



HAL
open science

Construction de l'architecture et des composantes visuelles d'un buisson ligneux d'ornement : le rosier

Morgan Garbez

► **To cite this version:**

Morgan Garbez. Construction de l'architecture et des composantes visuelles d'un buisson ligneux d'ornement : le rosier. Agronomie. Agrocampus Ouest, 2016. Français. NNT : 2016NSARB287 . tel-01713209

HAL Id: tel-01713209

<https://theses.hal.science/tel-01713209>

Submitted on 20 Feb 2018

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

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

AGRO CAMPUS

OUEST

Morgan GARBEZ • 23 novembre 2016

Thèse AGROCAMPUS OUEST
sous le label de l'Université Bretagne Loire
pour obtenir le grade de
DOCTEUR D'AGROCAMPUS OUEST
Spécialité Biologie et Agronomie

ÉCOLE DOCTORALE • ED495 Végétal, Environnement,
Nutrition, Agroalimentaire, Mer (VENAM)

LABORATOIRE D'ACCUEIL • UMR1345 Institut de recherche
en horticulture et semences (IRHS)

Construction de l'architecture et des composantes visuelles d'un buisson ligneux d'ornement : le rosier

Gerhard BUCK-SORLIN

AGROCAMPUS OUEST, UMR IRHS / *président*

Pierre-Éric LAURI

INRA Montpellier, UMR SYSTEM / *rapporteur*

Thierry AMÉGLIO

INRA Auvergne-Rhône-Alpes, UMR PIAF / *rapporteur*

Philippe ANDREY

UPMC (Paris VI), UMR IJPB / *examineur*

Loïc CHAUMONT

Université d'Angers, UMR LAREMA / *examineur*

Gilles GALOPIN

AGROCAMPUS OUEST, UMR IRHS /
directeur de thèse

Patrick CHASSAGNE

Pépinières Desmartis / *membre invité*

Isabelle MAÎTRE

Groupe ESA, UR GRAPPE / *membre invitée*

*Pour connaître la rose,
quelqu'un emploie la géométrie
et un autre emploie le papillon.*

Paul CLAUDEL

Préface

Ce mémoire de thèse présente les travaux que j'ai réalisés depuis le 1^{er} septembre 2013 au sein de l'équipe de recherche « biologie intégrative de l'Architecture de la plante dans son Environnement » (Arch-E) de l'Unité Mixte de Recherche « Institut de Recherche en Horticulture et Semences » (UMR1345, IRHS, Angers, France) et de l'entreprise « Pépinières Desmartis » (Bergerac, France).

Cette thèse préparée à Agrocampus Ouest (centre d'Angers) et déposée à l'École Doctorale : « Végétal, Environnement, Nutrition, Agroalimentaire, Mer » (ED495 VENAM) a bénéficié d'un financement par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche géré par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche en Entreprise (CIFRE n°2013 / 0410). Cette thèse, encadrée par D^r Gilles GALOPIN assisté de M. Patrick CHASSAGNE, est notamment le fruit d'intenses collaborations entre scientifiques de disciplines différentes mais complémentaires, qui a bénéficié d'un regard critique de professionnels de la production et de la distribution des végétaux présentés ci-après.

Biologie et agronomie végétale dont biostatistique :

Gilles GALOPIN (directeur de thèse), Enseignant-Chercheur et Maître de Conférences HDR en horticulture ornementale, Agrocampus Ouest, Centre d'Angers – UMR1345 IRHS, équipe Arch-E ; **Monique SIGOGNE**, Ingénieure d'études, INRA, Centre Angers-Nantes – UMR1345 IRHS, équipe Arch-E ; **Nicolas DONÈS**, Ingénieur de recherche, INRA, Centre Auvergne-Rhône-Alpes – UMR0547 PIAF, équipe MEA ; **Jean-Baptiste DURAND**, Professeur assistant, ENSIMAG (Grenoble INP) – UMR5224 LJK, UMR7501 IRMA, équipe MISTIS ; et **Yves CARAGLIO** (président du comité scientifique de suivi de thèse), Chercheur-Ingénieur, CIRAD, Montpellier – UMR0931 AMAP, équipe INDIVIDU.

Analyse sensorielle et sciences du consommateur :

Ronan SYMONEAUX, Ingénieur de recherche en évaluation sensorielle, Groupe ESA d'Angers - UR GRAPPE (USC INRA).

Analyse d'image :

Yann CHÉNÉ, Docteur en traitement du signal et des images, ED403 STIM, Université d'Angers – EA7315 LARIS, équipe ISISV ; **Étienne BELIN**, Enseignant-chercheur et Maître

de Conférences en physique, Université d'Angers – EA7315 LARIS, équipe ISISV ; et **David ROUSSEAU**, Professeur des Universités en traitement du signal et des images, Université Lyon 1.

Production et distribution des végétaux :

Patrick CHASSAGNE (co-encadrant de thèse), Directeur Général des Pépinières Desmartis ; **François PAULY** (co-encadrant de thèse), Responsable Filière Végétale et Interprofession du Groupe Jardiland ; et **Gilles DE FRAGUIER**, Directeur Général du groupe Velé de Jardiland.

Quatre articles émanant de ces collaborations ont été acceptés et publiés au cours de cette période, et deux autres sont « prêts » à être proposés. Ce manuscrit a donc été construit sous forme de chapitres incluant ces publications dans une perspective générale permettant de répondre à la problématique soulevée dans cette thèse, auxquels s'ajoute une conclusion générale sur le travail présenté.

L'introduction présente le contexte général, une synthèse de connaissances bibliographiques sur les différentes thématiques traitées, puis la démarche expérimentale utilisée, originale par la transversalité disciplinaire.

