. Technical  
40 performances are also considered such as computation costs. Another lack is the interaction  
41 with the outside world: in spatial unit-based representations, the outside world does not exist  
42 because the pattern is replicated indefinitely. In rule-based representations, the outside is  
43 just represented by constraints linked with the shape of the plot, and in GIS-based  
44 representations, the outside world is not explicitly represented or not considered.

1 Finally, agroforestry systems and the ecosystem services they provide evolve over the  
 2 seasons and years. Thus, it is important that the spatial representation of agroforestry  
 3 systems allows representing the evolution of the structure through time, a feature about  
 4 which the existing representations of agroforestry systems are not very good at.

5 *Table 1: Qualitative comparison of different types of spatial representations of agroforestry*  
 6 *systems.*

Comparison criteria	Model of AFS			
	Graph	Spatial unit	Rules-based	GIS
Ability to simulate different plots/AFS with small extra effort	++	++	+	-
Efficiency to reduce computation costs necessary to simulate ecosystem services	++	+	-	-
Ability to simulate local interactions between species	++	+	-	-
Ability to take into account constraints at plot scale	-	-	++	+
Ability to represent understory vegetation strips	-	-	+	-
Ability to represent irregular-shaped AFS	+	-	-	++
Realism of the spatial representation	-	-	+	++
Interaction of the system with outside	+	-	-	-
Ability to project in time	+	+	+	-
Example	[23]	Hi-Safe [28]	EcoAf [29]	[31]

7  
 8 As a summary, the use of graph shows wider benefits from other approaches, and our  
 9 hypothesis was that the identified drawbacks can be overcome:

- 10 - the ability to take into account constraints at plot scale may be solved using a  
 11 hierarchical multiscale graph definition able to consider the system as a whole in  
 12 interaction with the outside
- 13 - the ability to represent understory vegetation strip can be assessed using a classical  
 14 multilayer approach, or even better, using a 3-dimensional graph approach  
 15 representing systems components as solids and thus offering surfaces adjacency as  
 16 exchange areas

1 - the realism of the representation can be assessed by refining the geometry of the  
2 components, not only on the nodes, but also on the edges, allowing representations of  
3 fluxes and interfaces

4 Among the various graphs class formalisms, Combinatorial maps [40] answer to these  
5 requirements.  
6

7 In this paper, we introduce a new framework, inspired by FSPM approaches, to model  
8 agroforestry systems. This framework combines the versatility and abstracting power of  
9 combinatorial maps, with the spatial realism of coordinate-based representations.  
10

## 11 **2. Materials and Methods**

12 In this section, we first introduce the combinatorial maps concepts, requested to describe  
13 the systems, and then introduced the combinatorial map dual, which is of high interest to  
14 model exchanges between the system components.

15 Combinatorial maps ([36], [37]) are a theoretical framework that owes its origin to the  
16 modeling of the evolution of surfaces, applied to leaf growth simulation [38] and which has  
17 been mainly exploited in CAD and CAD/CAM, mostly for efficient adaptive meshing. We  
18 propose this framework to explore to model agroforestry systems. The main motivation for  
19 choosing this framework is to rely on strong theoretical background based on graph theory.  
20 A graph is composed of nodes linked by directional edges. Its background ensures the  
21 possibility to add or delete nodes, which entails changes to the edges and faces, in a clean  
22 and robust manner, mechanically impacting the attributes. This is important for agroforestry  
23 systems' representation, to represent both the dynamics of ecosystem provision within the  
24 year, and the dynamics of the system's structure across years.

### 25 **2.1. Combinatorial maps**

26 A combinatorial map of dimension  $n$  can be seen as a generalization of a graph defined in  
27  $n$  dimensions adapted to model spatial subdivisions. Here, we will work in 2 dimensions.

28 A combinatorial map of dimension 2 is composed of a limited set of darts (Figure 2A) and  
29 two operators defined on the set of darts. The following paragraphs explain in more detail  
30 the terms and operations relevant to combinatorial maps.

31 A dart links two nodes. It is oriented. Also, a dart can carry the relationship between the  
32 origin of the dart and its end (Figure 2A).

33 The nodes, usually connected to spatial points, are defined as a starting (or ending) point of  
34 the darts. In our application, a node will represent a plant, a tree, or a tight group of plant.  
35 The mathematical definition will be given below because we need to define others elements  
36 before.

37 The faces are the areas surrounded by a closed list of consecutive darts (therefore, dart  
38 orientation matters).

39 The consecutive darts are defined with the permutation operator  $\beta_1$ . It finds around the  
40 starting node of a given dart the dart that has the smallest angle (given an orientation  
41 convention). For example, in Figure 2C,  $\beta_1(1)$  gives 2.

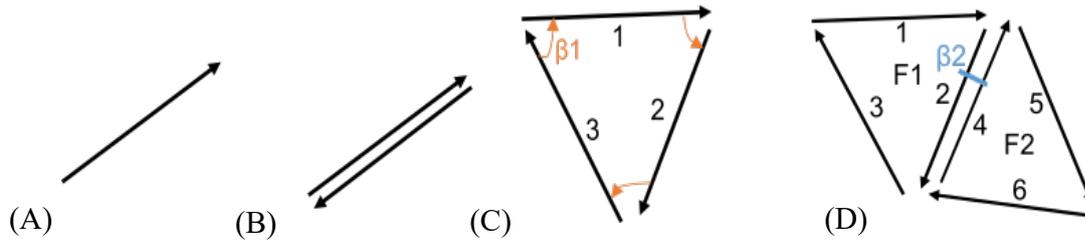


Fig 2: Examples of combinatorial map objects. (A) a dart (B) an edge (C) a face (D) 2 faces (F1 and F2) with  $\beta_2$ , which sets the adjacency between F1 and F2 and allows to move from one face to another.

To create a conventional edge which is not oriented (Figure 2B), we need to have two darts linking the same edges but of opposite directions. To do this, we need to define an involution, written  $\beta_2$ . It outputs the dart opposite a given dart. Therefore, for any dart  $d$ ,  $\beta_2(\beta_2(d)) = d$  and in Figure 2D,  $\beta_2(2) = 4$  (and  $\beta_2(4) = 2$ ).

A compound sequence of permutation(s) and involution(s) which allows one to traverse the map or a portion of the map from a specific dart  $d$ , defines an orbit of  $d$ . Orbits therefore define generic functions as a list of  $k$  composed operators. Mathematically, an orbit of a given dart  $d$  can be written as  $(\beta_{i1} \circ \beta_{i2} \circ \dots \circ \beta_{ik})(d)$ , with  $i_k=1$  or  $2$ . For example, in Figure 2C, the orbit drawing a face from dart 2, is the sequence of repeated  $\beta_1$  permutation, noted  $\beta_1^*$ , until reaching dart 2; the sequence is thus  $2, \beta_1(2) = 3, \beta_1(3) = 1, \beta_1(1) = 2$  and its compound function is  $(\beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1)$ . This specific orbit, applying  $\beta_1$  until reaching the initial dart  $d$ , allows us obtaining the face issued from dart  $d$ ; we call it “orbitFace”. This function can then also be used in orbit sequences to visit several faces, and in particular the full map. For example, a way to explore the full map drawn in Figure 2D from starting from dart 2, can be the sequence: orbitFace(2), then  $\beta_2(2)$  and orbitFace(4). It may also be written as orbitFace( $\beta_2$ (orbitFace(2))).

Another useful orbit is the function that allows exploring all darts from a given node. (In fact, in combinatorial map, the node definition raises from this orbit: a node referred from dart  $d$  is defined by the successive  $\beta_1$  and  $\beta_2$  compound iterations applied on  $d$ ). We call this function, “orbitNode”, mathematically noted  $(\beta_1 \circ \beta_2)^*$ . In Figure 2D, starting from dart 1, orbitNode(1) is node B defined by  $1, \beta_1(1) = 2, \beta_2(2) = 4, \beta_1(4) = 5; \beta_2(5)$  is empty.

On this example, we see that some dart (such as dart 5) may have no image from the involution: this is the case for each dart lying on the external border of the system. We found it more explicit to constraint the combinatorial map to explicit this external border. Indeed, we consider that the adjacency of an element with the outside of the system is of interest in the case of agroforestry systems. On Figure 2D, this leads to define the outside face introducing 4 new darts: 7, 8, 9, 10 (see Figure 3). Mathematically, for each dart  $d$ ,  $\beta_2(d)$  belongs to the set of darts of the map, and the orbitNode function applies on any dart until reaching it again. With this constraint, orbitFace and orbitNode define a cyclic operator.

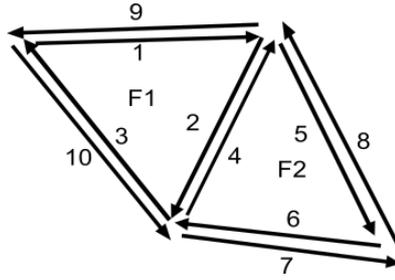


Fig 3: Combinatorial map composed of two faces and an external border.

Using combinatorial maps allow us to add or delete darts in a formal framework. If we delete an edge to merge the two triangle faces from Figure 2D, all darts must be updated (orientation, update to the next dart) to maintain the map consistency. This possibility is very important for scene design and will be detailed in the discussion section.

## 2.2. Dual representation

Graph theory shows that one can construct a dual graph [39] from the original graph called primal. This applies to a combinatorial map and its dual representation, which is also a combinatorial map. It is interesting since it allows us to explicit higher level adjacency relations automatically. Briefly, to construct the dual, each face becomes a node and each dart links the node corresponding to its face in primal to the node of its  $\beta_2$ 's face. An example is given in Figure 4A showing a combinatorial map composed of 3 faces (F1, F2, F3) and its dual (Figure 4B). In its dual, F1, F2 and F3 become nodes and, for example, edges 3 and 5 between F1 and F2 in Figure 4A, become edges connecting nodes F1 and F2. Note that the  $\beta_1$  and  $\beta_2$  operators are still the same in the dual.

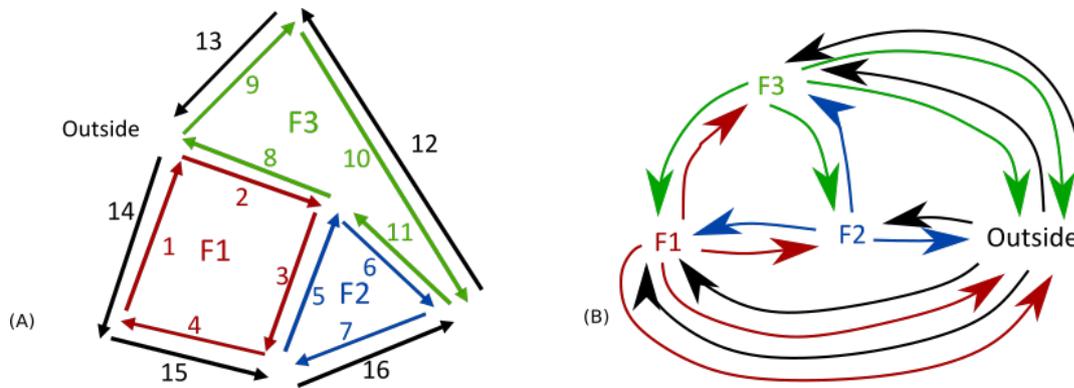


Fig 4: (A) A combinatorial map example and (B) its dual, which is also a combinatorial map.

To explicit the contribution of combinatorial maps, we decline it on an agroforestry context in the following result section and we detail our implementation.

## 3. Results

### 3.1. Application of combinatorial maps to agroforestry systems: a simple example

Starting from a simple example, we illustrate here the underlying concepts and operators of its combinatorial map representation and introduce their respective conceptual meaning in our application on agroforestry system modeling.

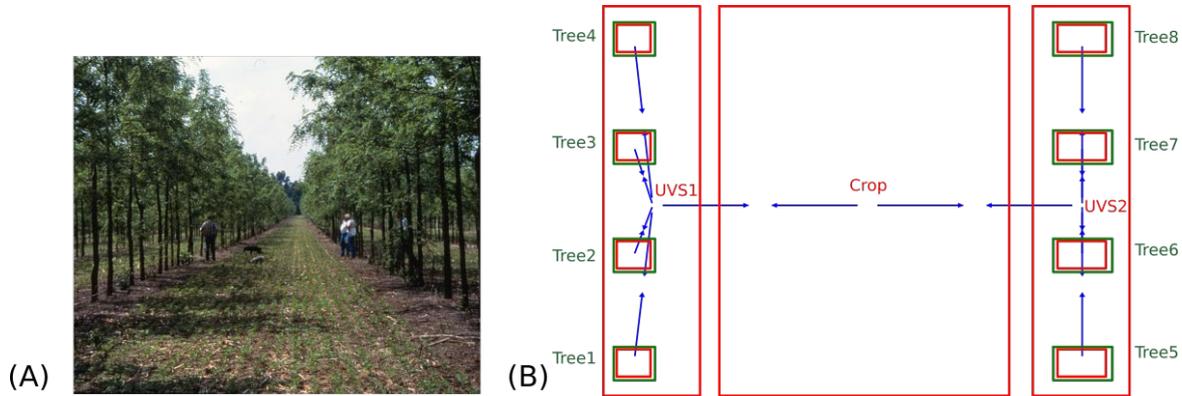


Fig 5: Example of agroforestry plot in combinatorial map. (A) Left. Example of an agroforestry plot with one alley of maize crop between two lines of trees (credit: National Agroforestry Center) (B) Right. A corresponding combinatorial map in red and its corresponding dual in blue, reduced to strips of 4 trees each generated by our application and post-processed for improved readability.

Let us consider a simple agroforestry system composed of two tree lines, each planted on an understory vegetation strip, and one crop alley between them, as presented in Figure 5. Let us also suppose that each tree line is composed of three trees. Its combinatorial map representation is shown in figure 5B in red. Each area (the two strips, trees inside the strips and crop alley) is modeled by a simple rectangular face. Note that a face (such as a tree line) may contain other faces (trees). This is represented by a hole, a concept natively present in combinatorial map theory, and that implies a hierarchical relationship between faces. In a tree line, we represent a tree as a face inside the strip face. At the highest level, the outside face (in red in Figure 5B) encapsulates the plot composed of three faces (two tree lines and one crop alley). An edge is an interface between areas and corresponds to the border either between crop and a tree line, or between the plot and the outside of the plot.

In its dual map (the blue arrows in Figure 5B), the agroforestry areas (the faces, including the outside face) become nodes, and the edges now represent the interactions between areas. Thus, in this dual representation, permutation  $\beta_1$  can be used to model exchange between different areas. The meaning – the interpretation in our application domain- of the different theoretical elements composing a combinatorial map, its dual, and key operators, are exposed in Table 3, the first three lines concerns the combinatorial map conceptual components, dart and operators; while the following lines consider orbits, that is to say compound operators.

Table 2: Combinatorial map's elements and their corresponding meaning in agroforestry context.

Combinatorial map object	Map interpretation	Example (red, Fig. 5B)	Interpretation in dual	Example (blue, Fig. 5B)
--------------------------	--------------------	------------------------	------------------------	-------------------------

Dart	A side of the current element	1: external right border of the full system	A link from the current element to the other	1: interface between the understory vegetation strip to crop
$\beta_1$ (Permutation)	Pass to next dart: follow the element border	$\beta_1(1) = 2$ links to lower right external border	Go to next element issued from the current element	$\beta_1(1) = 2$ : Move from strip-crop link to crop-outside
$\beta_2$ (Involution)	Go to inverse dart to change face: move to neighbor face	$\beta_2(1) = 9$ links the external right border to the line strip right border	Identify the element is connected from	$\beta_2(11) = 12$ Upper left tree is connected to left line tree strip
Compound operations				
OrbitFace	Path through all darts from the same face	$(\beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1)(9) = \beta_1^*(9)$ follows the right line tree strip starting from its right border (9)	$(\beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1)(9)$ follows the right line tree strip starting from its right border (9)	$(\beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1 \circ \beta_1)(9)$ follows the right line tree strip starting from its right border (9)
OrbitNode	Intersection	OrbitNode (16) = $(\beta_1 \circ \beta_2)^*(16)$ defines the node B from darts 16, 13,11,12,2,3	Area, identifies all relations issuing from an element	Orbit(Crop): relations with top line tree strip, outside and bottom line-tree strip

1

2

### 3.2. Usefulness of combinatorial maps to represent the functioning of agroforestry systems

3

4

5

6

7

8

9

10

In complex systems, making sure that a model is consistent (in particular that modifications in one part of the model do not induce undesired consequences on another part) is challenging due to the numerous elements and all their possible interactions. The combinatorial map framework brings a straightforward answer to this question: the list of all aspects that must be considered is simply the list of all cycles in the map and its dual. Indeed, the main interest of using the formalism of combinatorial maps is the proper identification of adjacency relations at the n-dimension levels. This is trivial on the direct map but is also true on the dual. Depending on the hierarchical level of a given cycle,

1 different data exchange procedures or functions (in the programming sense) can be applied  
2 to compute different functions (in the ecological sense) of the element.

3 The lowest cycle is the  $\beta_2$  operation since  $\beta_2$ , represents a local relationship between two  
4 components. This relationship may carry local interactions between these components:  
5 specific modelling and data sharing can be assessed at this level, without the need to query  
6 information from the rest of the map

7 The orbitFace function defines a cycle bordering the element. This function can then carry  
8 the endogenic evolution of the element; it may include the evolution of embedded faces if  
9 there are any. In this context, modelling approaches can be defined on the full face and no  
10 specific data management has to be defined regarding other components of the system.

11 At the opposite, the orbitNode function defines a local cycle around all elements sharing a  
12 local adjacency. When previous function are mainly tools to move in maps, this function is  
13 of key interest for data sharing and exchange. Therefore, when modelling this aspect, it is  
14 necessary to use models of higher complexity, involving all the local interactions, but their  
15 relevance must be considered.

16 We can consider a similar analysis on the dual map. The dual graph explains which  
17 components interact mutually in the system and with the outside and which are considered  
18 as simply embedded. The major interest arises from the fact that, on the dual, the adjacencies  
19 are related to a global instead of a local scale, since faces (i.e., elements) are now considered  
20 as nodes. At the lower scale, a dart represents an oriented relation between two elements.  
21 The involution  $\beta_2$  applies to its inverse relation. Then a dart indicates what comes out of the  
22 node  $\beta_2$  indicates what comes in the node. At the darts level, we can instantiate global  
23 information exchange/models in a non-symmetric manner, since darts are oriented. The  
24 orbitFace now defines a cycle between the different nodes (elements) and defines then a  
25 framework to address the specific ecosystem services supported by these elements. The  
26 orbitNode of an element is also of interest. Indeed, we can consider global output and input  
27 in the agroforestry element, and their balance. In agroforestry context, it groups all input  
28 and output of an area.

## 29 **Combinatorial map transformation**

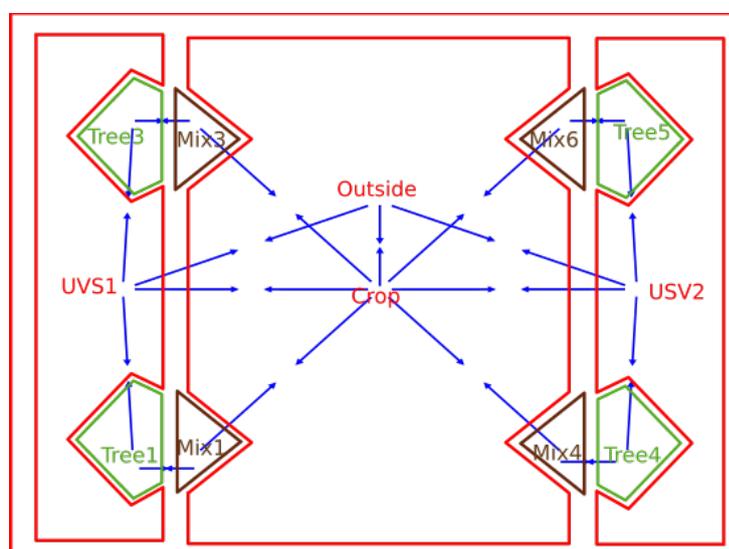
30 Agroforestry systems and ecosystem services change over seasons and years in two possible  
31 ways:

- 32 • The structure of the system does not change but the internal mechanisms evolve (i.e.,  
33 ecosystem services such as microclimate buffering start to be produced as trees  
34 grow)
- 35 • The structure of the system is modified (addition or removal of plants, e.g., through  
36 tree thinning to keep only the best individuals after a few years of growth).

