

Université de Montpellier
École Doctorale I2S

**Du phénotypage à la modélisation de l'architecture et
du fonctionnement des plantes**

Frédéric Boudon
CIRAD-UMR AGAP-Institut

Mémoire présenté pour l'Habilitation à Diriger des Recherches
Déposé en Novembre 2023



Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche.

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES	II
PARTIE A : PRESENTATION DU CANDIDAT	4
I. CURRICULUM VITAE	4
II. PUBLICATIONS.....	6
1. Articles publiés dans les revues à facteur d'impact	6
2. Articles publiés dans les revues à comité de lecture, sans facteur d'impact	8
3. Communications dans des congrès internationaux	8
4. Présentations invitées.....	15
III. ENCADREMENTS DE TRAVAUX D'ETUDIANTS	16
1. Mémoires encadrés : master 2 et spécialité d'ingénieur.	16
2. Encadrement de doctorants	17
3. Encadrement de post-doctorants et ingénieurs.....	19
4. Participation à des jurys ou comités de suivi de thèse	20
5. Participation à la formation continue	20
IV. COLLABORATIONS	21
1. Collaborations majeures	21
2. Collaborations productives	21
V. FINANCEMENT DE MES ACTIVITES.....	22
PARTIE B : SYNTHESE DES ACTIVITES DE RECHERCHE	25
I. INTRODUCTION	25
II. REPRESENTATION DE L'ARCHITECTURE TRIDIMENSIONNELLE DES PLANTES ET DES TISSUS.....	26
1. Modélisation de la structure géométrique multi-échelles des plantes.....	27
2. Méthode de compression de représentation géométrique végétale	27
3. Modélisation de la structure cellulaire des tissus.....	28
III. ACQUISITION DE STRUCTURES VEGETALES 3D	29
1. Reconstruction de l'architecture des plantes à partir de données 3D issus de scans laser	30
2. Spécification d'architecture de plantes par croquis (Sketching)	31
3. Reconstruction à partir de photographies et de vidéos	33
IV. CARACTERISATION ET ANALYSE DE STRUCTURES VEGETALES	35
1. Alignement de structures arborescentes 3D	35
2. Définition de morphotypes et analyse génétique à partir de traits architecturaux.....	36
3. Analyse fractale de la géométrie des plantes	37
V. FORMALISME DE SIMULATION DE LA CROISSANCE ET DU FONCTIONNEMENT DES PLANTES	37
1. Simulation de structures arborescentes	37
2. Modélisation multi-échelles de l'interception de la lumière.....	39
3. Modélisation par workflows scientifiques	39
4. Environnement virtuel de modélisation	40
5. Framework de simulation mécanique des tissus	41
VI. DEVELOPPEMENT DE MODELES STRUCTURE-FONCTION	42
1. Modélisation structure-fonction d'arbres fruitiers.....	42
2. Modélisation du débourrement.....	43
3. Modélisation des effets d'un ravageur sur le développement.....	44
4. Modélisation de la formation des primordia à l'échelle cellulaire	45
VII. CONCLUSIONS	46
PARTIE C : PROJET DE RECHERCHE	47

I.	LE PHENOTYPAGE DES PLANTES POUR LA CONSTRUCTION DE FSPM.....	47
1.	Reconstruction du développement d'arbres tempérés.....	47
2.	Inférence directe des paramètres des FSPMs.....	48
3.	Reconstruction des arbres à feuilles persistantes	49
4.	Gestion des données de phénotypages.....	49
II.	VERS DE NOUVEAUX INDICES POUR CARACTERISER LA STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE DES PLANTES ET LEUR INTERACTION AVEC LA LUMIERE	49
1.	De nouveau traits architecturaux	50
2.	Caractérisation de l'environnement lumineux	50
3.	Application à l'agrivoltaïsme	51
III.	EXTENSION DES FORMALISMES DE SIMULATION	51
1.	Extension du formalisme des L-systems	52
2.	Intégration de réseaux de régulation du débourrement dans des structure complexes.....	55
IV.	DES OUTILS DE MODELISATION POUR LES BIOLOGISTES ET LES AGRONOMES	56
1.	Un environnement de simulation virtuel distribué utilisable par les biologistes.....	56
2.	Applications pour des outils pédagogiques de conduites d'arbres	56
REFERENCES		58
ANNEXES : PRINCIPAUX TRAVAUX SCIENTIFIQUES		62

PARTIE A : PRESENTATION DU CANDIDAT

I. Curriculum Vitae

Frédéric BOUDON

Nationalité :	Française
Date de naissance :	27/10/1977, Grenoble
Situation familiale :	Célibataire, 2 enfants
Adresse professionnelle :	UMR AGAP Institut Avenue Agropolis, TA A-108 / 01 34398 Montpellier Cedex 5 France Téléphone : +33 4 67 61 49 37 Adresse électronique : frederic.boudon@cirad.fr
Fonction :	Chercheur en informatique appliqué à la modélisation des plantes. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement Systèmes biologiques (CIRAD)
Unité :	UMR AGAP Institut : Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales Informatique et ingénierie logicielle Biologie du développement
Formation :	Doctorat en Informatique de l'Université Montpellier II (2004) DEA en Informatique de l'Université de Montpellier II (2000) Diplôme d'Ingénieur en Informatique et Gestion de l'ISIM (2000)
Expérience Professionnelle :	02/2008 – présent : CIRAD, Montpellier France <ul style="list-style-type: none">02/2008 – 12/2017 : Équipe projet CIRAD/Inria Virtual Plants01/2017 – 12/2019 : Équipe Modèles et Méthodes pour le Phénotypage des Plantes (M2P2), UMR AGAP01/2020 - présent: Équipe Phenomen, UMR AGAP Institut Chercheur associé équipe projet Inria Mosaic 04/2006 - 02/2008 : Post Doctorant au CIRAD, Montpellier France dans l'équipe Virtual Plants Projet ANR « NatSim » : Représentations hybrides pour la modélisation, la simulation, la visualisation, et la transmission de scènes naturelles animées. 10/2005 - 03/2006 : Ingénieur développement au département Réalité Virtuelle de Communication & Système (CS), Toulouse France Système de représentation cartographique (SIG) 3D et d'analyse de données liées à la radioactivité nucléaire pour l'IRSN. 05/2005 - 09/2005 : Responsable technique pour Educagri Editions, Dijon France

**Expérience
Pays hors métropole
et étranger :**

Projet « Simulateur de taille de pommier »: Transfert technologique des méthodes de simulation de plantes issues de la recherche (L-systèmes). Conception et développement du moteur de simulation.

05/2004 - 04/2005 : Post-Doctorant au Loria, Equipe ISA de l'Inria, Nancy France
Simulation et visualisation de hêtraies basées sur un couplage entre des modèles botaniques (architecture des plantes) et sylvicoles (production forestière).

10/2000 - 02/2004 : Doctorant INRA à l'UMR AMAP, Montpellier France
Sujet : « Géométrie multi-échelles de l'architecture des plantes ».

Canada - 15/03/2002 - 31/01/2003 : Equipe « Biological Modeling and Visualization », Université de Calgary, Alberta.
Sujet : «Multiresolution Modeling and Visualization of Plants »

La Réunion – 01/08/2016 - 31/07/2017 : Cirad Bassin-Plat, Saint Pierre.
Sujet : « Modélisation du développement et de la phénologie du manguier »

II. Publications

Depuis ma thèse, mes activités de recherches consistent à mieux comprendre le fonctionnement et le développement des plantes à différentes échelles en développant des modèles prédictifs et en intégrant les connaissances de différentes disciplines, notamment la biologie végétale, la biophysique, l'écologie et l'informatique. C'est dans ce contexte que j'ai choisi de présenter ma liste de publications ci-dessous, en 3 parties, en différenciant les articles du domaine de l'informatique, de la biologie computationnelle et de la biologie.

Mon nom apparait en gras souligné. Celui des étudiants, ingénieurs ou post-doctorants que j'ai encadrés ou co-encadrés en gras.

1. Articles publiés dans les revues à facteur d'impact

A ce jour, j'ai participé à la publication de 27 articles dans des revues à facteur d'impact 7 en premier auteur et 1 en dernier auteur.

- Informatique:

1. **Vaillant Jan**, Grechi Isabelle, Normand Frédéric, **Boudon Frédéric**. Towards virtual modelling environments for functional–structural plant models based on Jupyter notebooks: Application to the modelling of mango tree growth and development. **2022**. In *Silico Plants*, 4 (1), n.spéc. Functional-structural plant models: diab040, 16 p. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab040>
2. **Boudon Frédéric**, **Preuksakarn Chakkrit**, Ferraro Pascal, **Diener Julien**, Nacry Philippe, Nikinmaa Eero, Godin Christophe. Quantitative assessment of automatic reconstructions of branching systems obtained from laser scanning. **2014**. *Annals of Botany*, 114 (4) spéc. Functional-structural plant models: 853-862.
3. **Boudon Frédéric**, Pradal Christophe, Cokelaer Thomas, Prusinkiewicz Przemyslaw, Godin Christophe. L-Py: an L-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language. **2012**. *Frontiers in Plant Science*, 3 (76), 20 p.
4. **Mebatsion Hibru K.**, **Boudon Frédéric**, **Godin Christophe**, **Pradal Christophe**, **Génard Michel**, **Goz-Bac C.**, **Bertin Nadia**. A novel profile-based model for virtual representation of quasi-symmetric plant organs. **2011**. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75 (1) : 113-124.
5. **Wither Jamie**, **Boudon Frédéric**, Cani Marie-Paule, Godin Christophe. Structure from silhouettes: A new paradigm for fast sketch-based design of trees. **2009**. *Computer Graphics Forum*, 28 (2) : 541-550.
6. **Mondet Sébastien**, Cheng Wei, Morin Géraldine, Grigoras Romulus, **Boudon Frédéric**, Tsang Ooi Wey. Compact and progressive plant models for streaming in networked virtual environments. **2009**. *ACM Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications*, 5 (3) : 1-21.
7. Pradal Christophe*, **Boudon Frédéric***, Nougier Christophe, Chopard Jérôme, Godin Christophe. PlantGL : A python-based geometric library for 3D plant modelling at different scales. **2009**. *Graphical Models*, 71 : 1-21.
8. **Da Silva David**, **Boudon Frédéric**, Godin Christophe, Sinoquet Hervé. Multiscale framework for modeling and analyzing light interception by trees. **2008**. *Multiscale Modeling and Simulation*, 7 (2) : 910-933.
9. Pradal Christophe, **Dufour-Kowalski Samuel**, **Boudon Frédéric**, Fournier Christian, Godin Christophe. OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling. **2008**. *Functional Plant Biology*, 35 (9-10) : 751-760.
10. **Boudon Frédéric**, Godin Christophe, Pradal Christophe, **Puech Olivier**, Sinoquet Hervé. Estimating the fractal dimension of plants using the two-surface method: An analysis based on 3D-digitized tree foliage. **2006**. *Fractals*, 14 (3) : 149-163.

11. **Boudon Frédéric**, Prusinkiewicz Przemyslaw, Federl Pavol, Godin Christophe, Karwowski Radoslaw. 2003. Interactive design of bonsai tree models. Computer Graphics Forum, 22 (3) : pp. 591-599. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.t01-2-00707>

- Biologie computationnelle:

12. Perez Raphaël, Vezy Rémi, Brancheriau Loïc, **Boudon Frédéric**, Grand François, Ramel Merlin, Raharjo Doni Artanto, Caliman Jean-Pierre, Dautat Jean. When architectural plasticity fails to counter the light competition imposed by planting design: An in silico approach using a functional–structural model of oil palm. 2022. In Silico Plants, 4 (1), n.spéc. : Functional–Structural Plant Models:diac009, 16 p. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diac009>

13. **Boudon Frédéric**, Persello Séverine, Jestin Alexandra, Briand Anne-Sarah, Grechi Isabelle, **Fernique Pierre**, Guédon Yann, Lechaudel Mathieu, Lauri Pierre-Eric, Normand Frédéric. V-Mango: A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. 2020. Annals of Botany, 126 (4), n.spéc. Functional-Structural Plant Growth Modelling : pp. 745-763. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa089>

14. Coupel-Ledru Aude, Pallas Benoît, Delalande Magalie, **Boudon Frédéric**, **Carrie Emma**, Martinez Sébastien, Regnard Jean-Luc, Costes Evelyne. Multi-scale high-throughput phenotyping of apple architectural and functional traits in orchard reveals genotypic variability under contrasted watering regimes. 2019. Horticulture Research, 6:52, 15 p. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0137-3>

15. **Liu Shouyang**, Baret Frédéric, Abichou Mariem, **Boudon Frédéric**, Thomas Samuel, Zhao Kaiguang, Fournier Christian, Andrieu Bruno, Irfan Kamran, Hemmerlé Matthieu, De Solan Benoît. Estimating wheat green area index from ground-based LiDAR measurement using a 3D canopy structure model. 2017. Agricultural and Forest Meteorology, 247 : pp. 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.007>

16. **Cieslak Mikolaj**, **Cheddadi Ibrahim**, **Boudon Frédéric**, Baldazzi Valentina, Génard Michel, Godin Christophe, Bertin Nadia. Integrating physiology and architecture in models of fruit expansion. 2016. Frontiers in Plant Science, 7 (1739), 19 p.

17. **Boudon Frédéric***, **Chopard Jérôme***, **Ali Olivier***, Gilles Benjamin, Hamant Olivier, Boudaoud Arezki, Traas Jan, Godin Christophe. A computational framework for 3D mechanical modeling of plant morphogenesis with cellular resolution. 2015. PLoS Computational Biology, 11 (1), e1003950 (16 p.)

18. Gaucherel Cédric, **Boudon Frédéric**, **Houet Thomas**, **Castets Mathieu**, **Godin Christophe**. Understanding patchy landscape dynamics: Towards a landscape language. 2012. PloS One, 7 (9), e4606 (16 p.)

19. Fournier Christian, Pradal Christophe, Chelle Michaël, **Boudon Frédéric**, Louarn Gaëtan, Robert Corinne, Combes Didier, Cokelaer Thomas, Bertheloot Jessica, Ma Kai, Saint-Jean Sébastien, Verdenal Alban, Escobar-Gutiérrez Abraham, Andrieu Bruno, Godin Christophe. Sharing efforts for modelling plant systems: from publications to reusable software components. 2009. Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular and Integrative Physiology, 153 (2), suppl.n°1, Résumé, S222

- Biologie:

20. **Carrie Emma**, Grechi Isabelle, **Boudon Frédéric**, Frak Ela, Combes Didier, Normand Frédéric. Modeling functional relationships between morphogenetically active radiation and photosynthetic photon flux density in mango tree crown. 2023. Frontiers in Ecology and Evolution, 11:1046332, 17 p. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1046332>

21. Bertheloot Jessica, Barbier François, **Boudon Frédéric**, Perez-Garcia Maria-Dolores, Péron Thomas, Citerne Sylvie, Dun Elizabeth, Beveridge Christine, Godin Christophe, Sakr Soulaïman. Sugar availability suppresses

the auxin-induced strigolactone pathway to promote bud outgrowth. **2020**. *New Phytologist*, 225 (2) : pp. 866-879.

22. **Schneider Anne**, Godin Christophe, **Boudon Frédéric**, Demotes-Mainard Sabine, Sakr Soulaïman, Bertheloot Jessica. Light regulation of axillary bud outgrowth along plant axes: An overview of the roles of sugars and hormones. **2019**. *Frontiers in Plant Science*, 10:1296 <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01296>
23. **Persello Séverine**, Grechi Isabelle, **Boudon Frédéric**, Normand Frédéric. Nature abhors a vacuum: Deciphering the vegetative reaction of the mango tree to pruning. **2019**. *European Journal of Agronomy*, 104 : pp. 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.007>
24. **Sassi Massimiliano**, **Ali Olivier**, **Boudon Frédéric**, Cloarec Gladys, Abad Ursula, Cellier Coralie, Chen Xu, Gilles Benjamin, Milani Pascale, Friml Jiri, Vernoux Teva, Godin Christophe, Hamant Olivier, Traas Jan. An auxin-mediated shift toward growth isotropy promotes organ formation at the shoot meristem in Arabidopsis. **2014**. *Current Biology*, 24 (19) : 2335-2342.
25. **Da Silva David**, Balandier Philippe, **Boudon Frédéric**, Marquier André, Godin Christophe. Modeling of light transmission under heterogeneous forest canopy : An appraisal of the effect of the precision level of crown description. **2012**. *Annals of Forest Science*, 69 (2) : 181-193.
26. **Hatt Clémence**, **Mankessi François**, Durand Jean-Baptiste, **Boudon Frédéric**, Montes Fabienne, Lartaud Marc, Verdeil Jean-Luc, Monteuis Olivier. Characteristics of Acacia mangium shoot apical meristems in natural and in vitro conditions in relation to heteroblasty. **2012**. *Trees*, 26 (3) : 1031-1044.
27. **Mankessi François**, Saya Aubin Rachel, **Boudon Frédéric**, Guédon Yann, Montes Fabienne, Lartaud Marc, Verdeil Jean-Luc, Monteuis Olivier. Phase change-related variations of dome shape in Eucalyptus urophylla X Eucalyptus grandis shoot apical meristems. **2010**. *Trees*, 24 (4) : 743-752.

2. Articles publiés dans les revues à comité de lecture, sans facteur d'impact

28. **Boudon Frédéric**, **Le Moguédec Gilles**. Déformation asymétrique de houppiers pour la génération de représentations paysagères réalistes. 2007. *REFIG. Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique*, 1 (1) : pp. 9-19.

3. Publications dans des actes de congrès internationaux

A ce jour, j'ai participé à 78 communications à des congrès internationaux qui ont donné lieu à des communications dans des actes. Mon nom apparaît en gras souligné. Celui des étudiants, ingénieurs ou post-doctorants que j'ai encadrés ou co-encadrés en gras. A noter qu'en informatique graphiques, les publications dans les actes peuvent avoir autant d'impact que les articles de journaux.

1. **Carrie E.**, Grechi I., **Boudon F.**, Frak E., Combes D., Normand F. 2023. Effect of growth unit characteristics and light environment on leaf fall in the evergreen mango tree. In : Serra S. (ed.), Lauri P.E. (ed.). *Proceedings of the International Symposium on Innovative Perennial Crops Management*. Louvain : ISHS, p. 393-400 *International Horticultural Congress (IHC2022): International Symposium on Innovative Perennial Crops Management*. 31, 2022-08-14/2022-08-20, Angers (France). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1366.48>
2. **Grisafi F.**, Tombesi S., Farinelli D., **Boudon F.**, Durand J.B., Costes E. 2023. Analysing the architecture of *Corylus avellana* and parametrizing L-HAZELNUT FSPM. In : Tsu-Wei Chen (ed.), Andreas Fricke (ed.), Katrin Kahlen (ed.), Susann Müller (ed.), Hartmut Stützel (ed.). *Book of abstracts the 10th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2023)*. Hannover : Institute of Horticultural Production Systems, p. 70-71 *International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2023)*. 10, 2023-03-27/2023-03-31, Berlin (Allemagne).
3. **Rojas bustos J.P.**, **Branthomme A.**, Costes E., **Boudon F.** 2023. Comparison between UAV and terrestrial LiDAR scans for high throughput phenotyping of architectural traits of a core collection of apple trees. In : Sankaran S. (ed.), Rousseau D. (ed.). *Proceedings of the III International Symposium on Mechanization*,

- Precision Horticulture, and Robotics: Precision and Digital Horticulture in Field Environments. Louvain : ISHS, p. 15-22 International Horticultural Congress (IHC 2022): International Symposium on Mechanization, Precision Horticulture, and Robotics: Precision and Digital Horticulture in Field Environments. 31, 2022-08-14/2022-08-20, Angers (France). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1360.2>
4. **Grisafi F.**, Farinelli D., Costes E., **Boudon F.**, Durand J.B., Tombesi S. 2023. Architecture and yield relationship in hazelnut tree. In : Serra S. (ed.), Lauri P.E. (ed.). Proceedings of the International Symposium on Innovative Perennial Crops Management. Louvain : ISHS, p. 331-336 International Horticultural Congress (IHC2022): International Symposium on Innovative Perennial Crops Management. 31, 2022-08-14/2022-08-20, Angers (France).
 5. **Schneider A.**, **Boudon F.**, Demotes-Mainard S., Sakr S., Godin C., Bertheloot J. 2022. Control of lateral meristems: how is sugar availability involved in the environmental control of axillary bud outgrowth?. In : Bertheloot Jessica (ed.), Durand Jean-Louis (ed.), Godin Christophe (ed.). *From genes to plant architecture: the shoot apical meristem in all its states*. Poitiers : INRAE, p. 35-36 From Genes to Plant Architecture: the Shoot Apical Meristem in all its States, 2022-11-28/2022-11-30, Poitiers (France).
 6. Barillot R., **Boudon F.**, Combes D., Durand J.L., Louarn G. 2022. Representation and functions of shoot apical meristems in FSPMs. In : Bertheloot Jessica (ed.), Durand Jean-Louis (ed.), Godin Christophe (ed.). *From genes to plant architecture: the shoot apical meristem in all its states*. Poitiers : INRAE, p. 29-30 From Genes to Plant Architecture: the Shoot Apical Meristem in all its States, 2022-11-28/2022-11-30, Poitiers (France).
 7. Grechi I., **Persello S.**, **Boudon F.**, Normand F. 2022. Pruning intensity and severity affect flowering processes in the mango tree. In : Musacchi S. (ed.). *Proceedings of the XII International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems*. Louvain : ISHS, p. 67-74 International Symposium on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems. 12, 2021-07-26/2021-07-30, Wenatchee (Etats-Unis). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1346.9>
 8. **Chaudhury A.**, **Boudon F.**, Godin C. 2020. 3D Plant phenotyping: All you need is labelled point cloud data. Glasgow : IPPN, p. 1-17 ECCV 2020 Workshop on Computer Vision Problems in Plant Phenotyping (CVPPP 2020), 2020-08-28/2020-08-28, Glasgow (Royaume-Uni). <https://www.plant-phenotyping.org/CVPPP2020>
 9. **Boudon F.**, **Reyné B.**, **Saint-Criq L.**, Memmah M., Ratnadass A., Normand F., Grechi I. 2020. Modelling of the mango tree blossom gall midge system: in silico assessment of its functioning. Montpellier : CIRAD, 2 p. International Crop Modelling Symposium (iCROPM 2020). 2, 2020-02-03/2020-02-05, Montpellier (France).
 10. **Artzet S.**, Pallas B., Costes E., **Boudon F.** 2020. Machine and deep learning based identification of organs within LiDAR scans of tree canopies: Application to the estimation of apple production. In : Kahlen Katrin (ed.), Chen Tsu-Wei (ed.), Fricke Andreas (ed.), Stützel Hartmut (ed.). *Book of abstracts of the 9th International Conference on Functional-Structural Plant Models: FSPM2020, 5 - 9 October 2020*. Hanovre : Institute of Horticultural Production Systems, p. 47-48 International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM 2020). 9, 2020-10-05/2020-10-09, (Allemagne). <https://www.fspm2020.net>
 11. **Persello S.**, Grechi I., **Boudon F.**, Normand F. 2020. Architectural factors affect fruit set in mango: evidence and modelling. In : Reighard G.L. (ed.), Morandi B. (ed.), Küden A.B. (ed.), Costes E. (ed.), Losciale P. (ed.). *Proceedings of the International Symposium on Cultivars, Rootstocks and Management Systems of Deciduous Fruit and Fruit Tree Behaviour in Dynamic Environments*. Louvain : ISHS, p. 609-616 International Horticultural Congress (IHC 2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.80>
 12. Bertheloot J., **Schneider A.**, Ledroit L., Perez-Garcia M.D., **Boudon F.**, Godin C., Sakr S. 2020. Axillary bud outgrowth regulation by light intensity: Modelling hormone and sugar interactions. In : Kahlen Katrin (ed.), Chen Tsu-Wei (ed.), Fricke Andreas (ed.), Stützel Hartmut (ed.). *Book of abstracts of the 9th International Conference on Functional-Structural Plant Models: FSPM2020, 5 - 9 October 2020*. Hanovre : Institute of Horticultural Production Systems, p. 78-79 International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM 2020). 9, 2020-10-05/2020-10-09, (Allemagne). <https://www.fspm2020.net>
 13. **Boudon F.**, **Persello S.**, Grechi I., Marquier A., Soria C., Fournier C., Léchaudel M., Normand F. 2020. Assessing the role of ageing and light availability in leaf mortality in the mango tree. In : Reighard G.L. (ed.), Morandi B. (ed.), Küden A.B. (ed.), Costes E. (ed.), Losciale P. (ed.). *Proceedings International on Symposium Understanding Fruit Tree Behaviour in Dynamic Environments*. Louvain : ISHS, p. 601-608 International Horticultural Congress (IHC 2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.79>
 14. **Boudon F.**, **Vaillant J.**, Pradal C. 2020. Toward virtual modelling environments using notebooks for phenotyping and simulation of plant development. In : Kahlen Katrin (ed.), Chen Tsu-Wei (ed.), Fricke Andreas (ed.), Stützel Hartmut (ed.). *Book of Abstracts of the 9th International Conference on Functional-Structural*

- Plant Models*: Hanovre : Institute of Horticultural Production Systems, p. 99-100 International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM 2020), 2020-10-05/2020-10-09, (Allemagne). <https://www.fspm2020.net>
15. Grechi I., **Saint-Criq L.**, Ratnadass A., Normand F., Soria C., Brustel L., Amouroux P., **Boudon F.** 2020. The mango tree - blossom gall midge system: toward in-silico assessment of management practices. In : Reighard G.L. (ed.), Morandi B. (ed.), Küden A.B. (ed.), Costes E. (ed.), Losciale P. (ed.). *Proceedings International on Symposium Understanding Fruit Tree Behaviour in Dynamic Environments*. Louvain : ISHS, p. 633-642 International Horticultural Congress (IHC 2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.83>
 16. Pallas B., Martinez S., **Simler O.**, **Carrie E.**, Costes E., **Boudon F.** 2020. Assessing T-LiDAR technology for high throughput phenotyping apple tree topological and architectural traits. In : Reighard G.L. (ed.), Morandi B. (ed.), Küden A.B. (ed.), Costes E. (ed.), Losciale P. (ed.). *Proceedings International on Symposium Understanding Fruit Tree Behaviour in Dynamic Environments*. Louvain : ISHS, p. 625-632 International Horticultural Congress (IHC2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1281.82>
 17. Perez R., Vezy R., Brancheriau L., **Boudon F.**, Grand F., Raharja D.A., Caliman J.P., Dauzat J. 2020. Toward a functional-structural model of oil palm accounting for architectural plasticity in response to planting density. In : Kahlen Katrin (ed.), Chen Tsu-Wei (ed.), Fricke Andreas (ed.), Stützel Hartmut (ed.). *Book of abstracts of the 9th International Conference on Functional-Structural Plant Models: FSPM2020, 5 - 9 October 2020*. Hanovre : Institute of Horticultural Production Systems, p. 36-37 International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM 2020). 9, 2020-10-05/2020-10-09, (Allemagne). <https://www.fspm2020.net/>
 18. Grechi I., **Reyné B.**, **Saint-Criq L.**, Memah M.M., Ratnadass A., Normand F., **Boudon F.** 2019. The mango tree ç blossom gall midge system: in-silico assessment of its functioning and management [GEN04.03]. Salzburg : ISEM, 1 p. Biennial conference of the international society for ecological modelling (ISEM). 22, 2019-10-01/2019-10-05, Salzburg (Autriche).
 19. **Schneider A.**, **Boudon F.**, Demotes-Mainard S., Ledroit L., Perez-Garcia M.D., Brouard N., Godin C., Sakr S., Bertheloot J. 2019. Modeling branching under different light intensity regimes: Integrating the role of hormones and sugars. Angers : ISHS, 1 p. International Symposium on Advanced Technologies and Management for Innovative Greenhouses (GreenSys 2019), 2019-06-16/2019-06-20, Angers (France).
 20. **Boudon F.**, Grechi I., Marquier A., Soria C., Fournier C., Lechaudel M., Normand F. 2018. Assessment of the role of age and light availability in leaf mortality in mango tree.[OS 6-1]. Istanbul : s.n., 1 p. International Horticultural Congress (IHC2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie).
 21. Pallas B., **Boudon F.**, **Carrie E.**, Costes E. 2018. T-Lidar as a new high-throughput methodology for studying the genetic determinisms of apple tree architecture. Nanjing : s.n., 1 p. International Rosaceae Genomics Conference. 9, 2018-06-26/2018-06-30, Nanjing (Chine). <http://rgc9.org/>
 22. Pallas B., **Carrie E.**, Martinez S., Costes E., **Boudon F.** 2018. Using T-LiDAR scans for high-throughput phenotyping of genotypic variability of apple tree architecture. Hefei : s.n., 1 p. IEEE International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications. 6, 2018-11-04/2018-11-08, Hefei (Chine).
 23. Pallas B., Delalande M., Coupel-Ledru A., **Boudon F.**, Ngao J., Martinez S., Bluy S., Costes E., Regnard J.L. 2018. Multi-scale high-throughput phenotyping of an apple tree core-collection under water stress condition. Istanbul : s.n., 1 p. International Horticultural Congress (IHC 2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie).
 24. Pallas B., Martinez S., **Carrie E.**, Costes E., **Boudon F.** 2018. Assessing T-LiDAR technology for high throughput phenotyping apple tree topological and architectural traits. Istanbul : s.n., 1 p. International Horticultural Congress (IHC 2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie).
 25. Normand F., **Boudon F.**, Capelli M., Dambreville A., Lauri P.E. 2018. Linking vegetative growth, reproduction and irregular bearing in the mango tree. In : Marra F.P. (ed.), Caruso T. (ed.), Mitra S.K. (ed.). *Proceedings of the International Symposium on Flowering, Fruit Set and Alternate Bearing*. Louvain : ISHS, p. 341-348 International Symposium on Flowering, Fruit Set and Alternate Bearing, 2017-06-19/2017-06-23, Palerme (Italie). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1229.51>
 26. Coupel-Ledru A., Pallas B., Delalande M., Morandi B., Manfrini L., Martinez S., Bluy S., Pinguet-Poquet T., **Boudon F.**, Corelli L., Regnard J.L., Costes E. 2018. Genetic analysis of the morphological and ecophysiological responses to water deficit in an apple tree core-collection through a combination of high-throughput and physiological approaches. s.l. : s.n., 1 p. AgreenSkills Annual Meeting, 2018-06-11/2018-06-14, Edinbourg (Royaume-Uni).