Le premier chapitre présente la construction d'une méthode scientifique originale pour la description des propriétés visuelles de plantes d'ornement. Cette méthode mobilise les apports de l'analyse d'image et de l'analyse sensorielle, et est mise au point à partir de vidéos de rosiers virtuels en rotation. Cette recherche méthodologique a fait l'objet de deux articles, publiés dans des revues scientifiques internationales.

Le second chapitre a pour objectif d'étudier les relations entre l'architecture du rosier et son apparence visuelle. La méthode de description visuelle des plantes virtuelles est appliquée sur rosiers réels et complétée par une analyse architecturale. L'expérimentation est réalisée sur un cultivar dont la diversité architecturale, accentuée par trois conditions environnementales de culture, a été analysée à trois stades de développement. Les résultats de cette étude sont présentés sous forme de deux articles en phase d'être soumis dans des revues scientifiques internationales.

Enfin, pour conclure, une discussion générale propose une vision globale et intégrée de ce travail de thèse. Elle permettra de discuter des approches méthodologiques avec sa dimension pluridisciplinaire et des premiers résultats obtenus sur le rosier buisson. En présentant une publication dans une revue scientifique internationale pour laquelle je suis co-auteur, il sera notamment possible d'aborder l'apport que peuvent représenter certaines

technologies innovantes pour améliorer la caractérisation visuelle des plantes et son automatisation. Cette discussion est finalement complétée par la proposition d'une démarche de transposition sur d'autres taxons à tendance buissonnante. Elle se base sur mes travaux réalisés sur le genre *Lagerstroemia* L. dans le cadre de ma thèse CIFRE au sein des Pépinières Desmartis, dont la publication d'un article sur ce taxon, co-signé avec M. Patrick CHASSAGNE, dans une revue botanique éditée en France.

Remerciements

Je remercie tout d'abord l'ensemble du jury, Gerhard BUCK-SORLIN, Thierry AMEGLIO, Pierre-Éric LAURI, Loïc CHAUMONT, Philippe ANDREY, Gilles GALOPIN, Patrick CHASSAGNE, et Isabelle MAÎTRE pour s'être rassemblés autour de l'évaluation de ce travail. Je remercie plus particulièrement Thierry AMEGLIO et Pierre-Éric LAURI d'avoir accepté les rôles de rapporteurs, et dont les regards critiques et les conseils ont permis d'aboutir à la version finale de ce manuscrit.

Je remercie plus particulièrement mes encadrants, Patrick et Gilles, pour leur soutien, et leurs conseils précieux tout au long de cette période. J'ai appris énormément à vos côtés, autant d'un point de vue professionnel, que sur les plantes, leur biologie, leur production, leur commerce ; mais aussi humainement. Je ne peux que vous remercier encore une fois de m'avoir donné la possibilité de travailler ce sujet, et sur moi-même par ailleurs ! Merci encore pour l'investissement consacré, pour vos regards perspicaces et vos discussions enrichissantes qui ont permis d'orienter cette thèse vers ce qu'elle est aujourd'hui. Merci pour vos encouragements, que ce soit pour le travail ou le repos, dans les meilleurs moments comme dans les moins faciles. Je vous suis particulièrement reconnaissant d'avoir toujours cru en moi, et de m'avoir fait prendre conscience de mon potentiel, de mes atouts, mais aussi de mes faiblesses et comment parvenir à les maîtriser et les transformer. La qualité de ce partenariat fait que c'est bien plus qu'une expérience professionnelle que je viens de vivre à vos côtés, mais une expérience humaine très enrichissante. Vos conseils, j'en suis sûr, m'aideront encore pour bien des aspects dans ma vie professionnelle et personnelle.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes ayant participé aux comités de cette thèse, en particulier Yves CARAGLIO qui en a assuré la présidence avec Jean-Baptiste DURAND. Merci à vous tous pour ce suivi, les remarques pertinentes, et les encouragements apportés. A ces remerciements, je tiens à inclure François PAULY. Bien que la conjoncture en ait décidé autrement, tout cela n'aurait pas été possible sans vous également. Avec Gilles et Patrick, je vous suis très reconnaissant d'avoir défendu et participé à ce projet, même de plus loin par la suite. François, je vous remercie pour les conseils prodigués et la qualité de nos échanges lors des différents comités. Un jour peut-être j'espère, nous aurons l'occasion de mettre plus en pratique tout cela ensemble.

Je tiens à remercier tout le personnel des Pépinières Desmartis, en particulier Anne-Marie, Éric, Simone, Brigitte, Pompon (ou Pan-Pan, vu que tu es devenu expert lapin maintenant ☺), Dominique, et Mathieu. Merci à tous pour l'accueil chaleureux, toute l'écoute et l'intérêt que vous avez porté à mes recherches et pour répondre à mes questions. J'ai passé des moments formidables avec vous, ce fut un réel plaisir de pouvoir prendre part de plus près à la vie de cette entreprise, de partager nos expériences, et de diversifier mes activités à vos côtés. Merci à Simon également, avec qui j'ai passé de très bons moments à la « villa » Desmartis. Un de ces quatre, il faudrait qu'on aille pousser nos boards ensemble, on peut même proposer à Patrick de s'y remettre avec nous ☺. J'espère bien revenir vous voir à l'occasion, en vacances cette fois, pour déguster un bon magret à l'ombre des Lager's ! Patrick, je vous remercie plus particulièrement pour cet accompagnement durant ces trois années. Je souligne la franchise de vos remarques, et les nombreux conseils positifs pour m'améliorer en tous points. Je tâcherai de trouver l'équilibre dans mes listes.