37 We can simulate the first type of change by modification on the attributes of darts. This  
38 operation is trivial in terms of code implementation and poses no risks of having  
39 unforeseeable repercussions on the system's structure. The second corresponds to the  
40 addition (or deletion) of a node. It is an operation well known in combinatorial maps [36],

1 respectively called sewing and cutting functions and defined on all the dimensions of the  
2 map simultaneously. Concretely, this operation updates all the darts and their respective  
3 permutation and involution.

4 Surprisingly, in the example presented in section 3.1, trees and crop are not connected. Tree-  
5 crop interaction can only be induce from through the strip component. Indeed, trees are still  
6 small in this case, and their representation in the strips is a small face. As trees grow and  
7 the projection of their crown overlaps with the cropped alley, the faces representing the trees  
8 will also expand and infringe on the crop face. Thus, the crop face subdivides into smaller  
9 faces corresponding to a mixing zone composed of crops overlapped by the canopy (in red  
10 in the Figure 6). When updating the corresponding map, new local relationships will appear  
11 with dart adjacencies between the concerned trees borders and the crop border. Conversely,  
12 new global relationships will appear in the dual map between each concerned tree and the  
13 crop (in blue in Figure 6).



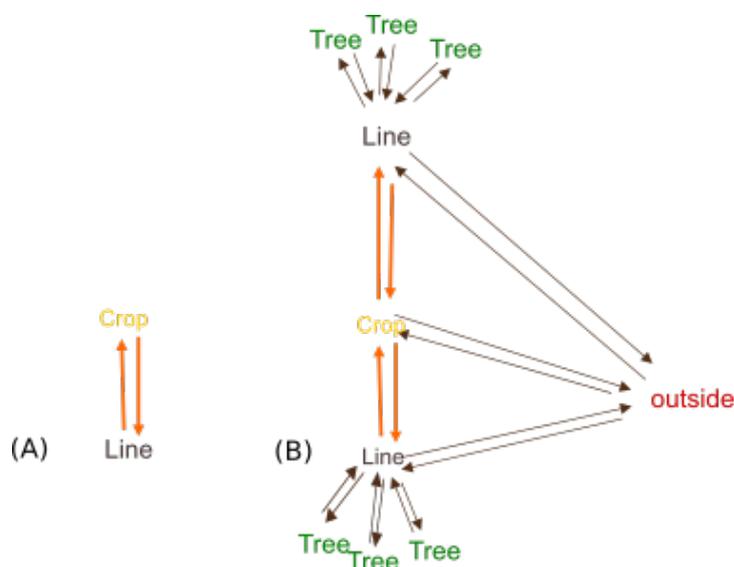
14  
15 *Fig 6: Combinatorial map (in red) and its dual (in blue) of the system represented in Figure*  
16 *1, several years later: the trees have grown and their canopy overlap the crop area. The*  
17 *grown trees areas are now split in two parts, on USV and on crop, on both graph and dual*  
18 *graph (in blue) generated by our application and post-processed for improved readability*

### 19 **3.3. Higher level operations: Pattern matching**

20 Numerous operators that have been developed in graph theory can be very useful in an  
21 agroforestry context. We will detail here pattern matching.

22 During the agroforestry design process, actors could want to know if their system is already  
23 existing somewhere else or if a specific ecosystem service is present inside the system. To  
24 answer these questions, we must compare two (sub)system, a task for which many pattern  
25 matching methods exist in graph theory [40], both for exact and approximate matching  
26 requests. In the example in Figure 7, we search for the structure that supports a biotic  
27 interaction (e.g., regulation of pests by natural enemies) between an alley cropping and two  
28 tree lines serving as overwintering habitats for the natural enemies (Figure 7A). In this case,  
29 we search exact matching between the substructure and the whole plot map. As can be seen

1 in Figure 7B, this pattern is present once. In addition, the pattern matching can use the darts'
 2 information, so we can instantiate constraint-based attributes like “crop area must lay
 3 between two tree lines”. Note that the pattern matching can also apply to properties such as
 4 distances computed from faces' coordinates; “the width of the alley cropping must be a
 5 multiple of the width of the farm cropping engine” is such a constraint.



6  
7 *Fig 7: Example of pattern search. (A) A combinatorial map of ecosystem service that helps*  
8 *to regulate insect pest (B) A combinatorial map of a plot that contains this ecosystem service*  
9 *twice.*

### 10 3.4. Implementation

11 Our implementation of the model (available at  
12 [https://github.com/agroforestar/carte\\_combinatoire](https://github.com/agroforestar/carte_combinatoire)) is still under development. The  
13 prototype founds on two key ideas. First, our map is a 2D map based on 2D coordinates,  
14 which makes sense in the case of mapping the location of trees in an agricultural plot.  
15 Second, our implementation is incremental, meaning the map is built by sequentially  
16 merging more and more complex faces. The system starts from a list of sets of coordinates  
17 describing the areas covered by the trees, the crops and the understory vegetation strips,  
18 makes a face for each area and then merges these individual faces until the whole system is  
19 included in the final map. The algorithms for creating and manipulating the maps come from  
20 the reference book by Damiand and Lienhardt [36] and we implemented them in Python  
21 3.9. An important point to note is that, all objects in the agroforestry system are considered  
22 as a face on our map even trees, which are usually considered as point objects.

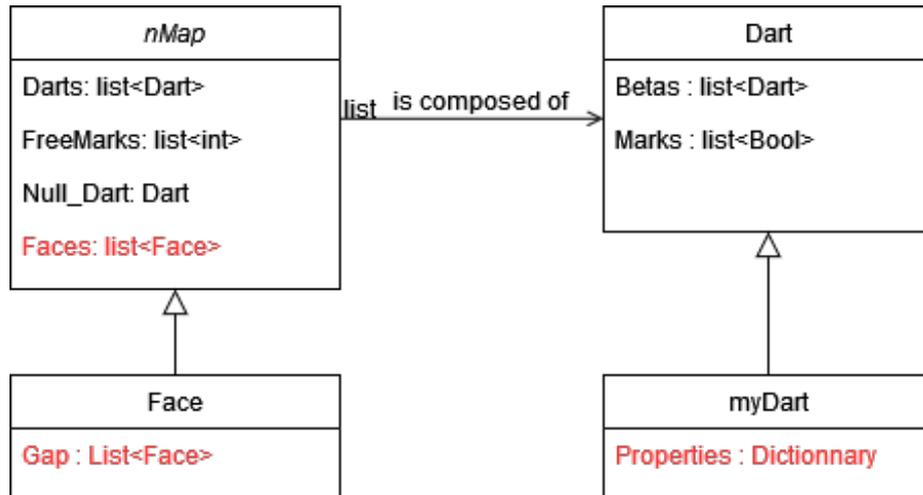


Fig 8: UML class diagram of our implementation of combinatorial map. In black, attribute already present in referenced book and, in red, attributes we add in our application.

We implemented most of the algorithms described in Damiand and Lienhardt [36]. In particular, we wrote the constructor (algorithm 22), the iterators (algorithms 28 – 30 and 34) and the functions to manipulate attributes of combinatorial maps classes (algorithms 23 – 27). Then we wrote the algorithms to create and remove darts (algorithms 35 and 36). We also implemented the algorithms to copy a map (algorithm 37) and to sew darts (algorithm 44). This set of methods allows to incrementally constructing the map from different faces representing the elements in the system.

In fact, this implementation was adapted to our context. We construct our class Face as a class inherited from class nMap (Figure 8). Faces can have several holes. In case of a tree line face, a tree is representing by a hole in the strip face and filled with a face for the tree. We described the face class as an inheritance class from nMap (Figure 8, left) with their holes. A hole is composed of darts and delimits a space filled with another face. The face definition can thus be considered as a recursive definition, each level can be related to a specific scale. For instance, the area of a tree line can be considered as an entity at a given level, and its holes, corresponding to the individual tree areas, describe the area in more details.

We introduce the Properties attribute in myDart, an inherited class of Dart (Figure 8, right). It contains 2D coordinates, the type of the start node (tree, crop ...) and may qualify other properties. We can simulate exchange between different areas into the plot and with the outside with the list of properties on darts.

## 4. Discussion

### 4.1. Advantages of the proposed framework compared to existing models

Despite the fact that the structure of agroforestry systems is of crucial importance to understand, predict or optimize the production of target ecosystem services [26], to our knowledge, no agroforestry model used the concept of FSPM, to represent the spatial organization at the system scale. In this article, we propose a new framework to describe agroforestry systems based on combinatorial maps.

1 This framework shows a good balance between the important criteria (complexity,  
2 capabilities to hold time and space dynamics) for an efficient spatial representation targeting  
3 agroforestry system design (table 3). Three features of the framework are of particular  
4 interest and show improvement over existing representations of agroforestry systems.

5 First, the two dual representations inherent to combinatorial maps allow representing not  
6 only the structure of the agroforestry system (as existing models already do) but also its  
7 functions. Indeed, our framework allows the user to focus alternatively on the areas, which  
8 represent the structure of the agroforestry system, and on the interfaces between areas, thus  
9 enabling to simulate the interactions between the elements of the system, which are the basis  
10 of ecosystem services. The model automatically ensures the consistency between both  
11 representations. This is consistent with the concept of FSPM, where the structure of a system  
12 (the plant) is directly linked to its functions. However, further research is needed to fully  
13 exploit this dual representation to build a complete Functional Structural Agroforestry  
14 Models approach.

15 Secondly, combinatorial maps allow a recursive description of the structure of the  
16 agroforestry system, so it becomes possible to describe the system in a hierarchical way. At  
17 the highest level, the system is described within an outside face, in which the different  
18 components are embedded. In the example presented above, at the second level, the system  
19 is composed of the areas of tree lines and of the crop. Each tree line area, in turn, embeds  
20 the different tree areas composing the tree line. However, the way the orbits are defined is  
21 the same and at all levels of the description. This authorizes a multiscale computation of  
22 ecosystem services, which is deemed particularly important to model complex agroforestry  
23 systems [41]. In particular, the fact that this framework can manage multiple scales allows  
24 aggregating individual plants at lower scales and adding a positive or negative impact of the  
25 system structure at higher scales. The combinatorial map and its dual define a framework  
26 which imposes that the interaction between the system elements must be modelled  
27 differently according to the local adjacencies and local relations. It also defines the cases  
28 where we need to mobilize models describing endogenous mechanisms or models  
29 describing interactions. For example, the fact that adjacencies between elements of the  
30 system are explicitly represented in the dual representation facilitates the simulation of local  
31 interactions between species. This recursive structure as well as the possibility of pattern  
32 matching is an asset for predicting ecosystem services either by reducing computation time  
33 (running relevant models' implementation only on subsets of the whole agroforestry  
34 system) or by allowing to use a database of structure-service relationships.

35 The third advantage is that the consistency of the agroforestry model is enforced by the  
36 combinatorial map structure even when the system is modified. Thus, the description is  
37 robust and remains valid when adding or removing elements. Therefore, it can be used to  
38 design the representation of a new agroforestry system from scratch, as well as to modify  
39 an existing system represented either by geographical coordinates of plants, or by a graph  
40 where nodes are the plants. This framework is also particularly well suited to represent the  
41 intrinsic dynamics of an agroforestry system, in which elements can appear (such as tree  
42 planting), disappear (such as tree thinning, or tree death), change their properties or even  
43 impact the adjacencies as is the case when tree growth causes the tree canopy to project  
44 beyond the understory vegetation strip.

1

2 *Table 3: Analysis of the suitability of combinatorial maps for the representation of agroforestry*  
 3 *systems according to the criteria of table 1*

Criteria	Ability of combinatorial maps to meet these criteria
Ability to simulate different plots/AFS with small extra effort	Yes: starting from scratch or evolution of existing system, with consistency of the representation and associated functions automatically ensured
Efficiency to reduce computation time necessary to simulate ecosystem services	Yes, thanks to pattern matching
Ability to simulate local interactions between species	Yes through the dual representation
Ability to take into account constraints at plot scale	Yes through the geometric instance of the plot
Ability to represent understory vegetation strips	Yes with the face
Ability to represent irregular-shaped AFS	Yes, thanks to actual coordinates of trees
Realism of the spatial representation	Yes, in particular if coupled with 3D tree representations
Interaction of the system with outside	Yes, thanks to the orbit face of the full system
Ability to project in time	Yes, see section 3.5

4

## 5 **4.2. Limits and perspectives**

6 Although the proposed model fulfills all the criteria that we identified initially, some limits  
 7 remain. For instance, global relations such as groups of non-adjacent elements (e.g. tree  
 8 lines), are not represented directly in the combinatorial map. However, these relationships  
 9 can be computing from the minimal topological graph [23]; this operation corresponds to  
 10 an agroforestry pattern [26] extraction. Further work will allow full integration of the  
 11 algorithms to do this into the prototype.

12 There is a need for further research in agroforestry, in particular to better understand and  
 13 predict the link between species interactions and production of ecosystem services.  
 14 Although this link has been highlighted for some time (e.g. [42]), work has only just started  
 15 to automatize mining agronomical knowledge in relation with plant traits to predict the

1 production of ecosystem services of different species associations (e.g. [43]), and the tree-  
2 service relationships are currently only able to relate services to single tree species, not  
3 species associations (e.g. [44]). Furthermore, to our knowledge, no trait-service database or  
4 tool take into account the spatial layout of associated species, despite the fact that its  
5 importance has been recognized [26]. Our framework could combine the notions of  
6 ecosystem service spatial unit and the relationship between species associations and biotic  
7 interactions in order to propose a modeling approach extending the principles of FSPM at  
8 the agroecosystem scale. Once we have built a catalogue of patterns (i.e., tuples of  
9 agroforestry elements) that provide ecosystem services (potentially based on different  
10 biophysical models), our framework will allow us to analyze both structural and functional  
11 aspects of an agroforestry system.

12 Future applications of our framework will be useful to help farmers and advisors to design  
13 agroforestry systems and estimate their evolution through time. Integrating 2D or 3D  
14 visualization tools will facilitate the design process with a better communication [45] and  
15 help farmers to better project themselves and understand the impact of their choices on the  
16 system's functioning. For example, we intend to use this framework to develop augmented  
17 reality tools that could be used either during agroforestry design workshops, for user-  
18 friendly, quick and robust, interactive ex ante evaluation of agroforestry system, or after the  
19 design phase, to visualize the future aspect of an agroforestry plot in the field.

## 20 5. Conclusion

21 Modelling agroforestry systems is challenging due to the diversity of systems and the  
22 diversity of modelling objectives, from visualizing agroforestry systems during the design  
23 phase to running simulations to predict the functioning of the system. Our framework,  
24 inspired by FSPM, uses combinatorial maps to represent agroforestry systems. This  
25 framework allows focusing either on the agroforestry system structure (with the map  
26 representation) or on the system functioning (with its dual representation). The proposed  
27 approach ensures the consistency between both representations when the system evolves.  
28 Compared with existing representations of agroforestry systems, this framework combines  
29 the versatility of a graph-based representation with a spatial realism sufficient to represent  
30 irregularities in the pattern and the possibility to record geographical coordinates. Thus, our  
31 framework might serve as a unifying representation, with the possibility to export to and  
32 import from all other representations.

## 33 Acknowledgments

34 This work was supported by the INRAE PhD grant program of the AgroEcosystem  
35 department and by the French National Research Agency under the Investments for the  
36 Future Program, referred as ANR-16-CONV-0004 / #DigitAg. Authors Laetitia Lemièrè  
37 and Marc Jaeger have been supported by the MaCS4Plants (Mathematics and Computer  
38 Sciences For Plants) CIRAD network, initiated from the AGAP Institute and AMAP joint  
39 research units.

### 40 **Author contributions:**

41 L. L: Bibliography, Conceptualization, Implementation Writing; M.J.: Implementation,  
42 Writing, Review; M.G.: Bibliography, Writing, Review; G.S: Bibliography,  
43 Conceptualization, Review  
44

1 All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

2  
3 **Competing interests:**

4 The authors declare no conflict of interest.

5  
6 **Data Availability:** The source code is available at

7 [https://github.com/agroforestar/carte\\_combinatoire](https://github.com/agroforestar/carte_combinatoire).

8  
9 **References**

- 10 [1] C. Dupraz and F. Liagre, *Agroforesterie: des arbres et des cultures*, 2e éd. in Agriproduction.  
11 Paris: Groupe France Agricole éd, 2011.
- 12 [2] R. P. Udawatta and C. J. Gantzer, ‘Soil and water ecosystem services of agroforestry’, *J. Soil*  
13 *Water Conserv.*, vol. 77, no. 1, pp. 5A-11A, Jan. 2022, doi: 10.2489/jswc.2022.1028A.
- 14 [3] P. K. R. Nair, *An introduction to agroforestry*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic  
15 Publishers in cooperation with International Centre for Research in Agroforestry, 1993.
- 16 [4] O. Tzuk, H. Uecker, and E. Meron, ‘The role of spatial self-organization in the design of  
17 agroforestry systems’, *PLOS ONE*, vol. 15, no. 7, p. e0236325, 2020, doi:  
18 10.1371/journal.pone.0236325.
- 19 [5] B. Oury, ‘Allowing for Weather in Crop Production Model Building’, *J. Farm Econ.*, vol. 47,  
20 no. 2, pp. 270–283, 1965, doi: 10.2307/1236574.
- 21 [6] R. Brouwer and C. T. de Wit, ‘A simulation model of plant growth with special attention to  
22 root growth and its consequences’, 1968, Accessed: Feb. 17, 2023. [Online]. Available:  
23 [https://research.wur.nl/en/publications/a-simulation-model-of-plant-growth-with-special-](https://research.wur.nl/en/publications/a-simulation-model-of-plant-growth-with-special-attention-to-root)  
24 [attention-to-root](https://research.wur.nl/en/publications/a-simulation-model-of-plant-growth-with-special-attention-to-root)
- 25 [7] T. R. Sinclair and N. G. Seligman, ‘Crop Modeling: From Infancy to Maturity’, *Agron. J.*, vol.  
26 88, no. 5, pp. 698–704, 1996, doi: 10.2134/agronj1996.00021962008800050004x.
- 27 [8] N. Meyer, J.-E. Bergez, E. Justes, and J. Constantin, ‘Influence of cover crop on water and  
28 nitrogen balances and cash crop yield in a temperate climate: A modelling approach using the  
29 STICS soil-crop model’, *Eur. J. Agron.*, vol. 132, p. 126416, Jan. 2022, doi:  
30 10.1016/j.eja.2021.126416.
- 31 [9] K. J. Boote, J. W. Jones, and N. B. Pickering, ‘Potential Uses and Limitations of Crop  
32 Models’, *Agron. J.*, vol. 88, no. 5, pp. 704–716, 1996, doi:  
33 10.2134/agronj1996.00021962008800050005x.
- 34 [10] N. Gaudio *et al.*, ‘Current knowledge and future research opportunities for modeling annual  
35 crop mixtures. A review’, *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 39, no. 2, p. 20, Apr. 2019, doi:  
36 10.1007/s13593-019-0562-6.
- 37 [11] J. Perttunen, R. Sievänen, and E. Nikinmaa, ‘LIGNUM: a model combining the structure and  
38 the functioning of trees’, *Ecol. Model.*, vol. 108, no. 1–3, pp. 189–198, May 1998, doi:  
39 10.1016/S0304-3800(98)00028-3.