27. Grechi I., **Saint-Criq L.**, Soria C., Ratnadass A., Normand F., Amouroux P., **Boudon F.** 2018. Assessment of mango tree - blossom gall midge management solutions from in-silico experiments: overview of an on-going modeling approach. Istanbul : ISHS, 1 poster International Horticultural Congress (IHC 2018). 30, 2018-08-12/2018-08-16, Istanbul (Turquie).
28. Normand F., **Boudon F.**, Capelli M., Dambreville A., Lauri P.E. 2017. Linking vegetative growth, reproduction and irregular bearing in the mango tree. In : Marra Francesco Paolo (ed.), Caruso Tiziano (ed.), Mitra Sisir K. (ed.). *International Symposium on Flowering, Fruit Set and Alternate Bearing. Book of abstracts*. Palermo : University of Palermo, p. 90 International Symposium on Flowering, Fruit set and Alternate Bearing, 2017-06-19/2017-06-23, Palermo (Italie). <http://www.fsab2017.it/index.php?p=committees>
29. **Boudon F.**, **Jestin A.**, **Briand A.S.**, **Fernique P.**, Lauri P.E., Dambreville A., Guédon Y., Grechi I., **Normand F.** 2017. The role of structural and temporal factors in the architectural development of the mango tree: evidences from simulation. In : Costes Evelyne (ed.). *Proceedings of the X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management*. Louvain : ISHS, p. 82-90 International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management. 10, 2015-06-02/2015-06-05, Montpellier (France). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1160.12>
30. **Persello S.**, Grechi I., **Boudon F.**, Normand F. 2017. How different pruning intensities and severities affect vegetative growth processes in "Cogshall" mango trees. Baise : ISHS, 1 p. International Mango Symposium. 12, 2017-07-10/2017-07-16, Baise (Chine).
31. Pradal C., Coste J., Baty G., Ribes S., **Boudon F.**, Godin C. 2016. OpenAleaLab: An open-source multi-paradigm - multi-language software framework for modeling morphogenesis. *Book of abstracts poster: 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao : FSPMA, p. 80-80 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).
32. Bertheloot J., Barbier F., **Boudon F.**, Perez-Garcia M.D., Péron T., Beveridge C., Godin C., Sakr S. 2016. Sucrose interacts with auxin in the burst of axillary buds. Angers : SFBV, 1 p. Colloque National de la Société Française de Biologie Végétale. 11, 2016-07-06/2016-07-08, Angers (France).
33. Bertheloot J., Barbier F., **Boudon F.**, Perez-Garcia M.D., Péron T., Beveridge C., Godin C., Sakr S. 2016. Modelling physiological regulation of bud burst by sucrose and auxin. *Book of abstracts poster: 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao : FSPMA, p. 85-85 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).
34. **Liu S.**, Baret F., **Boudon F.**, Fournier C., Andrieu B., Abichou M., Hemmerlé M., De Solan B. 2016. Estimating canopy characteristics from ground-based LiDAR measurement assisted with 3D AdelWheat model. *Book of abstracts poster: 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao : FSPMA, p. 62-62 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).
35. **Reyes F.**, Pallas B., Pradal C., Zanotelli D., **Boudon F.**, Vaggi F., Saudreau M., Tagliavini M., Gianelle D., Costes E. 2016. Exploring carbon allocation with a multi-scale model: the case of apple. *Book of abstracts poster: 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao : FSPMA, p. 84-84 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).
36. **Boudon F.**, **Persello S.**, **Jestin A.**, **Briand A.S.**, **Fernique P.**, Guédon Y., Lechaudel M., Grechi I., Normand F. 2016. An FSPM approach for modeling fruit yield and quality in mango trees. *Book of abstracts poster: 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao : FSPMA, p. 81-81 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).
37. Fournier C., **Boudon F.**, Chelle M., Saudreau M., Ngao J., Louarn G., Combes D., Pradal C. 2016. Toward the inter-comparison of radiation transfer model for plant modelling application. *Book of abstracts poster: 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016)*. Qingdao : FSPMA, p. 89-89 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).

38. Godin C., **Boudon F.**, Pradal C. 2016. Reducing algorithm complexity in trees. *2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016): Book of abstract oral*. Qingdao : FSPMA, p. 52-52 International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, 2016-11-07/2016-11-11, Qingdao (Chine).
39. Grechi I., **Boudon F.**, Lechaudel M., Normand F. 2015. A crop simulation model to predict fruit yield and quality on mango tree: overview, progresses and perspectives. Darwin : ISHS, 1 p. International Mango Symposium. 11, 2015-09-28/2015-10-02, Darwin (Australie). <http://mango2015.com.au/index.asp?IntCatId=14>
40. **Cheddadi I.**, Godin C., **Boudon F.**, Baldazzi V., Génard M., Bertin N. 2015. Toward a mechanical model of 3D fruit development. Montpellier : ISHS, 1 p. International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management. 10, 2015-06-02/2015-06-05, Montpellier (France). <http://www.ishs.org/symposium/462>
41. **Passot S.**, Gnacko F., Atkinson J., Atkinson B., Lucas M., Guyomarc'h S., **Boudon F.**, Couderc M., Zekraoui L., Sturrock C., Kane N.A., Hash C.T., Gantet P., Bennett M.J., Wells D., Vigouroux Y., Guédon Y., Laplaze L. 2015. Exploring root development and architecture in one of the most heat and drought tolerant cereals, pearl millet. Barcelona : EPPN; IPPN, 1 p. Plant Phenotyping Symposium, 2015-11-11/2015-11-12, Barcelone (Espagne). http://www.plant-phenotyping.org/Home_EPPN_Symposium
42. Grechi I., **Boudon F.**, Lechaudel M., Nordey T., Génard M., Normand F. 2015. Modelling fruit yield and quality on the Mango tree: Recent progresses and future steps. *International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management*. Montpellier : s.n., p. 1-1 International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management. 10, 2015-06-02/2015-06-05, Montpellier (France).
43. **Guénard J.**, Morin G., **Boudon F.**, Charvillat V. 2014. Realistic plant modeling from images based on analysis-by-synthesis. In : Michael Floater, Tom Lyche, Marie-Laurence Mazure, Knut Morken, Larry L. Schumaker (eds.). *Mathematical Methods for Curves and Surfaces : 8th International Conference, MMCS 2012, Oslo, Norway, June 28 - July 3, 2012*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg, p. 213-229 International Conference on Mathematical Methods for Curves and Surfaces. 8, 2012-06-28/2012-07-03, Oslo (Norvège). https://doi.org/10.1007/978-3-642-54382-1_12
44. **Legrand J.**, Mirabet V., **Boudon F.**, **Guignard L.**, Cellier C., Godin C., Traas J., Boudaoud A., Guédon Y., Das P. 2013. Towards identifying the dynamic cellular patterns underlying early *Arabidopsis* floral development. *Workshop on Molecular Mechanisms Controlling Flower Development, Presqu'île de Giens, France, 8th-12th June 2013*. s.l. : s.n., 1 p. Workshop on Molecular Mechanisms Controlling Flower Development, 2013-06-08/2013-06-12, Presqu'île de Giens (France).
45. Pradal C., Coste J., **Boudon F.**, Fournier C., Godin C. 2013. OpenAlea 2.0: Architecture of an integrated modeling environment on the web. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2013), Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013*. Vantaa : Finnish Society of Forest Science, p. 213-213 International Conference on Functional-Structural Plant Models. 7, 2013-06-09/2013-06-14, Saariselkä (Finlande). <http://ojs.metla.fi/index.php/fspm2013/article/view/852/817>
46. Refahi Y., Wightman R., **Boudon F.**, Massie L., Godin C., Jonsson H., Meyerowitz E. 2013. Measurements and classification of #Arabidopsis" mutants exhibiting differences in the phyllotactic pattern. In : Max Planck Institute. *Triangle Meeting 2013, Cologne, Germany, 23rd-24th September 2013*. s.l. : s.n., 1 p. Triangle Meeting 2013, 2013-09-23/2013-09-24, Cologne (Allemagne).
47. **Boudon F.**, **Preuksakarn C.**, Ferraro P., Diener J., Nikinmaa E., Godin C. 2013. Quantitative assessment of automatic reconstructions of branching systems. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2013), Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013*. Vantaa : Finnish Society of Forest Science, p. 64-66 International Conference on Functional-Structural Plant Models. 7, 2013-06-09/2013-06-14, Saariselkä (Finlande). <http://ojs.metla.fi/index.php/fspm2013/article/view/834/755>
48. **Balduzzi M.**, **Boudon F.**, Godin C. 2013. Optimal 3D reconstruction of plants canopy from terrestrial laser scanner data by fusion of the 3D point information and the intensity value. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2013), Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013*. Vantaa : Finnish Society of Forest Science, p. 58-60 International Conference on Functional-Structural Plant Models. 7, 2013-06-09/2013-06-14, Saariselkä (Finlande). <http://ojs.metla.fi/index.php/fspm2013/article/view/835/753>
49. **Cieslak M.**, Génard M., **Boudon F.**, Baldazzi V., Godin C., Bertin N. 2013. Integrating architecture and physiological perspectives in fruit development. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models*

- (FSPM2013), Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013. Vantaa : Finnish Society of Forest Science, p. 127-130 International Conference on Functional-Structural Plant Models. 7, 2013-06-09/2013-06-14, Saariselkä (Finlande). <http://ojs.metla.fi/index.php/fspm2013/article/view/746/778>
50. **Diener J.**, Nacry P., Perin C., Diévert A., Draye X., **Boudon F.**, Gaujon A., Godin C. 2013. An automated image-processing pipeline for high-throughput analysis of root architecture in OpenAlea. In : Eds. Risto Sievänen, Eero Nikinmaa, Christophe Godin, Anna Lintunen, Pekka Nygren. *Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models (FSPM2013), Saariselkä, Finland, 9-14 June 2013*. Vantaa : Finnish Society of Forest Science, p. 85-87 International Conference on Functional-Structural Plant Models. 7, 2013-06-09/2013-06-14, Saariselkä (Finlande). <http://ojs.metla.fi/index.php/fspm2013/article/view/849/764>
 51. **Guénard J.**, Morin G., **Boudon F.**, Charvillat V. 2013. Reconstructing plants in 3D from a single image using analysis-by-synthesis. In : Bebis George (ed.), Boyle Richard (ed.), Parvin Bahram (ed.). *Advances in visual computing : 9th International Symposium, ISVC 2013, Rethymnon, Crete, Greece, July 29-31, 2013. Proceedings, Part I*. Heidelberg : Springer [Allemagne], p. 322-332 International Symposium on Visual Computing. 9, 2013-07-29/2013-07-31, Rethymnon (Grèce). https://doi.org/10.1007/978-3-642-41914-0_32
 52. **Cieslak M.**, **Boudon F.**, Kenouche S., Zanca M., Goze-Bac C., Génard M., Godin C., Bertin N. 2012. Generating 3D volumetric meshes of internal and external fruit structure. In : Luo Weihong (ed.), Bertin Nadia (ed.), Heuvelink Ep (ed.). *Proceedings of the Fourth International Symposium on models for plant growth, environmental control and farm management in protected cultivation - HortiModel2012, Nanjing, China, November 4-8, 2012*. Louvain : ISHS [Belgique], p. 239-245 International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation. 4, 2012-11-04/2012-11-08, Nanjing (Chine). http://www.actahort.org/books/957/957_27.htm
 53. Louarn G., Carré S., Eprincharde A., Combes D., **Boudon F.** 2012. Characterization of whole plant leaf area properties using laser scanner point clouds. In : Kang Meng Zhen (ed.), Dumont Yves (ed.), Guo Yan (ed.). *Plant growth modeling, simulation, visualization and applications. Proceedings PMA12 : The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, Shanghai, China, 31 October-3 November 2012*. Piscataway : IEEE, p. 250-253 International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA12). 4, 2012-10-31/2012-11-03, Shanghai (Chine).
 54. **Longay S.**, Runions A., **Boudon F.**, Prusinkiewicz P. 2012. TreeSketch: interactive procedural modeling of trees on a tablet. In : Eds. by L.B.Kara, K.Singh. *SBIM '12 : Proceedings of the International Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling, Annecy, France, 4-6 June 2012*. Aire-la-Ville : Eurographics Association, p. 107-120 Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling. 9, 2012-06-04/2012-06-06, Annecy (France). <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2331083>
 55. **Han L.**, Costes E., **Boudon F.**, Cokelaer T., Pradal C., **Da Silva D.**, Faivre R. 2012. Investigating the influence of geometrical traits on light interception efficiency of apple trees: a modelling study with MAppleT. In : Kang Meng Zhen (ed.), Dumont Yves (ed.), Guo Yan (ed.). *Plant growth modeling, simulation, visualization and applications. Proceedings PMA12 : The Fourth International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, Shanghai, China, 31 October-3 November 2012*. Piscataway : IEEE, p. 152-159 International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA12). 4, 2012-10-31/2012-11-03, Shanghai (Chine).
 56. **Guénard J.**, Morin G., **Boudon F.**, Gurdjos P., Charvillat V. 2011. Reconstruction de modèles virtuels de vignes à partir d'images. In : Inria. *13ème Journées ORASIS 2011 : Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur, Praz-sur-Arly, France, 6 au 10 juin 2011*. s.l. : s.n., 8 p. Journées ORASIS. 13, 2011-06-06/2011-06-10, Praz-sur-Arly (France). <http://hal.inria.fr/docs/00/59/54/83/PDF/paper24.pdf>
 57. **Boudon F.**, Pradal C. 2011. L-Py: L-Systems in Python : [Présentation #4458]. *EuroSciPy 2011, August 25-28, Paris*. s.l. : s.n., 2 p. European Meeting on Python in Science. 4, 2001-08-25/2001-08-28, Paris (France). <http://www.euroscipy.org/talk/4458>
 58. **Boudon F.** 2011. Modeling and acquisition of plant architecture. *6th International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture (ISIITA 2011), Beijing, China, October 28-30, 2011*. s.l. : s.n., 1 p. International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture. 6, 2011-10-28/2011-10-30, Pékin (Chine).
 59. **Guénard J.**, Giron C., Morin G., Gurdjos P., **Boudon F.**, Charvillat V. 2010. Modélisation de vignes à partir d'une séquence d'images. *Actes des 23èmes Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique, 17-19 novembre 2010, Dijon, France*. s.l. : s.n., p. 15-20 Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique. 23, 2010-11-17/2010-11-19, Dijon (France). <http://danae.u-bourgogne.fr/AFIG2010/file/ActesAFIG2010.pdf>
 60. **Boudon F.**, Cokelaer T., Pradal C., Godin C. 2010. L-Py, an open L-systems framework in Python. In : Dejong Theodore M. (ed.), Da Silva David (ed.). *Proceedings of the 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, FSPM 2010, September 12-17, 2010, University of California, Davis (USA)*. Davis : University of

- California, p. 116-119 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 6, 2010-09-12/2010-09-17, Davis (Etats-Unis).
61. Fournier C., Pradal C., Louarn G., Combes D., Soulie J.C., Luquet D., **Boudon F.**, Chelle M. 2010. Building modular FSPM under OpenAlea : concepts and applications. In : Dejong Theodore M. (ed.), Da Silva David (ed.). *Proceedings of the 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, FSPM 2010, September 12-17, 2010, University of California, Davis (USA)*. Davis : University of California, p. 109-112 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 6, 2010-09-12/2010-09-17, Davis (Etats-Unis). <http://www-sop.inria.fr/virtualplants/Publications/2010/FPLCSLBC10/fournier-fspm.pdf>
 62. **Preuksakarn C., Boudon F.**, Ferraro P., Durand J.B., Nikinmaa E., Godin C. 2010. Reconstructing plant architecture from 3D laser scanner data. In : Dejong Theodore M. (ed.), Da Silva David (ed.). *Proceedings of the 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, FSPM 2010, September 12-17, 2010, University of California, Davis (USA)*. Davis : University of California, p. 16-18 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 6, 2010-09-12/2010-09-17, Davis (Etats-Unis).
 63. **Gaillard A.L.**, Ferraro P., **Boudon F.**, Godin C. 2010. Lossy compression of tree architectures. In : Dejong Theodore M. (ed.), Da Silva David (ed.). *Proceedings of the 6th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, FSPM 2010, September 12-17, 2010, University of California, Davis (USA)*. Davis : University of California, p. 12-15 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 6, 2010-09-12/2010-09-17, Davis (Etats-Unis).
 64. Yan D.M., Wintz J., Mourrain B., Wang W., **Boudon F.**, Godin C. 2009. Efficient and robust reconstruction of botanical branching structure from laser scanned points. *Computer-aided design and computer graphics. CAD Graphics 09 : 11th IEEE International Conference, Huangshan, China, 2009 August 19-21*. s.l. : s.n., p. 572-575 IEEE International Conference. 11, 2009-08-19/2009-08-21, Huangshan (Chine).
 65. **Doran A., Mondet S.**, Grigoras R., Morin G., Tsang Ooi W., **Boudon F.** 2009. A demonstration of MobiTree : progressive 3D tree models streaming on mobile clients. In : ACM. *Proceedings of the Seventeen ACM International Conference on Multimedia, Beijing, China, October 19-24, 2009*. New York : ACM, p. 955-956 ACM International Conference on Multimedia. 7, 2009-10-19/2009-10-24, Pékin (Chine).
 66. **Mondet S.**, Cheng W., Morin G., Grigoras R., **Boudon F.**, Tsang Ooi W. 2008. Streaming of plants in distributed virtual environments. *ACM International Conference on Multimedia, October 27-31, 2008, Vancouver, Canada*. New York : ACM, p. 1-10 ACM International Conference on Multimedia, 2008-10-27/2008-10-31, Vancouver (Canada). <http://www.mclab.uottawa.ca/acmmm2008/>
 67. **Mondet S., Boudon F.**, Hoelt J.C., Morin G., Grigoras R., Pradal C., Paulin M. 2007. Compression progressive de modèles de plantes à base de cylindres généralisés. In : Association francophone d'informatique graphique. *Journées de l'Association francophone d'informatique graphique*. s.l. : s.n., p. 197-204 Journées de l'Association francophone d'informatique graphique. 20, 2007-11-26/2007-11-28, Marne-la-Vallée (France).
 68. Pradal C., **Dufour-Kowalski S., Boudon F.**, Dones N. 2007. The architecture of OpenAlea : A visual programming and component based software for plant modeling. In : Eds by Prusinkiewicz P., Hanan J., Lane B. *Proceedings : Abstracts of papers and posters of the 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models, November 4-9, 2007, Napier, New Zealand*. Napier : HortResearch, p. 25-1 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 5, 2007-11-04/2007-11-09, Napier (Nouvelle-Zélande).
 69. **Da Silva D.**, Balandier P., **Boudon F.**, Marquier A., Pradal C., Godin C., Sinoquet H. 2007. Modeling of light transmission under heterogeneous forest canopy : model description and validation. In : Eds by Prusinkiewicz P., Hanan J., Lane B. *Proceedings : Abstracts of papers and posters of the 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models, November 4-9, 2007, Napier, New Zealand*. Napier : HortResearch, 58 (4) International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 5, 2007-11-04/2007-11-09, Napier (Nouvelle-Zélande).
 70. **Dufour-Kowalski S.**, Pradal C., Dones N., Barbier de Reuille P., **Boudon F.**, Chopard J., DaSilva D., Durand J.B., Ferraro P., Fournier C., Guédon Y., Ouangraoua A., Smith C., Stoma S., Théveny F., Sinoquet H., Godin C. 2007. OpenAlea: An open-source platform for the integration of heterogeneous FSPM components. In : Eds by Prusinkiewicz P., Hanan J., Lane B. *Proceedings : Abstracts of papers and posters of the 5th International Workshop on Functional Structural Plant Models, November 4-9, 2007, Napier, New Zealand*. Napier : HortResearch, p. 36-1 International Workshop on Functional-Structural Plant Models. 5, 2007-11-04/2007-11-09, Napier (Nouvelle-Zélande). <http://algorithmicbotany.org/FSPM07/Individual/P36.pdf>
 71. Pradal C., **Boudon F.**, Dones N., Durand J.B., Barbier de Reuille P., Fournier C., Sinoquet H., Godin C. 2006. OpenAlea : a platform for plant modelling analysis and simulation. *Europhyton 2006, Genève, Suisse, 03-05 juillet 2006*. s.l. : s.n., (27 vues) Europhyton 2006, 2006-07-03/2006-07-05, Genève (Suisse).
 72. **Da Silva D., Boudon F.**, Godin C., Puech O., Smith C., Sinoquet H. 2006. A critical appraisal of the box counting method to assess the fractal dimension of tree crowns. In : G. Bebis and al (eds.). *Advances in visual*

computing. *Second International Symposium, ISVC 2006 Lake Tahoe, NV, USA, November 6-8, 2006 Proceedings, Part I*. Heidelberg : Springer, p. 751-760 International Symposium on visual computing. 2, 2006-11-06/2006-11-08, Lake Tahoe (Etats-Unis). https://doi.org/10.1007/11919476_75

73. Kurz B., Lagouarde J.P., Moreau P., Guyon D., Champion I., Ogée J., **Boudon F.**, Caraglio Y., Godin C., Pradal C. 2006. Modeling directional anisotropy of thermal infrared measurements over a pine forest canopy. In : Sobrino José A. (ed.). *Second recent advances in quantitative remote sensing (RAQRS'II), Auditori de Torrent, Spain, 25-29 September 2006*. Valence : Universitat de Valencia, p. 320-325 International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. 2, 2006-09-25/2006-09-29, Valence (Espagne).
74. Zhang X.P., **Boudon F.**, Adelin B., Blaise F. 2005. Real-time visualization for heterogeneous stand. In : IUFRO. *Fifth Workshop on Connection between Forest Resources and Wood Quality : Modelling Approaches and Simulation Software, 20-27 November 2005, Auckland, New Zealand*. s.l. : s.n., 1 p. Workshop on Connection between Forest Resources and Wood Quality : Modelling Approaches and Simulation Software. 5, 2005-11-20/2005-11-27, Auckland (Nouvelle-Zélande).
75. Melius A., Proisy C., Heuret P., **Boudon F.** 2004. Coupling Avicennia tree architecture to radar backscatter models for estimating mangrove forest biomass. *ECOLAB 2004, November 30 - December 05, 2004, Cayenne, French Guyana*. s.l. : s.n., 1 p. ECOLAB 2004, 2004-11-30/2004-12-05, Cayenne (Guyane française).
76. Pradal C., Dones N., Godin C., Barbier de Reuille P., **Boudon F.**, Adam B., Sinoquet H. 2004. ALEA: A software for integrating analysis and simulation tools for 3D architecture and ecophysiology. In : Godin Christophe (ed.), Hanan Jim (ed.), Kurth Winfried (ed.), Lacoite André (ed.), Takenaka Akio (ed.), Prusinkiewicz Przemyslaw (ed.), Dejong Theodore M. (ed.), Beveridge Christine (ed.). *Proceedings of the 4th International workshop on functional-structural plant models (FSPM), abstracts of papers and posters, 7-11 June 2004, Montpellier, France*. Montpellier : CIRAD-AMAP, p. 406-406 International Workshop on Functional-Structural Plant Models (FSPM). 4, 2004-06-07/2004-06-11, Montpellier (France).
77. Godin C., **Puech O.**, **Boudon F.**, Sinoquet H. 2004. Space occupation by tree crowns obeys fractals laws : Evidence from 3D digitized plants. In : Godin Christophe (ed.), Hanan Jim (ed.), Kurth Winfried (ed.), Lacoite André (ed.), Takenaka Akio (ed.), Prusinkiewicz Przemyslaw (ed.), Dejong Theodore M. (ed.), Beveridge Christine (ed.). *Proceedings of the 4th International workshop on functional-structural plant models (FSPM), abstracts of papers and posters, 7-11 June 2004, Montpellier, France*. Montpellier : CIRAD-AMAP, p. 79-83 International Workshop on Functional-Structural Plant Models (FSPM). 4, 2004-06-07/2004-06-11, Montpellier (France).
78. **Boudon F.**, Nougier C., Godin C. 2001. Multiscale geometric representation of heterogeneous stands. *Third International Workshop on Functional-Structural Tree and Stand Models, Montreal, Canada, 27-30th September 2001*. s.l. : s.n., 1 p. International Workshop on Functional-Structural Tree and Stand Models. 3, 2001-09-27/2001-09-30, Montreal (Canada).