Je remercie aussi l'ensemble de mes collègues de l'IRHS. Même ceux qui ont la chance maintenant de profiter d'une retraite au soleil. Monique, après tout ce nombre de clics, et m'avoir supporté, merci pour votre investissement même jusqu'à vos dernières heures de services ! Gilles, je te remercie encore une fois, pour ton dynamisme et ta sollicitude. Je souligne avec respect et je ne peux que m'incliner devant ton acharnement remarquable à enchaîner les heures de digitalisation, tout comme ta sérénité exemplaire et à toute épreuve ! En espérant que tu trouves plein de gentil(le)s stagiaires pour les futurs rosiers, ou les rosiers du futur plutôt ! Tous les deux, on ne peut que souligner votre endurance ! Je vous suis tout deux très reconnaissant pour le soutien, les conseils et les encouragements apportés tout au long de cette expérience. Avec vous, j'ai appris à positiver, à avancer malgré les difficultés, et à accepter les aléas et les imprévus qui jonchent la recherche, du moins j'essaye ☺.

Merci beaucoup en particulier à Daniel RELION pour toute l'aide précieuse apportée à la gestion des cultures et les conseils avisés, et plus généralement merci à l'équipe INEM aussi, en particulier Nicolas, Daniel, Michel, Jacky et Rémi.

Plus largement, je tiens à remercier tous les membres de l'équipe Arch-E, pour leur accueil, leur soutien et les discussions enrichissantes tout au long de cette aventure, que ce soit en réunion, entre deux digitalisations, ou autour d'un café ! Je tiens à remercier Nathalie, Sandrine, Alain, Jérémy et Bénédicte que j'ai eu la chance d'avoir comme enseignant(e)s à la fac, ainsi que Gilles, Laurent, et Philippe à Agrocampus.

Aussi cette thèse, je tiens à le rappeler, n'aurait pas été possible sans le concours de Nicolas DONÈS, Ronan SYMONEAUX, Yann CHÉNÉ, Étienne BELIN, et David ROUSSEAU. Tous les cinq, je vous remercie d'avoir accompagné ce travail tentaculaire, j'ai appris à vos côtés à m'ouvrir à de nouvelles disciplines passionnantes qui suscitent en moi une vocation certaine ! Il m'est difficile encore de savoir laquelle privilégier !

Nicolas, merci beaucoup pour ta réactivité, ta disponibilité et ta sympathie ! Merci pour tout le temps passé à rassembler ces lignes interminables et ces puissants scripts ! Merci aussi de m'avoir formé à cette approche informatique d'encodage et d'extraction des données architecturales.

Ronan, je te remercie pour toutes ces heures passées sur le projet. Merci de m'avoir boosté à chaque moment, de m'avoir fait prendre conscience de mes capacités, mais aussi pour ta bonne humeur, ta sympathie et ton dynamisme. Avec toi j'ai appris à diriger des groupes d'étudiants pour en faire des panels performants, j'en ai encore du mal à le croire parfois ! Aussi, tu m'as appris à répondre aux reviewers et à défendre nos articles de manière élégante et posée, etc., la liste pourrait encore continuer, pour qu'elle soit exhaustive et non redondante ce serait peut-être plus compliqué que de dresser une liste de descripteurs ☺.

Yann, Étienne, et David, je vous remercie pour votre appui du début à la fin de ce projet. Merci pour cette initiation à l'analyse d'image sur les plantes virtuelles, et d'avoir tout fait pour que l'IRHS soit enfin doté d'un système d'acquisition digne de ce nom. Merci pour votre aide, vos remarques et tous ces conseils.

Je tiens aussi à remercier également Jean-Marc LABATTE, et Gilles HUNAULT, qui ont toujours su trouver les mots pour m'expliquer le pourquoi du comment des statistiques. A tous les deux, merci pour votre aide et votre sympathie.

Enfin, côté recherche, je souhaite aussi remercier Liu-Ji HARADA, stagiaire que j'ai eu la chance d'encadrer avec Gilles. Heureusement que tu étais là pour assurer la cadence de la dernière acquisition ! Merci beaucoup pour ton aide précieuse et ton entrain, ainsi que tes qualités professionnelles certaines ! ありがとう (... les kanjis c'est pas encore ça ... ☺).

Aussi, je remercie l'ensemble des personnes que j'ai pu côtoyer à Agrocampus. En particulier Marie-Pierre, Sylvie et Anita, merci pour tout le soutien et l'aide apportés sur le plan administratif, Bruno et Michel pour l'aide technique. Plus largement je vous remercie vous et tout le personnel SVAH pour votre accueil, votre sympathie, et toutes nos discussions

parfois sérieuses, parfois beaucoup moins mais oh combien nécessaires et bénéfiques. Merci à Gilles et Anita encore une fois, Sébastien, Laurent, Mickaël, Annie, Emmanuel, Denis, Gerhard, Valérie, Mathilde, et tous ceux oubliés...

Encore plus, je tiens à remercier les doctorant(e)s que j'ai croisés quotidiennement, Camille L.-M., Florent, Gaëlle, Éric, et Emna, ainsi que Camille L.B. et Ferréol ! Merci à vous tous pour l'ambiance générale, l'aide et les conseils mutuels, les moments passés en pauses et les soirées. J'ai partagé d'excellents moments en votre compagnie, vous êtes tous formidables, j'espère qu'on se retrouvera très vite autour d'interminables apéros, plein de sushis, de jeux, et de bon desserts ☺. Emna, tu es quelqu'un d'exceptionnel, une véritable battante ! Et je tiens à te remercier en particulier pour ton soutien dans les moments les plus critiques, nos conversations autour d'un café et d'une cigarette, même lors de tes nombreuses tentatives pour arrêter. Je te souhaite plein de bonheur et de réussite. Les autres, je ne vous oublie pas pour autant, je vous souhaite tout le meilleur pour l'avenir.