- 1 [12] T. Fourcaud, X. Zhang, A. Stokes, H. Lambers, and C. Korner, ‘Plant Growth Modelling and  
2 Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models’, *Ann. Bot.*,  
3 vol. 101, no. 8, pp. 1053–1063, Aug. 2007, doi: 10.1093/aob/mcn050.
- 4 [13] M. Crimaldi, F. Carteni, and F. Giannino, ‘VISmaF: Synthetic Tree for Immersive Virtual  
5 Visualization in Smart Farming. Part I: Scientific Background Review and Model Proposal’,  
6 *Agronomy*, vol. 11, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/agronomy11122458.
- 7 [14] K. Streit, M. Henke, B. Bayol, P.-H. Cournède, R. Sievänen, and W. Kurth, ‘Impact of  
8 geometrical traits on light interception in conifers: Analysis using an FSPM for Scots pine’,  
9 in *2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling,  
10 Simulation, Visualization and Applications (FSPMA)*, Nov. 2016, pp. 194–203. doi:  
11 10.1109/FSPMA.2016.7818307.
- 12 [15] M. T. Allen, P. Prusinkiewicz, R. R. Favreau, and T. M. Dejong, ‘L-Peach, an L-System-  
13 Based Model for Simulating Architecture, Carbohydrate Source–Sink Interactions and  
14 Physiological Responses of Growing Trees’, in *Functional-Structural Plant Modelling in  
15 Crop Production*, J. Vos, L. F. M. Marcelis, P. H. B. De Visser, P. C. Struik, and J. B. Evers,  
16 Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, pp. 139–150. doi: 10.1007/1-4020-6034-3\_12.
- 17 [16] P. Surový and A. Yoshimoto, ‘Application of a Functional-Structural Plant Model (FSPM) to  
18 Optimize a Management Regime’, *FORMATH*, vol. 12, no. 0, pp. 173–189, 2013, doi:  
19 10.15684/formath.12.173.
- 20 [17] P. de Reffye, B. Hu, M. Kang, V. Letort, and M. Jaeger, ‘Two decades of research with the  
21 GreenLab model in agronomy’, *Ann. Bot.*, vol. 127, no. 3, pp. 281–295, Feb. 2021, doi:  
22 10.1093/aob/mcaa172.
- 23 [18] S. Soualiou *et al.*, ‘Functional–Structural Plant Models Mission in Advancing Crop Science:  
24 Opportunities and Prospects’, *Front. Plant Sci.*, vol. 12, 2021, doi: 10.3389/fpls.2021.747142.
- 25 [19] J. B. Evers, W. van der Werf, T. J. Stomph, L. Bastiaans, and N. P. R. Anten, ‘Understanding  
26 and optimizing species mixtures using functional–structural plant modelling’, *J. Exp. Bot.*,  
27 vol. 70, no. 9, pp. 2381–2388, Apr. 2019, doi: 10.1093/jxb/ery288.
- 28 [20] P. J. Burgess, A. Graves, S. García de Jalón, J. H. Palma, C. Dupraz, and P. Burgess,  
29 ‘Modelling agroforestry systems’, p. 23, 2019.
- 30 [21] P.-H. Cournède *et al.*, ‘A Forest Growth Simulator Based on Functional-Structural Modelling  
31 of Individual Trees’, in *2009 Third International Symposium on Plant Growth Modeling,  
32 Simulation, Visualization and Applications*, Beijing, China: IEEE, Nov. 2009, pp. 34–41. doi:  
33 10.1109/PMA.2009.55.
- 34 [22] N. Lamanda, J. Dautat, C. Jourdan, P. Martin, and E. Malézieux, ‘Using 3D architectural  
35 models to assess light availability and root bulkiness in coconut agroforestry systems’,  
36 *Agrofor. Syst.*, vol. 72, no. 1, pp. 63–74, Jan. 2008, doi: 10.1007/s10457-007-9068-3.

- 1 [23] L. Lemièrè, M. Jaeger, G. Subsol, and M. Gosme, ‘Graph theory applied to agroforestry  
2 system co-design’, presented at the 5th World Congress on Agroforestry, Jul. 2022. Accessed:  
3 Nov. 30, 2022. [Online]. Available: <https://hal.inrae.fr/hal-03739687>
- 4 [24] W. Kurth, O. Kniemeyer, and G. Buck-Sorlin, ‘Relational Growth Grammars – A Graph  
5 Rewriting Approach to Dynamical Systems with a Dynamical Structure’, in *Unconventional*  
6 *Programming Paradigms*, J.-P. Banâtre, P. Fradet, J.-L. Giavitto, and O. Michel, Eds., in  
7 Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, pp. 56–72. doi:  
8 10.1007/11527800\_5.
- 9 [25] S. Rova, P. Meire, F. Müller, M. Simeoni, and F. Pranovi, ‘A Petri net modeling approach to  
10 explore the temporal dynamics of the provision of multiple ecosystem services’, *Sci. Total*  
11 *Environ.*, vol. 655, pp. 1047–1061, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.184.
- 12 [26] Sylvain Rafflegeau *et al.*, ‘The ESSU concept for designing, modeling and auditing ecosystem  
13 service provision, in intercropping and agroforestry systems. A review.’, *Accept. Minor Revis.*  
14 *Agron. Sustain. Dev.*.
- 15 [27] M. Van Noordwijk and B. Lusiana, ‘WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture  
16 in agroforestry systems’, *Agrofor. Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 217–242, Oct. 1998, doi:  
17 10.1023/A:1026417120254.
- 18 [28] C. Dupraz *et al.*, ‘Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop  
19 Interactions’, *Sustainability*, vol. 11, no. 8, p. 2293, Apr. 2019, doi: 10.3390/su11082293.
- 20 [29] F. Liagre, F. Santi, C. Sotteau, and F. de Coligny, ‘EcoAF on CAPSIS, simulates the  
21 economics effects of your choices when building and managing an agroforestry field!’,  
22 presented at the 4th World congress on Agroforestry, May 2019. Accessed: Jul. 11, 2022.  
23 [Online]. Available: <https://hal.inrae.fr/hal-02878592>
- 24 [30] ‘RegenWorks - Agroforestry Farm Management and Analytics Software’. Regen Farmer.  
25 Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available: <https://regenfarmer.com/software/>
- 26 [31] A. Kastuari *et al.*, ‘Implementation of SEI-FS (Spatially Explicit Individual-based Forest  
27 Simulator) Model using UAV Aerial Photo Data Case Study: Jatinangor ITB Campus’,  
28 *HAYATI J. Biosci.*, vol. 27, no. 4, Art. no. 4, Oct. 2020, doi: 10.4308/hjb.27.4.314.
- 29 [32] P. Degenne *et al.*, ‘Design of a Domain Specific Language for modelling processes in  
30 landscapes’, *Ecol. Model.*, vol. 220, no. 24, pp. 3527–3535, Dec. 2009, doi:  
31 10.1016/j.ecolmodel.2009.06.018.
- 32 [33] P. Degenne and D. Lo Seen, ‘Ocelet: Simulating processes of landscape changes using  
33 interaction graphs’, *SoftwareX*, vol. 5, pp. 89–95, 2016, doi: 10.1016/j.softx.2016.05.002.
- 34 [34] Elevitch, C.R. and N. Logan, ‘Agroforestry Design Tool™’. Hawaii. Accessed: Nov. 04,  
35 2021. [Online]. Available: [https://www.agroforestryx.com/#agroforestry-design-tool-](https://www.agroforestryx.com/#agroforestry-design-tool-authors-and-citations)  
36 [authors-and-citations](https://www.agroforestryx.com/#agroforestry-design-tool-authors-and-citations)

- 1 [35] ‘ShadeMotion’. CATIE. Accessed: Feb. 26, 2023. [Online]. Available:  
2 <https://www.shademotion.net/#/>
- 3 [36] G. Damiand and P. Lienhardt, *Combinatorial Maps: Efficient Data Structures for Computer*  
4 *Graphics and Image Processing*, 0 ed. A K Peters/CRC Press, 2014. doi: 10.1201/b17403.
- 5 [37] A. Vince, ‘Combinatorial maps’, *J. Comb. Theory Ser. B*, vol. 34, no. 1, pp. 1–21, Feb. 1983,  
6 doi: 10.1016/0095-8956(83)90002-3.
- 7 [38] P. Lienhardt, ‘Modelisation et evolution de surfaces libres’, These de doctorat, Strasbourg 1,  
8 1987. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/1987STR13031>
- 9 [39] J. W. Essam and M. E. Fisher, ‘Some Basic Definitions in Graph Theory’, *Rev. Mod. Phys.*,  
10 vol. 42, no. 2, pp. 271–288, Apr. 1970, doi: 10.1103/RevModPhys.42.271.
- 11 [40] C. C. Aggarwal and H. Wang, ‘Graph Data Management and Mining: A Survey of Algorithms  
12 and Applications’, in *Managing and Mining Graph Data*, C. C. Aggarwal and H. Wang, Eds.,  
13 in *Advances in Database Systems*, vol. 40. Boston, MA: Springer US, 2010, pp. 13–68. doi:  
14 10.1007/978-1-4419-6045-0\_2.
- 15 [41] N. Gaudio, G. Louarn, R. Barillot, C. Meunier, R. Vezy, and M. Launay, ‘Exploring  
16 complementarities between modelling approaches that enable upscaling from plant  
17 community functioning to ecosystem services as a way to support agroecological transition’,  
18 *Silico Plants*, vol. 4, no. 1, p. diab037, Jan. 2022, doi: 10.1093/insilicoplants/diab037.
- 19 [42] S. Médiène *et al.*, ‘Agroecosystem management and biotic interactions: a review’, *Agron.*  
20 *Sustain. Dev.*, vol. 31, no. 3, pp. 491–514, Jul. 2011, doi: 10.1007/s13593-011-0009-1.
- 21 [43] E. Najm, ‘Raisonner sur des données en agroécologie: application à la sélection d’espèces  
22 végétales de service’, 2022.
- 23 [44] C. Rigal, S. Wagner, M. P. Nguyen, L. Jassogne, and P. Vaast, ‘ShadeTreeAdvice  
24 methodology: Guiding tree-species selection using local knowledge’, *People Nat.*, vol. 4, no.  
25 5, pp. 1233–1248, Oct. 2022, doi: 10.1002/pan3.10374.
- 26 [45] T. Mahmood, W. Fulmer, N. Mungoli, J. Huang, and A. Lu, ‘Improving Information Sharing  
27 and Collaborative Analysis for Remote GeoSpatial Visualization Using Mixed Reality’, in  
28 *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Beijing,  
29 China: IEEE, Oct. 2019, pp. 236–247. doi: 10.1109/ISMAR.2019.00021.

30

Dans ce chapitre, j'ai présenté une modélisation basée sur les cartes combinatoires. Ce modèle permet de répondre au cahier des charges sur la représentation abstraite des systèmes agroforestiers présenté au chapitre précédent. En effet, il permet de représenter l'aspect spatial de la parcelle et les interactions entre les éléments. De plus, il permet d'utiliser les méthodes de la théorie de graphes afin d'identifier le motif agroforestier.



---

# Quatrième partie

## Implémentation

---





# Modélisation

Nous avons vu dans le chapitre II que la conception agroforestière a besoin d'outils facilitant les échanges entre les acteurs (agriculteurs, conseillers, agronomes). Ils doivent permettre une représentation spatiale et temporelle pour pouvoir modéliser les différentes interactions présentes dans la parcelle agroforestière. Les cartes combinatoires répondent au besoin de modélisation des services écosystémiques (cf. chapitre III) mais, pour que cette modélisation puisse servir à faciliter la conception, il faut l'intégrer dans un outil utilisable par des conseillers agroforestiers ou des agriculteurs. Dans ce chapitre qui concerne l'interface entre l'Homme (les agriculteurs et les conseillers agroforestiers) et la machine (la modélisation des systèmes agroforestiers), je présente deux compléments à la modélisation afin de la rendre utilisable pour la conception. Le premier outil transforme la maquette servant de support d'échanges lors de la conception en scène virtuelle grâce à un réseau de neurones et le second permet de visualiser la scène virtuelle avec la réalité augmentée.

## Plan du chapitre

1. Description de l'outil
2. Module d'acquisition
3. Modélisation
4. Visualisation en réalité augmentée
5. Informations à visualiser



# 1 Description de l’outil

Afin de répondre au cahier des charges (cf. 5), je propose une suite d’outils permettant

- 1. de continuer à utiliser une maquette physique en tant qu’interface tangible,
- 2. de visualiser les représentations numériques associées (encombrement spatial des arbres à différents âges du système, services écosystémiques produits etc.) en 3D.

Cette suite est composée de quatre modules. Le premier va acquérir les informations de la maquette. Le second la modélise selon le cadre conceptuel présenté au chapitre III et les deux derniers permettent de visualiser la parcelle en 3D, soit au-dessus d’une maquette soit dans une parcelle.

Les modules ont été développés séparément pour faciliter le développement et la maintenance future, et en particulier permettre à différents stagiaires de travailler chacun sur un module indépendamment des modifications effectuées sur les autres modules. A terme, ils seront tous unis dans un seul logiciel. Mais ce n’est pas encore le cas et, par conséquent, ils doivent s’échanger des données. Ces échanges sont résumés par la figure 6. Le module d’acquisition de la maquette analyse une photographie de la maquette physique et en extrait la position des marqueurs. Chaque marqueur est caractérisé par sa forme et sa couleur ainsi que ses coordonnées dans l’image. Ces informations sont transmises au module de modélisation, qui fait ensuite le lien entre la forme et la couleur des marqueurs d’une part, et la liste des espèces correspondantes d’autre part. De plus, la distribution spatiale des composants dans la scène est analysée pour obtenir un découpage de la scène en faces, qui, à leur tour, permettent la construction de la carte combinatoire du système. L’analyse du graphe des cartes et des positions permet ensuite d’extraire des hiérarchies et groupements d’éléments (par exemple pour la détection des alignements d’arbres), ce qui permettra par la suite de compléter la scène avec des informations supplémentaires issues des modèles de simulation. A partir de la scène virtuelle ainsi créée, des technologies de réalité augmentée sont utilisées pour visualiser la scène en 3D dans le monde réel, soit en la superposant sur la maquette (module 3), soit en la plaçant dans une parcelle agricole (module 4).

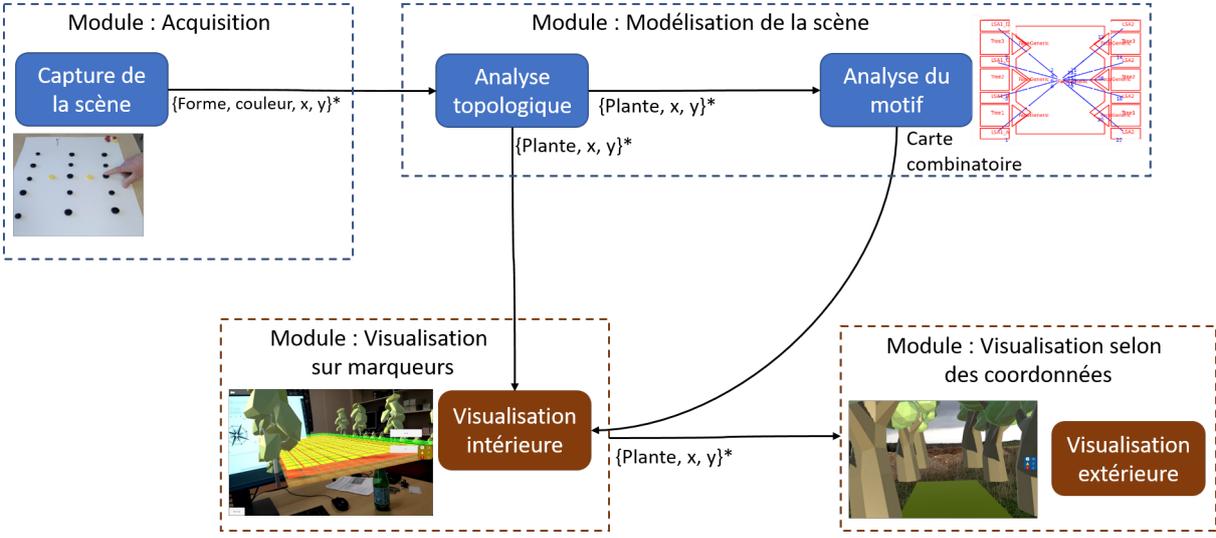


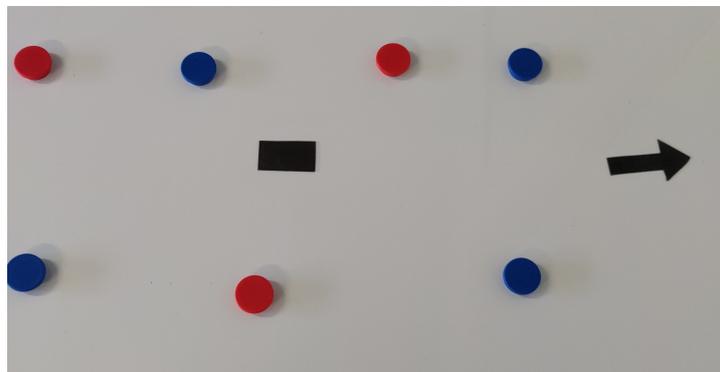
FIGURE 6 Schéma des modules et de leurs échanges de données

## 2 Module d'acquisition

### 2.1 Dispositif physique

Le module d'acquisition doit permettre l'interaction avec une interface ergonomique et interactive. De plus, la traduction entre cette interface et la scène virtuelle doit être rapide et facile. J'ai imaginé un système où les utilisateurs positionnent des marqueurs pour réaliser la maquette, qui est ensuite capturée par le module.

Afin de permettre une reconnaissance automatisée, les marqueurs en polystyrènes classiquement utilisés pour réaliser les maquettes ont été remplacés par des aimants avec des formes et des couleurs régulières. Cela permet d'avoir des formes standardisées, tout en n'utilisant que du matériel de bureau qu'on peut facilement trouver dans le commerce. Dans les maquettes telles que celle illustrée à la figure 4, les piques représentent en général des arbres, des autocollants rectangulaire ou triangulaires sont souvent utilisés pour figurer des cultures au sol et des traits indiquent des zones ou des déplacements de machines agricoles. Par conséquent, les formes rond, rectangle et flèche ont été choisies afin de représenter des arbres, des cultures et des directions. Un exemple de maquette avec ces aimants est visible sur la photographie à la figure 7. Le module restitue les informations de la maquette physique en récupérant la forme des aimants, leur couleur et leurs coordonnées.

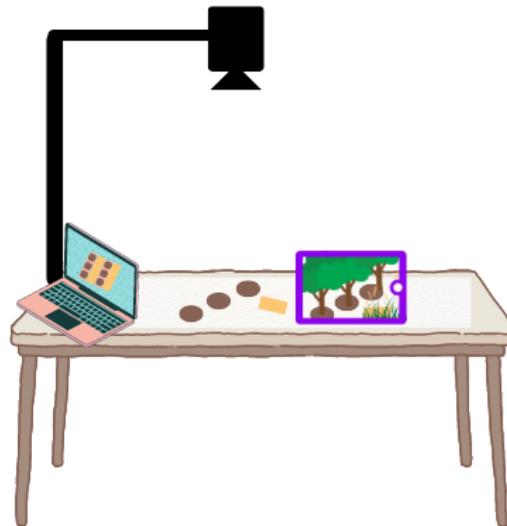


**FIGURE 7** Exemple de maquette de parcelle agroforestière adaptée aux outils développés. Les ronds correspondent aux emplacements des arbres, le rectangle à la culture au centre des lignes d'arbres. La flèche peut indiquer le nord ou la direction d'une machine agricole. Chaque couleur pour les marqueurs des plantes est associée à une espèce.