4. Présentations invitées

1. **Boudon F.**. 2022. Procedural modeling of plants using L-systems. *Workshop on Computer science and Robotic's tools for 3D marine underwater environment monitoring and modelling, Montpellier, France, 22-23rd Sept.*
2. **Boudon F.**. 2016. Le Lidar terrestre pour phénotyper l'architecture tridimensionnelle des plantes. *Assemblée Générale AGAP, Montpellier, France, 7th July.*
3. **Boudon F.**. 2016. Modelling the structure of trees: from phenotyping to simulation. *AnimAGAP, Montpellier, France, 27th June.*
4. **Boudon F.**. 2016. Modeling plant morphogenesis. *Tree data and modelling, Tampere, Finland, 07-09th June.*
5. **Boudon F.**. 2015. Modélisation des plantes. *Journées Agropolis Fondation, Montpellier, France, 05-06th February.*
6. **Boudon F.**. 2011. Acquisition of plant architecture. *6th International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture, held in Beijing, China in 28-30 October.*
7. **Boudon F.**. 2009. Modélisation géométrique multi-échelles de l'architecture des plantes : Application à la mesure, l'analyse et la simulation. *Séminaire Agropolis Fondation, Montpellier, France, 03rd July.*
8. **Boudon F.**. 2009. Modélisation géométrique multi-échelles de l'architecture des plantes : Application à la mesure, l'analyse et la simulation. *XLIM, Limoges, France, 20 October.*
9. **Boudon F.**. 2006. Représentation géométrique multi-échelles des plantes. *LaBRI, Bordeaux, France, 12 October.*

III. Encadrements de travaux d'étudiants

1. Mémoires encadrés : master 2 et spécialité d'ingénieur.

2023 (6 mois) - A. Besnier - Intégration de modèle de simulation L-systems au navigateur de structure morphodynamique MorphoNet.

INRAe - Université de Montpellier - France

2023 (6 mois) - N. André - Prédiction des dates de floraison de pommiers à partir d'images capturées par drone lors de la sénescence.

INRAe – Institut Agro Rennes-Angers – France

2022 (6 mois) - M. Ceresole - Intégration de modèle de simulation L-systems au navigateur de structure morphodynamique MorphoNet.

INRAe - Université de Montpellier - France

2022 (6 mois) - D. Busnach. - Prédiction des dates de floraison de pommiers à partir d'images capturées par drone lors de la sénescence

INRAe - Aix-Marseille school of economics - France

2022 (6 mois) - A. Colot - Intégration du réseau hormonal et trophique régulant la ramification dans un modèle de développement architectural du rosier.

INRAe - Université d'Angers - France

2021 (6 mois) - E. Sultanov - Segmentation de nuages de points

Université de Strasbourg - France

2021 (6 mois) - A. Branthomme - Caractérisation de l'architecture et la production d'une collection de pommiers à partir de scans Lidar aéroportés.

INRAe/#DigitAG - ENSIMAG/GEM - France

2021 (6 mois) - A. Maurin - Simulation distribuée de plantes en 3D pour l'agroécologie.

Cirad/#DigitAG - Université de Montpellier - France

2020 (6 mois) - B. Bytyqi - Simulation distribuée de plantes en 3D pour l'agroécologie

Cirad - Université Grenoble Alpes - France

2020 (5 mois) - G. Sacchetti - Segmentation et caractérisation d'images multi-spectrales et thermiques d'une collection d'arbres pour l'estimation de la variabilité génotypique

INRAe - Université de Jean Monnet Saint Etienne - France

2019 (6 mois) - E. Margailan - Amélioration du logiciel PlantScan3D de traitement de scans LiDAR pour la reconstruction d'arbres fruitiers virtuels. Application aux pommiers.

Cirad - Epitech - France

2019 (3 mois) - A. Scriven - Création d'une interface Web de modélisation pour LPy

Inria - Epitech - France

2019 (6 mois) - B. Reyne - Modélisation du système manguier-cécidomyie des fleurs pour une évaluation de modes de gestion du ravageur et de ses dégâts

Cirad - Université de Montpellier - France

2019 (6 mois) - R. Arezki - Évaluation de traits architecturaux et de fonctionnement d'arbres fruitiers par imagerie aéroportée

INRAe - Université de Pau - France

2018 (6 mois) - R. Berruex - Projet Seeders : Création d'une application mobile et web de partage d'idées visualisées sous forme d'arbres et de forêts.

Inria - Epitech - France

- 2018** (6 mois) - L. Saint Crieg - Modélisation du système manguier-cécidomyie des fleurs pour une évaluation de modes de gestion du ravageur et de ses dégâts
CIRAD - Université Toulouse III Paul Sabatier - France
- 2018** (6 mois) - T. Ang - Projet Seeders : Création d'une application mobile et web de partage d'idées visualisées sous forme d'arbres et de forêts.
Inria - Epitech - France
- 2018** (3 mois) - R. Fournier - Reconstruction de squelettes de pommiers grâce au Deep Learning
Cirad - IUT Montpellier - France
- 2018** (6 mois) - J. Benoit - Automatisation du pipeline de traitement des scans LIDAR pour l'analyse de l'architecture des pommiers
INRAe - Epitech - France
- 2017** (6 mois) - M. Cauvin - Création d'une application mobile et web de partage d'idées visualisées sous forme d'arbres et de forêts
Inria - Epitech - France
- 2017** (6 mois) - E. Carrié - Développement d'une méthode d'acquisition et de représentation de l'architecture par utilisation du LiDAR terrestre et évaluation de la variabilité génotypique du pommier
INRAe - Université de Montpellier - France
- 2017** (6 mois) - J. Benoit - Création d'une application mobile et web de partage d'idées visualisées sous forme d'arbres et de forêts
Inria - Epitech - France
- 2016** (6 mois) - O. Simler - Développement d'une méthode d'acquisition et de représentation de l'architecture par utilisation du LiDAR terrestre et évaluation de la variabilité génotypique du pommier
INRAe - Université de Picardie Jules Verne, Amiens - France
- 2015** (6 mois) - S. Persello - Modélisation de l'élaboration du rendement de la mangue: Analyse de la fructification et couplage de sous-modèles
CIRAD - Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agronomiques de Bordeaux Aquitaine - France
- 2014** (6 mois) - A.S. Briand - Modélisation de la phénologie et de la croissance des unités de croissance et des inflorescences du manguier
CIRAD - Université Claude Bernard Lyon 1 - France
- 2013** (6 mois) - A. Jestin - Modélisation du développement et de la phénologie du manguier
CIRAD - Université Claude Bernard Lyon 1 - France
- 2010** (6 mois) - M. Omidvar - Cartes combinatoires pour la modélisation des tissus végétaux
Inria - Université de Limoges - France
- 2010** (8 mois) - J. Marin - Spécification de la croissance d'arbres par croquis
Inria - Université de Limoges - France
- 2009** (6 mois) - C. Xavier - Spécification de la croissance d'arbres par croquis
Inria - ENSIMAG - France

2. Encadrement de doctorants

Travaux de doctorat encadrés comme co-encadrant principal

- 2019 - 2022** - E. Carrié - Contribution au développement d'un modèle d'appui à la conception d'itinéraires techniques de production de mangues plus durables
Co-encadré avec F. Normand et I. Grechi.

CIRAD - Université de Montpellier

Actuellement post-doctorante à l'University of Queensland, Australie.

2015 - 2018 - S. Persello - Modélisation structure-fonction de l'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue et intégration de l'effet de pratiques culturales

Co-encadré avec F. Normand et I. Grechi.

CIRAD - Université de Montpellier

Actuellement en poste à la société Sun'R

2009 - 2012 - C. Preuksakarn - Acquisition et validation de modèles architecturaux virtuels de plantes en croissance

Co-encadré avec C. Godin.

Université de Kasetsart/Inria - Université de Montpellier 2

Actuellement assistant professor à Kasetsart University

Travaux de thèse en cours

2023 – 2025 - L. Lescroart - Experimental approach and modelling of the impact of shade and microclimate generated by an agrivoltaic structure on the development and performance of rice in the Camargue.

Co-encadré avec M. Dingkhun, D. Fabre, R. Perez.

Thèse Cifre EDF Renouvelables/CIRAD - Université de Montpellier

2023 – 2026 - C. Jardon - Impact d'une structure photovoltaïque sur les conditions environnementales et le fonctionnement des arbres en verger d'abricotier.

Co-encadré avec F. Normand, M. Saudreau, I. Grechi.

Thèse Cifre Solvéo Energies/CIRAD - Université de Montpellier

2020 – 2024 - J.P. Rojas Bustos - Application du deep learning au traitement de données LiDAR pour l'évaluation de traits architecturaux et de fonctionnement d'arbres fruitiers

Co-encadré avec E. Faure, E. Costes, C. Fiorio.

#DigitAG / INRAe - Université de Montpellier

Actuellement ingénieur à Hiring For Good

Travaux de doctorat encadrés comme co-encadrant secondaire

2020 - 2023 - F. Grifasi - Modelling the architecture of *Corylus avellana* and parametrization of the functional structural plant model L-HAZELNUT.

Directeur de thèse : Sergio Tombesi.

Università Cattolica del Sacro Cuore – Italie

Actuellement post-doctorante à l'Università Cattolica del Sacro Cuore

2011 - 2014 - J. Legrand - Toward a multi-scale understanding of flower development - from auxin networks to dynamic cellular patterns

Directeur de thèse : A. Boudaoud et Y. Guédon.

Ecole Normale Supérieure de Lyon

Actuellement ingénieur de recherche Inrae à l'ENS Lyon

2017 - 2020 - A. Schneider - Etude du rôle des sucres, en interaction avec les hormones dans la régulation du débourrement des bourgeons axillaires par l'intensité lumineuse.

Directeur de thèse : S. Sakr et J. Bertheloot.

AgroCampus Ouest – France

Actuellement Chargée de Recherche pour Novadiscovery

2010 - 2013 - J. Guenard; Synthèse de modèles de plantes et reconstructions de baies à partir d'images.

Directeur de thèse : V. Charvillat et G. Morin.

University of Toulouse

Actuellement Chercheur chez Fitting Box

2006 - 2009 - S. Mondet; Adaptive Modeling and Distribution of Large Natural Scenes.

Directeur de thèse : M. Paulin et G. Morin.

University of Toulouse

Actuellement Software Engineer à Oxhead Alpha

2005 - 2008 - J. Wither – Sketching and annotation for the procedural modelling of complex phenomena

Directeurs de thèse : M.P. Cani

Institut National Polytechnique de Grenoble – France

Actuellement Lead Game Mechanics Programmer at Travellers Tales

2005 - 2008 - D. Da Silva – Caractérisation de la nature multi-échelles des plantes par des outils de géométrie fractale, Application à la modélisation de l'interception de la lumière

Directeurs de thèse : C. Godin et H. Sinoquet

Université de Montpellier 2 – France

Actuellement Professeur au Gymnase de Chamblandes

3. Encadrement de post-doctorants et ingénieurs

Co-encadrant principal d'ingénieur

2022 - 2024 - N. Guilhot – Développement de méthodes de machine et deep learning pour caractériser l'architecture et la production d'arbres fruitiers à partir de nuages de point 3D et d'images. Collaboration avec la société Hiphén et E. Costes (AFEF/AGAP)

2022 – 2023 - J. Vaillant – Redesign d'un modèle intégratif de développement du pommier.

Collaboration avec E. Costes (AFEF/AGAP).

2019 – 2021 - J. Vaillant – Redesign et optimisation d'un modèle intégratif de développement du manguier. Collaboration avec F. Normand et I. Grechi (Hortsys)

2020 - S. Artzet – Estimation de la production d'une core-collection de pommier à partir de scans LiDAR. Collaboration avec B. Pallas et E. Costes (AFEF/AGAP).

Actuellement ingénieur à EasyPicky

Participation à l'encadrement de post-doctorants

2012 - 2014 - O. Ali – Simulations numériques pour l'étude de la croissance tissulaire des plantes.

Encadrant principaux : C. Godin (Inria Virtual Plants) et J. Traas (ENS Lyon)

Actuellement chercheur à l'Inria

2010 - 2012 - M. Cieslak – Développement d'un modèle structure-fonction du fruit de la tomate.
Encadrant principaux : C. Godin (Inria Virtual Plants) et N. Bertin (Inrae PSH)

Actuellement research associate à l'Université de Calgary

2009 – 2010 -H. Mebatsion – Développement d'un modèle structure-fonction du fruit de la tomate.
Encadrant principaux : C. Godin (Inria Virtual Plants) et N. Bertin (Inrae PSH)

Actuellement ingénieur à Amcor

4. Participation à des jurys ou comités de suivi de thèse

Participation aux jurys de thèse

2023 - A. Couturier - Impact de la diversité architecturale intraspécifique chez le ray-grass anglais sur la variabilité du R:FR directionnel.

Université de Poitiers

2014 - J. Legrand - Toward a multi-scale understanding of flower development - from auxin networks to dynamic cellular patterns

Ecole Normale Supérieure de Lyon

2009 - C. Lam - Aspects géométriques du vieillissement du bois en synthèse d'images

Université de Limoges

Participation aux comités de suivi de thèse

2021 – 2024 - V. Acker – Modélisation de la réponse de la croissance foliaire des graminées aux variables du changement climatique à partir d'une approche structure-fonction intégrant les interactions trophiques et hydriques. Inrae Lusignan.

2021 – 2024 - Y. Bai – Neural networks for leaf/wood discrimination in ULS LiDAR for leaf area density estimation. Inria/Cirad – Université de Grenoble

2008 - F. Mankessi – Étude de l'aptitude au clonage conforme par bouturage de géotypes d'Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis. Cirad – Université de Brazzaville

5. Participation à la formation continue

2018 – présent : Participation au module « Informatique Graphique » du parcours Imagine du Master 2 Informatique. Université de Montpellier. 10h/an

2018 – présent : Participation au module « Modélisation géométrique » du parcours Imagine du Master 1 Informatique. Université de Montpellier. 5h/an

2022: Formation « Plant Modelling » au National Institute of Agricultural Biology, Cambridge, UK. 25h

2019 – 2021 : Responsable du module « Introduction à la modélisation des plantes » du Master 2 Biologie Fonctionnelle des Plantes. Université de Montpellier. 20h/an

2018: Agreenium PhD Training « Functional-Structural Plant Modelling». 10h

2014 – 2018 : Responsable du module « Informatique Graphique » du parcours Imagina du Master 2 Informatique. Université de Montpellier. 40h/an

2007 – 2013 : Participation au module « Modélisation informatique des plantes et structures multi-échelles » du Master 2 Informatique. Université de Montpellier. 3h/an

2004 : Formation « ALEA: A software platform for ecophysiological modeling of plant architecture » à l'université de Kasetsart (KU) à Bangkok, Thaïlande. 25h

2001 – 2006 : Participation au module « Structures multi-échelles : aspects formels et algorithmiques » du Master 2 Informatique. Université de Montpellier. 3h/an

IV. Collaborations

1. Collaborations majeures

Biologie :

- AGAP/AFEF (E. Costes, F. Andres)
- Hortsys (F. Normand/I.Grechi)
- IRHS (J. Bertheloot)

Informatique/Modélisation :

- Equipe Projet Inria Mosaic (C. Godin)
- LIRMM/ICAR (E. Faure, C. Fiorio, N. Faraj)

2. Collaborations productives

Biologie :

- LEPSE (C. Fournier, B. Pallas)
- UR P3F (D. Combes, E. Frak, R. Barillot, G. Louarn)
- UMR PIAF (H. Sinoquet, M. Saudreau, B. Moulia)
- ENS Lyon (J. Traas)
- UMR Abyss (P.E. Lauri)
- Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza (S. Tombesi)

Informatique/Modélisation :

- AGAP/Phenomen (C. Pradal, R. Perez, M. Dingkhun, D. Fabre, C. Granier)
- Université de Calgary (P. Prusinkiewicz)
- IRT (G. Morin)
- AMAP (T. Arzouze, J.B Durand, R. Vezy, G. Vincent, M. Jaeger, Y. Caraglio)
- Ens Cachan/Equipe Imagine ex-Inria Evasion (M.P. Cani)
- Hiphen (J. Labrosse, A. Comar)

V. Financement de mes activités

Tableau 1. Récapitulatif de l'ensemble des projets dans lesquels je suis intervenu et/ou j'interviens

Période	Projet	Partenaire porteur	Fonction	Bailleur
2024-2026	D'Twin4FruitTree : Vers le développement de jumeaux numériques d'arbres fruitiers	E. Costes INRAe	<u>Co-coordonateur</u>	#DigitBio
2023-2028	AGROECOPHEN : Phénotypage à haut débit des plantes pour l'agroécologie	B. Muller INRAe	Participant	ANR - PEPR
2023-2025	PHADA : PHénotypage HAut-débit de la Diversité génétique des Arbres fruitiers pour une meilleure adaptation au changement climatique	M. Weiss INRAe	Participant	#DigitAG
2021 – 2023	Physioscope : Une nouvelle plateforme pour l'exploration du réseau multi-régulateurs et multi-échelles contrôlant l'architecture de la plante : cas de la régulation du débourrement par la lumière.	J. Bertheloot INRAe	<u>Co-coordonateur</u>	INRAe #DigitBio
2021-2023	IFM2A2 : Intégration du fonctionnement des méristèmes caulinaires dans la modélisation dynamique de l'architecture aérienne des plantes.	J. L Durand INRAe	Participants	INRAe #DigitBio
2021	Bourse de Master : Simulations distribuées de plantes : Application à l'agroécologie.	CIRAD	<u>Coordinateur</u>	#DigitAG
2021-2026	SADUR : Systèmes Alimentaires Durables en milieu insulaire	F. Normand CIRAD	Participant	Europe FEDER
2021-2024	FruitFlow: Predicting and tuning seasonal responses of apple and peach to improve orchard yield and climate change resilience	F. Andres INRAe	Participant	ERANET-SUSCROP
2020-2023	PalmStudio: Modelling performances of oil palm plantation by identification of architectural and functional traits	R. Perez & R. Vezy CIRAD	Participant	PT SMART
2020-2023	Bourse de thèse (J.P Rojas Bustos) : Évaluation de traits architecturaux et de fonctionnement d'arbres fruitiers par	INRAe	<u>Coordinateur</u>	#DigitAG

	données LiDAR, apprentissage profond et modélisation structure-fonction			
2020-2024	INVITE « INnovations in plant Variety Testing in Europe to foster the introduction of new varieties better adapted to varying biotic and abiotic conditions and to more sustainable crop management practices”	F. Laurens INRAe	Participant	Europe H2020
2018-2020	IMPULSE : « Analyse et modélisation des interactions plante - sol - population microbienne au sein de couverts hétérogènes plurispécifiques »	A. Jullien INRAe	Participant	INRAe
2019	PlantScan3D : Phénotypage de traits architecturaux de plantes pérennes par LiDAR.	CIRAD	<u>Coordinateur</u>	CIRAD Action Incitative “Nouveaux Produits et Prestation”
2019-2023	Bourse de thèse (E. Carrié) : Contribution au développement d’un modèle d’appui à la conception d’itinéraires techniques de production de mangues plus durables	F. Normand CIRAD	Participant	CIRAD et projet FEDER Cosaq
2019	Bourse de stage de master 2 : « Utilisation conjointe de données LIDAR, d’images multi-spectrales et thermiques et de modèle structure-fonction pour l’estimation de la variabilité génotypique d’une collection de pommier	Inrae E. Costes	<u>Co-Coordinateur</u>	GIS Fruits
2017-2020	Bourse de thèse (A. Schneider) sur la modélisation du rôle des sucres, en interaction avec l’auxine, dans le contrôle des séquences de débourrement chez le rosier.	J. Bertheloot INRAe	<u>Co-Coordinateur</u>	INRAe-EA et Région Pays de la Loire
2016-2017	Mobilité CIRAD à la Réunion	CIRAD	<u>Coordinateur</u>	CIRAD et FEDER COSAQ
2015-2021	COSAQ : Co-Conception de systèmes agro-alimentaires de qualité	F. Normand CIRAD	Participant	Europe FEDER
2015-2016	ApCoreStress : Detection des stress dans une collection de pommier	E. Costes INRAE	Participant	INRAe-BAP
2014-2016	MecaFruit3D: Development of computational functional-structural tomato fruit model	N. Bertin INRAe	Participant	Agropolis Foundation

2013-2017	Morphogenetics: understanding how flower shape and architecture are controlled by genes during development	C. Godin Inria	Participant	Inria
2013-2014	RhizoScanHT: A pipeline for 2D root system reconstruction	C. Godin Inria	Participant	Labex Numev
2012-2014	Rose: Regulation network of bud outgrowth in rose	J. Bertheloot INRAe	Participant	INRAe
2009-2012	Fruit3D: Development of computational functional-structural tomato fruit model	N. Bertin INRAe	Participant	Agropolis Foundation
2009-2012	PlantScan3D: Automatic acquisition of plant architecture from LiDAR scans	CIRAD	<u>Coordinateur</u>	Agropolis Foundation
2009-2011	Associated teams BMV-VirtualPlants with the group of P. Prusinkiewicz	C. Godin Inria	Participant	Inria
2009-2010	Hands on Synthetic Biology	Jim Haseloff Cambridge Univ.	Participant	EU 2WAYS Grant
2008-2011	Flower Model: Modeling growth and gene regulation in floral organs	Jan Traas INRAe	Participant	ANR-BBSRC Grant
2005-2008	NatSim: Nature simulation: hybrid representation for modeling, simulation, visualisation and streaming of animated natural scenes	M. Paulin CNRS	Participant	ANR

PARTIE B : SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

I. Introduction

Depuis de nombreuses années, les biologistes élaborent des modèles conceptuels de la croissance et du développement des plantes (Blackman, 1919; DeJong et al., 2011; Halle and Oldeman, 1971). Mais les modèles quantitatifs prenant en compte la structure modulaire des plantes, leur fonctionnement interne et leur interaction avec l'environnement sont relativement récents (Fourcaud et al., 2008; Godin and Sinoquet, 2005; Louarn and Song, 2020; Prusinkiewicz, 2004; Sievänen et al., 2014). Ces modèles structure-fonction de plantes (FSPM) ont été initiés après que les concepts d'architecture végétale aient été largement reconnus en botanique (Halle and Oldeman, 1971). Ils étaient motivés par l'idée que la structure tridimensionnelle des plantes formait son interface avec l'environnement et modulait sa croissance et sa productivité (Costes et al., 2006). Des formalismes de modélisation de la structure 3D des plantes (Godin and Caraglio, 1998), de leur développement (Bell, 1986; Jaeger and De Reffye, 1992; Prusinkiewicz and Lindenmayer, 1990) et leur couplage avec des modèles biophysiques simulant leur environnement (Chelle and Andrieu, 1998; Room et al., 1994; Sievänen et al., 2000; Takenaka, 1994) ont fait l'objet d'intenses développements et sont toujours un domaine actif de recherche.

Comme résumé par (Louarn and Song, 2020), le développement de FSPM répondait dès le départ à trois objectifs principaux :

- Intégrer les connaissances de différentes disciplines, notamment la biologie végétale, la biophysique, l'écologie et l'informatique ;
- Comprendre le fonctionnement des plantes à différentes échelles, du méristème aux communautés végétales ;
- Développer des modèles prédictifs dans des domaines appliqués où l'architecture des plantes joue un rôle critique, tel que la modélisation des plantes dans des environnements spécifiques (serres, vergers, panneaux photovoltaïques, etc.), la compétition pour les ressources, l'introduction de perturbations (taille, bioagresseurs, etc.) et la définition d'idéotypes pour les sélectionneurs.

La réalisation de ces objectifs a nécessité des efforts interdisciplinaires pour le développement d'outils et de méthodes spécifiques. Depuis ma thèse à l'UMR AMAP jusqu'à mon poste de chercheur au Cirad présentement dans l'UMR AGAP Institut, mon projet de recherche s'inscrit dans cette dynamique et m'a conduit à formaliser un pipeline de modélisation partant de l'acquisition jusqu'à l'analyse et la simulation du développement des plantes (voir Figure 1). Pour chaque étape du pipeline, j'ai développé différentes méthodes algorithmiques pour intégrer et traiter les données. Mon travail a un focus fort sur les plantes pérennes, notamment les fruitiers.

Mon rapport d'activités est divisé en 5 parties :

- Dans la première partie de cette section, je présente mes travaux sur la formalisation de représentations de ces architectures. Un enjeu est de prendre en compte l'aspect multi-échelles de ces structures et de les rendre le plus compactes possible pour simplifier leur manipulation.
- J'aborde dans une deuxième partie les méthodes d'acquisition que j'ai mises en place pour numériser des formes végétales réelles. Dans ce cas, l'enjeu est de produire des maquettes 3D réalistes, supports des expérimentations virtuelles.
- A partir de ces reconstructions, je présente ensuite un certain nombre de méthodes d'analyse de structures de plantes que j'ai contribué à développer.

- Dans la partie suivante, je passe en revue les formalismes de simulation de la croissance et du fonctionnement des plantes sur lesquels j'ai développé.
- Je présente finalement l'application de ces formalismes à la création de modèle FSPM pour des applications particulières.

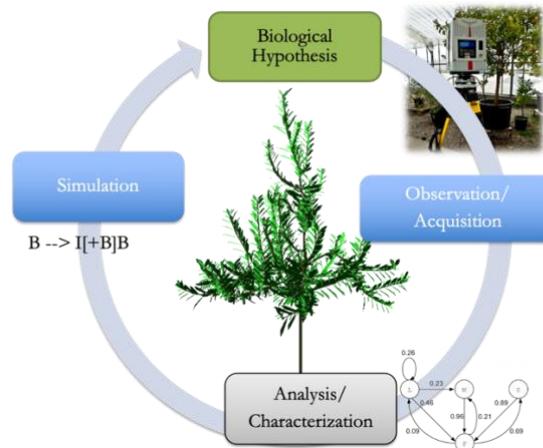


Figure 1: En partant d'une hypothèse biologique, nous mettons en place des expérimentations spécifiques qui demandent des traitements de données particuliers. Des méthodes d'analyses sont ensuite mises en place pour caractériser ces observations. A partir de ces données, un modèle de simulation peut être développé. A partir des résultats de simulation, l'hypothèse initiale est validée ou raffinée. Ce cadre classique de dialogue entre expérimentation et modélisation est utilisé pour structurer la présentation de mes activités dans la suite de ce document.

Tout le travail présenté ici a été réalisé dans le cadre de nombreuses collaborations et grâce aux travaux d'étudiants. A la fin de chaque section, j'explicite dans un encart les collaborations engagées, les financements, les étudiants encadrés et les valorisations qui ont été faites pour les travaux présentés.

II. Représentation de l'architecture tridimensionnelle des plantes et des tissus.

Les modèles virtuels 3D de plantes sont le support de nombreuses études de modélisation de la croissance et du fonctionnement des plantes. Ils sont utilisés pour simuler les interactions physiques d'une vraie structure de plante et de son environnement (captation de la lumière, interaction avec la pluie, le vent, les insectes, propagation des maladies, ...). Une analyse de la bibliographie montre comment l'échelle considérée dans chaque approche de modélisation de la géométrie d'une plante conditionne le type de représentations utilisées (Godin, 2000). Cependant, dans certains cas, les différents niveaux d'organisation doivent être considérés pour une meilleure compréhension du développement de la plante (Godin et al., 1997). Si un travail de formalisation sur l'organisation topologique multi-échelles des plantes avait été effectué (Godin and Caraglio, 1998), peu de travaux sur les différents niveaux d'organisations géométriques que l'on peut observer chez les plantes ont été entrepris.

Afin d'unifier et rendre cohérentes les différentes représentations géométriques à différentes échelles que l'on peut donner d'une même plante, j'ai développé et formalisé des représentations multi-échelles géométriques de l'architecture des plantes, et je les ai utilisées depuis dans différents contextes. Ces représentations donnent des points de vue complémentaires de l'organisation de la structure d'une plante et permettent une compréhension plus précise de leur géométrie complexe.