Pour finir sur ce qu'il y a de plus important à mes yeux, je souhaite exprimer ici toute ma reconnaissance envers mes proches. Je remercie et salue mes amis du ch'Nord ☺, en particulier Marjorie, Loïc, Yoann, les deux Maxime, les trois Julien, et Adrien, même si nous sommes bien plus éloignés maintenant, je pense toujours à vous !

Merci à Samuel, des fois, des choses qu'on ne comprend pas ne s'explique pas non plus, c'est comme ça... mais rien n'empêche de mettre l'inexpliqué au cœur du débat ☺. Sam, on se suit depuis le master, on n'a peut-être pas encore fait les 400 coups, mais pas loin, en faire l'éloge ici serait, euh, peut-être inconvenant et complètement déplacé ! Merci pour ton humour, ton soutien, tes conseils. T'es formidable comme mec !

Je remercie toute ma famille, mon frère, mes parents et grands-parents, avec une pensée pour mon Pépé Robert. Merci à tous pour tout votre soutien. J'en profite pour faire une bise à mon petit neveu Louis ☺ à qui je souhaite un avenir radieux ! QLF ☺ !!!

Enfin, pour finir, je ne peux que remercier Héloïse mon p'tit cœur en pomme ☺ à qui je dédicace ce manuscrit. Héloïse tu es une femme exceptionnelle, je n'ai que trop de chance de t'avoir rencontré. Merci pour ton soutien quotidien, ta patience, ton sourire et toute l'affection que tu me portes. C'est un véritable bonheur de vivre à tes côtés.

Merci à vous tous ! Avec mes excuses..., merci à celles et ceux que j'ai oublié.

Sommaire

Introduction générale	1
I. CONTEXTE GENERAL	3
1. <i>Le rosier, un modèle de buisson ligneux d'ornement remarquable</i>	5
1.a. Economie et nouvelles attentes	5
1.b. Origine de la diversité.....	6
1.c. Quelques classifications pour le rosier	8
2. <i>La qualité visuelle des produits d'ornement</i>	11
2.a. Qualité, normes et préférences des produits d'ornement	11
2.b. Comment évaluer la qualité visuelle des plantes d'ornement ?	12
II. INTRODUCTION AUX DISCIPLINES ABORDEES	17
1. <i>L'architecture des plantes</i>	19
1.a. L'analyse architecturale qualitative	19
1.a.i. Profil de croissance des axes.....	20
1.a.ii. Profil de ramification des axes	21
1.a.iii. Position de la sexualité	23
1.a.iv. Différenciation morphologique des axes	23
1.b. Plasticité phénotypique de l'architecture, effets du génotype et de l'environnement.....	23
1.c. Concepts d'unité architecturale et de réitération	25
1.d. Méthode et apport de l'analyse architecturale qualitative et quantitative par digitalisation 3D avec contact dans un champ électromagnétique	26
1.e. L'architecture du rosier	30
1.e.i. La fleur	30
1.e.ii. L'appareil végétatif	31
1.e.iii. Mode de floraison et ramification	35
1.e.iv. Sur le long terme.....	37
1.e.v. Constance, plasticité et variabilité phénotypique de l'architecture	37
2. <i>La caractérisation par analyse sensorielle</i>	43
2.a. Notions fondamentales d'analyse sensorielle	43
2.a.i. Démarche générale de l'analyse sensorielle.....	44
2.a.ii. Epreuves avec sujets naïfs ou non entraînés	45
2.a.iii. Epreuves avec sujets entraînés : focus sur la méthode du profil sensoriel	45
2.b. La caractérisation visuelle du rosier par analyse sensorielle	49
3. <i>Automatisation de la caractérisation sans contact des productions végétales</i>	53
3.a. L'agrégé automatisé des plantes d'ornement	53
3.b. Quelques notions et vocabulaire pour l'analyse d'image.....	54
3.c. Relations sur plantes d'ornement entre mesures sensorielles avec des mesures sur images et des mesures architecturales.....	57
III. DEMARCHE SCIENTIFIQUE PROPOSEE.....	61

Chapitre 1 : Méthodologie sur plantes virtuelles pour la caractérisation visuelle en trois dimensions de plantes d'ornement.....	65
I. AVANT-PROPOS.....	67
II. ASSESSING THE VISUAL ASPECT OF ROTATING VIRTUAL ROSE BUSHES BY A LABELED SORTING TASK	69
III. PREDICTING SENSORIAL ATTRIBUTE SCORES OF ORNAMENTAL PLANTS ASSESSED IN 3D THROUGH ROTATION ON VIDEO BY IMAGE ANALYSIS: A STUDY ON THE MORPHOLOGY OF VIRTUAL ROSE BUSHES.....	79
Chapitre 2 : Etude des relations entre l'architecture du rosier et son apparence visuelle	95
I. AVANT-PROPOS.....	97
II. RELATE AND PREDICT VISUAL ATTRIBUTES OF AN ORNAMENTAL PLANT FROM ARCHITECTURAL COMPONENTS: A NEW APPROACH ON THE ROSE BUSH FOR OBJECTIVE EVALUATION OF THE VISUAL QUALITY	99
III. PLANT VISUAL APPEARANCE ASSESSMENTS IN 3D PREDICTED FROM IMAGE ANALYSIS: ROTATING VIRTUAL PLANT METHODS APPLIED TO REAL ROSE BUSH VIDEOS	129
Conclusion	143
I. CARACTERISATION DE L'APPARENCE VISUELLE	145
II. CARACTERISATION DE L'ARCHITECTURE.....	149
III. RELATIONS ENTRE L'ARCHITECTURE ET L'APPARENCE VISUELLE	151
<i>Une nouvelle approche dans les programmes de sélection</i>	<i>153</i>
Les lagerstroemias de la Chine à Bergerac	156
Références.....	167
Annexe 1 : Shape descriptors to characterize the shoot of entire plant from multiple side views of a motorized depth sensor	179
Annexe 2 : Caractérisation des ramifications sylleptiques, proleptiques et intermédiaires chez le rosier : recherche de variables architecturales quantitatives discriminantes	195