Les premiers prototypes nécessitaient un dispositif physique spécifique, composé d'une caméra installée au-dessus de la maquette (cf. figure 8). La photographie de la maquette était alors prise à la demande de l'utilisateur ou à des intervalles réguliers afin de garantir que la mise à jour de la parcelle virtuelle soit rapide et facile. L'image était alors envoyée à un ordinateur pour qu'il l'analyse et qu'il crée la scène virtuelle. Le but de ce dispositif était de déporter les étapes d'analyse de l'image de modélisation, coûteuses en calcul, sur un ordinateur et non sur les téléphones ou les tablettes des usagers. L'inconvénient majeur de ce dispositif était son infrastructure matérielle. Bien qu'il requérait des éléments peu coûteux, il impliquait de transporter une caméra, un trépied, un support délimitant l'espace pour créer la maquette, des marqueurs.



Ce dispositif impliquait aussi des contraintes informatiques entraînant d'importants développements (échange de données entre l'ordinateur et les appareils des utilisateurs, recalage de la scène entre le point de vue des utilisateurs et celui de la photo initiale, gestion de la mise à jour de la scène...). On s'est alors tourné vers l'utilisation d'un réseau de neurones afin d'embarquer cette étape dans les smartphones et tablettes. Ainsi, le dispositif final ne nécessite plus qu'une photo prise par le smartphone des utilisateurs.

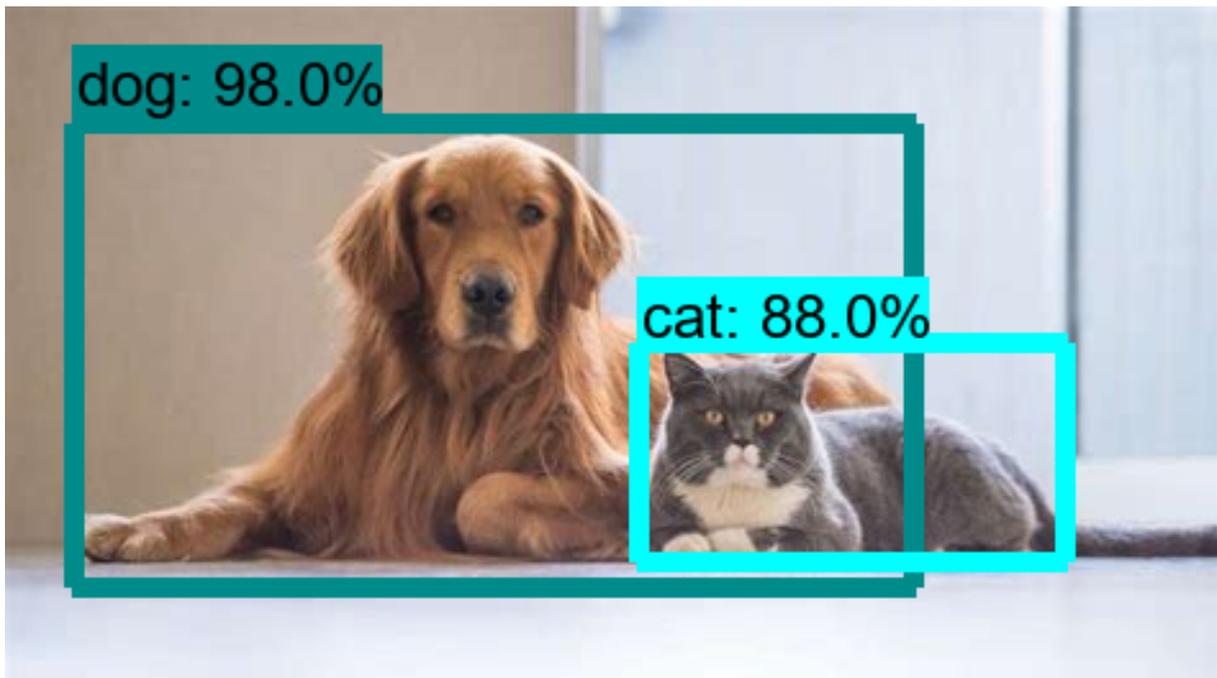


**FIGURE 8** Schéma du dispositif initialement prévu prenant une photographie de la maquette et un ordinateur avec un ordinateur pour l'analyse de la vue

## 2.2 Reconnaissance des marqueurs par un réseau de neurones convolutionnel

L'image de la maquette ayant été capturée, il faut ensuite analyser cette image pour identifier les marqueurs et leur position. Initialement, il était prévu d'utiliser des techniques classiques de reconnaissance d'image telles que la détection de contours. Cependant, le choix d'utiliser l'appareil photo du smartphone de l'utilisateur plutôt qu'un dispositif d'acquisition ad hoc a eu pour conséquence que la photographie est prise dans un environnement peu contrôlé (angle de prise de vue, éclairage, couleur du support de la maquette...). De ce fait, les techniques de reconnaissance d'image testées initialement échouaient à reconnaître les marqueurs. On s'est alors intéressé à l'utilisation d'un réseau de neurones du fait des excellentes performances de cette technique sur des tâches de reconnaissance de formes. De plus, ces techniques sont moins sensibles au bruit dans l'image. Le choix d'un réseau Yolo (You Look at Once) est motivé par le fait que ces réseaux sont très rapides et précis lors de la détection. Ils sont aussi open-source donc on peut les exploiter sans problème de licence. Face à ces nombreux avantages, nous avons donc choisi d'utiliser un réseau de neurones convolutionnel Yolo v8 créé par Ultralytics (JOCHER, CHAURASIA et QIU 2023). C'est un réseau pouvant réaliser plusieurs tâches. Dans cette étude, c'est sa capacité à détecter plusieurs objets sur une image comme à la figure 9 qui sera utilisée. De plus, il permet un portage satisfaisant sur matériel embarqué pour être utilisé sur un smartphone ou une tablette.





**FIGURE 9** Exemple de détection. Source : <https://www.mygreatlearning.com/blog/yolo-object-detection-using-opencv/>

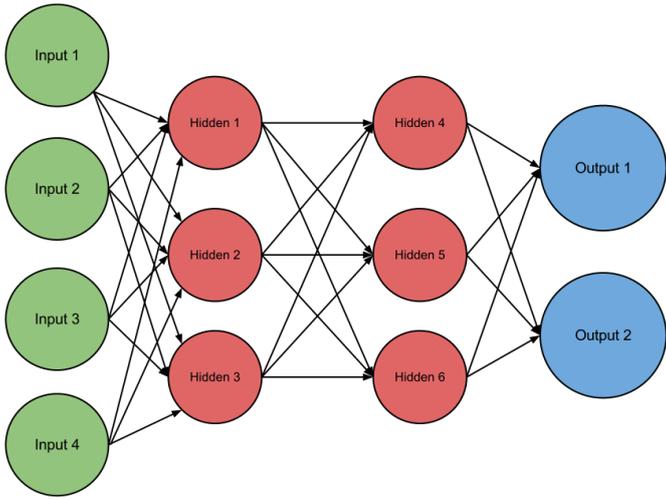
### 2.2.1 Description du réseau et des données d'entraînement

Un réseau de neurones est schématisé à la figure 10 par une structure composée de plusieurs couches de neurones successives. L'image pour analyser est fournie au réseau. La couche d'entrée permet de préparer l'image à l'analyse avec de nombreuses opérations et notamment la découpe en plusieurs parties. La couche de sortie donne le résultat de l'analyse sous forme de probabilité. Entre les deux, il y a des couches intermédiaires permettant d'analyser l'image. Pour cela et à l'instar du cerveau humain, les neurones des couches intermédiaires et de sortie s'activent si la donnée sous forme d'une valeur est suffisamment importante. Cette activation dépend de la donnée d'entrée et d'un paramètre nommé poids. La valeur des poids est modifiée lors de l'apprentissage du réseau. C'est pourquoi l'étape d'apprentissage est très importante. Par exemple, la reconnaissance d'un chien dans une image ne fonctionne que si les neurones permettant d'obtenir la réponse "chien" avec la plus grande probabilité, s'activent.

Pour réussir l'apprentissage, il faut au réseau de neurones de nombreuses photographies de maquette annotées, c'est-à-dire où les types et marqueurs avec leur position ont été notés. Ici, la tâche de détection n'est pas extrêmement complexe car les formes et les couleurs sont très distinctes. Donc, le jeu d'apprentissage n'a pas à être très grand et sa création ne sera pas problématique car on peut créer des maquettes facilement.

Dans notre outil, le réseau a appris à reconnaître trois classes d'objets, correspondant aux cercles (arbres), aux rectangles (cultures) et aux flèches (orientation ou direction d'un passage d'engin), à partir d'un jeu d'entraînement. Le jeu d'apprentissage est composé de 3 sous-ensembles : celui d'entraînement, de validation et de test. Le premier contient les images qui entraînent directement une modification des poids du réseau. Le jeu de validation est utilisé pour évaluer le modèle durant sa phase de développement





**FIGURE 10** Schéma d'un réseau de neurones

et il peut engendrer la modification d'hyperparamètres afin d'améliorer les performances du réseau. Le jeu de test évalue aussi le modèle mais uniquement lorsqu'il a fini d'être entraîné. Les annotations ont été réparties de manière classique : environ 80% d'annotations dans le jeu d'entraînement 10% dans le jeu de validation et 10% dans le jeu de test.

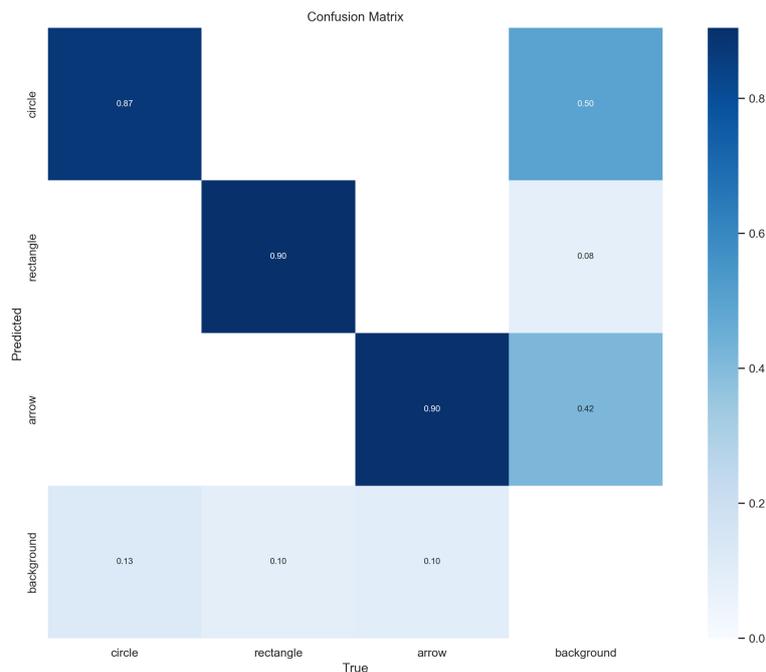
Nombre d'éléments par jeu de données	Images	Annotation Cercle	Annotation Rectangle	Annotation Flèche
Entraînement	169	2955	1143	667
Validation	21	427	101	74
Test	22	393	129	49

**TABLE 2** Récapitulatif du nombre d'images et d'annotations par jeux de données

Comme on peut le remarquer sur la table 2, il y a un déséquilibre entre les classes. Celle des cercles contient environ 5 fois plus d'annotations que celle des flèches et environ 3 fois plus d'annotations que la classe rectangle. Cette différence est révélatrice de la réalité des ateliers de conception où les maquettes comprennent plus d'arbres que de zones de cultures, et seulement une ou deux flèches. Ce défaut peut entraîner un biais dans l'apprentissage du réseau. En effet, la surreprésentation des cercles fait que le réseau va plus chercher à reconnaître des cercles et moins les classes faiblement représentées.

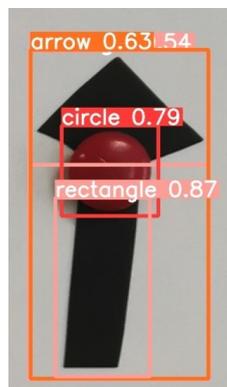
Malgré ce défaut, l'évaluation des performances du réseau avec une matrice de confusion s'est révélée satisfaisante (cf. figure 11). C'est une table indiquant la part d'erreur dans les prédictions. Par exemple si le réseau prédit un rectangle pour un marqueur rectangulaire alors la prédiction fera augmenter la valeur sur la case à l'intersection de la ligne "prédiction rectangle" et de la colonne "réel rectangle". Un réseau avec aucune erreur de prédiction a des valeurs uniquement sur la diagonale de la matrice de confusion. Les valeurs dans les cases hors diagonale renseignent sur le type d'erreur. Sur la figure 11, le réseau prédit des flèches là où il n'y a pas d'objet car c'est le fond de l'image.

Dans notre application, le réseau reconnaît bien les 3 classes et sa principale source d'erreur est la détection de morceaux du fond de l'image comme des rectangles ou des flèches, ou la fausse détection



**FIGURE 11** Matrice de confusion issue de l'entrainement de Yolo v8

de formes causées par la superposition d'objets (cf. figure 12).

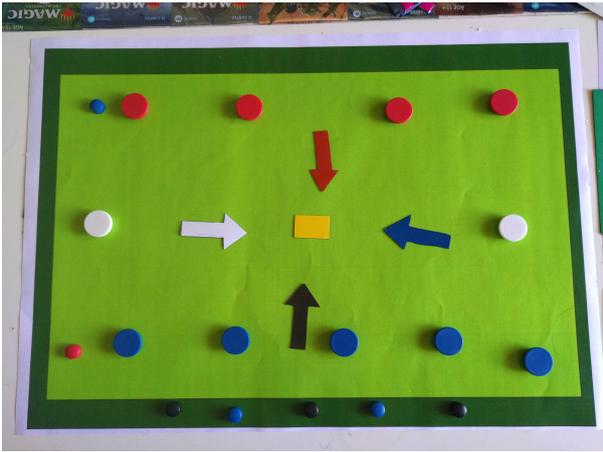


**FIGURE 12** Exemple où Yolov8 détecte des rectangles alors que c'est la superposition des éléments qui découpe la flèche comme deux rectangles

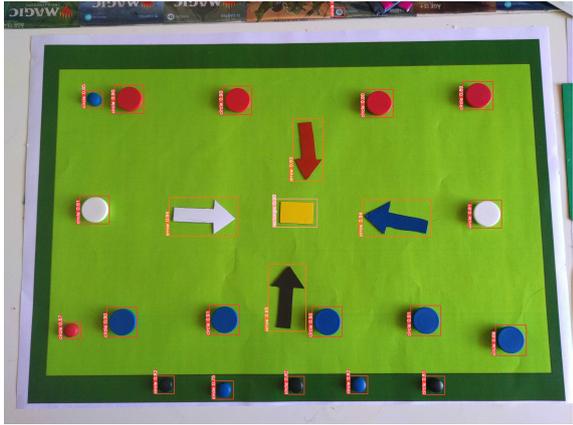
Il aurait été possible de poursuivre l'apprentissage en utilisant plus d'images présentant des superpositions pour "apprendre" au réseau à ne plus faire ce type d'erreurs, mais nous avons décidé d'arrêter l'amélioration du réseau à ce résultat car malgré le déséquilibre des classes et les quelques erreurs de détections, le réseau est capable de reconnaître les classes dans les contextes classiques (fond uni, peu de superpositions de marqueurs) qui correspondent à la majorité des utilisations. La figure 13 montre une maquette et le résultat de l'application du réseau sur celle-ci.

Le réseau détecte donc les formes et leur emplacement sont identifiés dans l'image grâce aux boites englobantes. Les couleurs des marqueurs sont récupérées en calculant la couleur moyenne du centre des boites englobantes. On peut noter que cette technique d'analyse d'image permet de détecter la forme et la position non seulement de marqueurs issus du commerce (pions, aimants, gommettes ...) mais





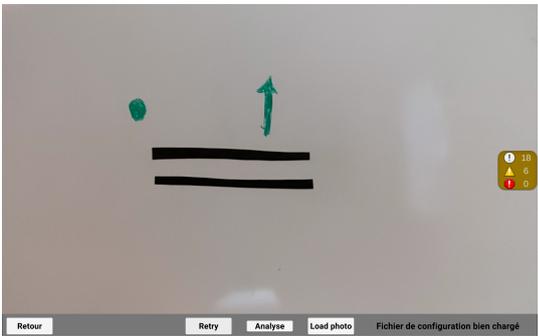
(a)



(b)

**FIGURE 13** (13a) Photographie d'une maquette (13b) Résultat obtenu après application de Yolo sur l'image

également de dessins à main levée, comme illustré dans la figure 14b. L'utilisateur sait que l'analyse est terminée avec l'apparition de rectangles gris au centre de chaque forme comme sur la capture écran de la figure 14b. Le module fournit donc les coordonnées des marqueurs ainsi que leur couleur au module de modélisation de la scène.



(a)



(b)

**FIGURE 14** (14a) Capture d'écran du menu permettant de photographier une maquette et de l'analyser par le réseau de neurones (14b) Capture d'écran de l'image lorsque la détection de forme a été réalisée

Le réseau a été entraîné avec la librairie fournie par Ultralytics en Python et le réseau a été intégré dans une application Android développée en C# sous Unity. Cette application est utilisable avec le module de visualisation détaillé plus bas dans ce chapitre. Il est disponible sur Github<sup>1</sup>. L'interface est suffisamment mature pour qu'une personne puisse, sans compétences informatiques particulières (hors capacité à installer une application sur son téléphone) photographier une maquette et l'analyser par YOLOv8.

1. [https://github.com/agroforestar/Step3\\_Visualisation](https://github.com/agroforestar/Step3_Visualisation)

### 3 Modélisation

Le module de modélisation correspond à l'implémentation en Python 3 des cartes combinatoires décrites au chapitre III. Le code est disponible sur Github<sup>2</sup>. L'annexe C montre le diagramme de classes du module. Le découpage en classes correspond à la définition mathématique (DAMIAND et LIENHARDT 2014) : une carte est composée d'un ensemble de « darts ». Il y a l'objet face qui est un ensemble de « darts » et les faces appartiennent à la carte.

Au-delà de l'implémentation des algorithmes dits élémentaires décrits dans l'ouvrage, j'ai développé des outils spécifiques de manipulation de faces. Dans notre modélisation, nous avons choisi une implémentation décrivant le système sous formes de faces, c'est à dire que tout composant physique est modélisé par une surface. De par l'usage du formalisme des cartes, toute face sera indéniablement connectée à une autre via la permutation beta2. La description du système est donc fournie par la donnée d'un ensemble de faces, construites en séquence et dont on lance des calculs d'adjacence. Les adjacences sont définies soit explicitement, soit calculés en fonction des coordonnées. Dans ce cas, nous avons écrit des outils identifiant les brins à connecter entre deux faces en fonction de seuils de distances. Tout composant est donc, par construction, adjacent à un autre. Et c'est en particulier le cas lorsque l'on a une face incluse dans une autre. Pour ce, nous avons en effet choisi de décrire la composition hiérarchique par l'ajout d'un trou qui reçoit la face incluse. Dans l'écriture de cette fonction, on définit d'abord un trou topologique dans la face de référence, ce trou est ensuite comblé par une nouvelle face parfaitement incluse au trou au sens géométrique et topologique. Cette fonction est par exemple employée pour positionner un arbre (caractérisé par une surface de couronne) dans son LSA. Tous les brins des faces des composants sont donc liés à une autre face via la permutation beta2, sauf les brins correspondants aux arêtes formant le bord du système agroforestier. Nous avons ainsi développé un algorithme spécifique définissant la surface externe du système, à partir de ces brins. Cette face est importante, en particulier pour extraire du dual toutes les composantes adjacentes aux bords du système, et donc mettre en évidence les composants en interaction directe avec l'extérieur du système. Des informations relatives au contexte sont ajoutées : type de face, nom, pour plus de convivialité.