Ces représentations s'appuient sur des graphes arborescents multi-échelles (Godin and Caraglio, 1998) dans lesquels chaque nœud est annoté d'information géométrique (position, orientation, modèle géométrique) afin de donner une représentation géométrique de l'entité qu'il représente. Des contraintes géométriques peuvent être définies pour rendre cohérente ces représentations à différentes échelles. Pour permettre de représenter des entités constituant une plante à différentes échelles (plante entière, axes, segments d'axes, phytomères, etc.), j'ai développé la bibliothèque logicielle PlantGL qui offre un catalogue de

primitives géométriques haut niveau et de nombreux outils pour leur manipulation. Cette librairie est présentée dans la section suivante. Une application possible des représentations avec différents niveaux de détails se trouve en infographie avec des besoins des affichages adaptatifs. J'ai ensuite formalisé des représentations multi-échelles continues qui permettent de raffiner progressivement la représentation. J'ai appliqué de telles représentations au problème du transfert sur le réseau de représentation de plante. Ce travail est détaillé dans la section suivante.

Finalement, j'ai entrepris un travail similaire de formalisation de la géométrie multi-échelles sur les tissus végétaux. Pour cela, je me suis intéressé au formalisme des cartes combinatoires généralisées, qui sont présentées dans la dernière section de cette partie.

1. Modélisation de la structure géométrique multi-échelles des plantes

La géométrie des plantes est particulièrement complexe et irrégulière. Les représentations traditionnelles sous forme de maillage ne semblent pas adaptées car elles ne permettent pas une construction et une manipulation haut niveau de cette géométrie. De plus, la géométrie des plantes est souvent résumée par des représentations volumiques spécifiques qui représentent le volume occupé par la plante. Pour permettre une modélisation intuitive et efficace d'une telle géométrie, j'ai implémenté la librairie PlantGL (i.e. Plant Graphic Library) (Pradal, Boudon et al., 2009). Ce toolkit graphique sous licence libre a pour but de fournir les outils de base pour la création, la simulation et l'analyse de formes virtuelles 3D de plantes.

Cette librairie géométrique est écrite principalement en C++ pour être efficace mais est exportée vers le langage de modélisation Python qui en fait une puissante plateforme interactive pour diverses applications de la modélisation des plantes. Des primitives géométriques spécifiques ont été développées pour répondre à diverses questions biologiques à des échelles fines ou plus globales. En particulier pour l'échelle de la plante entière et des systèmes ramifiés, différents types d'enveloppes (asymétriques, extrudées, swung, etc.) ont été définies et implémentées, rendant simple la modélisation et la manipulation d'un volume global de plante. Les enveloppes asymétriques, par exemple, inspirées de (Cescatti, 1997) sont définies par 6 points de contrôles et 2 facteurs de forme (Figure 2). Elles offrent une grande flexibilité avec un nombre limité de paramètres ce qui en fait un outil de modélisation de choix pour représenter simplement des systèmes ramifiés complexes. Des méthodes d'inférence ont été implémentées pour calculer des formes macroscopiques à partir de formes plus détaillées de manière à opérer efficacement des changements d'échelle. Sur la base de cet outil de modélisation géométrique, différents outils de la communauté de recherche sur les FSPM ont été construits (L-Py, OpenAlea, etc.) et PlantGL est également compatible avec d'autres plateformes de modélisation telle que LStudio/VLab et la gamme AMAP. Elle est largement utilisée par la communauté (~13k téléchargements sur conda dans les 6 dernières années) et a été utilisée par un nombre conséquent d'applications de modélisation de l'échelle des tissus à l'échelle de la communauté des plantes.



Figure 2: Exemples de formes de couronnes modélisées par des couronnes asymétriques pour permettre des représentations géométriques multi-échelles de plantes.

- Collaboration : *Virtual Plants* (C. Pradal, C. Godin et al.)
- Valorisation ;Publication (Pradal, Boudon et al., 2009), Logiciel PlantGL (<https://github.com/fredboudon/plantgl>)

2. Méthode de compression de représentation géométrique végétale

Les plantes ont souvent une géométrie irrégulière dont la représentation est complexe à manipuler et à transmettre. En particulier, avec l'informatique actuelle qui tend vers des environnements logiciels virtuels distribués sur plusieurs ordinateurs, les représentations classiques semblent inadaptées à leur

transmission progressive de données sur le réseau (streaming). Cependant il existe des similarités entre les constituants d'une plante. Exploiter ces similarités pour trouver une représentation compacte d'un système ramifié permettrait de réduire la complexité en mémoire et en temps de traitement ainsi qu'une meilleure compréhension de l'organisation complexe de plantes. Dans ce contexte, j'ai abordé la question de formaliser une représentation compacte et progressive (i.e. pouvant être décodée au fur et à mesure lors de la réception des données) des arbres et l'ai appliquée à la transmission sur le réseau. Pour cela, nous avons proposé un codage différentiel des plantes : une forme moyenne est calculée pour chaque groupe de branches et ensuite pour chaque branche nous ne codons que des paramètres d'instanciation et des différences à la moyenne. La précision du codage est définie en fonction de l'importance de l'information i.e. très précise pour les branches moyennes, faible pour les différences. Pour optimiser la transmission sur le réseau et pallier de possibles pertes, nous ordonnons les paquets de données à envoyer en fonction de l'importance volumique des branches qu'ils encodent et de manière à optimiser la probabilité de décodage d'un paquet lors de sa réception. Cette stratégie s'est montrée très efficace en taille mémoire et en temps de transmission (Figure 3). Ce travail a notamment été présenté à la conférence ACM Multimedia 2008 et a reçu le prix du meilleur papier (Mondet et al., 2009).



Figure 3: Rendus après un décodage progressif du système ramifié d'un noyer digitalisé.

- Collaboration : IRIT de Toulouse (G. Morin, R. Grigoras)
- Étudiants encadrés : S. Mondet, A. Doran
- Valorisation : Article (Mondet et al., 2009), Communications (Doran et al., 2009, Mondet et al., 2007, 2008)
- Financement : ANR NatSim

3. Modélisation de la structure cellulaire des tissus

Les avancées technologiques dans la microscopie permettent une vision plus précise du développement cellulaire des plantes et nous amènent donc à redéfinir les mécanismes mis en jeu. Dans ce contexte, la modélisation peut permettre la validation et l'exploration de certaines connaissances sur les interactions entre les mécanismes physiques, physiologiques et génétiques qui régissent la morphogénèse des plantes. Pour cela, il a été nécessaire de construire des modèles virtuels tridimensionnels de tissus végétaux pour permettre la simulation et l'analyse des différents mécanismes morphogénétiques. J'ai développé un premier formalisme pour la représentation volumique de tissus végétaux basé sur les graphes d'incidence. Ce formalisme repose sur l'idée de décomposer un complexe cellulaire en structures élémentaires de dimensions successives (0-cellules représentant les sommets, 1-cellules représentant les arêtes, 2-cellules les faces, et 3-cellules les volumes) et d'exprimer par des relations l'incidence entre éléments par un graphe de décomposition. Ce formalisme a l'avantage d'être très simple à instancier. Il est néanmoins contraint dans le type d'objet pouvant être représenté (surface orientable manifold) et n'offre aucune garantie contre des erreurs topologiques.

Pour permettre des représentations plus robustes et plus générales, j'ai ensuite étudié les différents formalismes proposés dans la littérature pour les représentations volumiques de complexes cellulaires. En particulier, je me suis intéressé au formalisme des cartes combinatoires généralisées (Damiand and Lienhardt, 2014). Ce formalisme est très général puisqu'il permet de représenter des objets non orientables, avec ou sans bord, etc. Sa structure de base est le brin qui est un élément abstrait pouvant être vu comme « un point de vue » sur un segment. Différents types d'involutions permettent de spécifier comment ces brins sont connectés pour former des points, segments, faces, volumes, etc. Formellement, une 3-G-Map (carte combinatoire de degré 3 permettant de représenter des complexes cellulaires) est un quadruplet $(B, \alpha_0, \alpha_1,$

α_2, α_3) avec B l'ensemble des brins de la carte, α_0, α_1 , et α_2 des involutions sans point fixe et α_3 une involution avec ou sans point fixe. Les involutions permettent de représenter les coutures aux différents degrés de la carte (α_0 représente la couture de 2 brins pour former une arête, α_1 la couture de deux arêtes en un point, α_2 la couture de 2 faces, etc.). Des contraintes de cohérences sur ces involutions ont été formalisées pour empêcher et détecter des erreurs topologiques. Pour une 3-G-Map, $\alpha_0 \cdot \alpha_2, \alpha_0 \cdot \alpha_3$ et $\alpha_1 \cdot \alpha_3$ doivent être des involutions. Cela garantit la cohérence des coutures.

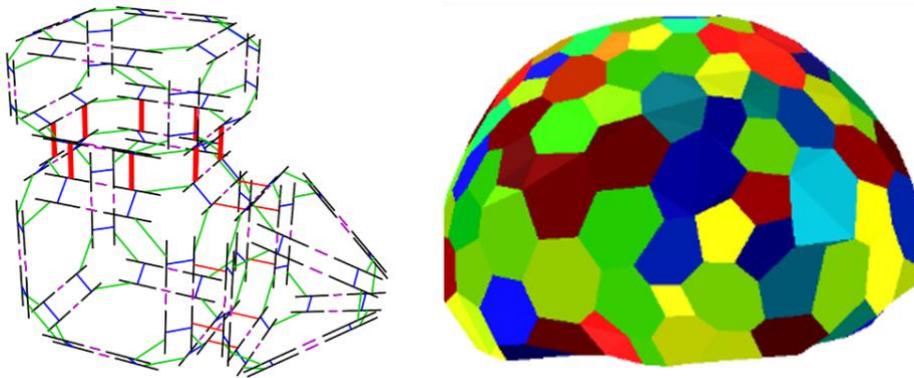


Figure 4: A droite, représentation volumique par cartes combinatoires généralisées de degré 3 (Damiand and Lienhardt, 2014). Les brins qui constituent l'éléments de base de la représentation sont représentés par des segments noirs. Les différentes relations topologiques modélisant les liens entre demi-arêtes, arêtes, faces et volumes (appelées respectivement $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ et α_3) sont représentées en violet, vert, bleu et rouge. A gauche, utilisation d'une carte combinatoire généralisées de degré 3 pour représenter l'organisation cellulaire d'un méristème floral de la plante modèle *Arabidopsis thaliana* (Omidvar, 2010).

J'ai appliqué ces représentations à la modélisation de tissus végétaux (Figure 4). J'ai également montré que ces représentations à base de cartes combinatoires permettaient de représenter des éléments topologiques moins classiques (faces de murs, régions de cellules, etc.) dans les représentations maillées mais utiles pour des simulations biologiques. Une telle approche multi-échelles s'intègre très simplement dans le formalisme des cartes généralisés. Grâce aux contraintes de cohérence, nous avons pu corriger des reconstructions maillées de tissus issues d'images de microscopie confocale. Le principal inconvénient de ce formalisme est qu'il repose sur des éléments abstraits et que cela rend plus difficile la manipulation des cellules topologiques de différentes dimensions. Nous avons mis en place des mécanismes pour abstraire cela et permettre une manipulation simple pour un modélisateur. Une première tentative a été faite pour mettre en place un système de réécriture de type L-systems pour ces structures afin de simuler leurs évolutions par des règles simples. Des premiers résultats intéressants ont été obtenus nous permettant de simuler très simplement la diffusion d'une hormone dans un tissu (Omidvar, 2010).

- Collaboration : Virtual Plants (J. Chopard, G. Cerutti, C. Godin), RDP de l'ENS Lyon (J. Traas)
- Étudiant encadré : M. Omidvar
- Valorisation : Logiciel CellComplex (<https://github.com/VirtualPlants/cellcomplex>)
- Financement : IPL Morphogenetics, Flower Model

III. Acquisition de structures végétales 3D

Dans la partie précédente, j'ai présenté mes travaux sur la formalisation de structures topologiques et géométriques représentant des végétaux. Cette partie présente les méthodes que j'ai mises en place pour construire de telles structures à partir de différentes sources de données. Dans les années quatre-vingt-dix, des premières méthodes sont apparues pour digitaliser l'architecture des plantes en 3D par exemple en utilisant des dispositifs électromagnétiques (Room et al., 1996; Sinoquet et al., 1997). Ces méthodes sont basées sur la mesure directe de la position et les dimensions des organes d'une plante dans l'espace. Elles fournissent des données précises mais sont particulièrement coûteuses en temps de collecte. Les progrès techniques récents dans la création de matériels (scanners laser, tablettes, caméras à haute résolution) ont

permis d'imaginer des méthodes plus rapides et automatiques pour acquérir l'architecture de plantes de types et tailles variées. Pourtant les méthodes standards développées sur ces nouvelles sources de données n'ont pas donné de résultats convaincants dans le cas des plantes et des adaptations ont été nécessaires.

L'enjeu est d'importance au vu du besoin en méthodes automatisées de reconstruction de l'architecture pour les plateformes de phénotypage haut débit (telles que PhenoArch en conditions contrôlées ou Diaphen au champ à Montpellier). L'acquisition haut débit de données de phénotypage de plantes permet d'étudier de manière quantitative et explorer les réponses des plantes à différentes conditions environnementales pour un grand nombre de génotypes. Ce type de travaux doit permettre à terme de d'identifier des traits utiles pour l'amélioration des plantes.

Dans le cadre de mon projet de recherche, j'ai donc exploré l'utilisation de scanner laser, de croquis et de photographies que je présente dans les sections suivantes.

1. Reconstruction de l'architecture des plantes à partir de données 3D issus de scans laser

J'ai examiné la possibilité d'utiliser les scans LiDAR pour automatiser la digitalisation d'architecture de plantes. En collaboration avec l'équipe-projet Inria Galaad, j'ai mis en place un premier algorithme pour reconstruire des systèmes ramifiés sans feuilles. Cette méthode a été appliquée avec succès sur des données générées par scans virtuels. Dans cette approche, les composants cylindriques et les régions de branchement sont identifiés et localisés en utilisant un algorithme de clustering K-means variationnel. Un graphe d'adjacence entre cylindre est reconstruit et analysé pour extraire la topologie arborescente de la structure. Néanmoins, les données manquantes dues par exemple à de l'occlusion entre organes lors de la prise de données peuvent perturber fortement la reconstruction.

Dans le cadre de la thèse de C. Preuksakarn et du projet PlantScan3D, j'ai exploré l'idée d'utiliser l'algorithme de colonisation de l'espace (SCA) (Palubicki et al., 2009; Runions et al., 2007) inspiré de processus biologiques pour reconstruire l'architecture d'une plante à partir d'un scan. Originellement, le SCA a été introduit pour générer des structures ramifiées artificielles plausibles dans un volume spécifié par un ensemble de points 3D appelé attracteurs. Le pipeline développé combine les filtres géométriques décrits dans la Figure 5).

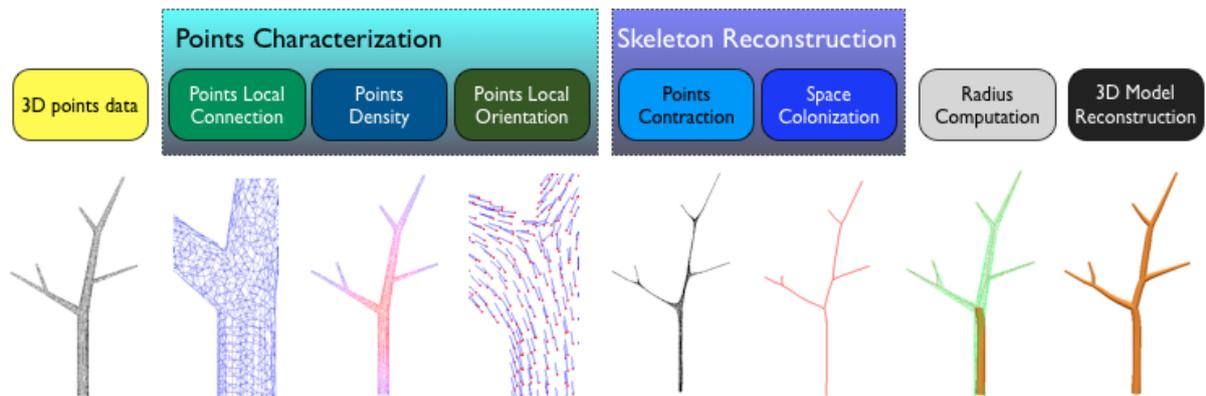


Figure 5: Pipeline de traitement de nuages 3D issue de scans Lidar pour la reconstruction de structures arborescentes

Le nuage de points est d'abord caractérisé localement en estimant la densité et l'orientation locale en chaque point du scan. Pour cela, un voisinage pour chaque point est déterminé dans l'espace riemannien en considérant des connexions locales entre points construites à partir des k plus proches voisins. La densité et l'orientation locale du nuage de points sont ensuite estimées sur ce voisinage. Pour mieux estimer le centre des branches, un filtre de contraction sur les points est appliqué et consiste à déplacer chaque point vers le centre de leur voisinage. La taille du voisinage peut dans ce cas être estimé en fonction de la densité de points pour discriminer les petites branches des plus larges. Un voisinage anisotrope qui s'étend plus radialement sur les branches larges peut aussi être paramétré en fonction de la direction locale du nuage de points. Une fois contracté, le nuage de points sert d'attracteurs pour un algorithme de colonisation qui itérativement va mettre en place de nouveaux segments dans l'arborescence pour atteindre les points du scan. En paramétrisant correctement un tel algorithme, il est possible de reconstruire précisément des structures arborescentes complexes comme le montre la Figure 6.



Figure 6: Reconstruction d'un cerisier par notre méthode basée sur l'algorithme de colonisation de l'espace. À droite, photo originale du cerisier. Au centre, projection des points du scan sur la photo. À gauche, projection de la reconstruction.

- Collaborations : Inria Virtual Plants (C. Godin, J.B Durand), Galaad (B. Mourrain), Inria Evasion (M.P. Cani), Univ Helsinki (E. Nikinmaa)
- Étudiant encadré : C. Preuksakarn
- Valorisation : Communication (Preuksakarn et al., 2010), Logiciel PlantScan3D (<https://github.com/fredboudon/plantscan3d>)
- Financement : PlantScan3D

2. Spécification d'architecture de plantes par croquis (Sketching)

L'acquisition par scanner reste limitée à des arbres plutôt isolés et de tailles limitées. Un certain nombre de problèmes apparaissent donc lors de mesures de grands arbres en forêt (par exemple en forêts tropicales). Depuis longtemps, les relevés botaniques sont généralement effectués sous forme de croquis dans de telles situations. De nombreux relevés existent mais restent difficilement exploitables quantitativement. De manière générale, l'utilisation de dessins reste le moyen le plus intuitif pour spécifier une forme. Cependant, la complexité importante des formes végétales rend le travail souvent fastidieux. Fournir un système de dessin pour permettre de spécifier rapidement des éléments naturels tels que des arbres de manière réaliste avec un contrôle simple et intuitif est donc un véritable challenge. Pour cela, j'ai développé une première approche où la structure multi-échelles des plantes est exploitée pour minimiser les entrées de l'utilisateur et une deuxième approche qui exploite les facilités d'interaction offerte par les tablettes.

- **Approche multi-échelles pour le sketching**

J'ai développé une méthode multi-échelles de design de formes de plantes par dessin basée sur l'utilisation de silhouettes. Ce paradigme permet en effet une spécification rapide et intuitive du feuillage d'un système ramifié à plusieurs échelles sans avoir à dessiner chacune des branches individuelles d'un arbre. Ce choix m'a permis d'intégrer des connaissances et contraintes botaniques pour générer des distributions plausibles de branches sur un axe.

J'ai illustré ce paradigme en construisant une interface logicielle de dessin permettant de spécifier de manière continue des silhouettes de feuillage de l'échelle de la plante entière à l'échelle de la feuille (Figure 7). Chaque dessin sert à inférer la disposition des branches dans le houppier en analysant les courbures de la silhouette. À partir de chaque bosse, un sous-système ramifié est inféré et une silhouette est calculé. L'utilisateur a la possibilité de détailler cette silhouette qui permet ainsi d'inférer le niveau suivant de détails, ainsi jusqu'aux feuilles individuelles. Quand finalement l'utilisateur dé-zoom, le style botanique spécifié localement sur certains systèmes ramifiés est copié sur les autres systèmes ramifiés à la même échelle et repositionné en 3D. Le positionnement en 3D des systèmes ramifiés autour de leur axe porteur est calculé comme une optimisation pour respecter des contraintes botaniques (phylloxtaxie) et la projection définie par le dessin de l'utilisateur. De par sa flexibilité, ce système permet ainsi de décrire la structure de la plante avec une précision contrôlée et offre des procédures de générations automatiques pour éviter un travail fastidieux.

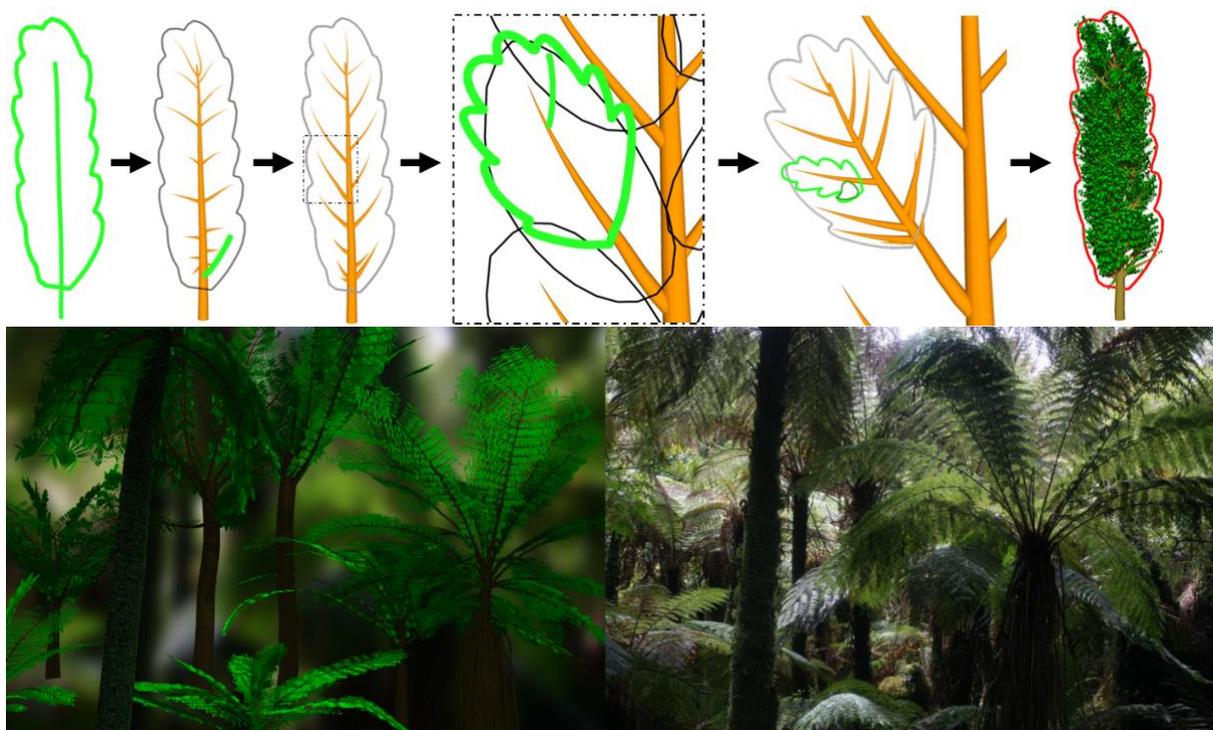


Figure 7: Méthode multi-échelles de sketching d'arbre. Illustration de la méthode en haut. L'utilisateur dessine une silhouette et l'axe principale. Des sous-systèmes ramifiés sont inférés. L'utilisateur peut corriger le port des branches d'un seul trait. Il spécifie ensuite les détails d'un sous-système ramifié. Ainsi jusqu'au feuilles. Quand il dézoome, le système génère automatiquement l'ensemble de la géométrie de l'arbre en copiant le style que l'utilisateur a spécifié à chaque échelle. En bas, exemple de résultats obtenus avec cette approche sur une forêt de fougères.

- Collaborations : Inria Evasion (M.P. Cani), Inria Virtual Plants (C. Godin) et AMAP (Y. Caraglio).
- Étudiant encadré : J. Wither
- Valorisation : Article (Wither et al., 2009)

- **Modélisation basée tablette**

J'ai exploré une approche alternative basée sur l'utilisation de tablettes qui permettent directement d'explorer le modèle 3D généré pendant le design par sketching de la plante. Pour cela, j'ai participé au développement d'une application qui combine des méthodes procédurales flexibles avec l'interface multi-touch des tablettes pour un contrôle fin de la forme de l'arbre (Figure 8). L'outil principal est une brosse qui donne au modélisateur un contrôle plus ou moins détaillé sur la forme de l'arbre. En fonction du rayon de la brosse, le modélisateur peut spécifier le parcours exact d'un axe individuel ou définir globalement le volume d'un système ramifié ou de la couronne d'un arbre. Le processus de croissance est basé sur l'algorithme de colonisation de l'espace (SCA) et le positionnement des attracteurs est contrôlé par la brosse utilisée par l'utilisateur. Celui-ci peut ainsi contraindre la croissance en dessinant la silhouette de l'arbre ou le faire croître de manière autonome. Il est aussi possible de faire virtuellement décroître l'arbre, fournissant un undo continu et permettant de cibler précisément un stade de développement. La forme et l'organisation des branches sont contrôlées par un petit nombre de paramètres qui contrôlent par exemple le gravitropisme, le gravimorphisme, etc. Les branches générées peuvent également être élaguées ou déformées interactivement. En combinant des méthodes procédurales rapides et flexibles et une interface intuitive, cette approche permet de créer rapidement une grande diversité de structures d'arbres naturelles ou artistiques.



Figure 8: *TreeSketch*: Méthode de sketching d'arbres sur tablette. L'utilisateur contrôle un algorithme de colonisation de l'espace par quelques gestes sur la tablette.

- Collaboration: Univ. Calgary (P. Prusinkiewicz, A Runions).
- Étudiant encadré : S. Longay
- Valorisation : Article (Longay et al., 2009) App pour iPad (*TreeSketch*)
- Financement : Equipe associée VP-BMV

3. Reconstruction à partir de photographies et de vidéos

- **Reconstruction d'arbres**

Je me suis ensuite intéressé à la reconstruction de structures végétales à partir d'images. Pour cela, j'ai adopté une approche d'analyse-par-synthèse pour lequel des connaissances à priori sur les espèces de plantes reconstruites peuvent être prises en compte (Guénard et al., 2014). La méthode est basée sur un algorithme de squelettisation qui permet de générer plusieurs squelettes plausibles à partir d'une segmentation du feuillage de la plante. La squelettisation prend en compte des contraintes botaniques sur la distribution des rameaux dans l'espace, en particulier sur un cep de vigne que nous considérons. Un modèle paramétrique de systèmes ramifiés définis en L-systèmes génère ensuite à partir de ces squelettes une structure végétale tridimensionnelle complète. Une reprojexion de la structure générée est comparée à l'image originale pour évaluer la qualité de la reconstruction. Une procédure d'optimisation est ensuite utilisée pour sélectionner les meilleurs paramètres du modèle génératif en fonction de ce critère de reprojexion. Des résultats réalistes ont ainsi été obtenus, notamment sur de la vigne.