Introduction générale

I. Contexte général

Le buisson ligneux est un modèle végétal très important dans les régions tempérées. Outre ses bénéfices environnementaux évidents, il contribue à l'amélioration de notre cadre de vie. Le buisson ligneux fait partie intégrante du paysage rural de bocage. L'Homme l'a ensuite progressivement introduit dans les zones urbaines et périurbaines pour végétaliser, décorer et agrémenter ces espaces minéraux.

La ville d'aujourd'hui et de demain, qui se doit d'être évolutive et durable, demande au buisson ligneux de répondre à de nouvelles attentes et fonctionnalités, ciblées en fonction des lieux et des usages. Les spécialistes du végétal d'ornement, scientifiques, producteurs et distributeurs, doivent être en mesure de répondre à cette demande sociétale et d'anticiper son évolution en proposant des concepts et des produits attractifs sur ce segment de marché. Une réponse difficile à apporter par un manque de connaissances objectives tant sur les valeurs esthétiques du buisson ligneux que sur la maîtrise de ses processus de développement.

Les fonctionnalités attendues du buisson résultent en grande partie de son architecture et notamment des caractéristiques et de l'agencement spatial de ses organes avec ses formes et ses couleurs. L'architecture de la plante résulte de l'interaction entre son génotype et son environnement. Cette expression phénotypique est une composante importante du produit, considérée comme la résultante d'un processus de production mis en œuvre par les producteurs. Son étude et son contrôle doivent alors permettre de contribuer à l'amélioration des productions au travers de leurs sensibilités aux maladies, leur homogénéité intra-culturelle, mais aussi de leur qualité visuelle qui conditionne les bénéfices et le bien-être ressentis des usagers et consommateurs.

L'apparence de la plante, par son architecture, peut sous certaines réserves être en partie contrôlée génétiquement via la création variétale ou des techniques culturales comme la taille, la restriction hydrique, l'application de régulateurs de croissance ou encore la modulation de la lumière. Mieux appréhender l'architecture du buisson, avec sa plasticité et ses conditions d'expression représente alors une approche a priori pertinente (Galopin 2012, Galopin et al. 2010b) et nécessaire pour *exploiter et valoriser les caractéristiques intrinsèques de la plante et tenter de proposer des leviers d'actions permettant de répondre aux attentes des consommateurs dans leurs espaces de vie d'aujourd'hui et de demain.*

Ces travaux sont le résultat d'une collaboration entre l'entreprise « Pépinières Desmartis » et l'unité mixte de recherche « Institut de Recherche en Horticulture et Semences » (IRHS). Les travaux présentés s'inscrivent dans le programme de recherche de

l'équipe « biologie intégrative de l'Architecture de la plante dans son Environnement » (Arch-E) dirigée par P^r Soulaïman SAKR. A travers une approche pluridisciplinaire, ce travail de thèse contribue à l'élaboration d'une méthodologie scientifique permettant de caractériser le buisson au niveau de son architecture et de son apparence visuelle pour tenter d'identifier, de répondre et d'anticiper plus efficacement les attentes des consommateurs. Ce travail de thèse va tenter d'apporter des réponses aux trois questions scientifiques suivantes : **(i)** peut-on caractériser l'architecture d'un buisson ligneux d'ornement ? ; **(ii)** peut-on caractériser son apparence visuelle ? ; cela afin d'étudier **(iii)** quelles sont les relations entre l'architecture et l'apparence visuelle. En accord avec la communauté nationale et européenne pour la recherche en ornement, le rosier buisson a été choisi comme modèle d'étude de par son importance économique au niveau mondial et national et de par son polymorphisme à l'origine des utilisations horticoles diverses et variées.

1. Le rosier, un modèle de buisson ligneux d'ornement remarquable

1.a. Economie et nouvelles attentes

Le rosier représente une des premières ressources économiques pour l'horticulture ornementale au niveau mondial. On estime un marché annuel d'environ « \$10 billion », soit près de 9 milliards d'euros, pour plus de 8 milliards de roses fleurs coupées et 300 millions de plantes (80 millions en pot et 220 millions pour le jardin) vendues chaque année (Azadi et al. 2016, Boumaza et al. 2009, Guterman et al. 2002).

D'après les chiffres de FranceAgriMer (2015b) sur la consommation des ménages français en 2014 pour la fleur coupée, les roses restent les fleurs les plus prisées, suivies par les lys et les tulipes. Sur 17 millions d'unités achetées à la pièce (seule, pour bouquet ou composition), 58,7 % sont des roses et représentent deux-tiers des 267 millions d'euros dépensés. En botte d'une seule espèce, là encore aucune fleur ne vient détrôner les roses, elles représentent 45,8 % des 21 millions d'unités achetées et 54,3 % des 161 millions d'euros dépensés, laissant les tulipes et les œillets loin derrière elles.