Par ailleurs, une des difficultés du formalisme est de bien pouvoir vérifier les fonctions associées aux brins. On a donc ajouté une classe regroupant des méthodes spécifiques de visualisations afin de voir plus facilement les cartes et les fonctions de permutations et d'involutions. Elles intègrent des modifications de géométries locales (rétrécissement des faces), l'affichage de libellés, et l'usage de marqueurs pour éviter la superposition géométrique des composants et mieux identifier les fonctions attachées aux brins. Des exemples de ces visualisations sont données dans les publications pour Plant Phenomics.

---

2. [https://github.com/agroforestar/carte\\_combinatoire](https://github.com/agroforestar/carte_combinatoire)



## 4 Visualisation en réalité augmentée

La section 2.2 a montré l'importance de la visualisation pour comprendre des mécanismes complexes comme les services écosystémiques. Dans ce travail, afin de lier la visualisation de phénomènes compliqués et l'utilisation de maquette physique, on a fait l'hypothèse que la réalité augmentée tangible (BILLINGHURST, KATO et POUPYREV 2008) est la technologie la mieux adaptée. En effet, ce type de visualisation permet de garder une grande proximité entre ce qui existe dans le monde réel (les éléments de la maquette, qu'on peut voir, toucher, déplacer...) et les éléments ajoutés à l'image du monde réel. Deux visualisations sont proposées : une projetée sur la maquette tangible et une pour voir la parcelle en taille réelle in situ. Avant de les détailler, je vais présenter ce qu'est la réalité augmentée.

### 4.1 Réalité augmentée

La réalité augmentée est une technologie permettant de superposer une visualisation d'éléments virtuels dans le monde réel. Elle peut être tangible, si elle utilise des supports réels pour fonctionner, ou non tangible, si l'affichage est déconnecté du monde réel. La technologie est présente dans notre quotidien à travers les filtres dans les réseaux sociaux (cf. figure 15a), les applications d'aide à l'aménagement intérieur (figure 15c), les jeux vidéo (figure 15b) ou encore les applications professionnelles comme sur la figure 15d pour aider les chirurgiens.

Cette technologie a été utilisée récemment pour la visualisation de maquette de paysage (BANGAY et al. 2022) et en agriculture (LACHHWANI et ASLEKAR 2022 ; HURST, MENDOZA et TEKINERDOGAN 2021 ; PANDEY et al. 2020). Elle aide en affichant les informations obtenues par d'autres technologies comme des capteurs hydriques installés dans les parcelles. Des lunettes connectées, des téléphones portables ou des tablettes servent de support pour l'affichage, l'utilisation de la réalité augmentée ne nécessite pas de matériel spécifique ou coûteux (hors un smartphone, que de nombreuses personnes possèdent déjà) et est donc accessible à un grand nombre de personnes. De plus, la réalité augmentée s'insère particulièrement bien dans les processus de conception présentée au chapitre II. En effet, elle est un support pour le travail collaboratif, notamment pour les tâches d'analyse d'après SERENO et al. (2022).

Le recalage de la scène en réalité augmentée dans le monde réel est possible à l'aide de différentes techniques :

- basées sur la détection de surface plane,
- basées sur le suivi de marqueurs,
- basées sur la localisation GPS.

Pour le suivi des marqueurs, une caméra filme la scène et des méthodes d'analyse d'image sont utilisées pour repérer des marqueurs spécifiques. Ils peuvent être en 2D (image, QRCode...) ou en 3D (objet physique dont le modèle 3D a été fourni à l'ordinateur). Les méthodes de reconnaissance de ces éléments sont décrites plus en détail dans l'article de CARMIGNIANI et al. (2011). Pour la méthode basée sur la localisation, les éléments virtuels sont associés à des coordonnées GPS. Des algorithmes recalent la taille et l'orientation des objets en fonction de la distance entre l'appareil (smartphone, tablette) et le point GPS ainsi que du point de vue de la caméra. Dans mon travail, j'utilise les trois méthodes. La première





(a) Exemple de filtre Snapchat appliqué à un chien  
©Kendra Campbell / Bored Panda



(b) Capture d'écran du jeu Pokemon GO  
©Pokemon Go



(c) Exemple de l'application Sodezign ©Sodezign



(d) Exemple de l'outil HECTOR ©Inria / Photo F. Nussbaumer - Signatures

**FIGURE 15** Exemples d'applications utilisant la réalité augmentée

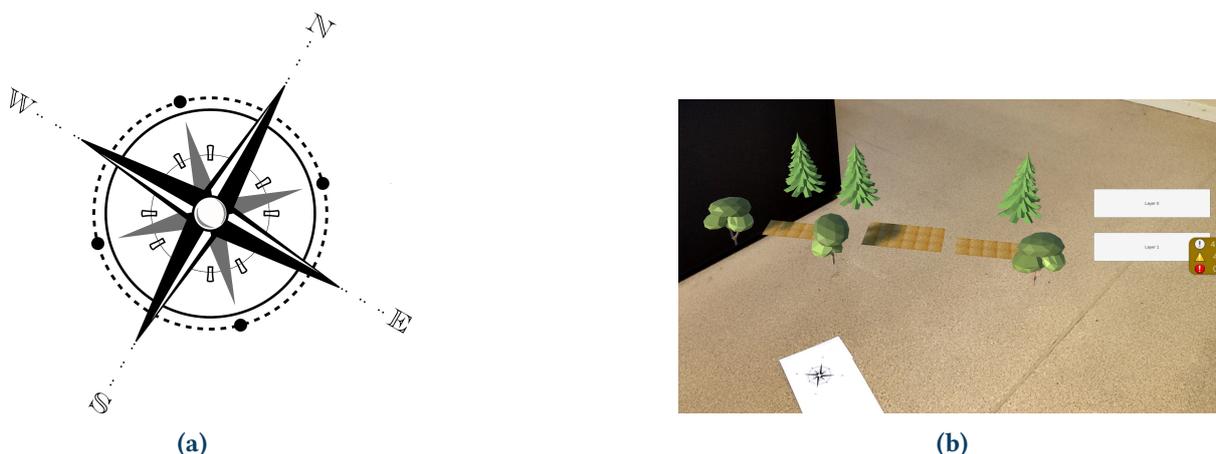


visualisation positionne la maquette 3D au-dessus de la maquette réelle, grâce à la présence sur la maquette d'une rose des vents servant de marqueur ; elle est présentée à la section 4.2. La deuxième crée une scène à taille réelle sur le terrain de l'agriculteur, à partir des coordonnées GPS ; elle est présentée à la section 4.3. La troisième, utilisée uniquement pour réaliser les tests de visualisation auprès des utilisateurs, positionne une maquette sur n'importe quelle surface plane. Ce test est présenté à la section 5.2.

Les trois méthodes ont été implémentées en C# avec ARFoundation, une bibliothèque logicielle fournie et intégrée dans le moteur de jeu vidéo Unity. Dans tous les cas, elles doivent permettre une interactivité entre l'utilisateur et la projection.

## 4.2 Visualisation en réalité augmentée avec marqueurs

Dans l'outil développé, l'utilisateur peut afficher la scène virtuelle en scannant un marqueur (cf. figure 16a). La figure 16b montre un exemple de parcelle en réalité augmentée. L'application est téléchargeable sur Github<sup>3</sup>.

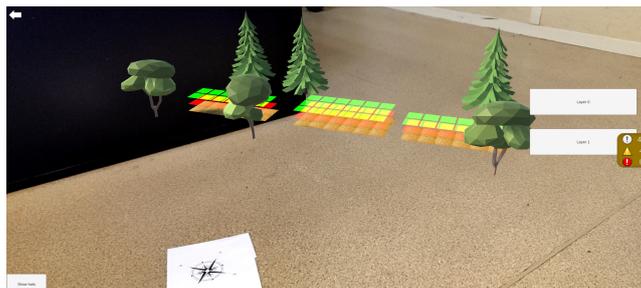


**FIGURE 16** (16a) Marqueur à scanner permettant l'affichage de la parcelle en réalité augmentée (16b) Parcelle en réalité augmentée

Bien qu'aucun modèle calculant des services écosystémiques n'ait été implémenté, les fonctionnalités pour afficher des informations concernant de tels services sont prêtes. La figure 17 montre la possibilité d'ajouter des couches visuelles dont les couleurs peuvent correspondre à des valeurs pré-calculées.

3. [https://github.com/agroforestar/Step3\\_Visualisation](https://github.com/agroforestar/Step3_Visualisation)





**FIGURE 17** Capture d'écran de la parcelle en réalité augmentée avec deux couches d'informations colorées

### 4.3 Visualisation en réalité augmentée selon des coordonnées GPS

La visualisation dans la parcelle en taille réelle permet de percevoir des services écosystémiques comme l'impact des arbres sur le paysage ou leur croissance. L'application permettant cette visualisation est téléchargeable sur Github<sup>4</sup>. Ici, la projection de la scène est calée grâce aux coordonnées GPS (cf. figure 18). Il n'y a pas encore d'interface pour facilement entrer les coordonnées GPS. Actuellement, ils sont ajoutés par l'interface de Unity. La gestion de l'affichage des éléments virtuels en fonction des coordonnées GPS est réalisée avec l'aide de la bibliothèque logicielle "AR +GPS"<sup>5</sup>. Cette visualisation est prévue pour être utilisée dans la phase de proposition du processus de conception. En effet, les agriculteurs pourront alors avoir un aperçu concret des propositions issues des ateliers ou des conseillers agricoles.



**FIGURE 18** Capture d'écran de la parcelle en réalité augmentée projetée dans un champ

4. <https://github.com/agroforestar/RAoutdoor>

5. <https://docs.unity-ar-gps-location.com/>



## 5 Informations à visualiser

### 5.1 Techniques possibles

En plus de montrer une représentation 3D des systèmes agroforestiers, ces visualisations en réalité augmentée ont pour but de représenter des services écosystémiques. Plusieurs techniques sont disponibles. Il est possible de placer des objets 3D dans l'espace afin de symboliser la présence d'éléments. Par exemple, une sphère au pied des arbres peut figurer l'encombrement racinaire. Afin de montrer des éléments dynamiques, des animations avec des objets 3D est tout aussi possible. Une machine agricole ou un troupeau peut être animé pour montrer leur déplacement dans la parcelle. Ces méthodes valorisent bien l'environnement 3D mais nécessitent une plus grande quantité de ressources processeur pour afficher les éléments et les déplacer.

Une autre technique plus proche des visualisations habituelles dans le monde académique est l'utilisation de cartes 2D de couleurs. Une carte est composée de plusieurs cellules auxquelles une couleur est attribuée. La traduction entre la couleur et une valeur indicative est possible à l'aide d'une échelle de valeurs. On peut représenter plusieurs cartes en même temps en les superposant. Cette technique sera peut-être plus facilement compréhensible par les utilisateurs car elle est utilisée en cartographie 2D qui est plus connue. Par contre, si trop de cartes sont superposées en même temps la lisibilité devient difficile. De plus, L'affichage d'une carte occupe forcément la totalité de la scène et peut aussi gêner à l'observation des arbres et des cultures. Afin d'identifier les visualisations les plus adaptées au contexte, un test auprès d'utilisateur a été réalisé.

### 5.2 Retours utilisateurs

Tout au long de la thèse, des rencontres auprès de conseillers agricoles, d'agriculteurs et de chercheurs en agroforesterie ont eu lieu. Lors de ces occasions, des démonstrations de l'avancement des travaux étaient réalisées. Toutefois, afin de mieux mesurer l'apport des visualisations en réalité augmentée, un test plus formalisé a été organisé. Son but était de déterminer les représentations les plus appréciées par les utilisateurs potentiels. L'appréciation a été mesurée en terme de compréhension de l'information, de facilité d'utilisation, de volonté de réutilisation de la visualisation et de lisibilité.

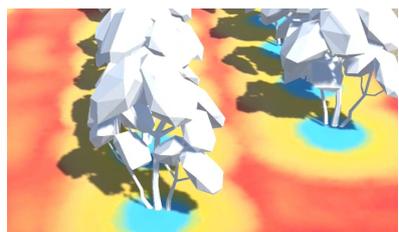
#### 5.2.1 Matériels et méthodes

Le test a consisté à montrer à des utilisateurs potentiels sept visualisations simulant des services écosystémiques ou des contraintes techniques en réalité augmentée par détection de surface plane. Le choix des informations à visualiser a été fait en fonction des motivations principales et des craintes des agriculteurs pour la création d'une parcelle agroforestière, identifiées lors des entretiens avec des conseillers (cf. chapitre II).

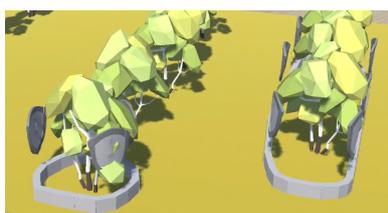
Trois visualisations représentent un phénomène unique. Il y a l'ensoleillement de la parcelle (cf. figure 19a), représenté par une carte de chaleur, la protection contre des ravageurs (cf. figure 19b),



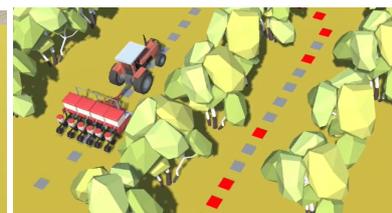
représenté à l'aide de boucliers tournant autour de la zone protégée et, enfin, le déplacement d'une machine agricole (cf. figure 19c) avec la mise en évidence par un affichage en rouge des endroits où la machine risque d'abimer les arbres. Les quatre autres visualisations (cf. figure 19d, 19e, 19f et 19g) mélangent les trois premières visualisations. Dans chaque visualisation, l'utilisateur peut faire varier la taille des arbres pour observer le phénomène à différents moments de la vie de la parcelle et dans la visualisation avec la machine agricole, l'utilisateur peut mettre en pause le mouvement du tracteur, le placer où il le souhaite le long du trajet prédéfini et faire varier la taille de l'outil tracté par l'engin.



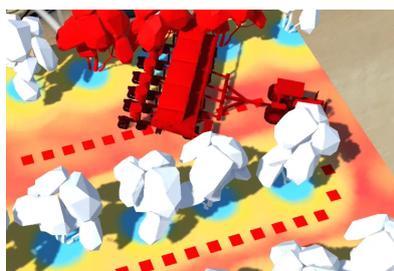
(a) Visualisation 1 : ensoleillement de la parcelle par une carte de chaleur



(b) Visualisation 2 : zone protégée contre les ravageurs



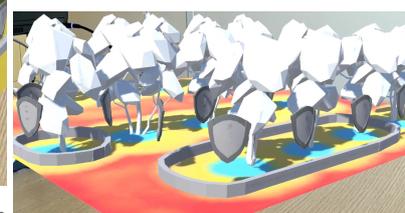
(c) Visualisation 3 : déplacement d'une machine agricole



(d) Visualisation 4 : ensoleillement et mouvement d'une machine agricole



(e) Visualisation 5 : protection contre un ravageur et mouvement d'une machine agricole



(f) Visualisation 6 : ensoleillement et protection contre un ravageur



(g) Visualisation 7 : combinaison regroupant les 3 premières

**FIGURE 19** Captures d'écran des visualisations testées

Le test a été réalisé auprès de dix-huit utilisateurs potentiels, lors de trois sessions et d'autres dates sont prévues dans l'été. Les personnes participant aux tests avaient des connaissances en agroforesterie mais des profils différents allant des chercheurs en agronomie (10) aux conseillers agroforestiers (2) en passant par des techniciens (5) et un informaticien (1). Chaque utilisateur manipulait une tablette ou un téléphone avec l'application sous Android développée spécialement. Lors de l'un des tests, du fait du nombre limité d'appareils disponibles, un seul appareil était distribué par groupe de deux.

Les utilisateurs suivaient les différentes étapes du test par lots de deux écrans, le premier était une visualisation en RA, le suivant était l'invitation à répondre aux pages correspondantes du questionnaire



papier associé. Les questionnaires sont disponibles à l'annexe B. Pour chaque étape, les utilisateurs avaient le temps qu'ils désiraient et ils pouvaient revenir à la visualisation durant l'étape de remplissage du questionnaire. Les utilisateurs ont donc tous testé les visualisations dans le même ordre. De plus, les organisateurs du test étaient là pour répondre à des questions éventuelles ou débloquer les utilisateurs s'ils rencontraient des bugs. La figure 20 est une photographie prise durant un test où l'on voit un utilisateur regarder la visualisation 1 pendant que son voisin remplit un questionnaire. Au fond de l'image, on peut remarquer que je suis en train de répondre à des utilisateurs.



FIGURE 20 Test de visualisation

Le questionnaire a été conçu pour être analysé par la méthode « System Usability Scale » (SUS) (BROOKE 1995). Elle consiste à faire indiquer aux utilisateurs s'ils sont d'accord ou non avec des affirmations en leur faisant cocher sur une échelle à 5 niveaux entre « Je suis d'accord » et « Je ne suis pas d'accord ». De plus, on a demandé aux testeurs de classer les visualisations 4, 5, 6 et 7 par ordre de préférence. On a déterminé un ordre de préférence générale en appliquant la méthode de vote de Condorcet, qui se base sur les comparaisons 2 à 2 des préférences (le testeur est interrogé sur sa visualisation préférée pour chaque couple de visualisation).

### 5.2.2 Résultats préliminaires

Les premiers résultats montrent que plusieurs visualisations sont reconnues comme facile à utiliser (visualisations 1, 2 ou 4) et les utilisateurs veulent bien les utiliser (visualisations 1 et 2) dans leur travail. La figure 21a montre le score de chaque visualisation. Ce score a été calculé à partir de 5 critères : la volonté des testeurs d'utiliser l'outil, la complexité de la visualisation, sa facilité d'utilisation, sa compréhension, la lisibilité. On peut constater que, pour chaque critère, les testeurs préfèrent quand un seul phénomène est représenté, c'est-à-dire les visualisation 1 et 3. La visualisation 2 n'a pas un bon score mais il semble que c'est dû à un problème du contenu des informations présentées. De plus, la visualisation 7 (les trois informations simultanément) est au milieu de ce classement. Toutefois, lorsqu'on



étudie le classement des visualisations faites directement par les testeurs via la méthode de Condorcet, la visualisation 7 est en dernière position (cf. figure 21b). Avec ce classement, la visualisation 7 est dernière car elle ne bat aucune autre et la visualisation 5 est en avant-dernière place. La visualisation 6 est en première position du classement. Bien qu'elle gagne autant de duel que la visualisation 5, elle est première car elle remporte le duel face à la visualisation 4 avec un point supplémentaire que le duel de la visualisation 5 face à la visualisation 4.

Ce classement est curieux car, dans la partie remarques, certains testeurs ont expliqué qu'ils appréciaient la visualisation avec tous les phénomènes (visualisation 7). Elle leur permettait d'avoir une vue globale de la scène et des phénomènes. De plus, plusieurs utilisateurs nous ont fait remarquer qu'ils aimeraient un menu permettant de filtrer les visualisations. On suppose que ces visualisations sont appréciées car les personnes aiment avoir une vision globale pour analyser la scène mais apprécient aussi de pouvoir détailler un phénomène afin de mieux le comprendre. Une analyse plus approfondie de ces premiers résultats reste nécessaire, mais ils permettent déjà de mettre en évidence la complémentarité qu'il y aurait à pouvoir passer d'une vue globale et à une vue plus détaillée grâce à un système de filtre pour faire afficher les visualisations des phénomènes désirés.