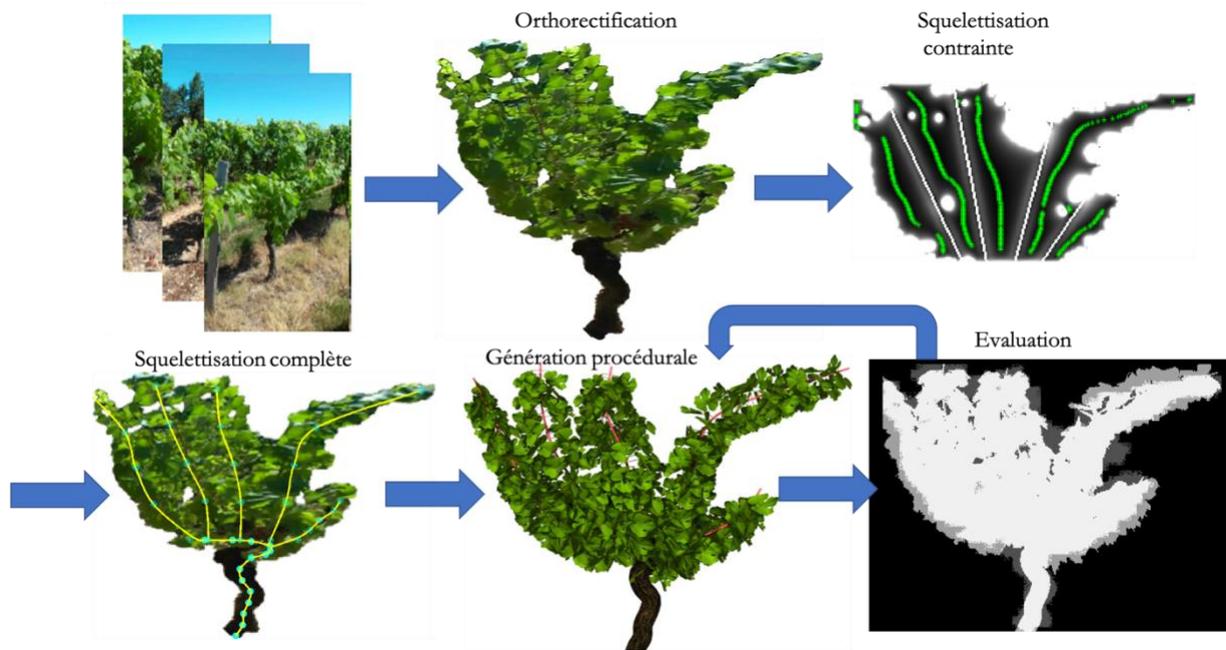


Figure 9: Méthode de reconstruction de la structure 3D de vignes à base d'images.

- Collaboration: IRIT (G. Morin, V. Charvillat).
- Étudiant encadré : J Guénard
- Valorisation : Article (Guénard et al., 2010, 2011, 2013, 2014)

- **Reconstruction de la structure interne des fruits**

Je me suis également intéressé à la modélisation spatialisée du fonctionnement de la structure interne de fruits (tomate, nectarine principalement). Pour cela, un pipeline de reconstruction de la structure volumique de fruits a été développé, composé de plusieurs étapes (Cieslak et al., 2016). En premier, nous avons finalisé des procédures de segmentations du profil de fruit à partir d'images de coupe de fruit. En assemblant plusieurs profils, un volume peut être construit. Un maillage volumétrique 3D peut ensuite être reconstruit avec différentes régions marquées par différentes identités (par exemple le noyau et le mésocarpe pour les fruits à noyau) en utilisant les algorithmes de maillage de la bibliothèque de géométrie computationnelle CGAL. Le réseau vasculaire est ensuite construit dans le maillage en réutilisant et paramétrant correctement l'algorithme de colonisation de l'espace qui remplit le volume en simulant la compétition pour l'espace de la vasculature. Ce travail a montré la possibilité de créer un modèle spatial de fruit spécifique pour une espèce de fruit avec un effort relativement faible. Ces maillages volumétriques sont combinés avec des modèles de fonctionnement du fruit pour explorer l'effet de la forme du fruit sur sa qualité.

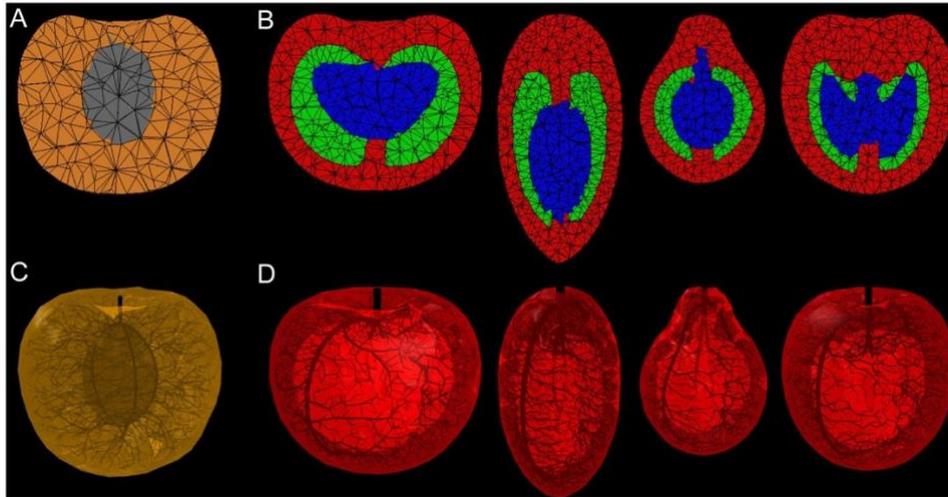


Figure 10: Exemple de reconstruction de la structure interne de fruit à partir d'images.

- Collaboration: Inrae PSH (N. Bertin, M. Génard), Inria Virtual Plants (C. Godin).
- Étudiant encadré : H Mebatsion, M. Cieslak
- Valorisation : Article (Mebatsion et al., 2010, Cieslak et al., 2016)
- Financement : Fruit3D, MecaFruit3D

IV. Caractérisation et analyse de structures végétales

Dans cette section, je présente les méthodes que j'ai mises en place pour analyser et caractériser les structures végétales. Une première méthode consiste à estimer une distance entre deux structures 3D prenant en compte la disposition géométrique et l'organisation topologique des éléments qui les constituent. Dans une deuxième application, je présente comment les traits estimés à partir de scans et de leur reconstruction peuvent être reliés à la variabilité génétique et utilisés pour définir des morphotypes de plantes à partir d'une collection de diversité génétique. Finalement, je propose un indice original, issue de l'analyse fractale, pour caractériser l'occupation de l'espace par une plante.

1. Alignement de structures arborescentes 3D

Pour valider les reconstructions architecturales obtenus à partir de scans Lidar et les rendre utilisables dans des études biologiques, j'ai développé une procédure de comparaison de structures (Boudon et al., 2014). L'idée est de comparer des structures reconstruites automatiquement avec des structures de référence (digitalisées manuellement par exemple). Les éléments similaires sont identifiés en utilisant un algorithme d'optimisation global et des critères de comparaison géométriques. Plus en détails, j'ai utilisé une distance d'Hausdorff pour comparer les squelettes de chaque élément. Basé sur cette métrique qui compare 2 éléments, un appariement global est défini qui associe les éléments des deux structures à comparer de façon à ce que la somme des distances entre éléments associés soit minimale. Pour cela, un algorithme d'optimisation de type algorithme hongrois est utilisé. Une originalité de cet algorithme est de permettre l'appariement de plusieurs éléments d'une structure avec un élément de l'autre structure. Cela permet de palier à des découpages différents en segments élémentaires des deux structures à comparer. L'organisation topologique des éléments appariés est ensuite comparée. Pour cela, le nombre de liens topologiques entre éléments qui ont une image sur la structure de référence est estimé et comparé au nombre total de liens. Deux indices de similarité géométrique et structurelle sont ainsi définis et caractérisent la différence entre reconstructions automatiques et structures de références (Figure 11). Ces distances m'ont permis d'estimer la validité de différentes méthodes de reconstruction. En particulier, j'ai pu comparer quantitativement différentes méthodes de la littérature (Livny et al., 2010; Xu et al., 2007) avec la méthode de reconstruction développée. Ces deux indices ont permis de montrer la robustesse de la méthode proposée. J'ai également appliqué cette méthode pour valider des reconstructions automatiques de systèmes racinaires. Cette

approche peut également se révéler intéressante pour comparer des reconstructions à différents temps et déterminer ainsi les structures issues de chaque période de croissance.

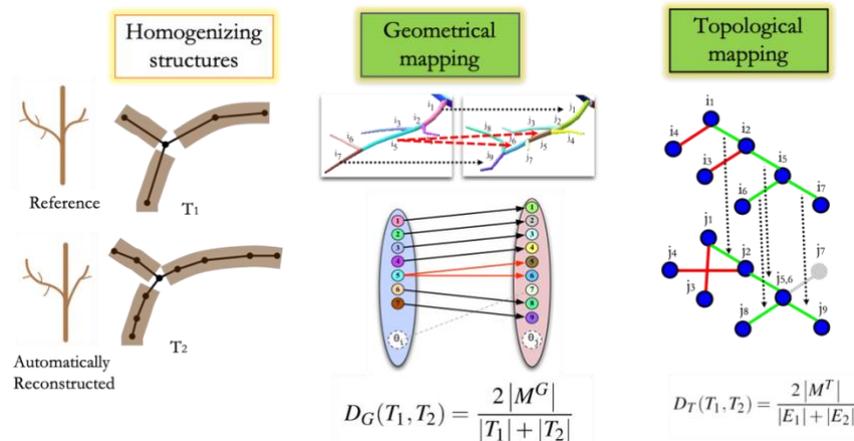


Figure 11: Définition d'une distance entre structure 3D de plantes. Une distance géométrique permet de trouver un appariement optimal entre les éléments des deux structures. Une première distance géométrique entre ces structures est ainsi définie basée sur cet appariement. L'organisation topologique des deux structures est ensuite comparée, formalisée par une deuxième distance.

- Collaborations : Inria Virtual Plants (C. Godin, P. Ferraro), BPMP (P. Nacri) Univ Helsinki (E. Nikinmaa)
- Étudiant encadré : C. Preuksakarn
- Valorisation : Article (Boudon et al., 2014), Logiciel TreeMatching (https://github.com/fredboudon/tree_matching)
- Financement : PlantScan3D

2. Définition de morphotypes et analyse génétique à partir de traits architecturaux

En collaboration avec l'équipe AFEF de l'UMR AGAP institut, nous avons scanné une core-collection de pommiers en été et en hiver. À partir des scans d'été, j'ai développé un pipeline pour inférer un ensemble de traits architecturaux tels que la hauteur, le rayon, l'excentricité, le volume du houppier, la surface foliaire. À partir de scans d'hiver (sans feuilles) et en utilisant les algorithmes de reconstruction de l'architecture des plantes présentés précédemment, j'ai estimé plusieurs traits topologiques et architecturaux tels que le nombre d'axes, leur typologie (court, moyen, long), leurs longueurs, etc. En utilisant ces traits et en les combinant à des traits plus fonctionnels (NDVI acquis par imagerie drone), des analyses génétiques ont été menées en estimant notamment l'héritabilité de chacun des traits. Pour cela la variabilité génétique est estimée par une régression linéaire et comparée à la variation résiduelle. L'héritabilité des traits a été caractérisée, mettant en évidence les très bons scores des traits volumiques. Finalement, par une analyse de clustering hiérarchique et une analyse en composante principale, a permis de déterminer différentes catégories de formes, appelé morphotypes, et identifier les traits associés (taille, densité, etc.) (Coupel-Ledru et al., 2019).

En utilisant une approche similaire d'estimation de traits architecturaux globaux, nous avons comparé les valeurs de traits calculés à partir de nuages de points issus de scans terrestres et de scans aéroportés issus de différents protocoles. Le but était d'estimer la qualité de ces traits en fonction du protocole utilisé, Lidar terrestre ou drone. Le but était de trouver un compromis entre rapidité d'acquisition et qualité des résultats. Les résultats ont montré que les scans issus des vols les plus rapides avec une densité de points moindre permettent une estimation des traits plus proche de ceux estimés à partir de scans terrestres avec notamment des corrélations entre traits plus fortes et des différences d'héritabilité des traits plus faibles. Ce travail a été présenté à l'PIHC 2022 à Angers et a reçu le prix de la meilleure présentation pour sa section par un doctorant que je co-encadre (Rojas Bustos et al., 2022).

- *Collaborations* : AFEF/AGAP (B. Pallas, E. Costes)
- *Étudiant encadré* : A. Brantbomme, J.P. Rojas Bustos
- *Valorisation* : Article (Coupel-Ledru et al., 2019) Communication (Pallas et al., 2018, 2020, Rojas Bustos et al., 2022), Logiciel TreeMatching (<https://github.com/fredboudon/aerialTerrestrialScans>)
- *Financement* : These #DigitAG, Invite, ApCoreStress

3. Analyse fractale de la géométrie des plantes

Les formes végétales étant particulièrement irrégulières, il est difficile d'analyser, avec la géométrie classique (euclidienne), l'analyse de l'espace occupé par le houppier d'une plante. Des indicateurs concrets du type de structure et de son occupation de l'espace manquent. La géométrie fractale offre de tels indicateurs avec notamment la notion de dimension fractale. Plusieurs méthodes existent pour estimer la dimension fractale d'un objet, la plus connue étant la méthode des boîtes. J'ai montré comment et sous quelles conditions cette première méthode pouvait être mise en application sur des architectures de plantes. J'ai également montré comment les outils de calculs de géométries multi-échelles volumiques que j'ai développés durant ma thèse permettent de déterminer cette dimension par une méthode alternative inspirée de la méthode des deux surfaces (Zeide and Pfeifer, 1991). Pour cela, j'ai estimé différentes représentations à différentes échelles d'une base de données de pêcheurs digitalisés et comparé la surface de l'enveloppe et des feuilles de chaque composant pour inférer la dimension fractale (Boudon et al., 2006). Ces outils ouvrent la voie à l'étude de la géométrie de la plante à différentes échelles, et permettent une compréhension plus précise de l'occupation de l'espace par une plante. Ces résultats, obtenus sur des architectures digitalisées réelles, formalisent et confirment quantitativement l'idée intuitive de la nature fractale de certaines plantes.

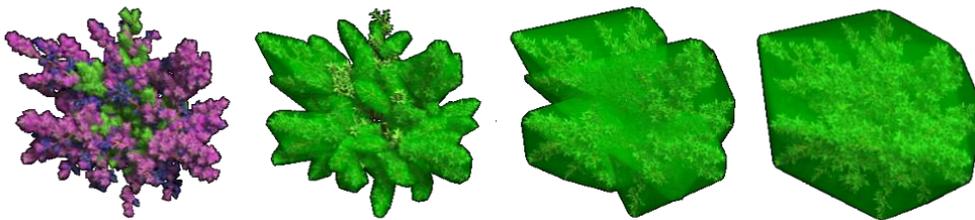


Figure 12: Représentation volumique multi-échelles d'un pêcheur qui est ensuite utilisée pour calculer une dimension fractale. L'évolution du volume de la plante à travers les échelles nous permet d'estimer une telle dimension.

- *Collaboration* : Virtual Plants (C. Godin et al.), Inrae PLAF (H. Sinoquet)
- *Valorisation* : Publication (Boudon et al., 2006)

V. Formalisme de simulation de la croissance et du fonctionnement des plantes

Dans cette partie, je présente mes travaux sur le développement de formalismes pour simuler la croissance et le fonctionnement des plantes. En particulier, j'ai formalisé un système de simulation basé sur le formalisme des systèmes de Lindenmayer (L-systems) que j'ai cherché à intégrer dans des pipelines de simulation plus complexes basés sur des workflows scientifiques.

1. Simulation de structures arborescentes

Le formalisme de réécriture des L-systems (Prusinkiewicz and Lindenmayer, 1990) est très populaire dans la communauté de modélisation car il permet de simuler efficacement la croissance de structures arborescentes. Ce formalisme est défini par un alphabet de modules, représentant les objets à modéliser (les organes d'une plante par exemple). Ces modules peuvent être assemblés en une chaîne parenthésée pour représenter les branchements dans la structure ramifiée. Des règles de réécriture (productions) expriment la création et le changement d'état des modules de la plante à travers le temps.

Formellement, un L-system est un triplet $\langle V, w_0, P \rangle$ avec V , l'alphabet utilisé, w_0 l'axiome, soit la chaîne initiale de la simulation représentant la structure au temps initial, et P l'ensemble des règles de production. Un exemple très simple de L-systèmes est donné dans la Figure 13. Contrairement aux grammaires de Chomsky, les règles sont appliquées en parallèle sur la chaîne, permettant ainsi de formaliser des étapes de la simulation. Une règle est composée d'un prédécesseur, i.e. le module à remplacer, spécifié dans la partie gauche de la règle et un successeur, i.e. le mot à utiliser pour le remplacement. Par défaut, la règle identité s'applique. Une interprétation graphique de la chaîne générée à chaque étape peut être calculée. Pour cela, une tortue Logo est utilisée et interprète les modules de la chaîne comme des commandes géométriques à effectuer. Dans l'exemple donné, F est interprété comme le tracé d'un cylindre de longueur unitaire, + et - comme des rotations gauches et droites. Des règles spécifiques d'interprétation peuvent être formulées pour traduire les modules de la simulation en module interprétable par la tortue.

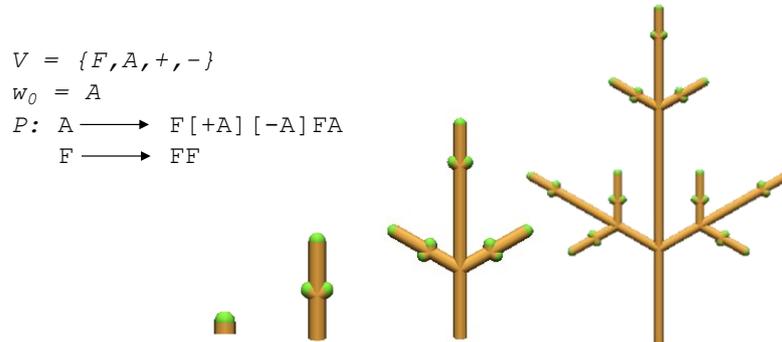


Figure 13: Un exemple de L-systèmes très simple. À gauche, la grammaire utilisée et à droite les résultats graphiques de la simulation. Avec des règles très compactes, des structures très complexes peuvent être générées

Les règles peuvent être évidemment bien plus sophistiquées que celles présentées et de nombreuses extensions existent (règles paramétriques, conditionnelles, stochastiques, etc). Notamment des règles contextuelles peuvent être définies où un module est remplacé en fonction du contexte dans la structure modélisée de ce module. Dans la pratique, le prédécesseur est modifié pour spécifier ce contexte. Par exemple, la règle $B \langle A \rangle C \rightarrow D$ indique qu'un module A n'est réécrit que s'il a pour parent (au sens arborescent du terme) un module B et pour enfant un module C. Dans ce cas, il sera réécrit en un module D. Ce mécanisme est très pratique pour propager des calculs dans la structure, vu qu'un élément peut être réécrit en fonction des paramètres de ses voisins. Une diffusion sur une structure basée sur la loi de conservation peut s'écrire simplement par la règle suivante :

$$N(c_i) \langle N(c_j) \rangle N(c_k) \rightarrow N(c_j + v_d * (2c_j - c_i - c_k) - \alpha * c_i + \beta)$$

Avec les c_i représentant la concentration d'une substance dans le compartiment i , v_d la vitesse de diffusion, α la vitesse de dégradation et β la vitesse de création.

Pour exprimer toute cette complexité, les règles ont été incorporées à des langages de programmation classiques, tels que le C++ (Karwowski and Prusinkiewicz, 2003) ou Java (Kniemeyer et al., 2007). Dans un premier temps, j'ai réalisé une implémentation des L-systems intégrés au langage Python (Boudon et al., 2012) notamment pour rendre accessible ce formalisme dans la plateforme de modélisation des plantes OpenAlea (Pradal et al., 2008). Le langage de modélisation Python est particulièrement intéressant dans ce cas car il propose des méthodes et des structures de haut niveau, une syntaxe simple et un mode interactif permettant d'explorer très simplement les structures que l'on manipule. Au-dessus de ce module de simulation, appelé L-Py, j'ai également implémenté un environnement de développement intégré pour faciliter la création de modèles de plantes. Grâce à Python, ce module peut intégrer une grande variété d'outils définis dans différents contextes de modélisation, en particulier les outils de la plateforme OpenAlea. Réciproquement L-Py peut être intégré facilement comme un simple outil de simulation dans des pipelines de calculs plus complexes. Dans L-Py, de nouveaux opérateurs pour l'interprétation géométrique des structures produites par les L-systems ont été définis permettant une spécification aisée de la géométrie complexe des plantes. De plus, la notion d'échelle dans la représentation par chaîne de modules a été introduite pour représenter les différents niveaux d'organisation d'une plante et de simuler leurs interactions et leurs dynamiques. Ce module a eu un succès certain et un nombre conséquent de modèles structure-fonction de plantes ont été développés avec L-Py par différents groupes de la communauté de modélisation des plantes (Barillot et al., 2012; Boudon et al., 2020; Costes et al., 2008; Leopold, 2017).

- *Collaboration: Inria Virtual Plants (C. Godin) et Univ. Calgary (P. Prusinkiewicz).*
- *Valorisation : Article (Boudon et al., 2012) Logiciel L-Py (<https://github.com/fredboudon/lpy>)*
- *Financement : Équipe associée VP-BMV*

2. Modélisation multi-échelles de l'interception de la lumière

Je me suis intéressé à la modélisation de l'interaction de la plante avec son environnement lumineux et à l'influence des différents niveaux d'organisation de la plante sur cette interaction. Dans ce travail, je me suis plus particulièrement concentré sur la modélisation de l'interception du rayonnement direct à différentes échelles. L'architecture de l'arbre est dans ce cas décomposée en collection de composants représentant des amas de feuilles à différentes échelles dans la couronne. Ces composants sont modélisés sous forme d'enveloppes poreuses. L'opacité des composants est définie comme la probabilité d'interception d'un rayon de lumière traversant l'enveloppe. Le rôle de l'organisation multi-échelles de l'arbre sur la captation de la lumière est estimé en comparant différents scénarios où les composants à chaque échelle sont soit distribués de manière aléatoire soit placés à leurs positions réelles (Figure 14). Ces scénarios ont été testés sur différentes architectures 3D digitalisées de pêcheurs et de manguiers. Une étude de sensibilité a été menée pour évaluer l'effet de chaque échelle de l'organisation de ces arbres sur l'interception de la lumière. Avec ces informations, il a été possible d'estimer un niveau de description de l'arbre qui offre le meilleur compromis entre la quantité d'information à mesurer et la qualité des résultats du modèle d'interception lumineuse. Ce modèle multi-échelles d'estimation de l'interception de la lumière a été appliqué à l'identification d'idéotype de pommier (Picheny et al., 2017) ou l'estimation du partitionnement de la lumière par espèces dans des couverts herbacés (Louarn et al., 2012).

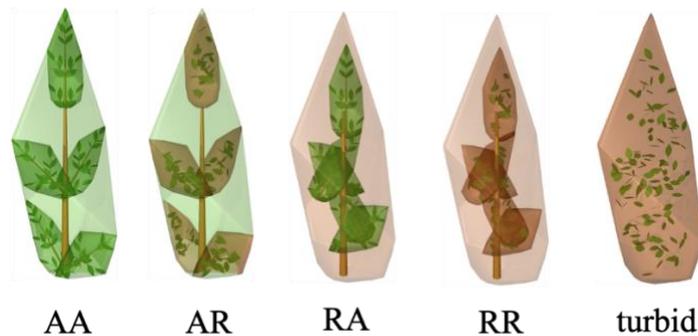


Figure 14: Représentation multi-échelles de l'architecture d'une plante fractale utilisée pour quantifier l'interception de la lumière. A chaque échelle, une distribution homogène ou réelle peut être considérée permettant une analyse de sensibilité de chaque niveau d'organisation.

- *Collaboration : Virtual Plants (C. Godin et al.), Inrae PLAF (H. Sinoquet)*
- *Étudiant encadré : D. Da Silva*
- *Valorisation : Publication (Da Silva et al., 2008), logiciel Fractalysis (<https://github.com/openalea/fractalysis>)*

3. Modélisation par workflows scientifiques

La communauté FSPM développe des modèles pour comprendre les processus biologiques impliqués dans la fonction et la croissance des plantes. Des chercheurs en botanique, écophysiologie, sylviculture, horticulture, mathématiques appliquées et informatique ont développé de nombreux modèles et outils logiciels. En raison des différentes contraintes et de l'expérience des équipes, les modèles disponibles ont été développés dans différents langages de programmation sur différents systèmes d'exploitation dans le but de répondre à des questions biologiques spécifiques, le plus souvent à une échelle donnée. Ils sont souvent développés comme des programmes "monolithiques" qui manquent généralement d'interopérabilité. Pour pallier à ce problème, la plateforme logicielle OpenAlea a été développée par l'équipe projet Virtual Plant (Pradal et al., 2008). Il s'agit d'un framework logiciel flexible permettant l'intégration et l'interopérabilité de composants logiciel hétérogènes provenant de différentes disciplines scientifiques. OpenAlea a été développé en Python, un langage interprété de haut niveau, orienté objet. L'architecture d'OpenAlea consiste en (a) un ensemble d'outils pour intégrer des modèles hétérogènes mis en œuvre dans différents langages et

sur différentes plateformes ; (b) un framework de gestion de composants logiciels qui permet leur instanciation dynamique et leur composition ; et (c) un environnement de modélisation graphique pour améliorer la lisibilité et l'utilisation de modèles complexes et pour un prototypage rapide. Une grande variété de composants, basés sur les fonctionnalités des bibliothèques PlantGL et L-Py, a été définie et sont utilisables facilement à travers l'environnement de modélisation graphique pour permettre la définition de scénarios de modélisation complexes. OpenAlea a largement été diffusé et utilisé dans la communauté FSPM et est devenu une plateforme de référence à l'Inrae.

- *Collaboration: Inria Virtual Plants (C. Pradal, C. Godin).*
- *Étudiant encadré : S. Dufour-Kowalsky*
- *Valorisation : Article (Pradal et al., 2008) Logiciel OpenAlea (<https://github.com/openalea>)*

4. Environnement virtuel de modélisation

Les diverses plateformes de modélisation dédiées aux modèles FSPM de plantes, tel qu'OpenAlea, ont été développées avec un soutien limité pour la diffusion et la reproductibilité de modèles limitant ainsi le travail collaboratif et distribué. Afin de remédier à ces problèmes, j'ai proposé d'utiliser le projet Jupyter, un écosystème open-source de notebooks computationnels, pour créer des environnements de modélisation virtuels pour la modélisation de plantes. Ces environnements (Vaillant et al., 2022) combinent des modules scientifiques standards de Python, le formalisme des L-systèmes, l'utilisation de tableaux multidimensionnels pour représenter la structure des plantes et des outils pour la visualisation de l'architecture des plantes en 3D dans des notebooks Jupyter. Comme étude de cas, un environnement réimplémentant les fonctionnalités du FSPM V-Mango (voir section V.1) a été instancié. Cette nouvelle implémentation a clairement amélioré la modularité du modèle, les modules représentant les processus individuels et les flux de travail entre eux. La modularité du modèle permet d'effectuer simplement des simulations pour un sous-ensemble de processus seulement, en partant aussi bien d'architectures simulées que mesurées. Une des originalités de ce travail a été de proposer des solutions pour l'intégration du formalisme des L-systems dans les notebooks, la visualisation, le calcul distribué à distance et les simulations parallèles de plusieurs modèles indépendants (Figure 15). Le développement de modèles sur des sites éloignés des ressources informatiques rend possible la conception et la mise en œuvre de modèles collaboratifs et distribués, et démontre l'utilité et l'efficacité d'un environnement de modélisation virtuel personnalisable. Cet ensemble logiciel permet d'envisager une meilleure diffusion de telle approche de modélisation par exemple dans les pays du sud et de bénéficier plus simplement des ressources computationnelles institutionnelles intensives.