Pour les végétaux d'extérieur, l'étude estime que les français ont acheté près de 7,4 millions de rosiers d'extérieur pour une valeur estimée à environ 79,7 millions d'euros. Cela représente près de 2 % des plantes et 9 % des sommes allouées aux végétaux d'ornement pour l'extérieur par les ménages. Par rapport à 2013, on enregistre une baisse des volumes de 15 % mais une augmentation en valeur de 5,3 %. Par leur importance économique, les rosiers, comme les géraniums ou les hortensias, sont considérés comme des catégories à eux seuls dans l'analyse du commerce des végétaux d'ornement destinés à l'extérieur. Les rosiers forment une des rares catégories à forte valeur ajoutée dont les parts de marché en volume restent stables voire en hausse : 8,4 % en 2011 et 2012, 8,8 % en 2013, 9,4 % en 2014.

Toujours d'après la même étude, pour les végétaux en pot, sous-entendu pour l'intérieur, les ménages ont achetés près de 2,4 millions de rosiers sous forme miniature pour une valeur estimée à environ 24,5 millions d'euros. Cela représente 4,4 % en volume et 4,5 % en valeur des achats en plantes fleuries en pot pour l'intérieur. Juste derrière les orchidées, jacinthes, azalées et cyclamens, les « mini rosiers », ou rosiers miniatures, tiennent donc une place très importante avec une évolution dans ses parts de marché relativement bonne (+ 0,6 % en quantité et en volume entre 2011 et 2014).

Le marché de l'horticulture est un marché très concurrentiel tant au niveau national qu'international. La France, avec une balance commerciale très défavorable (- 837 millions d'euros en 2014), présente aussi la même dynamique sur les marchés du rosier et de la rose

fleur coupée (FranceAgriMer 2015a). En effet, les exportations de rosiers pour la décoration extérieure en 2014 ont représenté 2,1 millions d'euros contre 8,9 millions pour les importations. Pour les roses fleurs coupées, les exportations se sont élevées à 983 millions d'euros et les importations à 126,2 millions d'euros. La concurrence, souvent d'entreprises d'origine néerlandaise, provient d'une production principalement située aux Pays-Bas pour les rosiers, et en Ethiopie et au Kenya pour les roses. Face à un marché attractif avec une balance commerciale très déficitaire, des mesures permettant d'accroître la compétitivité des entreprises horticoles françaises sont alors nécessaires pour mieux répondre aux attentes des consommateurs.

Ces chiffres indiquent que le marché du rosier extérieur est très important, mais majoritairement dominé par des produits étrangers. En parallèle, on constate que les ventes de rosiers pour l'extérieur se recentrent de plus en plus sur la période printanière et que les achats en vue de la décoration des balcons et terrasses prennent de plus en plus d'importance (14 % des rosiers d'extérieur vendus en 2013 contre 16 % en 2014). Ceci traduit une certaine évolution du profil des consommateurs, notamment à mettre en relation avec la réduction des espaces végétalisables privés et publics. D'autre part, les achats concernent de plus en plus des rosiers non greffés, à effet décoratif immédiat, et dits « sans entretien » (com. pers. C. Widehem). En effet, les consommateurs sont désormais en attente de plantes d'ornement « prêtes à consommer » plus décoratives, plus résistantes aux maladies et à la sécheresse, obtenues selon des méthodes respectueuses de l'environnement, de qualité garantie, et auxquelles s'ajoute une préférence pour les productions « made in France » plus ou moins locales (Excellence végétale n.d., Sonalier 2014). Ces transitions se ressentent aussi chez les professionnels, notamment avec l'adoption et la création de certifications et labels divers tels que « Plante Bleue », « *Milieu Programma Sierteelt* » (MPS), « Label rouge » (dahlias et rosiers), ou encore « Fleurs de France ». Pour répondre au marché et l'anticiper dynamiquement, des méthodologies permettant de caractériser précisément les attentes des consommateurs et les satisfaire, tout comme proposer des produits novateurs et tester leur potentiel devient alors une nécessité pour les sélectionneurs, les producteurs et les distributeurs qui veulent se démarquer.

1.b. Origine de la diversité

Les rosiers sont des plantes à fleurs ligneuses (Angiosperme, Eudicotylédone) et pérennes. On les regroupe sous le genre *Rosa* L. de la grande famille cosmopolite des *Rosaceae*. Selon les auteurs, on dénombre chez ce genre de cent à plus de deux cent cinquante

espèces buissonnantes au port rampant à érigé, parfois sarmenteuses au port grimpant à pleureur qu'on qualifie de lianes pour certaines essences aux développements les plus exubérants (Bhattacharyya and Johri 1998 ; Gudin 2000, Liorzou et al. 2016, Roberts et al. 2003).

Les plus anciens fossiles découverts ayant été rattachés à ce taxon attestent sa présence aux États-Unis dès l'Oligocène, il y a 35 à 40 millions d'années, et encore plus tôt, dès le début de l'ère Tertiaire vers l'Éocène en Chine. De nos jours, on retrouve des rosiers à l'état sauvage dans de nombreuses régions tempérées et subtropicales du globe. Ils se sont naturellement répandus sur quasiment tout l'hémisphère nord, et sur l'hémisphère sud après avoir été introduits par l'Homme (Bendahmane et al. 2013, Gudin 2000, Meynet 2001, Nađpal et al. 2016, Tarbouriech 2001).

Utilisés et cultivés depuis des temps immémoriaux à des fins décoratives essentiellement, les rosiers et leurs fleurs suscitent l'admiration de l'Homme pour leurs hautes valeurs esthétiques, symboliques et affectives. D'abord utilisés comme haie défensive contre les animaux, leurs utilisations à des fins ornementales auraient commencé il y a déjà plus de 5000 ans en Afrique du Nord, en Asie de l'Ouest et en Chine. On note par ailleurs les nombreuses utilisations ancestrales et maintenant industrielles de certaines espèces ou hybrides pour la médecine, la phytothérapie, l'aromathérapie, l'alimentation, l'épicerie, la nutrition, la parfumerie et les cosmétiques. C'est néanmoins pour l'ornement, sous leurs nombreuses formes cultivées, résultantes d'une histoire complexe rythmée par des milliers d'années de domestication, de sélection et d'hybridation engendrées par l'Homme, que les rosiers sont le plus couramment utilisés (Azadi et al. 2016, Bendahmane et al. 2013, Gudin 2000, Liorzou et al. 2016, Meynet 2001, Nađpal et al. 2016, Tarbouriech 2001).