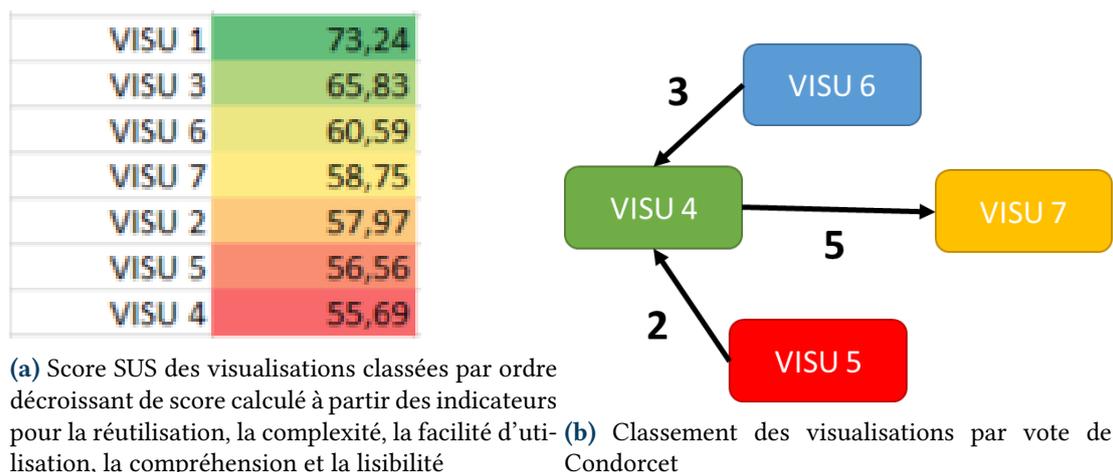


FIGURE 21 Résultats préliminaires des tests de visualisations

### 5.2.3 Discussion

Un reproche récurrent des utilisateurs concerne certaines informations affichées qui ne sont pas crédibles dans quelques visualisations. Cette remarque est surtout citée pour la visualisation de protection contre les ravageurs ou celle combinant la protection contre un ravageur et la machine agricole. Une analyse supplémentaire est nécessaire pour bien comprendre ce retour. Une première piste d'interprétation pourrait être un problème de visualisation, en particulier dans l'échelle des objets visualisés. En effet, nous avons utilisé des représentations peu réalistes (arbres "cartoon", tracteur trop grand par rapport à la taille des arbres et à la largeur des allées) ou cherché à représenter par un objet physique (un bouclier) un processus invisible (la protection contre les bioagresseurs). Ce peut être aussi un problème de crédibilité du processus représenté, c'est-à-dire la protection contre les bioagresseurs, qui est le processus commun aux deux représentations problématiques. Dans le premier cas, l'ajout d'une échelle



spatiale améliorera probablement ce point car plusieurs utilisateurs ont rapporté qu'ils auraient aimé avoir ces repères pour mieux comprendre la scène virtuelle. Par ailleurs, le symbole du bouclier comme protection provient du jeu vidéo et peut-être que c'est un code peu répandu dans l'agriculture. Dans le second cas, il faudra vérifier si le choix était pertinent de mettre une limite nette (et arbitraire du fait que la littérature ne fournit pas de valeur générique pour la distance à laquelle la présence d'habitats semi-naturels apporte une protection effective dans une parcelle agricole).

Néanmoins, plusieurs commentaires enthousiastes sont présents dans les remarques. Bien qu'un travail reste à réaliser pour améliorer l'expérience utilisateur, les retours de cet essai sont positifs et confirment l'intérêt de la réalité augmentée pour visualiser des parcelles et des processus à l'œuvre dans des systèmes agroforestiers.

Dans ce chapitre, j'ai présenté les développements informatiques réalisés pour proposer une solution pour faciliter la conception agroforestière. Les modules développés sont des prototypes c'est-à-dire qu'ils sont fonctionnels dans le cadre de tests contrôlés auprès d'un petit nombre d'utilisateurs sélectionnés. Hormis le module de capture de la scène, les autres ne sont pas suffisamment stables et faciles à utiliser pour qu'ils soient manipulés en autonomie. Un travail de développement reste à réaliser. Néanmoins, ils répondent presque entièrement au cahier des charges en permettant de visualiser en réalité augmentée la parcelle à partir de la maquette. De plus, l'interactivité avec la maquette physique est maintenue car la mise à jour de la scène virtuelle est facilement faisable avec une photo. Elle est aussi présente dans l'application avec l'aide de curseurs et bouton permettant de modifier la vue (modification de l'encombrement des arbres, modification de la position du tracteur, affichage des cartes de couleurs).

La fonctionnalité manquante est le couplage avec d'autres modèles qui permettrait entre autre la prédiction des services écosystémiques. Techniquement, le format d'échange de données entre les modules permet à un modèle de récupérer des données ou d'en ajouter mais n'a pas pu être testé dans la thèse. De même, pour l'affichage des services écosystémiques, les méthodes nécessaires pour les afficher sont prêtes mais faute de modèles de simulation, les services écosystémiques ont été affichés à partir d'informations fictives.



---

Cinquième partie  
Discussion Générale

---





# Discussion générale

Dans ce chapitre, je présente les points innovants de cette thèse ainsi que les limites de ces travaux. J'expose ensuite les perspectives en terme d'ingénierie et de recherche, en particulier des recommandations pour les prochains développements des prototypes à partir des retours utilisateurs, ainsi que pour le couplage des cartes combinatoires avec d'autres modèles. Enfin, je présente l'impact de cette modélisation sur la définition du motif agroforestier et la conception agroforestière.

1. Aspects novateurs du travail réalisé
2. Limites des travaux
3. Perspectives de développement
4. Conclusion



## 1 Aspects novateurs du travail réalisé

Les apports conceptuels de cette étude sont multiples. Tout d'abord, elle propose une formalisation informatique du concept d'« Ecosystem Service Spatial Unit » (ESSU) (RAFFLEGEAU et al. 2023), qui est lui-même un concept très récent. En utilisant les cartes combinatoires, il devient possible de modéliser et d'analyser ces structures de manière plus précise et systématique avec la théorie des graphes.

Une des hypothèses avancées, mais qui n'a pas encore été testée, est la relation structure-fonction à l'échelle du système agroforestier. Cette hypothèse s'inspire des travaux de OLDEMAN (1992), qui avait proposé cette relation mais sans avoir pu l'appliquer concrètement. Cette thèse propose un cadre conceptuel solide qui permettra de tester cette hypothèse.

De plus, la représentation par carte combinatoire pourrait éventuellement servir de représentation unifiée des systèmes agroforestiers, avec la possibilité d'exporter vers et d'importer depuis d'autres modèles. Elle pourrait ainsi favoriser l'échange de données pour faire travailler plusieurs modèles ensemble.

Ma thèse propose aussi des innovations techniques. En effet, l'implémentation des algorithmes de DAMIAND et LIENHARDT (2014) en Python dû être réalisé car il n'existait pas de bibliothèque les implémentant disponible dans ce langage. Certaines méthodes de notre implémentation sont spécifiques à l'agroforesterie mais la majorité est la stricte traduction des algorithmes présentés dans l'ouvrage et est donc réutilisable dans d'autres applications.

La visualisation en réalité augmentée peut aussi s'intégrer dans un ensemble d'outils plus large pour l'agroforesterie. On peut facilement envisager un lien avec Hi-sAFe (DUPRAZ et al. 2019). En effet, l'outil de réalité augmentée pourrait fournir le motif agroforestier créé lors de la phase de conception à Hi-sAFe. Ce dernier le simulerait en détail afin de prévoir précisément le développement de la parcelle, et les résultats de simulation pourraient ensuite être projetés sur la maquette en réalité augmentée, fournissant ainsi une interface tangible pour ce modèle de simulation qui pour l'instant utilise et produit uniquement des fichiers texte pour ses entrées et sorties. Les modules de visualisations peuvent aussi facilement compléter Eco-AF (LIAGRE et al. 2019). Une fois un système agroforestier conçu par Eco-AF, le plan peut être projeté en réalité augmentée sur le site d'implantation par l'outil de visualisation en extérieur. L'outil est donc prometteur pour modéliser les systèmes agroforestiers et les services écosystémiques avec l'aide de plusieurs modèles de simulation. La visualisation de ces informations faciliterait grandement la conception agroforestière.

Les innovations pour l'agronomie portent sur la prise de décision et l'amélioration de l'attrait pour les systèmes agroforestiers grâce à une meilleure projection des agriculteurs dans le futur système agroforestier. En effet, la réalité augmentée facilite l'affichage d'informations permettant une prise de décision plus efficace. HURST, MENDOZA et TEKINERDOGAN (2021) remarquaient que faciliter l'accès aux informations grâce aux visualisations des évaluations de système, accéléreraient les prises de décision. La conception agroforestière est un processus lent qui peut durer plus d'un an. La réalité augmentée pourrait raccourcir la durée et faciliter la plantation de parcelle agroforestière. De plus, bien que le processus de conception ne soit pas une activité quotidienne, l'emploi de la réalité augmentée, peut



rendre les métiers du monde agricoles plus attractifs comme le fait remarquer PANDEY et al. (2020).

## 2 Limites des travaux

### 2.1 Limites techniques

Il est important de noter certaines limites techniques de cette recherche qui n'ont pas pu être corrigées en raison de contraintes de temps. Tout d'abord, quelques bugs d'affichage ont été identifiés, notamment concernant le bouton de lecture pour faire démarrer l'animation du tracteur. Bien que ces bugs puissent affecter l'expérience utilisateur, ils n'ont pas de conséquences majeures sur les aspects conceptuels et les résultats de l'étude.

Un reproche qu'on peut faire au travail d'enquête est le nombre restreint de participants lors des interviews des conseillers agricoles ou le nombre restreint de testeurs de visualisations. Pour les conseillers agroforestiers, le nombre de personnes disponibles pour participer à l'enquête était relativement faible car il n'existe qu'un petit nombre d'experts dans le domaine en France. Pour les tests de visualisations, c'est principalement une contrainte de disponibilité des testeurs potentiels qui a limité le nombre de testeurs : de nombreuses personnes qui devaient participer aux tests ont annulé leur venue au dernier moment. Cependant, des tests supplémentaires sont prévus dans les mois à venir pour élargir l'échantillon des utilisateurs et obtenir des retours plus diversifiés.

Une autre limite technique concerne le réalisme des visualisations qui présentent des informations non adaptées à toutes les cultures et un aspect « cartoon ». Par exemple, lors de tests de visualisations, nous avons mis des largeurs de travail des machines agricoles allant de 2m à 6m. Or, un conseiller nous a informés que cette largeur pouvait atteindre plusieurs dizaines de mètres en grandes cultures. Bien que ces visualisations puissent ne pas refléter fidèlement la réalité, elles ont été utilisées dans un but conceptuel et pour démontrer les principes fondamentaux de l'approche proposée.

Cette recherche a également fait face à des contraintes techniques en raison du choix de la réalité augmentée comme outil de visualisation. Une de ces contraintes concerne l'acceptabilité des outils de la réalité augmentée par les utilisateurs potentiels. En effet, son utilisation chez les agriculteurs et les conseillers peut être limitée par le manque d'habitude d'utilisation des technologies numériques. Cette contrainte pourra être étudiée avec le cadre conceptuel de DIJK (2013) qui explique que l'utilisation des outils ne dépend pas que de l'accès au matériel mais qu'il faut aussi développer les compétences des utilisateurs sur la technologie choisie pour que l'usage de cette technologie se développe.



## 2.2 Limites scientifiques

Une limite scientifique qui impacte le développement de notre outil est le manque de modèles de prédiction des services écosystémiques adaptées à l'utilisation en conception. Plus précisément, il manque des modèles prédictifs des processus ou des fonctions écosystémiques qui puissent être utilisés dans une phase de conception d'un système agroforestier. Si ce verrou était levé, il serait possible, d'une part, d'ajouter de l'information aux visualisations en réalité augmentée et, d'autre part, de sélectionner les simulations à réaliser selon les besoins des utilisateurs.

Il est important de souligner que l'outil proposé dans cette recherche ne fonctionne pas comme un Outil d'Aide à la Décision (OAD) traditionnel. Il ne vise pas à optimiser ou à proposer des recommandations spécifiques. Au contraire, cet outil a été conçu délibérément pour fournir une visualisation des systèmes agroforestiers lors de la phase de définition du système. Son objectif principal est d'aider les participants à la conception à mieux appréhender les états futurs du système et à faciliter les échanges entre eux.

En choisissant de ne pas inclure d'optimisation ou de fonctionnalités de proposition, l'accent est mis en premier lieu sur le rôle de la compréhension des phénomènes visualisés par les acteurs, et en second lieu sur le rôle des discussions entre acteurs sur les scénarios envisagés pour le système agroforestier. Les compétences des acteurs de terrain et des spécialistes restent donc au centre du processus décisionnel, la modélisation et la visualisation proposée sont bien des outils au service des compétences des acteurs.

Cette approche a été délibérément choisie pour encourager une participation active et une collaboration entre les parties prenantes. En mettant l'accent sur les échanges et la visualisation des états futurs, l'outil favorise une meilleure compréhension des enjeux et des possibilités du système agroforestier, tout en permettant aux participants de contribuer avec leurs connaissances et leurs idées.

## 3 Perspectives de développement

### 3.1 Amélioration du prototype

Des améliorations peuvent être apportées au prototype proposé dans cette thèse. Tout d'abord, il est possible d'améliorer les visualisations en rendant les maquettes des plantes plus réalistes. Des améliorations futures avec la collaboration d'AMAP et les outils basés sur GreenLab (de REFFYE et al. 2021) sont possibles afin d'apporter des visualisations plus réalistes et représentatives des systèmes agroforestiers réels, en particulier des représentations des arbres basées sur des modèles architecturaux de croissance des plantes. Cependant, il convient de noter que cette amélioration peut être limitée par les contraintes de complexité informatique des modèles de plantes et de capacités des téléphones et tablettes. De même, il serait bénéfique d'ajuster les outils agricoles représentés dans l'outil pour correspondre davantage à la réalité, notamment en ce qui concerne la largeur de travail des machines agricoles utilisées en fonction du type de culture (grandes cultures, maraîchage...).



Une autre amélioration importante consisterait à intégrer les différents modules de l'outil en un seul outil cohérent. Actuellement, le module de modélisation par carte combinatoire est séparé du module de capture et de visualisation. L'intégration de ces modules permettrait aux utilisateurs d'accéder à toutes les fonctionnalités de manière fluide et cohérente.

L'interactivité de l'outil peut également être améliorée. Par exemple, l'ajout de filtres pour permettre aux utilisateurs de sélectionner les informations à afficher selon leurs besoins spécifiques serait une amélioration intéressante.

## 3.2 Du motif agroforestier à la parcelle agroforestière

Afin de faciliter la création d'un plan de la future parcelle agroforestière, il serait très pertinent d'automatiser la génération de ce plan à partir du motif agroforestier tout en prenant en compte des contraintes comme la largeur des tournières. Cela serait d'autant plus utile pour la visualisation de la parcelle complète en extérieur et en taille réelle le système agroforestier à maturité avant même sa plantation. On peut imaginer, l'agriculteur se déplaçant avec une machine agricole au sein de la parcelle tout en ayant la parcelle virtuelle visible afin de tester les manœuvres agricoles risque de blesser les arbres.

Même si la modélisation des évolutions d'outils agricoles attelés (parfois poly articulés) reste imparfaite, l'intégration de ces évolutions dans l'outil de réalité augmentée semble possible. D'ailleurs les constructeurs utilisent déjà la réalité augmentée comme outil marketing de découverte de leur matériel ou pour former à la maintenance des matériels<sup>6</sup>.

## 3.3 Théorie des graphes au service du motif agroforestier

Mes travaux ouvrent aussi une piste pour une meilleure caractérisation des systèmes agroforestiers. En effet, on peut extraire le motif défini par RAFFLEGEAU et al. (2023) d'un système agroforestier dont les services écosystémiques ont été identifiés en employant les méthodes de recherche de la théorie des graphes (DI GIUSTO et al. 2019; AGGARWAL et WANG 2010). Ces informations pourraient alors être stockées pour créer une base de données regroupant les motifs agroforestiers et les services écosystémiques. Il devient donc envisageable de réaliser de la fouille de données pour chercher des familles de motifs ou des corrélations entre l'organisation spatiale et les services écosystémiques. Le travail de NAJM (2022) propose une base de données regroupant une liste d'espèce et leur apport sur des fonctions agronomiques. Ce travail ne prend pas en compte l'aspect spatial mais s'il était combiné avec les motifs agroforestiers, il deviendrait envisageable d'associer des valeurs d'impact sur les services écosystémiques à partir des espèces présentes dans le motif.

De plus, cette base de données serait utile aux conseillers agroforestiers. Ils pourraient alors proposer des prototypes basés sur les connaissances collectives en plus de celles des personnes impliquées dans le projet grâce à l'ensemble des motifs et des données transférables à leur cas dans la base de données.

6. <https://www.reussir.fr/machinisme/la-realite-augmentee-entre-dans-les-ateliers-de-repar>



### 3.4 Couplage des modèles

Les cartes combinatoires et le format ouvert des données d'échanges entre les modules rendent le couplage de modèles possible. Toutefois, de nombreux points doivent être explicités comme la définition de protocoles d'échange d'informations entre les modèles à ajouter et les cartes combinatoires. Des tels travaux sont en dehors du cadre posé pour cette thèse, mais pourront s'appuyer sur des développements et des expériences acquises au sein d'Absys, sur Hi-sAFe (DUPRAZ et al. 2019) en particulier, et au Cirad au sein des travaux du réseau MaCS4Plants sur les plateformes de couplages de modèles par interactions comme MIMIC (TRIKI et al. 2022) ou par workflow comme OpenAlea (PRADAL et al. 2015).

Les modèles couplés pourront simuler le système à plusieurs échelles spatiales et temporelles comme le recommande la synthèse bibliographique de Gaudio *et al.* (2022) pour les systèmes multi espèces. Ils seraient associés aux différents éléments (nœud ou nœud) de la carte combinatoire ou de son dual. Bien que, pour chaque modèle, il faille prendre en compte les contraintes techniques comme le temps de calcul de simulation, les cartes pourraient être couplées avec les modèles de plantes Fonction-Structure (Vos et al. 2010).

### 3.5 Nouvelles utilisations envisageables

Les rencontres avec les conseillers agricoles ont permis de guider le développement du prototype mais aussi d'imaginer des utilisations qui n'étaient pas envisagées au départ de ce travail de recherche. En effet, un conseiller a remarqué que la visualisation en extérieur a certaines applications concrètes dès la première visite de la parcelle. En effet il est possible de montrer immédiatement des linéaires arborés avant même la conception de la parcelle. L'idée serait de pouvoir générer des haies préconçues entre deux points GPS afin de donner un aperçu visuel de l'aménagement aux potentiels agriculteurs dès la première visite de terrain, afin de leur donner un avant-goût du travail futur. Cette idée a permis de changer le cas d'utilisation initial qui était l'utilisation de la visualisation en extérieur uniquement après la création d'une proposition. De plus, cette idée ouvre la voie de la conception *in situ* dans laquelle des aménagements sont intégrés « en direct » (sur le terrain) dans la parcelle numérique et visualisés immédiatement. La réalité augmentée semble donc permettre de développer des applications supplémentaires utilisables sur le terrain mais il est nécessaire d'aller plus à la rencontre des conseillers et des agriculteurs pour identifier ces utilisations.