Integrate L-Py with xarray-simlab

Definition of the Lsystem

Interface with other processes is deduced from extern values and modules declaration.

```

1 #!writefile -lpydevel.lpy
2 from util import *
3 cmap = PglMaterialMap(0,25)
4
5 extern(flush_delay = None)
6 extern(nb_metamers = None)
7 extern(step_delta = None)
8
9 module Metamer(t, size, lighting, allocation)
10 module Apex(t)
11 Axion: (0,3)@Gc SetColor(green) Apex(0)
12
13 production:
14 Apex(t) :
15   if (t < flush_delay) < step_delta and (t // flush_delay) < nb_metamers:
16     nproduce Metamer(MetamerParams(0, size=0.5)) / (10+randint(-15,15))
17     produce Apex(t+step_delta)
18
19 Metamer(p) --> Metamer(p.set(trp.t+step_delta, size = p.size+p.allocation))
20 interpretation:
21 Apex(t) --> F(1) 0
22 Metamer(p) :
23   l = p.size
24   nproduce F(1/3) [SetColor(cmap(p.lighting))] (0,1)
25   nproduce @Gc Sweep(interpolate(path1, path2, max(1,p,t/5)), section, 1,1/strides, 1/2, radius))

```

Definition of the process from the lpy model

A xarray process class named LPyDevel is created from the lsystem definition.

```

1 import xsimlab as xs
2 from lpy_simlab_process import xs_lpyprocess
3
4 _ = xs_lpyprocess('lpydevel', '-lpydevel.lpy',
5                 globaldependencies={'Metamer_lighting': 'light', 'Metamer_allocation': 'carbon'})

```

Definition of the carbon allocation process

```

1 #xs_process
2 class CarbonAllocation():
3   conv_rate = 0.01
4   res_conv_rate = 0.5
5
6   # process input
7   Metamer_t = xs.foreign(lpydevel, 'Metamer_t')
8   Metamer_lighting = xs.foreign(light, 'Metamer_lighting')
9
10  # process output
11  Metamer_allocation = xs.variable(dims='Metamer', global_name='Metamer_allocation', intent='inout')
12  Metamer_demand = xs.variable(dims='Metamer', intent='out')
13  reserves = xs.variable(intent='inout')
14
15  #xs_runtime(args=['step_delta'])
16  def run_step(self, step_delta):
17    carbon = (self.Metamer_lighting * self.conv_rate)
18    self.Metamer_demand = growth_rate(np.array(self.Metamer_t))*step_delta
19
20    autoallocated = np.minimum(carbon, self.Metamer_demand)
21    demand = self.Metamer_demand - autoallocated
22    supply = carbon - autoallocated
23
24    total_demand = sum(demand)
25    total_supply = sum(supply) + self.reserves
26
27    ratio = min(1, total_supply/total_demand) if total_demand > 0 else 0
28    nreserves = (total_supply - total_demand*ratio) - self.reserves
29    self.reserves += nreserves if nreserves < 0 else nreserves*self.res_conv_rate
30    self.Metamer_allocation = autoallocated*demand*ratio

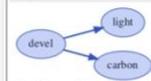
```

Create xarray-simlab model and simulation setup with the three processes

```

1 model = xs.Model({'devel': lpydevel, 'light': Light, 'carbon': CarbonAllocation})
2 ds = xs.create_setup(
3   model=model,
4   clock='time', np.linspace(0, 20, 200)),
5   input_vars=lpydevel.init_vars({'devel': {'flush_delay': 2, 'nb_metamers': 5},
6   'carbon': {'reserves': 10}}))
7 model.visualize(show_inputs=False, show_variables=False)

```

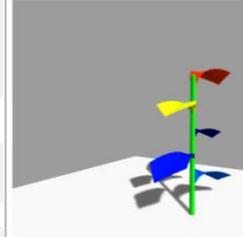


Run the model and inspect results

```

1 from lpy_simlab_process import xs_lpydisplay_hook
2 ds_out = ds.xsimlab.run(model=model, hooks=xs_lpydisplay_hook('devel', scale = 1/50, delay = 0.01))

```



100% | Simulation finished in 00:02

Plot output

```

1 plt.figure(figsize=(18,4))
2 plt.subplot(1, 3, 1)
3 ds_out.light_Metamer_lighting.plot.line(x='time')
4 plt.subplot(1, 3, 2)
5 ds_out.carbon_reserves.plot.line(x='time')
6 plt.subplot(1, 3, 3)
7 ds_out.carbon_Metamer_allocation.plot.line(x='time'); plt.show()

```

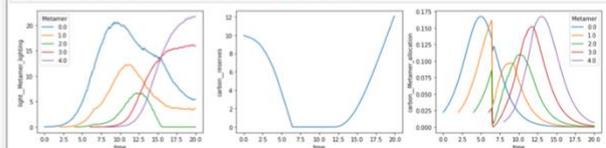


Figure 15: Exemple de modèle FSPM incluant des règles L-systems, de l'interception de la lumière et de l'analyse intégré dans un notebook Jupyter.

- Collaboration: Cirad Hortsys (F. Normand, I. Grechi).
- Étudiant encadré : J. Vaillant
- Valorisation : Article (Vaillant et al., 2022)
- Financement : Projet COSAQ

5. Framework de simulation mécanique des tissus

La simulation de tissus végétaux en croissance nécessite une représentation dynamique et flexible et un solveur mécanique robuste pour estimer la croissance cellulaire. Pour cela, j'ai combiné la représentation de complexes cellulaires basée sur un graphe d'incidence présenté précédemment et le solveur mécanique Sofa développé par l'Inria (Faure et al., 2012). Le complexe cellulaire est annoté pour fournir une base de données dynamique de l'organisation et des propriétés mécaniques et biologiques du tissu. Sofa permet de calculer l'équilibre mécanique nécessaire à la simulation. J'ai développé un module logiciel, appelé TissueMeca, permettant de traduire les représentations des tissus en éléments mécaniques pour Sofa et d'appliquer des opérations géométriques et topologiques telles que le raffinement du maillage, la division cellulaire, etc. Ce module a été utilisé pour investiguer le comportement géométrique et physique de tissus en lien avec les expressions de gènes observées dans les tissus (Boudon et al., 2015).

- Collaboration : Virtual Plants (J. Chopard, C. Godin), LIRMM (B. Gilles), RDP de l'ENS Lyon (A. Boudaoud, J. Traas)
- Étudiant encadré : O. Ali
- Valorisation : Article (Boudon et al., 2015) et logiciel TissueMeca (<https://gitlab.inria.fr/fboudon/tissuemeca>)
- Financement : IPL Morphogenetics, Flower Model

VI. Développement de modèles structure-fonction

Un dernier axe de ma recherche porte sur le développement de méthodes et modèles pour la modélisation structure-fonction de plantes. En collaboration avec des collègues biologistes, j'ai ainsi développé différents modèles FSPM, notamment sur le manguiier, le noisetier et le rosier.

1. Modélisation structure-fonction d'arbres fruitiers

- **Modélisation du développement du manguiier**

Le manguiier est marqué par un fort asynchronisme phénologique. A partir de premières analyses montrant le rôle de facteurs architecturaux et temporeux dans ce phénomène (Dambreville et al., 2013), j'ai mis en place un modèle structure-fonction intégratif, appelé V-Mango. Ce modèle synthétise les différentes connaissances existantes sur le développement architectural et la qualité des fruits du manguiier acquises par les collègues biologistes, eco-physiologistes et agronomes. Ce FSPM est composé d'un module de développement architectural et de modules qui simulent le développement des organes individuels. L'apparition des différents organes (unité de croissance, inflorescences et fruits) est décomposée en événements élémentaires qui décrivent l'occurrence, l'intensité et la chronologie du développement végétatif et reproducteur. Les probabilités correspondantes ont été estimées en utilisant des modèles linéaires généralisés (GLM) sur une base de données de croissance d'architectures et d'organes de manguiiers mesurés à la Réunion, principalement sur la variété Cogshall. Ces événements sont déterminés par des facteurs structurels (position et type des entités botaniques) et temporels (dates d'apparition). Un second module simule la croissance et le développement journalier des unités de croissance et des inflorescences à l'aide de distributions empiriques et de modèle de temps thermique. Finalement, la croissance des fruits est déterminée à l'aide d'un modèle écophysio-logique qui simule les processus liés au carbone (i.e photosynthèse, mobilisation/accumulation de réserve, respiration, croissance) et à l'eau (flux contrôlé par le potentiel hydrique de la tige et du fruit, transpiration du fruit) à l'échelle de la branche fructifère pendant la période de croissance des fruits. En résultat, la simulation du modèle donne une vue intégrée de la dynamique de la population des unités de croissance, des inflorescences et des fruits d'un arbre (Figure 16). En utilisant un tel modèle, des études sur le concept d'autonomie des branches ont pu ainsi être menées *in silico* (Boudon et al., 2020).



Figure 16: Le modèle FSPM V-Mango qui simule la phénologie du manguiier.

- *Collaboration* : Cirad Hortsys (F. Normand, I. Grechi), Inrae Abyss (P.E. Lauri) Cirad QualiSud (M. Léchaudel), Virtual Plants (Y. Guédon).
- *Étudiantes encadrées* : S. Persello, A. Jestin, A.S. Briand
- *Valorisation* : Article (Boudon et al., 2020), Modèle V-Mango (<https://github.com/fredboudon/vmango>)
- *Financement* : Projet COSAQ

- **Modélisation du développement du noisetier**

Suite à une sollicitation de F. Grifasi, doctorante à l'Université Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza, j'ai également participé à la caractérisation architecturale et la formalisation d'un FSPM de noisetier. L'architecture du noisetier présente des caractéristiques différentes de celles des autres arbres fruitiers. Il s'agit d'une espèce monoïque dont les fleurs femelles sont regroupées en inflorescences sur des bourgeons mixtes, tandis que les fleurs mâles sont disposées en inflorescences sur des pousses sylleptiques. Chaque nœud peut porter plus d'un bourgeon. Pour modéliser cela, nous avons décomposé le développement architectural du noisetier en événements stochastiques élémentaires spécifiques qui ont été calibrés sur des mesures architecturales. Une fois les processus stochastiques formalisés, le développement du noisetier a été formalisé par des règles L-systèmes pour générer des architectures simulées réalistes (Grifasi et al., 2023). L'évaluation de ces simulations est en cours.

- *Collaboration* : Inrae AFEF/AGAP (E. Costes), AMAP (J.B. Durand), Université Cattolica del Sacro Cuore (S. Tombesi).
- *Étudiantes encadrées* : F. Grifasi
- *Valorisation* : Communication (Grifasi et al., 2023)

2. Modélisation du débourrement

La ramification est un processus important pour la productivité (nombre de branches productives) et pour la qualité visuelle des plantes ornementales (disposition spatiale des branches). Mais le comportement de la ramification est difficile à prévoir en raison du manque de connaissances sur tous les mécanismes régulant la plasticité du débourrement des bourgeons. Dans une première étude, j'ai cherché à caractériser et quantifier l'effet de la taille et de la lumière sur le débourrement sur le manguier. Dans une seconde étude, je me suis intéressé aux mécanismes physiologiques qui contrôlent ce débourrement.

- **Effet de la taille et de la quantité et de la qualité de la lumière sur le développement du manguier**

Pour en faire un outil utile d'aide à la conception d'itinéraire technique, un des objectifs de l'équipe d'HortSys était d'intégrer différentes pratiques culturales dans V-Mango, en particulier la taille. La taille est une pratique horticole importante qui favorise généralement la croissance végétative. Elle a notamment pour effet de modifier la distribution de la lumière à l'intérieur de la canopée. J'ai contribué à cet objectif de par mes compétences en développement de modèle SF et mes expériences antérieures sur l'estimation de l'interception lumineuse d'un végétal. J'ai également participé à la mise en place et au suivi d'expérimentations sur le terrain lors de mon expatriation à la Réunion.

Dans le cadre d'une première thèse (S. Persello), nous avons pour objectif de caractériser la réponse végétative à la taille chez le manguier. De manière similaire à ce que nous proposons dans V-Mango, la croissance végétative après la taille a été décomposée en processus élémentaire (occurrence, intensité, timing) pour modéliser le débourrement végétatif et reproducteur. L'analyse des résultats de notre expérimentation ont montré que la réponse des manguiers à la taille est complexe et dépend de différents facteurs tels que l'intensité de la taille (quantité de biomasse fraîche enlevée par unité de volume de la canopée) et la sévérité de la taille (distance entre le point de taille et l'extrémité distale de l'axe), le diamètre de l'axe et la proximité aux points de coupe. En général, une taille plus importante conduit à une croissance végétative plus importante et plus synchronisée.

Pour compléter ces connaissances et mieux localiser les lieux de stimulation de la croissance, nous avons ensuite étudié l'effet de la lumière sur le débourrement et la mortalité des organes. Dans le cadre de

la thèse d'E. Carrié, nous avons caractérisé la distribution de la lumière en termes de quantité (densité de flux de photons photosynthétiques) et de qualité (rapport Rouge clair Rc sur Rouge sombre Rs) à l'intérieur d'une canopée de manguiers et ainsi établi des relations fonctionnelles entre ces 2 indices (Carrié et al., 2023). Des relations ces indices et des facteurs de taille avec la croissance végétative (occurrence, intensité, timing) ont pu être raffinées. J'ai intégré ces relations dans le modèle V-Mango et commencé à explorer *in silico* l'effet de différents protocoles de taille sur la croissance végétative du manguiers (Figure 17).



Figure 17: Simulation de différentes intensités de taille (en haut) et la croissance résultante (en bas).

- Collaboration : Cirad Hortsys (F. Normand, I. Grechi), Inrae P3F (D. Combes, E. Frake).
- Étudiantes encadrées : S. Persello, E. Carrié
- Valorisation : Article (Persello et al., 2019, Carrié et al., 2023), Communication (Boudon et al., 2023) Modèle virtualpruning (<https://github.com/fredboudon/virtualpruning>)
- Financement : Projets COSAQ, SADUR

• Modélisation du réseau de régulation du débourrement axillaire du rosier

Le débourrement des bourgeons axillaires est une étape majeure dans le développement des plantes pérennes. La régulation de cet événement clé est supposée gérée par la disponibilité en sucres et par des flux hormonaux (auxine, cytokinine, strigolactone). Ces hypothèses sont travaillées par l'équipe de J. Bertheloot de l'Inrae à Angers, chez le rosier. Dans le cadre d'une collaboration avec cette équipe, j'ai contribué à formaliser un réseau de régulation contrôlant le débourrement axillaire du rosier et à le calibrer sur des mesures sur des bourgeons isolés faisant ressortir l'importance du sucre dans la modulation de l'effet inhibiteur du débourrement de l'auxine. En particulier, j'ai mis en place les simulations numériques de ce réseau de régulation et optimiser les paramètres du modèle pour permettre leur interprétation. Dans le cadre de la thèse d'A. Schneider, ce premier modèle a été étendu en l'intégrant sur une architecture complète en croissance et en y incluant l'effet de la lumière. Pour cela, nous avons mis en place un modèle simple d'allocation de carbone que nous avons calibré sur les données observées dans différentes conditions lumineuses.

- Collaboration : Inrae IRHS (J. Bertheloot).
- Étudiantes encadrées : A. Schneider
- Valorisation : Article (Bertheloot et al., 2020), Modèle (<https://github.com/fredboudon/rose-bud-model>)
- Financement : Projets Rose, Projet bourse de thèse

3. Modélisation des effets d'un ravageur sur le développement

Dans le cadre du projet Ecoverger porté par I. Grechi, j'ai également entrepris un travail de modélisation de l'impact de la cécidomyie des fleurs, un des ravageurs importants à la Réunion, sur le développement du manguiers. Des suivis des larves de cécidomyie tombant des inflorescences avaient été

menées par des collègues d'Hortsys (A. Ratnadass, C. Soria). J'ai formalisé un modèle de type proie-prédateur pour simuler la dynamique des adultes et des larves de cécidomyie que nous avons calibré sur les données mesurées (Grechi et al., 2019). Le but à terme est d'estimer *in silico* l'effet de différentes pratiques culturales sur cette dynamique (bâchage du sol, manipulation de la phénologie) pour minimiser les dégâts et d'intégrer l'effet des ravageurs dans le modèle V-Mango.

- *Collaboration* : Cirad Hortsys (I. Grechi, A. Ratnadass, C. Soria, F. Normand).
- *Étudiantes encadrées* : L. Saint Criq, B Reyne
- *Valorisation* : Communications (Grechi et al., 2021, 2020, Boudon et al., 2020) *Modèle cécidomyie* (<https://github.com/fredboudon/cecidomyie>)
- *Financement* : Projets COSAQ, Ecoverger

4. Modélisation de la formation des primordia à l'échelle cellulaire

A l'échelle cellulaire, Je me suis intéressé à la croissance des tissus lors de la morphogénèse, et son lien avec la régulation génétique en utilisant le module *TissueMeca* présenté précédemment. Les parois cellulaires rigides qui entourent les cellules végétales sont responsables de leurs formes. Ces structures sont sous fortes contraintes dues à la forte pression de turgescence à l'intérieur des cellules. Pour étudier leurs changements de forme, j'ai paramétré un modèle mécanique du développement des tissus à la résolution cellulaire. Dans ce modèle, chaque paroi cellulaire est caractérisée par des propriétés mécaniques, tel qu'un module de Young qui décrit l'élasticité du matériel. La déformation des parois résulte des forces dues à la pression de turgescence des cellules. La croissance vient de la synthèse de parois qui est déclenché lorsque la déformation dépasse un certain seuil. Pour modéliser ces processus, j'utilise une approche tensorielle qui décrit les déformations et les stress dans le tissu. Pour modéliser la croissance, nous avons défini une loi phénoménologique de la résistance de parois aux stress mécaniques en fonction de l'identité cellulaire. La forme finale du tissu résulte de l'intégration à l'échelle de l'organe de toutes ces propriétés mécaniques et des stress dus aux pressions de turgescence à l'échelle des cellules (Figure 18). Un premier article décrit ce modèle mécanique et son application pour modéliser la formation des primordia dans le méristème apical caulinaire d'*Arabidopsis Thaliana* (Boudon et al., 2015). Ce framework a également été utilisé pour explorer l'influence d'une cascade de signalisation spécifique (ABP1 – Kat1) et ses conséquences mécaniques putatives sur l'initiation des primordia (Sassi et al., 2014).

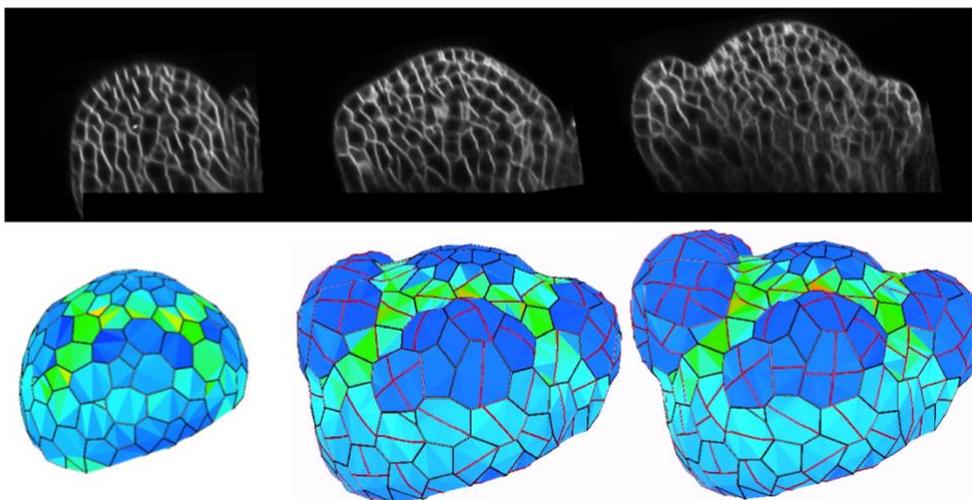


Figure 18: Simulation de la croissance de tissus végétaux. La croissance est impulsée par la pression osmotique. En fonction de leur volume, les cellules peuvent entrer en division (parois rouges). Différentes propriétés mécaniques, potentiellement anisotropes, sont associés à différentes régions du tissu permettant des croissances différentes suivant les régions.

- *Collaboration* : Virtual Plants (J. Chopard, C. Godin), LIRMM (B. Gilles), RDP de l'ENS Lyon (A. Boudaoud, J. Traas)

- *Étudiant encadré : O. Ali*
- *Valorisation : Article (Boudon et al., 2015, Sassi et al., 2014)*
- *Financement : IPL Morphogenetics, Flower Model*

VII. Conclusions

Mon projet est focalisé sur la modélisation structure-fonction des plantes. J'ai développé des méthodes originales pour la représentation, la digitalisation, l'analyse et la simulation de ces structures. Les résultats de ces travaux se concrétisent notamment sous la forme de frameworks et pipelines logiciels qui sont régulièrement réutilisés par la communauté de modélisation des plantes.

J'ai également développé des applications pour des cas d'études spécifiques tel que le manguier, le pommier, le rosier et le noisetier. Ces applications m'ont permis de tester les limites de mes approches. Pour chacun des axes de recherches, de nombreux challenges restent à aborder que je détaille dans la partie suivante.

PARTIE C : PROJET DE RECHERCHE

Mon travail se positionne à l'interface entre biologie et informatique. Un enjeu pour moi est de faciliter le dialogue entre modélisation mathématique et informatique et problématique biologique. Dans cet esprit, je propose plusieurs axes dans le projet de recherche que je compte mener dans les années à venir. Le premier consiste à améliorer le lien entre phénotypage des plantes et construction de modèle FSPM. Les progrès récents dans la définition de matériel de phénotypage et les récentes avancées du deep learning pour l'assimilation et l'analyse de données permettent d'imaginer la construction de pipelines automatiques pour la construction efficace de tel modèles. Dans un deuxième axe, je propose de continuer le travail sur la formalisation d'indices pour caractériser la structure 3D des plantes pour mieux rendre compte de leur interaction avec l'environnement, notamment la lumière. Pour le troisième axe, je pars du constat que les méthodes de simulation que je développe ont atteint une certaine maturité mais requièrent une certaine expertise pour leur utilisation. Un enjeu est de les rendre plus expressives, efficaces et intuitives pour les modélisateurs biologistes. Je propose donc d'explorer plusieurs extensions des formalismes de simulation pour les rendre plus modulaires et efficaces. Dans le dernier axe, je propose de développer des applications spécifiques pour permettre une utilisation intuitive de ces outils de simulation.

Pour chaque sujet de recherche, j'indique dans un encart spécifique les collaborations envisagées et s'il y a lieu les financements déjà acquis pour mener de telles actions.

I. Le phénotypage des plantes pour la construction de FSPM

Le développement massif des méthodes de phénotypage numérique a fait émerger une problématique nouvelle qui consiste à réaliser la paramétrisation de FSPM à partir de telles données. Effet, la paramétrisation des FSPM constitue un verrou majeur pour construire des outils d'aide à la décision pour la gestion des vergers (DeJong, 2019) et plus généralement qui freine leur utilisation dans la communauté scientifique. Récemment de nombreuses initiatives visent à automatiser le phénotypage des plantes, mais se concentrent que sur un ensemble limité de traits, souvent peu compatibles avec la définition d'un FSPM (Streit et al., 2023). Des premiers travaux, dont ceux de la thèse de C. Preuksakarn que j'ai co-encadrée, permettent de reconstituer la structure topologique d'arbres, mais n'ont pas été utilisés pour paramétrer des FSPM. Une des contraintes fortes de cette approche est qu'il se base sur des acquisitions LiDAR peu rapides et les reconstructions automatiques nécessitent pour l'instant une validation utilisateur.

Un challenge important est donc de permettre l'automatisation de la construction et la paramétrisation de modèles FSPM. Un des axes de recherche que je souhaite développer est de combiner plusieurs types de capteurs pour permettre des acquisitions plus fréquentes et l'implémentation des méthodologies associées pour reconstruire la dynamique des architectures d'arbres. Le cadre applicatif restera celui des arbres fruitiers, avec des questions associées venant de mes partenaires travaillant en génétique mais aussi en éco-physiologie et en agronomie.

1. Reconstruction du développement d'arbres tempérés

Dans des projets récemment acceptés (DTwin4FruitTrees et PHADA notamment), je propose de coupler différents protocoles d'acquisition basés sur du LiDAR et de l'imagerie aéroportée ou des perches LITERAL (perche portant deux caméras couplées). Pour des arbres de régions tempérées et du fait de la dormance hivernale, l'idée est de partir de quelques scans précis réalisés d'abord en hiver pour capter la structure ramifiée des arbres, puis en été pour capter la distribution foliaire au cours de la saison de végétation. Des vols intermédiaires de drones embarquant des caméras RGB, multispectrale ou thermique permettront d'évaluer l'évolution du volume de canopée de chaque arbre et des paramètres de fonctionnement tel que la température du couvert.

A partir de ces données, les différentes actions sont proposées :

1. Un premier enjeu sera d'inférer les paramètres des règles de développement et de ramification des arbres au cours des années successives. Pour l'instant des modèles stochastiques spécifiques ont été

développés pour représenter les structures de ramification, basés sur des semi chaînes de markov cachées (Costes et al., 2008; Lopez et al., 2008) ou des modèles linéaires généralisés (Boudon et al., 2020). Ces approches ont l'inconvénient de nécessiter une forte expertise en statistique. Je propose d'utiliser des méthodes d'assimilation de données, basées sur du machine ou deep learning pour capturer les séquences d'événements développementaux observées. L'idée est d'utiliser des reconstructions construites à partir de scans LiDAR en hiver en utilisant la méthode proposée dans (Preuksakarn et al., 2012) ou des scans virtuels pour extraire les séquences d'événements développementaux. Pour modéliser et simuler ces séquences, différents types d'architectures de réseaux seront testés, (i.e. CNNs, RNNs, LSTMs et Transformers). Les séquences déduites de la reconstruction 3D des structures d'arbres devront prendre en compte l'incertitude des mesures. Les premiers modèles de séquences construits à partir de modèles de semi chaînes de Markov cachées seront utilisés pour pré-entraîner les modèles de réseaux. Le cadre applicatif portant sur des enjeux de phénotypage haut-débit de population d'arbres de grande diversité génétique, sur plusieurs années ou dans des environnements contrastés, ces modèles seront évalués pour leur capacité à prendre en compte les effets génotypiques et environnementaux.

2. Sur les nuages de points précis de scans en été, des méthodes de segmentation d'instance (tel que RandLaNet (Hu et al., 2020)) seront testées pour identifier la forme des organes individuels et leur distribution. Une fois chaque instance d'organes identifiées, des méthodes de fitting par des surfaces classiques seront utilisées (Boukhana et al., 2022). Des premiers résultats ont été obtenus sur la détection de pommes (Rojas Bustos, 2023). Je souhaite généraliser cette approche à d'autres organes tels que les feuilles. Des modèles de distribution spatiales seront construits pour compléter les informations manquantes dues à l'occlusion. Ils permettront de reconstruire de manière procédurale les feuilles non ou peu visibles dans les scans.
3. Finalement, des nuages de points représentant l'espace occupé par les arbres seront construits par photogrammétrie à partir de vols de drone ou des acquisitions complémentaires par perche littoral. Ces volumes seront utilisés pour contraindre le développement simulé par les FSPMs (Boudon et al., 2003). Notamment des algorithmes d'optimisation seront utilisés pour ajuster les distributions spatiales mesurées.
4. Dans une dernière étape, la fusion des données LiDAR et d'imagerie aéroportée sera envisagée. Cela nécessite d'identifier très précisément dans les images les composantes végétales et faire la correspondance avec les reconstructions LiDAR. Pour cela, des approches innovantes d'analyse d'image et d'appariement devront être développées. Les informations provenant de l'imagerie aéroportée pourront être complétées par une approche de simulation en utilisant des modèles permettant par exemple d'estimer l'interception du rayonnement, la photosynthèse ou la transpiration des arbres (Sinoquet et al. 2001). Les données issues d'imagerie pourront être projetées sur les données architecturales pour paramétrer les simulations du fonctionnement. Par exemple, le GNDVI connu pour être un indicateur de la teneur en chlorophylle pourra être intégré et moduler le niveau d'activité photosynthétique. Les données issues des simulations tel que la température foliaire seront finalement comparées aux données issues d'imagerie pour juger de la pertinence de notre approche couplant scans 3D et modélisation.