La sélection et l'hybridation intensives menées depuis le XVIII^e siècle, notamment entre les variétés issues de la domestication européenne et asiatique du genre, a permis la génération d'une étonnante diversité phénotypique (Liorzou et al. 2016). En effet, outre leurs aptitudes agronomiques contrastées (qui concernent la vigueur, la floribondité, la remontée de floraison, la résistance aux stress et maladies, puis le parfum), les rosiers cultivés présentent une large diversité avec un continuum de ports, aux dimensions variables ; de fleurs plus ou moins groupées à isolées, plus ou moins denses. Les fleurs, comme les feuilles, présentent elles aussi des dimensions, des formes, des textures et des coloris très contrastés (Bendahmane et al. 2013, Gudin 2000, Liorzou et al. 2016, Meynet 2001, Roberts et al. 2003, Tarbouriech 2001).

Depuis, avec la création variétale toujours aussi prolifique, cette diversité est en constante évolution. En effet, on distinguait au début des années 2000 plus de 24000 variétés cultivées (cultivars), et cinq à dix milliers de plus une dizaine d'années plus tard. Ces cultivars sont communément regroupés sous la nomenclature binomiale de *Rosa hybrida* L., qui aujourd'hui constitue la première « espèce » d'ornement par ordre d'importance économique. Pour autant la diversité rencontrée ne serait basée que sur les fonds génétiques d'une dizaine d'espèces (Bendahmane et al. 2013, Gudin 2000, Liorzou et al. 2016, Meynet 2001, Roberts et al. 2003). Ces espèces (**Tableau 1**) proviennent, selon la classification botanique des rosiers sauvages proposée par Rehder (1940) revue par Wissemann (2003), de cinq des dix (parfois 11) sections proposées pour le sous-genre *Rosa* (parfois *Eurosa*). Ce dernier regroupe à lui seul plus de 95 % des espèces sauvages de rosiers (Liorzou et al. 2016, Meynet 2001, Wissemann 2006, Wissemann and Ritz 2005).

Tableau 1. Divisions du genre *Rosa* L. et principales espèces ayant conduit aux ancêtres des variétés de rosiers cultivés (d'après Liorzou et al. 2016, Wissemann and Ritz 2005). **Notes :** Les noms acceptés d'espèces d'après The Plant List (2013) sont reportés en italiques.

Sous-genre (subgen.) Section (sect.)	Principales espèces ancêtres des variétés cultivées
Subgen. <i>Hesperhodos</i> Cockerell, 1913	
Subgen. <i>Hulthemia</i> (Dumort.) Focke, 1888	
Subgen. <i>Platyrhodon</i> (Hurst) Rehder, 1940	
Subgen. <i>Rosa</i>	
Sect. <i>Banksianae</i> Lindl., 1820	
Sect. <i>Bracteatae</i> Thory, 1820	
Sect. <i>Caninae</i> (DC.) Ser. 1825	
Sect. <i>Carolinae</i> Crép., 1891	
Sect. <i>Cinnamomeae</i> (DC.) Ser. 1825	<i>R. cinnamomea</i> L. = <i>R. majalis</i> Herrm.; <i>R. rugosa</i> Thunb.
Sect. <i>Indicae</i> Thory, 1820	<i>R. chinensis</i> Jacq. ; <i>R. gigantea</i> Collet ex Crép.
Sect. <i>Laevigatae</i> Thory, 1820	
Sect. <i>Pimpinellifoliae</i> (DC.) Ser. 1825	<i>R. foetida</i> Herrm.; <i>R. spinosissima</i> L.
Sect. <i>Rosa</i> (Gallicanae) (DC.) Ser. 1825)	<i>R. gallica</i> L.
Sect. <i>Synstylae</i> DC., 1813	<i>R. moschata</i> Herrm. ; <i>R. multiflora</i> Thunb. ; <i>R. wichurana</i> Crép. = <i>R. luciae</i> Franch. & Rochebr.

1.c. Quelques classifications pour le rosier

Pour le rosier, diverses classifications sujettes aux améliorations, remaniements et controverses, ont été proposées et sont utilisées pour différencier parmi les espèces, variétés et cultivars, certains groupes relativement plus homogènes quant à leurs origines, ou leurs caractéristiques agronomiques et morphologiques. La remontée de floraison en particulier, est un des caractères les plus récurrents dans celles-ci. Elle traduit l'étalement de la floraison possible du printemps à l'automne, récurrent ou occasionnel, de manière continue ou en

plusieurs vagues ; qu'on oppose à une floraison non remontante car unique et courte (Iwata et al. 2012, Kawamura et al. 2011, 2014, 2015, Roman et al. 2015).

Par exemple, la Société Française des Roses (n.d., n.d.1) propose différentes catégorisations dont l'objectif principal est surtout d'orienter les consommateurs en fonction de l'usage et des caractéristiques des rosiers qu'ils recherchent.