## 4 Conclusion

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de la conception des systèmes agroforestiers, qui sont des systèmes complexes incluant des plantes pérennes. Il est souvent difficile d'avoir une perception claire de l'aspect futur des systèmes agroforestiers, étant donné le manque d'exemples réels de systèmes agroforestiers matures. De plus, les décisions sur l'aspect spatial revêtent une importance prépondérante en raison de leur impact sur les services écosystémiques et l'irréversibilité de certains choix, tels que l'espacement des arbres. C'est pourquoi, cette thèse a cherché à répondre à la question « Comment



faciliter la conception agroforestière? ». Pour y répondre, il a été nécessaire de s'intéresser à différentes interrogations pluridisciplinaires, dans le domaine des sciences humaines et sociales (sur les pratiques de conception, cf. chapitre II) ou de la modélisation informatique (modélisation des systèmes agroforestiers, cf. chapitre III) ou encore de l'interaction Homme-Machine (sur l'utilisation de la réalité augmentée lors de la conception).

Premièrement, il a été démontré que la réalité augmentée peut effectivement faciliter la conception agroforestière, en se basant à la fois sur la possibilité de représentation des différents éléments du système agroforestier et des services écosystémiques et sur l'intérêt exprimé par les utilisateurs potentiels lors de tests. Cette technologie peut donc compléter les outils actuellement utilisés en conception afin de montrer les dynamiques spatiales et temporelles qui n'étaient pas représentées

Deuxièmement, la modélisation des systèmes agroforestiers et des services écosystémiques associés a été abordée en utilisant les cartes combinatoires. Bien que la modélisation précise des services écosystémiques n'ait pas été entièrement réalisée dans le cadre de cette thèse, les cartes combinatoires proposent une structure représentant l'aspect spatial et les interactions dans le système agroforestier.

Enfin, un prototype d'outil utilisant la réalité augmentée a été proposé. Il est composé de modules permettant de passer facilement d'une maquette physique de conception collaborative à une maquette virtuelle, de projeter cette maquette en réalité augmentée pour visualiser l'évolution future de la parcelle et des services écosystémiques qui seront produits dans le futur dès la phase de conception collaborative. D'après le cahier des charges créé à partir des interviews de conseillers agricoles, le prototype contient presque toutes les fonctionnalités (maquette tangible, rapidité, visualisation spatiale et 3D, interactivité) pour faire face aux difficultés rencontrées par les agriculteurs et les conseillers lors de la conception des systèmes agroforestiers.

En conclusion, cette thèse a apporté des contributions significatives à la conception des systèmes agroforestiers en explorant l'utilisation de la réalité augmentée comme un outil novateur pour visualiser ces systèmes. Les résultats obtenus indiquent que la réalité augmentée présente un fort potentiel pour répondre aux défis spécifiques liés à la conception des systèmes agroforestiers. Cependant, des pistes d'amélioration subsistent, notamment en termes de modélisation des services écosystémiques et d'amélioration de l'outil de réalité augmentée lui-même. Ces avancées pourraient ouvrir de nouvelles perspectives pour la conception agroforestière et contribuer à une agriculture plus durable et résiliente.





---

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---





## Bibliographie

- AGGARWAL, Charu C. et Haixun WANG (2010). "Graph Data Management and Mining : A Survey of Algorithms and Applications". In : *Managing and Mining Graph Data*. Sous la dir. de Charu C. AGGARWAL et Haixun WANG. T. 40. Boston, MA : Springer US, p. 13-68. ISBN : 978-1-4419-6044-3 978-1-4419-6045-0. DOI : 10 . 1007 / 978 - 1 - 4419 - 6045 - 0 \_ 2. URL : [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-6045-0\\_2](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-6045-0_2) (visité le 09/09/2021).
- ALA-HULKKO, Terhi (août 2020). "Integrating Accessibility Analysis in Ecosystem Service and Disservice Mapping". In : *Nordia Geographical Publications* 49.3, p. 73. URL : <https://nordia.journal.fi/article/view/97279>.
- BANGAY, Shaun et al. (2022). "Opportunities with Slippy Maps for Terrain Visualization in Virtual and Augmented Reality :". in : *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. 17th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications. Online Streaming, – Select a Country – : SCITEPRESS - Science and Technology Publications, p. 139-146. ISBN : 978-989-758-555-5. DOI : 10 . 5220 / 0010774700003124. URL : <https://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0010774700003124> (visité le 28/06/2022).
- BILLINGHURST, Mark, Hirokazu KATO et Ivan POUPYREV (2008). "Tangible Augmented Reality". In : *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Courses on - SIGGRAPH Asia '08*. ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Courses. Singapore : ACM Press, p. 1-10. DOI : 10 . 1145 / 1508044 . 1508051. URL : <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1508044.1508051> (visité le 29/06/2023).
- BROOKE, John (30 nov. 1995). "SUS : A Quick and Dirty Usability Scale". In : *Usability Eval. Ind.* 189.
- BURKHARD, Benjamin et al. (2 juin 2014). "Ecosystem Service Potentials, Flows and Demands-Concepts for Spatial Localisation, Indication and Quantification". In : *Landscape Online* 34, p. 1-32. ISSN : 1865-1542. DOI : 10 . 3097 / LO . 201434. URL : <https://landscape-online.org/index.php/lo/article/view/LO.201434> (visité le 05/11/2021).
- CANTWELL, Margot D. et Richard T. T. FORMAN (déc. 1993). "Landscape Graphs : Ecological Modeling with Graph Theory to Detect Configurations Common to Diverse Landscapes". In : *Landscape Ecology* 8.4, p. 239-255. ISSN : 0921-2973, 1572-9761. DOI : 10 . 1007 / BF00125131. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF00125131> (visité le 22/03/2022).
- CARMIGNIANI, Julie et al. (1<sup>er</sup> jan. 2011). "Augmented Reality Technologies, Systems and Applications". In : *Multimedia Tools and Applications* 51.1, p. 341-377. ISSN : 1573-7721. DOI : 10 . 1007 / s11042 - 010 - 0660 - 6. URL : <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6> (visité le 25/06/2023).
- CASTEL, Laurie et al. (1<sup>er</sup> mai 2019). "Concevoir et Expérimenter Des Vergers Agroforestiers En Agriculture Biologique (VERTiCAL)". In : 76, p. 273-289. DOI : 10 . 15454 / 5za04b.
- CASTLE, Sarah E., Daniel C. MILLER, Nikolas MERTEN et al. (17 mars 2022). "Evidence for the Impacts of Agroforestry on Ecosystem Services and Human Well-Being in High-Income Countries : A Systematic Map". In : *Environmental Evidence* 11.1, p. 10. ISSN : 2047-2382. DOI : 10 . 1186 / s13750 - 022 - 00260 - 4. URL : <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00260-4> (visité le 03/06/2022).



- CASTLE, Sarah E., Daniel C. MILLER, Pablo J. ORDONEZ et al. (2021). “The Impacts of Agroforestry Interventions on Agricultural Productivity, Ecosystem Services, and Human Well-Being in Low- and Middle-Income Countries : A Systematic Review”. In : *Campbell Systematic Reviews* 17.2, e1167. ISSN : 1891-1803. DOI : 10.1002/c12.1167. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/c12.1167> (visité le 03/06/2022).
- CERDÁN, C. R. et al. (1<sup>er</sup> juill. 2012). “Local Knowledge of Impacts of Tree Cover on Ecosystem Services in Smallholder Coffee Production Systems”. In : *Agricultural Systems* 110, p. 119-130. ISSN : 0308-521X. DOI : 10.1016/j.agsy.2012.03.014. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X12000571> (visité le 03/06/2023).
- CHIEZE, Blandine, Marion CASAGRANDE et Aude ALAPHILIPPE (2021). “Guide pratique de Co-conception”. In : DOI : 10.15454/HZW1-AA02. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-03227988> (visité le 21/06/2021).
- DAMIAND, Guillaume et Pascal LIENHARDT (19 sept. 2014). *Combinatorial Maps : Efficient Data Structures for Computer Graphics and Image Processing*. 0<sup>e</sup> éd. A K Peters/CRC Press. ISBN : 978-0-429-17037-9. DOI : 10.1201/b17403. URL : <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482206531> (visité le 29/09/2022).
- DEGENNE, P. et D. LO SEEN (2016). “Ocelet : Simulating Processes of Landscape Changes Using Interaction Graphs”. In : *SoftwareX* 5, p. 89-95. ISSN : 23527110. DOI : 10.1016/j.softx.2016.05.002. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352711016300103> (visité le 20/02/2023).
- De REFFYE, Philippe et al. (16 fév. 2021). “Two Decades of Research with the GreenLab Model in Agronomy”. In : *Annals of Botany* 127.3, p. 281-295. ISSN : 0305-7364. DOI : 10.1093/aob/mcaa172. URL : <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa172> (visité le 25/11/2022).
- DI GIUSTO, Cinzia et al. (2019). “Pattern Matching in Discrete Models for Ecosystem Ecology :” in : *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*. 10th International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms. Prague, Czech Republic : SCITEPRESS - Science and Technology Publications, p. 101-111. ISBN : 978-989-758-353-7. DOI : 10.5220/0007485801010111. URL : <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0007485801010111> (visité le 29/09/2021).
- DIJK, Johannes A. G. M. van (2013). “A Theory of the Digital Divide”. In : *The Digital Divide : The Internet and Social Inequality in International Perspective*. Routledge, p. 29-51. URL : <https://research.utwente.nl/en/publications/a-theory-of-the-digital-divide> (visité le 14/07/2023).
- DUPRAZ, Christian et al. (16 avr. 2019). “Hi-sAFe : A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree-Crop Interactions”. In : *Sustainability* 11.8, p. 2293. ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su11082293. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/8/2293> (visité le 11/07/2022).
- FAO (2018). *Les 10 éléments de l'agroécologie*. FAO. ISBN : I9037FR/1/05.18.
- GAUCHEREL, Cédric et al. (25 sept. 2012). “Understanding Patchy Landscape Dynamics : Towards a Landscape Language”. In : *PLoS ONE* 7.9. Sous la dir. de Lennart MARTENS, e46064. ISSN : 1932-6203. DOI :



- 10.1371/journal.pone.0046064. URL : <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0046064> (visité le 27/09/2021).
- GAUDIO, Noémie et al. (1<sup>er</sup> jan. 2022). “Exploring Complementarities between Modelling Approaches That Enable Upscaling from Plant Community Functioning to Ecosystem Services as a Way to Support Agroecological Transition”. In : *in silico Plants* 4.1. Sous la dir. de Tsu-Wei CHEN, Stephen P LONG et Tsu-Wei CHEN, diab037. ISSN : 2517-5025. DOI : 10.1093/insilicoplants/diab037. URL : <https://academic.oup.com/insilicoplants/article/doi/10.1093/insilicoplants/diab037/6449487> (visité le 26/02/2023).
- HAINES-YOUNG, Roy et Marion POTSCHIN-YOUNG (11 juin 2018). “Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1) : A Policy Brief”. In : *One Ecosystem* 3, e27108. ISSN : 2367-8194. DOI : 10.3897/oneeco.3.e27108. URL : <https://oneecosystem.pensoft.net/articles.php?id=27108> (visité le 16/03/2022).
- HURST, William, Frida Ruiz MENDOZA et Bedir TEKINERDOGAN (déc. 2021). “Augmented Reality in Precision Farming : Concepts and Applications”. In : *Smart Cities* 4.4 (4), p. 1454-1468. ISSN : 2624-6511. DOI : 10.3390/smartcities4040077. URL : <https://www.mdpi.com/2624-6511/4/4/77> (visité le 31/05/2023).
- JEUFFROY, Marie-Helene, Lorène PROST et Eric SCOPEL (2021). “Tae\_aes\_act\_-\_s1\_lp\_es\_mhj\_vf.Pdf”. Séminaire Interdépartement AgroEcoSystem et ACT. URL : [https://www.inrae.fr/sites/default/files/tae\\_aes\\_act\\_-\\_s1\\_lp\\_es\\_mhj\\_vf.pdf](https://www.inrae.fr/sites/default/files/tae_aes_act_-_s1_lp_es_mhj_vf.pdf) (visité le 03/06/2023).
- JOCHER, Glenn, Ayush CHAURASIA et Jing QIU (jan. 2023). *YOLO by Ultralytics*. Version 8.0.0. URL : <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (visité le 25/06/2023).
- JUŘÍK, Vojtěch et al. (21 mai 2020). “The 3D Hype : Evaluating the Potential of Real 3D Visualization in Geo-Related Applications”. In : *PLOS ONE* 15.5. Sous la dir. de Vincent LECOURS, e0233353. ISSN : 1932-6203. DOI : 10.1371/journal.pone.0233353. URL : <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0233353> (visité le 29/04/2022).
- KLEIN, T. M., E. CELIO et A. GRÊT-REGAMEY (1<sup>er</sup> juin 2015). “Ecosystem Services Visualization and Communication : A Demand Analysis Approach for Designing Information and Conceptualizing Decision Support Systems”. In : *Ecosystem Services*. Best Practices for Mapping Ecosystem Services 13, p. 173-183. ISSN : 2212-0416. DOI : 10.1016/j.ecoser.2015.02.006. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041615000248> (visité le 19/07/2021).
- LACHHWANI, Ritu et Avinash ASLEKAR (nov. 2022). “Augmented Reality in Agriculture”. In : *2022 International Interdisciplinary Humanitarian Conference for Sustainability (IIHC)*. 2022 International Interdisciplinary Humanitarian Conference for Sustainability (IIHC), p. 150-153. DOI : 10.1109/IIHC55949.2022.10059707.
- LANÇON, Jacques et al. (1<sup>er</sup> juin 2007). “An Improved Methodology for Integrated Crop Management Systems”. In : *Agronomy for Sustainable Development* 27.2, p. 101-110. ISSN : 1773-0155. DOI : 10.1051/agro:2006037. URL : <https://doi.org/10.1051/agro:2006037> (visité le 03/06/2023).



- LEHMANN, Lisa Mølgaard et al. (6 juill. 2020). “Productivity and Economic Evaluation of Agroforestry Systems for Sustainable Production of Food and Non-Food Products”. In : *Sustainability* 12.13, p. 5429. ISSN : 2071-1050. DOI : 10 . 3390 / su12135429. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/13/5429> (visité le 30/05/2023).
- LIAGRE, Fabien et al. (20 mai 2019). “EcoAF on CAPSIS, Simulates the Economics Effects of Your Choices When Building and Managing an Agroforestry Field!” In : 4th World Congress on Agroforestry. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02878592> (visité le 11/07/2022).
- MARSDEN, Claire et al. (1<sup>er</sup> août 2020). “How Agroforestry Systems Influence Soil Fauna and Their Functions - a Review”. In : *Plant and Soil* 453.1, p. 29-44. ISSN : 1573-5036. DOI : 10 . 1007 / s11104 - 019 - 04322 - 4. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04322-4> (visité le 06/10/2022).
- NAIR, P. K. R. (1993). *An Introduction to Agroforestry*. Dordrecht ; Boston : Kluwer Academic Publishers in cooperation with International Centre for Research in Agroforestry. 499 p. ISBN : 978-0-7923-2134-7.
- NAJM, Elie (2022). “Raisonnement sur des données en agroécologie : application à la sélection d’espèces végétales de service”. In.
- OLDEMAN, Roelof A. A. (1<sup>er</sup> juill. 1992). “Architectural Models, Fractals and Agroforestry Design”. In : *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Application of Ecological Principles to Sustainable Land-use Systems 41.2, p. 179-188. ISSN : 0167-8809. DOI : 10 . 1016 / 0167 - 8809 (92) 90108 - N. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016788099290108N> (visité le 21/11/2022).
- PANDEY, Hrithik et al. (22 fév. 2020). *Augmented Reality in Agriculture*. 2752. EasyChair, p. 5.
- PRADAL, Christophe et al. (29 juin 2015). “OpenAlea : Scientific Workflows Combining Data Analysis and Simulation”. In : *Proceedings of the 27th International Conference on Scientific and Statistical Database Management*. SSDBM 2015 : International Conference on Scientific and Statistical Database Management. La Jolla California : ACM, p. 1-6. ISBN : 978-1-4503-3709-0. DOI : 10 . 1145 / 2791347 . 2791365. URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2791347.2791365> (visité le 08/07/2023).
- RAFFLEGEAU, Sylvain et al. (20 juin 2023). “The ESSU Concept for Designing, Modeling and Auditing Ecosystem Service Provision in Intercropping and Agroforestry Systems. A Review”. In : *Agronomy for Sustainable Development* 43.4, p. 43. ISSN : 1773-0155. DOI : 10 . 1007 / s13593 - 023 - 00894 - 9. URL : <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00894-9> (visité le 26/06/2023).
- SALEMBIER, Chloé et al. (juill. 2018). “Genealogy of Design Reasoning in Agronomy : Lessons for Supporting the Design of Agricultural Systems”. In : *Agricultural Systems* 164, p. 277-290. ISSN : 0308521X. DOI : 10 . 1016 / j . agsy . 2018 . 05 . 005. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308521X17308181> (visité le 03/06/2023).
- SERENO, Mickael et al. (juin 2022). “Collaborative Work in Augmented Reality : A Survey”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 28.6, p. 2530-2549. ISSN : 1941-0506. DOI : 10 . 1109 / TVCG . 2020 . 3032761.



- TRIKI, Housseem et al. (2022). “Coupling Plant Growth Models, Application on Pest and Disease Models : An Interaction Structure Proposal”. In : 7th International Symposium on Plant Growth Modelling, Simulation, Visualization, and Applications (PMA2022). Wuxi, China.
- TZUK, Omer, Hannes UECKER et EHUD MERON (2020). “The Role of Spatial Self-Organization in the Design of Agroforestry Systems”. In : *PLOS ONE* 15.7, e0236325. ISSN : 1932-6203. DOI : 10 . 1371 / journal . pone . 0236325. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0236325> (visité le 30/11/2020).
- VEREIJKEN, P (1<sup>er</sup> sept. 1997). “A Methodical Way of Prototyping Integrated and Ecological Arable Farming Systems (I/EAFS) in Interaction with Pilot Farms”. In : *European Journal of Agronomy* 7.1, p. 235-250. ISSN : 1161-0301. DOI : 10 . 1016 / S1161 - 0301 (97 ) 00039 - 7. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030197000397> (visité le 03/06/2023).
- Vos, J. et al. (1<sup>er</sup> mai 2010). “Functional–Structural Plant Modelling : A New Versatile Tool in Crop Science”. In : *Journal of Experimental Botany* 61.8, p. 2101-2115. ISSN : 0022-0957. DOI : 10 . 1093 / jxb / erp345. URL : <https://doi.org/10.1093/jxb/erp345> (visité le 29/06/2023).
- ZHU, Xiai et al. (1<sup>er</sup> août 2020). “Reductions in Water, Soil and Nutrient Losses and Pesticide Pollution in Agroforestry Practices : A Review of Evidence and Processes”. In : *Plant and Soil* 453.1, p. 45-86. ISSN : 1573-5036. DOI : 10 . 1007 / s11104 - 019 - 04377 - 3. URL : <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3> (visité le 06/10/2022).