- *Collaborations envisagées : AGAP AFEF (E. Costes) & Phenomen (G. Beurier, R. Fernandez), Hiphen (J. Labrosse, A. Comar), Inrae CAPTE (M. Weiss, J. Sylvain), GAFL (M. Roth), LIRMM (E. Faure)*
- *Financements acquis: PHADA, DTwin4FruitTrees*

2. Inférence directe des paramètres des FSPMs

Dans l'approche présentée dans la section précédente, la construction du modèle FSPM est conduite par les données (data-driven) qui permettent d'initialiser ou contraindre la structure 3D de la plante et potentiellement ses propriétés physiologiques. Une approche alternative (model-driven) consisterait à utiliser un modèle génératif paramétrique dont l'espace phénotypique résultant couvre les phénotypes observés, et d'ajuster les paramètres du modèle par optimisation pour correspondre au mieux aux plantes

observés. A l'heure actuelle, les FSPM d'arbres fruitiers sont souvent un peu caricaturaux dans les structures qu'ils représentent (phyllotaxie régulière, courbure simple des branches ne prenant que l'effet simple du gravitropisme et de l'héliotropisme, etc.). Une adaptation de tels FSPMs pour prendre en compte des structures géométriques plus complexes (prise en compte de l'effet du vent, collision entre organes, ravageurs, etc.) seraient nécessaire. Des premiers travaux dans ce sens ont eu lieu (Owens et al., 2016; Pirk et al., 2014) mais ne sont pas intégrés dans les FSPMs d'arbres fruitiers, principalement pour des questions de complexité de ces structure et des temps de calcul. Un challenge est de rendre le calcul des FSPMs plus efficace (voir section simulation). L'avantage d'une telle approche est qu'elle permettrait de travailler directement sur les paramètres du modèle, et donc une interprétation de la forme observée en termes de paramètres développementaux. Si le cas des arbres fruitiers en général semble difficile à atteindre à court terme, l'étude de plantes avec des développements stéréotypés ou conduit avec des contraintes fortes (conduite en cordon pour les pommiers) pourraient donner des premiers résultats intéressants.

3. Reconstruction des arbres à feuilles persistantes

Ensuite, se pose la question des arbres à feuilles persistantes, tel qu'un certain nombre d'arbres méditerranéen et tropicaux (olivier, manguier, letchi, etc.) pour lesquels l'accès à la structure ramifiée est très limité. Dans ce cas, une solution serait d'acquérir des images et/ou des cartes de profondeur avec un enregistrement très précis du positionnement 3D des capteurs pour reconstituer le nuage de points et de multiplier les acquisitions à l'intérieur de la canopée. Cela nécessiterait néanmoins le développement de capteurs facilement manipulables et d'un système de localisation plus précis que les systèmes actuels. Des traitements spécifiques seront nécessaires pour optimiser le positionnement de capteurs pour couvrir l'intégralité des volumes des plantes.

4. Gestion des données de phénotypages

Finalement, le phénotypage des plantes génère une très grande quantité de données. Avec l'augmentation des fréquences d'acquisition et l'automatisation des traitements, ces quantités explosent en taille. Il n'existe actuellement pas de base de données pour stocker, organiser et explorer l'ensemble de ces données. Des premiers systèmes permettent l'organisation de données d'imagerie (Neveu et al., 2019) mais ne permettent pas d'intégrer des données 3D tels que celles issues de scans LiDAR ou de les visualiser efficacement. Le framework Morphonet (Leggio et al., 2019) développé au LIRMM propose une solution intéressante à ce problème pour des données temporelles d'acquisitions microscopiques. Ce visualiseur en ligne permet de parcourir et d'annoter des données 3D sous forme de maillage de segmentation d'images 3D avec un système de stockage et d'organisation des données. En s'inspirant d'une telle approche, je propose de construire un tel outil pour la visualisation et le traitement d'acquisition de plantes en ligne. Une telle démarche serait cohérente la politique des instituts de recherche français, dont le CIRAD sur l'accessibilité des données produites par la science (approche FAIR).

- *Collaborations envisagées : LIRMM (E. Faure), AGAP AFEF (E. Costes) & Phenomen (C. Pradal), Hiphen (J. Labrosse, A. Comar),*

II. Vers de nouveaux indices pour caractériser la structure tridimensionnelle des plantes et leur interaction avec la lumière

La géométrie des plantes est un facteur clé pour la modélisation du fonctionnement et de la croissance des plantes. Elle représente l'interface d'échange entre les processus physiologiques internes et l'environnement. Dans ce contexte, caractériser la géométrie des plantes et la résumer à quelques indices morphologiques significatifs est un problème difficile. Des premiers travaux (Boudon et al., 2006; Coupel-Ledru et al., 2019) proposent des premiers indices, tel qu'une dimension fractale, qui quantifie le niveau d'irrégularité à différentes échelles, ou des facteurs de formes plus classique tel que le volume, la convexité ou la porosité

d'une plante. Pourtant des indices fréquemment utilisés par les agronomes n'ont pas trouvé de définition mathématique claire.

1. De nouveau traits architecturaux

Récemment, je me suis intéressé à caractériser le port d'un arbre (retombant vs érigé). Sa définition n'est pas simple, chaque axe ayant son propre port et plusieurs courbures peuvent se mélanger (début de l'axe érigé et fin de l'axe retombant). Une approche hiérarchique ou multi-échelles semble nécessaire et nécessiterait un travail de formalisation. De plus, inférer un tel indice sur des acquisitions de structure feuillée (scan LiDAR en été pour du phénotypage rapide) rajoute du challenge car il faut déduire les courbures des systèmes ramifiés contenus dans l'arbre dont les axes sont cachés par le feuillage.

De manière alternative, la quantité et la taille des interstices sont d'un intérêt majeur pour les processus écophysologiques, permettant notamment la pénétration de la lumière à l'intérieur d'une couronne d'arbre. L'un des moyens de distinguer une texture d'une autre est de s'intéresser à ses trous, plus précisément à leur taille et à leur fréquence. Mandelbrot (Mandelbrot, 1983) a introduit la notion de lacunarité dans le but spécifique de caractériser la distribution des trous à l'intérieur d'un objet. Une définition précise de la lacunarité a été proposée par (Allain and Cloitre, 1991), ainsi que l'algorithme de la boîte glissante pour la calculer. Cet algorithme utilise une discrétisation de l'objet par une grille régulière de taille N . Une boîte de rayon δ est ensuite centrée sur un élément de la grille de manière à ce que la boîte entière tienne dans la grille, et la masse de la boîte est définie comme le nombre d'éléments de la grille encastrés occupés par l'objet. La boîte est ensuite déplacée sur tous les centres possibles de la grille et sa masse est enregistrée. Cette procédure génère une distribution de fréquence des masses des boîtes où $n(\eta, \delta)$ est le nombre de boîtes de rayon δ ayant une masse η . Soit X_δ la variable aléatoire représentant la masse des boîtes de rayon δ . La lacunarité d'après (Allain and Cloitre, 1991) à l'échelle δ est définie comme la variance relative de la variable X_δ :

$$L = \frac{Var(X_\delta)}{E(X_\delta)^2} + 1$$

En faisant varier la taille du rayon des boîtes, on obtient une caractérisation multi-échelles de la lacunarité de l'objet. Dans des précédents travaux, (Da Silva, 2008) cette définition a été étendue à la lacunarité centrée qui considère uniquement des boîtes de masse non nulle et l'a appliqué à l'étude de la porosité des plantes. Cependant, cette définition est très dépendante du positionnement de la grille qui peut faire varier les mesures (cf l'étude sur la dimension fractale avec une approche similaire (Da Silva et al., 2006)). Il serait intéressant de généraliser le calcul d'un tel indice avec le calcul d'enveloppe adaptative tel que les α -shapes (Edelsbrunner et al., 1983) qui permettent d'estimer des volumes dans lesquels des concavités de taille $1/\alpha$ sont introduites. Un tel calcul est unique et ne dépend pas du référentiel dans lequel on calcule ces volumes.

2. Caractérisation de l'environnement lumineux

Cet indice de lacunarité permet de quantifier la porosité de la plante à plusieurs échelles. Cette porosité justement va conditionner l'interception de la lumière. Dans une étude précédente (Da Silva et al., 2008), nous avons montré comment un indice de porosité pouvait être intégré, potentiellement de manière multiéchelles, dans un calcul radiatif simplifié de type Beer-Lambert. Une contribution intéressante serait de paramétrer une loi de type Beer-Lambert en fonction de l'indice de lacunarité, défini à travers les échelles pour mieux prendre en compte les irrégularités géométriques des plantes dans l'interception de la lumière.

De manière similaire, des relations fonctionnelles ont été formalisées pour caractériser le lien entre lumière interceptée pour les longueurs d'onde du PAR et ζ , le ratio entre longueur d'onde rouge clair et rouge sombre, qui module la croissance des plantes. Dans une première étude, nous avons caractérisé par des mesures cette relation dans une canopée de manguier (Carrié et al., 2023). Pourtant, dans ces travaux, nous avons observé une variabilité pour cette relation dans les mesures et les simulations. Une première analyse préliminaire a montré comment cette variabilité pouvait être relié à la densité locale de feuille (Figure 19). Je

propose de développer plus avant ces analyses et de relier cette variabilité dans la relation à un indice de porosité.

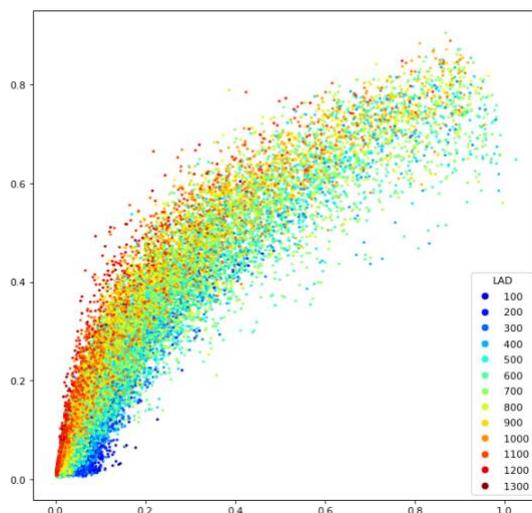


Figure 19: Relation entre PPF et ζ simulé sur une maquette de manguiers. Chaque point représente la mesure correspondant à une feuille. La couleur du point indique la densité de feuille (LAD) locale.

- Collaborations envisagées : UR P3F (D. Combes), Hortsys (F. Normand, I. Grechi)

3. Application à l'agrivoltaïsme

Une application intéressante des FSPM et de leur capacité à prédire l'environnement lumineux est pour l'étude des systèmes agrivoltaïques où les plantes sont positionnées sous des panneaux solaires. Ce type d'approches est une réponse aux problématiques sociétales actuelles sur la protection des cultures contre les événements climatiques extrêmes et le développement des énergies renouvelables. Ces panneaux sont construits pour produire de l'électricité issue de l'énergie solaire et peuvent être fixes ou mobiles (on pilote leurs orientations). Un enjeu actuel majeur est d'évaluer l'impact d'un système agrivoltaïque sur les cultures cultivées en dessous et de définir des stratégies de pilotage des panneaux solaires pour optimiser le rendement électrique et la production végétale. Un enjeu majeur est donc de mettre en place des processus de phénotypage de la géométrie des plantes pour caractériser leur développement sous ces conditions contraintes et d'estimation de leurs environnements lumineux en fonction des protocoles de pilotage des panneaux. Récemment, je participe à l'encadrement d'une première thèse qui considère la culture du riz en Camargue et une deuxième thèse qui considère des vergers d'abricotiers. Ces deux thèses seront des applications intéressantes pour les outils de phénotypages et de simulation d'environnement lumineux que je développe.

- Collaborations envisagées : AGAP Phenomen (M. Dingkhun, D. Fabre, R. Perez), Hortsys (F. Normand, I. Grechi), PLAF (M. Saudreau), P3F (D. Combes)
- Financements acquis : Thèses Cifre EDF Renouvelables et Solveo Ennergies

III. Extension des formalismes de simulation

La simulation devient un outil incontournable pour la recherche scientifique contemporaine, permettant de mieux comprendre d'agréger les connaissances et/ou décomposer des phénomènes complexes. Dans le cadre de mon projet de recherche, j'ai contribué au développement du formalisme des L-systèmes et à leur implémentation en Python permettant à la communauté FSPM de représenter la croissance et le développement de structures biologiques. J'ai également contribué à l'élaboration d'environnements de modélisation virtuel, cherchant à créer des outils plus intuitifs et puissants pour permettre une simulation plus précise et accessible.

Cette section de mon projet expose ma vision pour l'avenir de ces recherches, mettant en lumière les perspectives d'extension des L-systèmes et le perfectionnement des environnements de modélisation. L'objectif principal est de développer des outils toujours plus sophistiqués et adaptables, tout en continuant à explorer de nouvelles dimensions dans la représentation des phénomènes complexes au sein des L-systèmes.

1. Extension du formalisme des L-systems

1. Modularité et réutilisabilité

Les L-systèmes permettent de décrire la croissance des plantes en se basant sur une représentation modulaire de leurs structures et des règles récursives. Chaque modèle simule en général différents aspects du développement des plantes qui sont imbriqués dans une même série de règles, mixant ainsi plusieurs concepts dans un même code. Cela rend difficile la réutilisation et le partage de leurs implémentations.

Des premiers solutions existent pour créer des groupes de règles, formalisant différents aspects de la simulation, et de les combiner pour un modèle donné (Cieslak et al., 2011). Dans cette approche, chaque aspect de la simulation se base sur des modules spécifiques et ainsi chaque entité de la plante est représentée par une multitude de modules représentant les différents aspects traités par le modèle. Une telle approche a l'inconvénient de générer une inflation du nombre de modules dans la structure simulée. De plus, l'assemblage des différents aspects nécessite de connaître les paramètres d'applications de chaque aspect (nombre d'itérations, sens de réécriture, modules à générer lors de la création de nouveaux éléments, etc) offrant in fine une modularité limitée des modèles. De plus, si un ensemble de règles et ses modules associés permettent de simuler une fonction de base (par exemple de la diffusion) et que plusieurs processus doivent être simulés avec le même jeu de règles, il est possible que les modules associés aux différents processus interagissent de manière non désirée. Par exemple si pour chaque organe d'une structure, simuler la diffusion de 2 hormones utilise le même jeu de règles P_l basé sur un module $N(c)$, chaque organe aura une représentation telle que $N(c^1_i)N(c^2_i)O(p_i)$ avec O un module représentant un ensemble d'autres propriétés de l'organe et c^1_i et c^2_i représentant la concentration des deux hormones. Une règle contextuelle, $N(a) < N(b) > N(b)$, écrite normalement pour sélectionner un même aspect de deux entités voisines, sélectionnera c^1_i et c^2_i pour les paramètres a et b mixant de ce fait les concentrations des 2 hormones pour lesquels aucune interaction n'était demandée.

Étant donné ces limites identifiées, il semble néanmoins possible d'étendre le langage des L-systems pour formaliser plus explicitement la définition des modules comme un assemblage d'aspects à la manière d'une approche orientée objet de programmation (héritage multiple). Cela garantirait lors de la création d'un nouveau module que les différents aspects soient bien représentés et créerait une claire séparation entre modules lors de l'application des règles contextuelles. Néanmoins le mécanisme d'application des règles nécessite certainement d'être revisité en profondeur dans ce cas-là.

De manière alternative, pour construire un modèle de manière modulaire, je propose d'envisager de générer différentes parties de la plante de manière indépendante (la structure ramifiée versus les feuilles ou les fruits). Des modèles L-systèmes indépendants qui pourraient hiérarchiquement s'appeler lors de la simulation permettraient une telle séparation. Un tel mécanisme permettrait par exemple de créer un catalogue de modèles d'organes dynamiques réutilisables pour différentes simulations. Une telle approche a déjà été partiellement proposée très tôt avec les sub-L-systèmes (Hanan, 1992) mais n'a été que peu explorée. Un des problèmes que pose ce type d'approche est la compatibilité des échelles de temps et d'espace entre les modèles assemblés. Pour cela, un sub-L-systèmes doit être instancié avec des paramètres de taille et de temps. Récemment, (Godin and Besnard, 2023) ont revisité l'idée de L-systems hiérarchiques et proposent d'appliquer des fonctions de mapping de temps non linéaires. Je propose de développer ces idées plus avant et d'en réaliser une implémentation fonctionnelle. Cela nécessiterait notamment de permettre à la tortue, lors de l'interprétation graphique, d'adopter la paramétrisation spécifique de chaque sub-L-systèmes.

• *Collaborations envisagées : Inria Mosaic (C. Godin)*

2. Intégration de solvers multiples

Le principe de base des L-systems est d'utiliser le mécanisme de réécriture pour simuler différents aspects du modèle. Pourtant, certains processus s'y prêtent mal quand notamment ils nécessitent de connaître une grande partie ou l'entièreté de la structure pour simuler le processus (par exemple dans le cas de l'interception de la lumière (Měch and Prusinkiewicz, 1996) ou des collisions entre organes (Owens et al., 2016)) ou quand ils nécessitent des temps de convergence spécifiques comme la résolution d'ODE pour la simulation de la diffusion de nutriments (Hemmerling et al., 2013), d'hormones ou des calculs biomécaniques (Costes et al., 2008). Dans ces cas, la notion de pas de simulation est rendue floue. Des premières solutions étendent le formalisme des L-systems avec des constructions prédéfinies pour prendre en compte ce type de calculs (comme par exemple l'introduction du symbole ?E dans (Měch and Prusinkiewicz, 1996) ou de l'opérateur différentiel dans (Hemmerling et al., 2013)).

Pourtant ces mécanismes ont en commun un même traitement des données : 1) une traduction de la chaîne en structure de données spécifiques (graphe de scène, matrice d'adjacence, etc) 2) le calcul avec le solveur spécifique 3) la réinjection des résultats du calcul dans la chaîne initiale. Il semble possible de mieux formaliser une telle chaîne de traitement et l'intégrer au formalisme pour permettre son extension avec une multitude de solveurs. Pour cela, je propose d'utiliser une approche similaire à ce qui est fait pour l'interprétation géométrique où des règles spécifiques sont utilisées pour la traduction de la structure en données à considérer par le solveur et des symboles spécifiques (par exemple ?P) qui permettent l'extraction des valeurs calculées.

- *Collaborations envisagées : Inria Mosaic (C. Godin)*

3. L-systems parallélisés

Par définition, le formalisme des L-systems suppose une application en parallèle des règles lors d'un pas de dérivation pour obtenir la chaîne à l'étape suivante. Dans la pratique, certaines extensions, telles que l'utilisation des nouveaux contextes (Karwowski, 2002), nécessitent de considérer la chaîne en cours de construction pour permettre le transfert d'information dans la structure. De plus, certains modèles considèrent un certain nombre de variables ou structure globales à la simulation. Malgré ces contraintes, il serait tout à fait envisageable de paralléliser les simulations et ainsi profiter de toute la puissance de calcul des ordinateurs modernes. Lors d'un premier stage de master 2 (B. Bytyqi), j'avais étudié la possibilité d'introduire une telle parallélisation dans le langage L-Py. Dans ce framework, la boucle de réécriture qui parcourt la chaîne de module courante et identifie les règles à appliquer est faite en C++. Les règles par contre, qui sont définies par l'utilisateur, sont en Python et sont donc appelées depuis le code C++ par un mécanisme de wrapping basé sur Boost.Python. Les premiers tests, où la boucle C++ avait été parallélisée, ont montré des performances désastreuses dû au Global Interpreter Lock (GIL) de Python. En effet, par défaut, Python a un mécanisme de verrou global pour gérer le comptage de référence de ses objets (et ainsi libérer la mémoire lorsque les objets ne sont plus utilisés). Or ce verrou, empêche justement d'appeler des fonctions Python en parallèle. De nombreuses discussions animent la communauté autour des limites et des avantages qu'amène ce GIL dans la définition de Python, et un plan a été élaboré pour le supprimer à terme et permettre ainsi des applications multithreads. Les mécanismes qui seront mis en place en Python pour remplacer le GIL imposeront sans doute des adaptations de L-Py pour être parallèle. Une fois que les règles seront parallélisables, j'envisage de mettre au point une stratégie d'application des règles pour permettre le transfert d'information dans la structure. En effet, à chaque ramification, les calculs fait sur chaque sous-branche sont souvent indépendants. Néanmoins subdiviser le calcul en trop de sous-tâches parallèles a aussi tendance à faire perdre en performance à cause des coûts de communication entre threads. Trouver un découpage des calculs optimal en temps pourrait être posé certainement comme un problème d'optimisation intéressant à résoudre.

4. L-systems pour la génération de surface

Les L-systèmes génèrent par défaut des structures linéaires potentiellement arborescentes représentées par des surfaces tubulaires, la structure arborescente générée par les règles servant de squelette à la forme générée. Pourtant, d'autres formes ont un support arborescent qu'ils pourraient être intéressant de simuler par des L-systèmes. C'est notamment le cas des feuilles et leurs réseaux vasculaires qui permet de définir leur forme. Des premiers systèmes de réécriture de maillages surfaciques inspirés des L-systèmes ont été proposé dans la littérature (Peyrat et al., 2008), mais n'exploitent pas l'idée d'arborescence sous-jacente. J'ai commencé, en collaboration avec C. Godin, à explorer cette idée. Une des problématiques d'une telle approche est qu'il faut ordonner les différents segments à une même profondeur dans l'arborescence générée pour créer un ensemble de triangles. Par défaut, les L-systèmes génèrent des arborescences semi-ordonnées et il est de ce fait non trivial de retrouver un ordre global. Une des idées serait de considérer le plan local formé par les segments issus d'un même nœud mais cela ne permettrait pas de modéliser les repliements de surface. Une idée serait d'introduire une notion d'ordre dans la génération des ramifications dans le formalisme de simulation. Un tel formalisme permettrait de modéliser simplement des formes de feuilles complexes (lobée, dentée, sinuée, etc.) comme l'illustre la Figure 20. A noter qu'une extension volumique pourrait être d'utiliser des polyèdres pyramidaux générés à partir des segments issus de chaque point pour générer des complexes cellulaires.

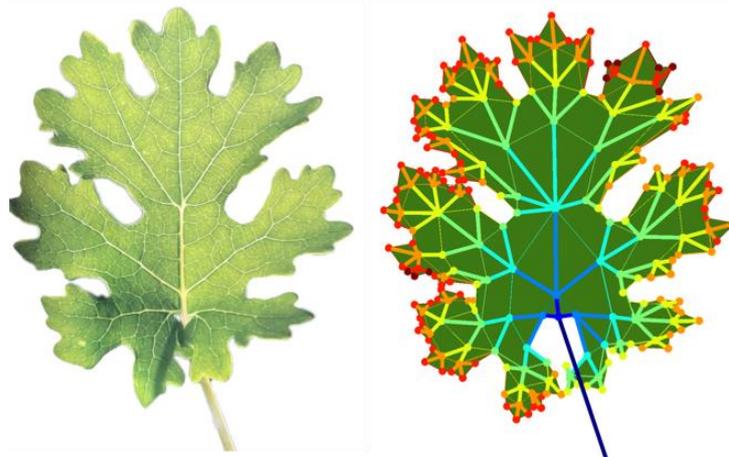


Figure 20: Prototype d'utilisation d'une arborescence pour générer une surface appliquée à la modélisation d'une feuille. Les segments à une même profondeur dans l'arborescence sont reliés par des triangles.

5. L-systems dans des espaces riemanniens

J'ai également commencé, toujours avec C. Godin, à m'intéresser à l'interaction entre les structures croissantes et les propriétés de l'espace dans lequel elles évoluent. Pour cela, nous avons commencé à formaliser l'intégration de L-systèmes dans des espaces courbes non euclidiens, i.e. des espaces riemanniens. Les espaces riemanniens sont un formalisme mathématique général qui permet en effet de tenir compte de la déformation locale de l'espace. Des courbures peuvent ainsi être introduites qui vont modifier localement la métrique de l'espace. Dans une telle approche, le challenge est de modifier l'interprétation géométrique faite par la tortue Logo pour suivre la courbure locale de l'espace. Dans ce cas, tracer un segment avec la tortue revient à suivre une trajectoire géodésique dans l'espace considéré. De manière applicative, cela permettrait de modéliser simplement des plantes grimpantes, tel que des lierres (cf Figure 21), ou de simuler la structure de veines d'une feuille en fonction de sa géométrie. En combinant la richesse géométrique des

espaces riemanniens avec la flexibilité des L-systèmes, une telle approche permettrait d'étudier l'interaction entre espace et forme et ouvrirait des perspectives intéressantes pour la modélisation de la morphogénèse.

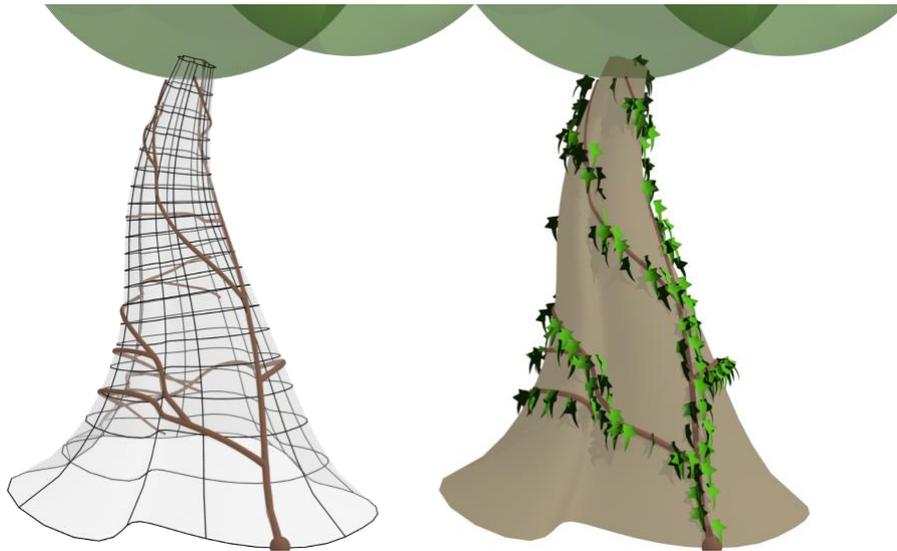


Figure 21 : Prototype de simulation L-systems dans un espace riemannien. L'espace considéré est la surface du tronc et le L-system simule la croissance d'un lierre.