---

## ANNEXES

---





## Listes des articles concernant les services écosystémiques





	carte	Scène virtuelle	Couleur	Visualisation dynamique	Evolution temporelle	ment de la zonAF spécifique ?	Commentaire	Ref recherche	Interactif ?	obj	implication (le diagnostique	Has_Representation
Axe Y	carte avec carte sans GIS avec point	2D	3D	Echelle de couleur						Information		
				Non	Non	Agriculture	Mesure l'impac	11 Non	X			0
X			X	Non	Oui	Foret	Estimation de	12 Non			X	0
X			X	Non	Oui	Agriculture	Estime l'imapc	14 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Mesure l'impac	14 Non	X			1
X			X	Non	Non	Urban	Evalue des ser	15 Non			X	1
X			X	Non	Non	Agriculture	Propose une r	11 Non	X			1
Proportion				Non	Non	Agriculture	Mesure l'influ	14 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Etudie l'impac	14 Non	X			1
				Non	Oui	Agriculture	Role de l'habit	16 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Evalue l'impac	16 Non	X			1
Isoler		X		Non	Non	Agriculture	Mesure des Ef	16 Non	X			1
Value X				Non	Oui	Multiple	Estime le l'évc	11 Non			X	1
X				Non	Non	Multiple	Estimation de	12 Non	X			1
X			X	Non	Non	Agriculture	Mesure le stor	14 Non	X			0
X	X			Non	Non	Multiple	Evalue des Se	19 Non	X			1
X			X	Non	Non	Multiple	Présente des s	19 Non	X			0
				Non	Non	Agriculture	Evalue les trac	20 Non	X			1
				Non	Oui	Urban	Mesure la bio	10 Non	X			1
relative value				Non	Non	Agriculture	Mesure la fon	11 Non	X			1
X			X	Non	Non	Agriculture	Montre l'évol	11 Non			X	0
X			X	Non	Oui	Foret		12 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Mesure le stor	15 Non	X			1
				Non	Oui	Multiple	Evolution des	15 Non			X	0
				Non	Non	Agriculture	Evalue le regu	16 Non	X			1
				Non	Non	Multiple	A l'échelle du	16 Non	X			1
X		X*		Non	Oui	Multiple	Propose un nc	17 Non	X			1
X				N	N	Multiple	Présnete un o	17 Oui	X			0
X			X	Non	Non	Multiple	Estime les syn	19 Non	X			1
Maladie				Non	Non	Agriculture	Mesure l'impac	10 Non	X			1
				Non	Oui	Agriculture	Evaluation de:	10 Non	X			1
				Non	Oui	Foret	Estime le com	12 Non	X			1
X	X		X	Non	Non	Multiple	Rapport de l'If	14 Non	X			1
				Non	Oui	Agriculture	Evalue l'appor	14 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Etudie l'influe	14 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Impact de pas	15 Non	X			1
				Non	Non	Agriculture	Impact sur les	16 Non	X			1
				Non	Oui	Multiple	Etudit les rela	19 Non	X			1
X				Non	Non	Multiple	Utilisation d'u	10 Non	X			1
pourcent				Non	Non	Multiple	Estimation de	12 Non	X			1
X			X	Non	Non	Foret	Estimation de:	12 Non			X	0
				Non	Non	Mangrove	Mesure de l'ui	12 Non	X			1
X			X	Non	Oui	Multiple	Evaluation de:	15 Non			X	1
				Non	Non	Agriculture	Etudie les fleu	16 Non	X			1
				Non	Non	Multiple	Estime les syn	19 Non	X			1
X			X	Non	Non	Multiple	Evalue un bun	20 Non	X			1
X			X	Non	Non	Multiple	Evalue des SE	20 Non	X			1
				Non	Non	Parc	Evalue des bui	20 Non	X			1
X			X	Non	Non	Multiple	Evalue avec dr	20 Non	X			1
				Non	Oui	Multiple	Evaluation de:	10 Non	X			1
				Non	Oui	Multiple	Site web moni	13 Oui			X	0
				Non	Non	Agriculture	Etude sur l'am	15 Non	X			1
												0
X			X	Non	Non	Agriculture	Evalue des Se	20 Non	X			1
X			X	Non	Non	Multiple	Etudi 8 Se en l	20 Non	X			1
Value X				Non	Non	Agriculture	Propose un fr	10 Non	X			1
Value				Non	Non	Multiple	Montre l'évol	11 Non	X			1
				Non	Non	Verger	Etudie l'impac	14 Non	X			1
				Non	Oui	Multiple	Evalue l'influe	18 Non	X			1
				Non	Non	Multiple	Recherche patt	18 Non				1
X			X	Non	Non	Aquatique	Evalue la mod	15 Non	X		X	1
X	X		X	Non	Non	Multiple	Etudie les rela	19 Non	X			0

Has\_Visualization

0  
1  
1  
1  
0  
1  
1  
0  
0  
0  
0  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
0  
0  
0  
1  
1  
1  
1  
1  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
1  
1  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
1  
1  
1  
0  
0  
0  
0  
1  
1  
1  
0  
0  
0  
1  
1

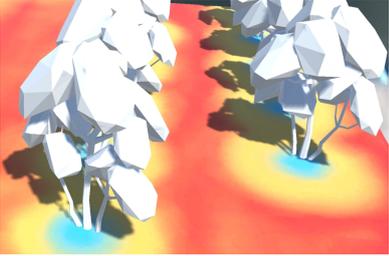
# Questionnaire du test de visualisations en réalité augmentée



## Questionnaire n°1 : Quantité de lumière au sol

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

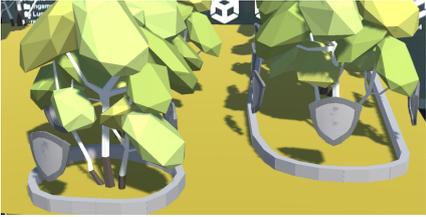
	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Les zones recevant peu de lumière sont facilement différenciables des zones en recevant fortement					
Le code couleur utilisé (bleu au rouge) est un bon choix de représentation					
Afficher le reste de la parcelle en blanc permet de voir plus clairement l'information					
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres apporte une plus-value intéressante sur cette visualisation					

Avez-vous des propositions d'améliorations ? Remarques ?

## Questionnaire n°2 : Répulsion des ravageurs

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Les zones de répulsion sont facilement identifiables					
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
L'utilisation de boucliers est bon choix pour représenter la protection d'une zone					
Le fait que les boucliers tournent autour de la zone aide à délimiter clairement la zone					
Le fait de délimiter la zone protégée par des murs est utile					
Les boucliers ont une taille idéale (assez visible mais pas imposante)					
La couleur des symboles de bouclier et des murs est un bon choix de représentation					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres apporte une plus-value intéressante sur cette visualisation					

Avez-vous des propositions d'améliorations? Remarques ?



## Questionnaire n°3 : Le passage des machines

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

### Questions

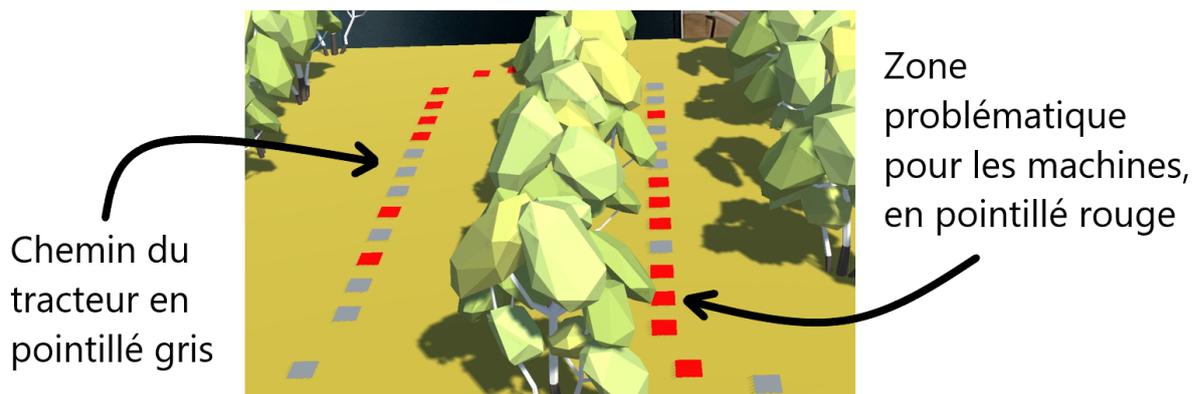
1) Avez-vous identifié le chemin du tracteur ?

- OUI  
 NON

2) Avez-vous identifié des zones problématiques pour les machines ?

- OUI  
 NON

Explication :

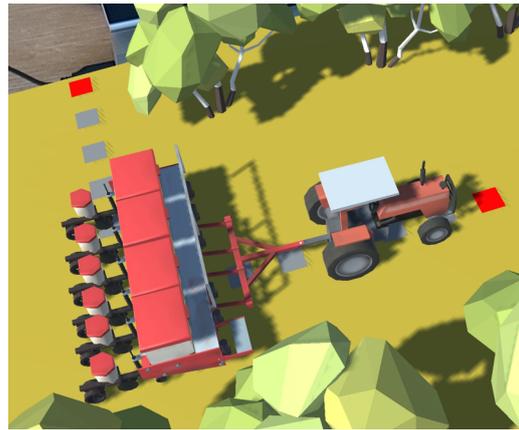


3) Avez-vous, vous-même, déplacé le tracteur sur la parcelle, sans utiliser le bouton play/pause ? (**Inutile de répondre si vous avez seulement regardé une vidéo**)

- OUI  
 NON

4) Avez-vous vu passer le tracteur sur une zone problématique où il ne passait pas ?

- OUI  
 NON



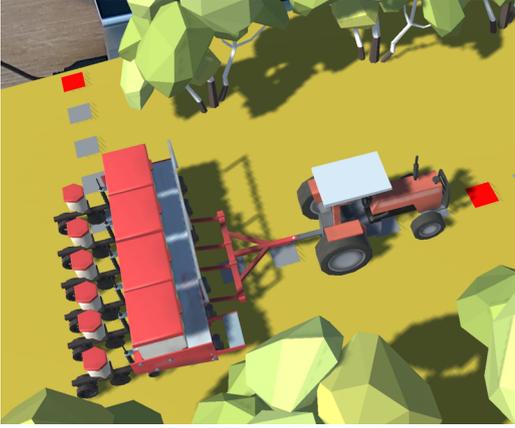
*Tracteur positionné sur son chemin sur l'image de droite et sur une zone où il ne passe pas sur l'image de gauche.*

5) Avez-vous modifié la taille des arbres via le curseur "croissance" à gauche de l'écran ? **(Inutile de répondre si vous avez seulement regardé une vidéo)**

- OUI  
 NON

6) Que pensez-vous des éléments visuels utilisés ?

## Affirmations

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Le chemin du tracteur est bien visible.					
Les zones où le tracteur ne passe pas sont localisables facilement sur l'écran					
Le fait de pouvoir librement déplacer le tracteur dans la scène apporte une plus-value					
Le fait que le tracteur avance automatiquement en suivant l'itinéraire technique apporte une plus-value					
Afficher les arbres en rouge est une bonne manière de voir le passage bloquant pour la machine					
Afficher le véhicule en rouge est une bonne manière de voir le passage bloquant pour la machine					
Afficher le chemin du tracteur est nécessaire					
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					

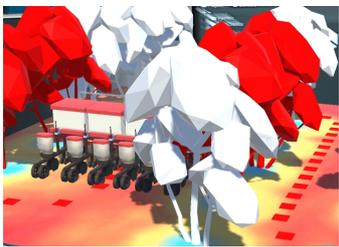
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
Le fait de pouvoir changer la taille de l'outil derrière le tracteur apporte une plus-value intéressante					
Le fait de pouvoir mettre en pause le mouvement du tracteur est intéressant					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres apporte une plus-value intéressante sur cette visualisation					

Avez-vous des propositions d'améliorations ? Remarques ?

## Questionnaire n°4 : Machine + Lumière

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
Cette visualisation permet de mettre en lumière des interactions intéressantes entre "le passage des machines" et "la quantité de lumière au sol"					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres, permet d'observer toutes les interactions possibles entre les différentes représentations					

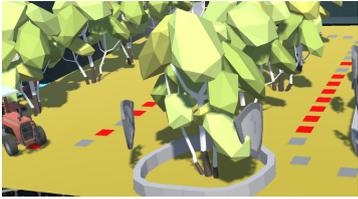
Avez-vous des propositions d'améliorations ? Remarques ?



## Questionnaire n°5 : Machine + Répulsion

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
Cette visualisation permet de mettre en lumière des interactions intéressantes entre "le passage des machines" et "les zones de répulsion des ravageurs"					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres, permet d'observer toutes les interactions possibles entre les différentes représentations					

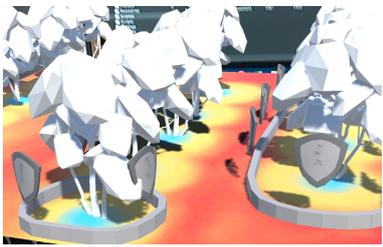
Avez-vous des propositions d'améliorations ? Remarques ?



## Questionnaire n°6 : Lumière + Répulsion

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
Cette visualisation permet de mettre en lumière des interactions intéressantes entre "la quantité de lumière au sol" et "les zones de répulsion des ravageurs"					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres, permet d'observer toutes les interactions possibles entre les différentes représentations					

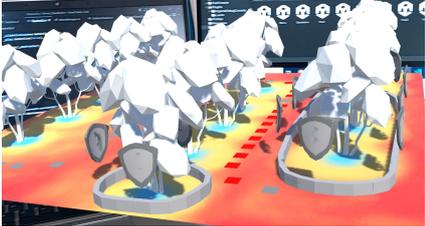
Avez-vous des propositions d'améliorations ? Remarques ?



## Questionnaire n°7 : Machine + Lumière + Répulsion et Bilan

Comment avez-vous expérimenté la démo ?

En regardant une vidéo  / En manipulant directement via une tablette ou un téléphone

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Je voudrais utiliser cet outil fréquemment					
Cet outil est inutilement complexe					
Cet outil est facile à utiliser					
Il y a trop d'incohérences dans cette visualisation					
La lisibilité globale de cette visualisation est bonne					
Cette visualisation permet de mettre en lumière des interactions intéressantes entre "le passage des machines", "les zones de répulsion des ravageurs" et "la quantité de lumière au sol"					
Le fait de pouvoir modifier la taille des arbres, permet d'observer toutes les interactions possibles entre les différentes représentations					

Avez-vous des propositions d'améliorations ? Remarques ?

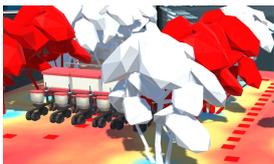
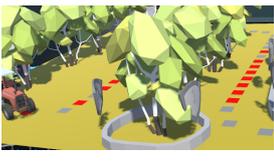
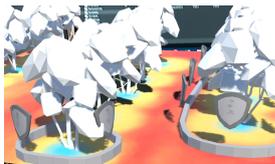
## Questions Bilan

- 1) Quelles visualisations vous semblent réellement exploitables et utilisables en tant qu'outil à l'avenir ?

Cochez les visualisations en question :

- Machine – Lumière
- Machine – Répulsion
- Lumière – Répulsion
- Machine – Lumière - Répulsion

- 2) Organisez les différentes représentations visuelles de la moins appréciée à votre favorite en attribuant un chiffre de 1 à 4 (où 4 représente la visualisation la moins satisfaisante et 1 celle que vous préférez).

Machine + Lumière	Machine + Répulsion	Lumière + Répulsion	Machine + Lumière + Répulsion
			

3)

	<i>Pas du tout d'accord</i>	<i>Pas d'accord</i>	<i>Ni d'accord ni pas d'accord</i>	<i>D'accord</i>	<i>Tout à fait d'accord</i>
Mon intérêt concernant la visualisation des services écosystémiques, via toutes ces visualisations, est fort					

Avez-vous, sur l'ensemble des visualisations présentées, des propositions d'améliorations ?  
Remarques ?

# Diagramme de classes de l'implémentation des cartes combinatoires



FIGURE 22 Diagramme de classes du module des cartes combinatoires





# RÉSUMÉ

## **La réalité augmentée pour faciliter la conception agroforestière**

L'agroforesterie est un système agricole prometteur pour faire face au changement climatique combinant des arbres et des cultures (cultures de champs, prairies, etc.). Cependant, sa conception est une tâche difficile, car cela nécessite la prise en compte des dynamiques spatiales et temporelles. J'ai mené des enquêtes auprès de conseillers agroforestiers sur les approches de conception, révélant une diversité de méthodes et d'outils utilisés. Cependant, un manque d'outils pour visualiser l'apparence future des parcelles et les services écosystémiques fournis a été identifié. Dans cette thèse, je propose une chaîne de traitement informatique pour aider les conseillers lors d'ateliers de conception de parcelles agroforestières et propose une nouvelle approche de la représentation des systèmes agroforestiers.

Dans la chaîne de traitement, un premier module recueille des informations à partir d'une maquette physique d'un système agroforestier, utilisant un réseau de neurones pour identifier les composants de la maquette et leur positionnement. Un deuxième module construit une représentation abstraite du système en utilisant des cartes combinatoires. Cette modélisation, basée sur les adjacences et les hiérarchies structurelles du système, propose une nouvelle représentation graphique formelle du système agroforestier, et le graphe dual peut être utilisé pour représenter et estimer les services écosystémiques du système. Un troisième module permet une visualisation interactive en réalité augmentée de la plantation, y compris la représentation de la croissance des plantes et la production de services écosystémiques.

Deux prototypes ont été développés pour être intégrés dans des dispositifs mobiles. Une application superpose des images virtuelles sur des vues de maquettes physiques lors d'atelier de conception, et l'autre, destinée à une utilisation en extérieur, intègre des images virtuelles directement sur les vues de la parcelle. Un panel d'utilisateurs a testé leur utilisation.

Ce travail interdisciplinaire (agronomie, informatique, interfaces homme-machine) sera utile aux conseillers et aux agriculteurs dans la conception de parcelles agroforestières, en tenant compte des relations entre leur structure et leurs fonctions et, finalement, des services écosystémiques produits. Les systèmes conçus et leur évolution future seront ainsi mieux adaptés aux contraintes et aux objectifs des agriculteurs.

La représentation structure-fonction proposée des systèmes ouvre également de nouvelles perspectives de recherche en tant que support pour les approches de conception participative et fournit un cadre pour la modélisation mécaniste du fonctionnement et des interactions au sein des systèmes agroforestiers.

**Mots clefs :** Agroforesterie, Réalité augmentée, Visualisation, Carte combinatoire.

# ABSTRACT

## **Augmented reality to facilitate agroforestry design**

Agroforestry is a promising agricultural system to face climate change. It combines trees and crops (field crops, meadows, etc.). However, designing an agroforestry plot is a difficult task, since it requires consideration of both spatial and temporal dynamics. We conducted surveys of agroforestry advisors on design approaches, which revealed a diversity of methods and tools used. But we identified a lack of tools for visualizing the future appearance of plots and the ecosystem services provided.

In this thesis, we propose a computer processing chain to assist advisors in agroforestry plot design workshops, and propose a new approach to agroforestry system representation.

In our chain, a first module captures information from a physical model of an agroforestry system, using a deep learning system to identify the model's components and their positioning. A second module builds an abstract representation of the system using combinatorial maps. This modeling, based on the system's adjacencies and structural hierarchies, proposes a new formal graph representation of the agroforestry system, and we show that the dual graph can be used to represent and estimate the system's ecosystem services. Finally, a third module, exploiting Unity's real-time potential, enables interactive visualization in augmented reality of the variety and complexity of plantations, including the representation of plant growth and the production of ecosystem services.

Two prototypes have been developed for embedding into mobile devices. One application superimposes virtual images on physical model views during the design workshop, and the other, for outdoor use, integrates virtual images directly on the plot views. Their use is currently being tested by a panel of users.

This interdisciplinary work (agronomy, computer science, human-machine interfaces) will be useful to advisors and farmers in designing agroforestry plots, taking into account the relationships between their structure and functions and, ultimately, the ecosystem services produced. The systems designed and their future evolution will thus be better adapted to farmers' constraints and objectives.

The proposed structure-function representation of systems also opens up new research prospects as a support for participatory design approaches, and provides a framework for mechanistic modelling of the functioning of and interactions within agroforestry systems.

**Key words :** Agroforestry, Augmented reality, Visualization, Combinatorial map.