- Collaborations envisagées : Inria Mosaic (C. Godin)

2. Intégration de réseaux de régulation du débourrement dans des structure complexes

L'étude du réseau de régulations qui contrôle le débourrement, notamment chez les rosiers est un sujet d'intenses débats (Barbier et al., 2019; Bertheloot et al., 2019; Mason et al., 2014; Prusinkiewicz et al., 2009). Une image commence pourtant à se dégager qui montre l'importance conjointe du sucre, de l'auxine et d'autres hormones telles que les cytokinines. S'il semble possible désormais de simuler et tester un tel réseau, son intégration dans une architecture complexe reste à faire. Un composant important d'un tel modèle est d'estimer des distributions de sucres réalistes dans l'architecture de plante entière. Pour cela, des modèles biophysiques ont été proposés (théorie de Münch), mais n'ont pas d'implémentation simple disponible (Seleznyova and Hanan, 2018) et ne sont pas facilement calibrables. Dans des projets récents, j'ai pour projet d'initié un travail sur l'implémentation d'un tel modèle en L-Py. Si le carbone est un acteur important de la régulation du débourrement, il n'est pas le seul. Il sera également nécessaire de simuler d'autres acteurs, tel que les hormones qui nécessitent elles-mêmes la résolution de leur équation de transport. Or, chaque jeu d'équations n'aura pas forcément les mêmes exigences de convergence. Les interactions entre les acteurs de la régulation doivent également être formalisées par un jeu d'équations. Tout cela étant simulé sur une structure en croissance, la challenge sera de s'assurer que les simulations sont efficaces et stables, i.e dont la convergence est garantie. Pour cela, l'intégration dans L-Py de solveurs efficaces et robustes est nécessaire. Un tel modèle, dit mécaniste, permettrait d'étudier plus en profondeur le développement de l'architecture des plantes et permettrait de tester différentes conditions environnementales et leur impact sur l'architecture. Mon projet à terme est de l'étendre aux arbres notamment fruitiers.

- Collaborations envisagées : LEPSE (J. Bertheloot), Inria Mosaic (C. Godin)
- Financement demandé : Projet INRAe #DigitBio CarbonScope

IV. Des outils de modélisation pour les biologistes et les agronomes

Si de nombreuses connaissances existent sur le développement et le fonctionnement des plantes qui peuvent être intégrées dans un modèle de type FSPM pour valider leur cohérence et tester des hypothèses, il reste difficile pour un biologiste, notamment expérimentateur, d'interagir facilement et rapidement avec ces modèles. En effet, les plateformes de simulation de plantes virtuelles, comme L-Py, ne permettent que des interactions limitées avec les modèles numériques qui y sont intégrés. En particulier, elles ne permettent pas de modifier, en cours de simulation, la structure de la plante (taille) ou les paramètres physiologiques des modèles, ne permettant pas ainsi de reproduire des expérimentations typiques des biologistes. Elles restent également limitées dans la modélisation de l'environnement de la plante (chambre de culture, etc.). Cela limite fortement les possibilités d'exploration des modèles.

1. Un environnement de simulation virtuel distribué utilisable par les biologistes

Pour rapprocher l'expérimentation et la modélisation numérique, j'ai commencé à explorer, en collaboration avec J. Bertheloot (IRHS/Lepse) et E. Faure (Lirmm), la possibilité de coupler L-Py avec MorphoNet (Leggio et al., 2019), une plateforme en ligne qui permet d'interagir avec des structures morphodynamiques (3D+temps) complexes et de projeter sur ces structures des informations quantitatives et qualitatives. L'idée est de permettre aux biologistes de simuler des actions comparables à leurs expérimentations directement sur le modèle et d'en explorer les conséquences prédites par le modèle. Pour cela des interfaces spécifiques commencent à être développées, lors du stage de master 2 d'A Besnier, pour interagir avec le modèle (suppression de parties de la plante, modification de variables du modèle pour simuler par exemple l'import dans la structure de certaines hormones ou de sucres, etc), et visualiser l'état physiologique simulé (affichage d'un gradient de couleur des concentrations des hormones, des nutriments, etc.). Nous avons également commencé à mettre en place un protocole pour modéliser l'environnement de la plante, notamment les chambres de culture, et des outils pour simuler l'environnement lumineux correspondant (bilan radiatif par photon mapping). L'idée est de permettre d'explorer le plus intuitivement possible les sorties morphodynamiques du modèle et d'interagir avec lui. Je prévois de m'engager dans un travail de finalisation et de prendre en charge des interactions avec des utilisateurs de façon à produire un outil utile et intuitif. J'envisage également de tester une approche de type Réalité Virtuelle pour explorer cet espace morphodynamique de la croissance et du fonctionnement des plantes pour lequel MorphoNet offre des bases solides.

Une prochaine étape sera donc de mettre en place des outils visuels et intuitifs pour spécifier les hypothèses du modèle à tester, notamment les règles de croissance et les réseaux de régulation physiologiques et environnementaux. Lors du développement de la plateforme OpenAlea (Pradal et al., 2008), nous avons développé un outil de programmation visuelle, appelé *VisuAlea*. Celui-ci est assez générique et permet l'assemblage d'algorithmes haut-niveaux et de données pour la modélisation des plantes. En m'inspirant d'une telle approche, je projette de spécifier visuellement par un graphe les composants physiologiques et morphologiques (hormones, eau, etc) et les interactions des processus considérés pour permettre aux biologistes d'exprimer et tester directement leurs hypothèses.

- *Collaborations envisagées : LIRMM (E. Faure), LEPSE (J. Bertheloot), Inria Mosaic (C. Godin)*
- *Financement acquis : Projet INRAe #DigitBio Physioscope*

2. Applications pour des outils pédagogiques de conduites d'arbres

Le modèle FSPM de manguier que j'ai développé en collaboration avec les collègues d'HortSys, intègre les effets de la taille sur son développement végétatif. Il reste à intégrer les effets de la taille sur la floraison et la fructification pour avoir une vue complète de la modulation par la taille du développement du manguier

et ainsi pouvoir tester et optimiser différentes modalités de conduite. Une des applications, pour laquelle j'ai déjà reçu plusieurs sollicitations, est d'utiliser un tel modèle réactif pour créer des outils virtuels pédagogiques, par exemple pour les écoles d'agronomie. Cela nécessitera la création d'une interface virtuelle permettant à l'utilisateur de choisir des points de coupes. A partir de ces coupes et d'un environnement lumineux simulé, la croissance de l'arbre pourra être estimée et donner à l'utilisateur un aperçu de l'impact de ses actions sur la croissance de l'arbre. Pour plonger complètement l'utilisateur dans un tel exercice virtuel, il pourrait être intéressant d'investiguer l'utilisation des dispositifs de réalité virtuelle (RV). Dans ce cas-là, se pose la question d'une navigation réaliste et intuitive en RV qui permette de parcourir la structure végétale, ainsi que d'un affichage adapté pour mettre en avant les éléments à considérer.

- *Collaborations envisagées : Hortsys (F. Normand, I. Grechi), AGAP/AFEF (E. Costes)*

REFERENCES

- Allain, C., Cloitre, M., 1991. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Phys. Rev. A* 44, 3552–3558. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.44.3552>
- Barbier, F.F., Dun, E.A., Kerr, S.C., Chabikwa, T.G., Beveridge, C.A., 2019. An Update on the Signals Controlling Shoot Branching. *Trends Plant Sci.* 24, 220–236. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.12.001>
- Barillot, R., Combes, D., Huynh, P., Escobar Gutiérrez, A., 2012. Ideotype construction from an architectural model of pea. Plant and canopy architecture impact on disease epidemiology and pest development.
- Bell, A.D., 1986. The simulation of branching patterns in modular organisms. *Phil Trans R Soc Lond.* 313, 143–159.
- Bertheloot, J., Barbier, F., Boudon, F., Perez-Garcia, M.-D., Péron, T., Citerne, S., Dun, E., Beveridge, C., Godin, C., Sakr, S., 2019. Sugar availability suppresses the auxin-induced strigolactone pathway to promote bud outgrowth. *New Phytol.* 225, 866–879. <https://doi.org/10.1111/nph.16201>
- Blackman, V.H., 1919. The Compound Interest Law and Plant Growth. *Ann. Bot.* 33, 353–360. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a089727>
- Boudon, F., Godin, C., Pradal, C., Puech, O., Sinoquet, H., 2006. Estimating the fractal dimension of plants using the two-surface method: An analysis based on 3D-digitized tree foliage. *Fractals* 14, 149–163. <https://doi.org/10.1142/S0218348X06003179>
- Boudon, F., Persello, S., Jestin, A., Briand, A.-S., Grechi, I., Fernique, P., Guédon, Y., Lechaudel, M., Lauri, P.-E., Normand, F., 2020. V-Mango: A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. *Ann. Bot.* 126, 745–763. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa089>
- Boukhana, M., Ravaglia, J., Hétyroy-Wheeler, F., De Solan, B., 2022. Geometric models for plant leaf area estimation from 3D point clouds: A comparative study. *Graph. Vis. Comput.* 7, 200057. <https://doi.org/10.1016/j.gvc.2022.200057>
- Cescatti, A., 1997. Modelling the radiative transfert in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. model structure and algorithms. *Ecol. Model.* 101, 263–274.
- Chelle, M., Andrieu, B., 1998. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecol. Model.* 111, 75–91. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00100-8)
- Cieslak, M., Seleznyova, A.N., Prusinkiewicz, P., Hanan, J., 2011. Towards aspect-oriented functional-structural plant modelling. *Ann. Bot.* 108, 1025–1041. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr121>
- Costes, E., Lauri, P.-É., Regnard, J.-L., 2006. Analyzing Fruit Tree Architecture: Implications for Tree Management and Fruit Production, in: *Horticultural Reviews*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–61. <https://doi.org/10.1002/9780470767986.ch1>
- Costes, E., Smith, C., Renton, M., Guédon, Y., Prusinkiewicz, P., Godin, C., Costes, E., Smith, C., Renton, M., Guédon, Y., Prusinkiewicz, P., Godin, C., 2008. MAppleT: simulation of apple tree development using mixed stochastic and biomechanical models. *Funct. Plant Biol.* 35, 936–950. <https://doi.org/10.1071/FP08081>
- CoupeL-Ledru, A., Pallas, B., Delalande, M., Boudon, F., Carrie, E., Martinez, S., Regnard, J.-L., Costes, E., 2019. Multi-scale high-throughput phenotyping of apple architectural and functional traits in orchard reveals genotypic variability under contrasted watering regimes. *Hortic. Res.* 6, 15 p. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0137-3>
- Da Silva, D., 2008. Caractérisation de la nature multi-échelles des plantes par des outils de géométrie fractale : application à la modélisation de l'interception de la lumière (These de doctorat). Montpellier 2.
- Dambreville, A., Lauri, P.-É., Trottier, C., Guédon, Y., Normand, F., 2013. Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. *J. Exp. Bot.* 64, 2467–2480. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert105>
- Damiand, G., Lienhardt, P., 2014. *Combinatorial Maps: Efficient Data Structures for Computer Graphics and Image Processing*. A K Peters/CRC Press.

- DeJong, T.M., Da Silva, D., Vos, J., Escobar-Gutiérrez, A.J., 2011. Using functional–structural plant models to study, understand and integrate plant development and ecophysiology. *Ann. Bot.* 108, 987–989. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr257>
- Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D., Seidel, R., 1983. On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Trans. Inf. Theory* 29, 551–559. <https://doi.org/10.1109/IT.1983.1056714>
- Faure, F., Duriez, C., Delingette, H., Allard, J., Gilles, B., Marchesseau, S., Talbot, H., Courtecuisse, H., Bousquet, G., Peterlik, I., Cotin, S., 2012. SOFA: A Multi-Model Framework for Interactive Physical Simulation, in: Payan, Y. (Ed.), *Soft Tissue Biomechanical Modeling for Computer Assisted Surgery*, Studies in Mechanobiology, Tissue Engineering and Biomaterials. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 283–321. https://doi.org/10.1007/8415_2012_125
- Fourcaud, T., Zhang, X., Stokes, A., Lambers, H., Körner, C., 2008. Plant Growth Modelling and Applications: The Increasing Importance of Plant Architecture in Growth Models. *Ann. Bot.* 101, 1053–1063. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn050>
- Godin, C., 2000. Representing and encoding plant architecture: a review. *Ann. For. Sci.* 57, 413–438.
- Godin, C., Besnard, F., 2023. Hierarchical Developmental Timeline Warping: a generic method to design realistic plant architecture models, in: 10th International Conference on Functional-Structural Plant Models. Berlin, Germany.
- Godin, C., Caraglio, Y., 1998. A multiscale model of plant topological structures. *J. Theor. Biol.* 191, 1–46.
- Godin, C., Costes, E., Caraglio, Y., 1997. Exploring plant topology structure with the AMAPmod software : an outline. *Silva Fenn.* 31, 355–366.
- Godin, C., Sinoquet, H., 2005. Functional–structural plant modelling. *New Phytol.* 166, 705–708. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01445.x>
- Halle, F., Oldeman, R.A.A., 1971. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Paris, Masson, Collection de Monographies de Botanique et de Biologie Végétale, n° 6, 1970. *Rev. D'Écologie Terre Vie* 25, 140–140.
- Hemmerling, R., Evers, J.B., Smoleňová, K., Buck-Sorlin, G., Kurth, W., 2013. Extension of the GroIMP modelling platform to allow easy specification of differential equations describing biological processes within plant models. *Comput. Electron. Agric.* 92, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.007>
- Hu, Q., Yang, B., Xie, L., Rosa, S., Guo, Y., Wang, Z., Trigoni, N., Markham, A., 2020. RandLA-Net: Efficient Semantic Segmentation of Large-Scale Point Clouds. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.11236>
- Jaeger, M., De Reffye, P.H., 1992. Basic concepts of computer simulation of plant growth. *J. Biosci.* 17, 275–291. <https://doi.org/10.1007/BF02703154>
- Karwowski, R., 2002. Improving the process of plant modeling: The L+C modeling language (PhD Thesis). University of Calgary.
- Karwowski, R., Prusinkiewicz, P., 2003. Design and Implementation of the L+C Modeling Language, in: Giavitto, J.-L., Moreau, P.-E. (Eds.), *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. Elsevier.
- Kniemeyer, O., Buck-Sorlin, G., Kurth, W., 2007. GroIMP as a platform for functional-structural modelling of plants. *Frontis* 43–52.
- Leggio, B., Laussu, J., Carlier, A., Godin, C., Lemaire, P., Faure, E., 2019. MorphoNet: an interactive online morphological browser to explore complex multi-scale data. *Nat. Commun.* 10, 2812. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10668-1>
- Leopold, N., 2017. Algorithmische Botanik durch Lindenmayer Systeme in Blender.
- Livny, Y., Yan, F., Olson, M., Chen, B., Zhang, H., El-Sana, J., 2010. Automatic reconstruction of tree skeletal structures from point clouds, in: *ACM SIGGRAPH Asia 2010 Papers, SIGGRAPH ASIA '10*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/1866158.1866177>
- Lopez, G., Favreau, R.R., Smith, C., Costes, E., Prusinkiewicz, P., DeJong, T.M., Lopez, G., Favreau, R.R., Smith, C., Costes, E., Prusinkiewicz, P., DeJong, T.M., 2008. Integrating simulation of architectural development and source–

- sink behaviour of peach trees by incorporating Markov chains and physiological organ function submodels into L-PEACH. *Funct. Plant Biol.* 35, 761–771. <https://doi.org/10.1071/FP08039>
- Louarn, G., Da Silva, D., Godin, C., Combes, D., 2012. Simple envelope-based reconstruction methods can infer light partitioning among individual plants in sparse and dense herbaceous canopies. *Agric. For. Meteorol.* 166–167, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.014>
- Louarn, G., Song, Y., 2020. Two decades of functional–structural plant modelling: now addressing fundamental questions in systems biology and predictive ecology. *Ann. Bot.* 126, 501–509. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa143>
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The fractal geometry of nature*. W.N. Freeman, USA.
- Mason, M.G., Ross, J.J., Babst, B.A., Wienclaw, B.N., Beveridge, C.A., 2014. Sugar demand, not auxin, is the initial regulator of apical dominance. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 6092–6097. <https://doi.org/10.1073/pnas.1322045111>
- Měch, R., Prusinkiewicz, P., 1996. Visual models of plants interacting with their environment, in: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '96*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 397–410. <https://doi.org/10.1145/237170.237279>
- Neveu, P., Tureau, A., Hilgert, N., Nègre, V., Mineau-Cesari, J., Brichet, N., Chapuis, R., Sanchez, I., Pommier, C., Charnomordic, B., Tardieu, F., Cabrera-Bosquet, L., 2019. Dealing with multi-source and multi-scale information in plant phenomics: the ontology-driven Phenotyping Hybrid Information System. *New Phytol.* 221, 588–601. <https://doi.org/10.1111/nph.15385>
- Owens, A., Cieslak, M., Hart, J., Classen-Bockhoff, R., Prusinkiewicz, P., 2016. Modeling dense inflorescences. *ACM Trans. Graph.* 35, 1–14. <https://doi.org/10.1145/2897824.2925982>
- Palubicki, W., Horel, K., Longay, S., Runions, A., Lane, B., Měch, R., Prusinkiewicz, P., 2009. Self-organizing tree models for image synthesis. *ACM Trans. Graph.* 28, 58:1-58:10. <https://doi.org/10.1145/1531326.1531364>
- Peyrat, A., Terraz, O., Merillou, S., Galin, E., 2008. Generating vast varieties of realistic leaves with parametric 2Gmap L-systems. *Vis. Comput.* 24, 807–816. <https://doi.org/10.1007/s00371-008-0262-8>
- Picheny, V., Casadebaig, P., Trépos, R., Faivre, R., Da Silva, D., Vincourt, P., Costes, E., 2017. Using numerical plant models and phenotypic correlation space to design achievable ideotypes. *Plant Cell Environ.* 40, 1926–1939. <https://doi.org/10.1111/pce.13001>
- Pirk, S., Niese, T., Hädrich, T., Benes, B., Deussen, O., 2014. Windy trees: computing stress response for developmental tree models. *ACM Trans. Graph.* 33, 204:1-204:11. <https://doi.org/10.1145/2661229.2661252>
- Prusinkiewicz, P., 2004. Modeling plant growth and development. *Curr. Opin. Plant Biol.* 7, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2003.11.007>
- Prusinkiewicz, P., Crawford, S., Smith, R.S., Ljung, K., Bennett, T., Ongaro, V., Leyser, O., 2009. Control of bud activation by an auxin transport switch. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 17431–17436. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906696106>
- Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A., 1990. *The Algorithmic Beauty of Plants, The Virtual Laboratory*. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8476-2>
- Room, P., Hanan, J., Prusinkiewicz, P., 1996. Virtual plants: new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists. *Trends Plant Sci. Update* 1, 33–38.
- Room, P.M., Maillette, L., Hanan, J.S., 1994. Module and metamer dynamics and virtual plants. *Adv. Ecol. Res.* 25, 105–157.
- Runions, A., Lane, B., Prusinkiewicz, P., 2007. Modeling Trees with a Space Colonization Algorithm, in: Ebert, D., Merillou, S. (Eds.), *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/NPH/NPH07/063-070>
- Seleznyova, A.N., Hanan, J., 2018. Mechanistic modelling of coupled phloem/xylem transport for L-systems: combining analytical and computational methods. *Ann. Bot.* 121, 991–1003. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx204>
- Sievänen, R., Godin, C., DeJong, T.M., Nikinmaa, E., 2014. Functional–structural plant models: a growing paradigm

for plant studies. *Ann. Bot.* 114, 599–603. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu175>

Sievänen, R., Nikinmaa, E., Nygren, P., Ozier-Lafontaine, H., Perttunen, J., Hakula, H., 2000. Components of functional-structural tree models. *Ann. For. Sci.* 57, 399–412. <https://doi.org/10.1051/forest:2000131>

Sinoquet, H., Rivet, P., Godin, C., 1997. Assessment of the three-dimensional architecture of walnut trees using digitising. *Silva Fenn.* 31, 265–273.

Takenaka, A., 1994. A simulation model of tree architecture development based on growth response to local light environment. *J. Plant Res.* 107, 321–330. <https://doi.org/10.1007/BF02344260>

Xu, H., Gossett, N., Chen, B., 2007. Knowledge and heuristic-based modeling of laser-scanned trees. *ACM Trans. Graph.* 26, 19-es. <https://doi.org/10.1145/1289603.1289610>

Zeide, B., Pfeifer, P., 1991. A methode for estimation of fractal dimension of tree crown. *For. Sci.* 37, 1253–1265.

ANNEXES : ORGANIGRAMMES

- Equipe Phénomén

Phénotypage et modélisation des plantes dans leur environnement agro-climatique (PhenoMEN)



Co-animation d'équipe :

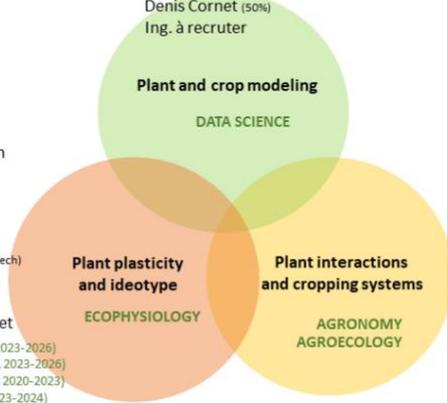
Christine Granier (DR2, INRAE)
 Christophe Pradal (Chercheur, CIRAD)
 Mégane Misseri (Assistante, CIRAD, 2023-)



Michael Dingkuhn
 Benoit Clerget
 Sylvie Jaffuel
 Alain Audebert
 Denis Fabre (50%)
 Grégory Aguilar (Tech)
 Christine Granier
 Michel Ghanem
 Catherine Giauffret
 Laura Lescroart (doc, 2023-2026)
 Angélique Berger (doc, 2023-2026)
 Ezékiel Hougbo (doc, 2020-2023)
 Laura Fierro (stage, 2023-2024)

Grégory Beurier
 Lauriane Rouan
Frédéric Boudon
 Christophe Pradal
 Romain Fernandez
 Denis Cornet (50%)
 Ing. à recruter

Oriane Braud (doc, 2023-2026)
 Belmys Cakpo (post-doc, 2023-2026)
 Gargée Phukon (Ing, 2023-2026)



Bertrand Muller (expat. Madagascar)
 Myriam Adam (expat. Cambodge)
 Camila Rebolledo 50% (50% CIAT Colombie)
 Raphaël Perez
 Hélène Marrou
 Edgar Steven Correa Pinzon (doc, 2023-2026)
 Marcos Mc Cormick (doc, 2023-2026)

- UMR AGAP Institut



Directrice de l'UMR Claire BILLOT

Direction adjointe
E. Costes
J. Ronfort
M. Ruiz
G. Trouche

Adjointes à la Directrice
P. Costeraste
 Finances
N. Maghnaoui
 Outils Communs de Recherche
N. Tardieu
 Ressources humaines

Attachée de Direction
B. Dhellemmes

Assistante administrative
P. Pons

Pôle DIVERSITES J. Ronfort	Pôle GENOMES M. Ruiz	Pôle FONCTIONS E. Costes	Pôle METHODOLOGIE de SELECTION C. Trouche	Activités transversales
<p>DDSE Dynamiques de la diversité sociétés et environnements Responsable : C. Leclerc Assistante : G. Cros</p> <p>GE2POP Génomique évolutive et gestion des populations Responsable : H. Fréville Assistantes : S. Marghem, N. De Roon</p> <p>Centres de Ressources Biologiques</p> <p>GAMeT, ARCAD Montpellier Responsable : P. Térés Assistante : M. Misseri</p> <p>Plantes Pérennes Tropicales Guyane Responsable : M. Boccara Assistante : R. Lannes</p> <p>Plantes Tropicales Antilles Responsable : D. Dessauw Assistantes : N. Basile, F. Dahou</p>	<p>GABA Génétique et amélioration des bananiers Responsable : J-P. Hory Assistantes : N. Basile, F. Dahou</p> <p>SEG Structure et évolution des génomes Responsable : A. Dhont Assistante : F. Chazot</p> <p>DEFI Déterminisme expression et fonctionnement des traits chez l'igname Responsable : H. Chair Assistante : F. Dahou</p> <p>SEAPAG Évolution et amélioration des agrumes Responsable : R. Morillon Assistantes : N. Basile, F. Dahou</p> <p>Plateau Bioanalyse/ bioinformatique - South Green Responsable : G. Droc Assistante : C. Poitou</p> <p>Plateforme Génotypage Responsable : P. Mourmet Assistante : C. Poitou</p>	<p>AFEF Architecture et floraison des fruitiers Responsable : F. Andres-Lalaguna Assistantes : S. Iribarne, V. Miralles</p> <p>DARS Développement adaptatif du riz et du sorgho Responsable : C. Périn Assistantes : C. Poitou</p> <p>PHENOMEN Phénotypage et modélisation des plantes dans leur environnement agro-climatique Responsables : C. Granier, C. Pradal Assistante : M. Misseri</p> <p>Plateforme Modélisation (Open Alea) Responsable : C. Pradal Assistante : M. Misseri</p> <p>Plateforme Histologie et imagerie (PHIV) Responsable : J-L. Verdel Assistante : Intérimaire</p> <p>Plateau Biochimie Responsable : A. Sotillo Assistante : M. Misseri</p> <p>Plateau Ecophysiologie Responsable : D. Fabre Assistante : M. Misseri</p> <p>Culture végétales (serres) Responsable : G. Oliver Assistante : C. Poitou</p> <p>Plateau Analyse fonctionnelle et édition des génomes Responsable : A-C Meunier Assistante : C. Poitou</p>	<p>DAAV Diversité et amélioration de la vigne Responsable : P. This Assistantes : S. Iribarne, V. Miralles</p> <p>GIV Génétique et innovation variétale Responsable : D. Pot, H. De Verdal Assistante : C. Poitou</p> <p>GSP Génome et sélection des plantes pérennes Responsables : D. Lopez, D. Cros Assistante : R. Lannes</p> <p>Plateau Mycologie Responsable : A. Vaillant Assistante : R. Lannes</p>	<p>Formation T. Leroy, JC. Glaszmann, P. Pons</p> <p>Agroécologie Responsable : H. Joly</p> <p>Communication Responsable : N. Pivot</p> <p>Médiation scientifique Responsable : C. Cardin</p> <p>Propriété intellectuelle Responsable : T. Leroy</p> <p>Métrologie Responsable : C. Carasco-Lacombe</p> <p>Qualité Responsable : S. Birot</p> <p>Prévention, sécurité Responsable : FC. Baurens</p> <p>Données Responsable : M. Ruiz</p> <p>Living labs de l'Agroécologie Responsable : S. Tazi</p>



Mise à jour : 13-09-2023

ANNEXES : PRINCIPAUX TRAVAUX SCIENTIFIQUES

Vous trouverez en suivant une sélection de mes publications majeures :

1. **Vaillant Jan, Grechi Isabelle, Normand Frédéric, Boudon Frédéric.** Towards virtual modelling environments for functional–structural plant models based on Jupyter notebooks: Application to the modelling of mango tree growth and development. 2022. *In Silico Plants*, 4 (1), n.spéc. Functional-structural plant models.
2. **Boudon Frédéric, Chopard Jérôme, Ali Olivier, Gilles Benjamin, Hamant Olivier, Boudaoud Arezki, Traas Jan, Godin Christophe.** A computational framework for 3D mechanical modeling of plant morphogenesis with cellular resolution. 2015. *PLoS Computational Biology*, 11 (1), e1003950 (16 p.)
3. **Boudon Frédéric, Preuksakarn Chakkrit, Ferraro Pascal, Diener Julien, Nacry Philippe, Nikinmaa Eero, Godin Christophe.** Quantitative assessment of automatic reconstructions of branching systems obtained from laser scanning. 2014. *Annals of Botany*, 114 (4) spéc. Functional-structural plant models: 853-862.
4. **Boudon Frédéric, Pradal Christophe, Cokelaer Thomas, Prusinkiewicz Przemyslaw, Godin Christophe.** L-Py: an L-system simulation framework for modeling plant architecture development based on a dynamic language. 2012. *Frontiers in Plant Science*, 3 (76), 20 p.
5. **Wither Jamie, Boudon Frédéric, Cani Marie-Paule, Godin Christophe.** Structure from silhouettes: A new paradigm for fast sketch-based design of trees. 2009. *Computer Graphics Forum*, 28 (2) : 541-550.