L'*American Rose Society* propose quant à elle une classification plus robuste et relativement bien reconnue des spécialistes. Elle est essentiellement basée sur le pedigree et le phénotype avec trois grandes divisions (American Rose Society n.d., Liorzou et al. 2016) : **(i)** les rosiers sauvages et botaniques (sauvages cultivés dans les jardins botaniques) ; **(ii)** les variétés cultivées « anciennes », obtenues avant 1867 et dérivant de celles-ci en 21 sous-divisions dont par exemple « Alba », « Bourbon », « Centifolia », « Portland », « Thé », etc. ; et **(iii)** les variétés cultivées « modernes » également dites de type « buisson » (*shrub*), qui délimitent dans le cadre de nos recherches ce que nous appelons les « rosiers buissons », avec 13 sous-divisions ou groupes horticoles tels que « Floribunda », « Hybride de wichurana », « Hybride de kordesii », « Polyantha », « *Shrub (modern)* : Buisson (moderne)¹ », etc. Ce groupe rassemble les fonds génétiques de variétés d'origine européenne et asiatique obtenus après 1867 (ou ne satisfaisant pas suffisamment les critères des catégories précédentes) avec la création du premier rosier « moderne » remontant nommé 'La France'. Cette variété, issue d'un croisement entre des variétés anciennes des sous-divisions « Hybride remontant » et « Thé », constitue le type de la sous-division « Hybride de Thé » regroupant des variétés utilisées pour la floriculture à l'origine de nombreuses variétés actuelles. Cette classification, bien que considérée comme une référence, reste un travail en constante progression. En effet, les groupes horticoles distingués, en particulier chez les rosiers modernes, ne sont pas explicables par la génétique des variétés qui les composent. Ce type de classification devrait donc être reconsidéré et intégrer la structuration génétique observée (Liorzou et al. 2016).

Pour autant, la lecture du phénotype, sur laquelle se basent de telles classifications horticoles, reste plus fonctionnelle pour le commerce. Notons également que par extension cette lecture du phénotype, *i.e.* le phénotypage, reste primordiale et indispensable pour détecter d'éventuels marqueurs génétiques contrôlant des caractères d'intérêts, et pour demander la protection des obtentions variétales par ailleurs (Crespel et al. 2012, Liorzou et al. 2016, Vosman et al. 2004). En ce sens, l'Union internationale pour la Protection des

¹ En français, on rencontre souvent la traduction « rosier paysager », ou abusivement « rosier arbustif » même s'il n'en est rien car au sens strict un arbuste possède un tronc.

Obtentions Végétales (UPOV) propose plus simplement de distinguer en premier lieu les rosiers en fonction de l'usage prévu : ceux pour la floriculture ; ceux pour le jardin y compris ceux en conteneur pour patios, balcons et terrasses ; et ceux en pot pour l'intérieur, produits sous serres ou autres types d'abris. Pour les rosiers de jardin et en pot, la première distinction se fait sur le type de croissance via six catégories très fonctionnelles (**Figure 1**) déterminées selon la hauteur potentielle et le port (UPOV 2004, 2010). Les rosiers tiges et pleureurs ne sont pas considérés dans ces critères car ils résultent de la greffe d'une variété buisson, grimpante, ou couvre-sol sur une tige tuteurée de 0,5 à 1,8 m, souvent d'espèces botaniques comme l'églantier *R. canina* L., ou encore *R. indicae* L. et *R. multiflora* Thunb. par exemple (Excellence végétale n.d., Société Française des Roses n.d.). S'ajoute ensuite la proposition d'une cinquantaine de critères, transversaux ou spécifiques des catégories d'usage, pour évaluer les caractéristiques des cultivars, avec par exemple le nombre de pétales, le nombre de rameaux florifères, etc. Ces critères plus ou moins spécifiques sont développés par l'UPOV pour de nombreux autres taxons également. Ils sont utilisés pour les tests « **DHS** » permettant d'attester l'obtention d'un nouveau cultivar avec l'objectif d'évaluer si un matériel candidat est **D**istinct d'autres taxons déjà identifiés, si ses traits à un instant donné sont **H**omogènes sur la plante et d'une plante à l'autre, et s'ils sont **S**tables dans le temps (UPOV 2002).

(A)	Type de croissance	Indications (hauteur potentiel et port)	Exemples de cultivars	Note
	Miniature	< 15 cm	-	1
	Nain	15-40 cm	'Koverlandus'	2
	De massif	40-150 cm	'Taneidol'	3
	Buisson	150-250 cm	'Kolmag'	4
	Grimpant	> 250 cm	'Noasafa'	5
	Couvre-sol	< 30 cm et port fortement divergent	'Meifafio'	6

(B)	Port (hors rosier grimpant)	Exemples de cultivars	Note
	Dressé	'Poulhi008'	1
	Demi-dressé	'Tantasch' ; 'Korkallet'	3
	Intermédiaire	'Poulkrid' ; 'Evera107'	5
	Modérément divergent	'Meibonrib'	7
	Fortement divergent	'Korkilgwen'	9

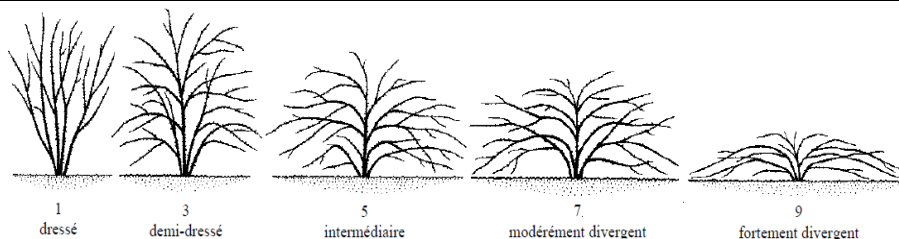


Figure 1. Exemple de critères pour évaluer les cultivars de rosiers de jardin et en pot (d'après UPOV 2004, 2010) : (A) notation du type de croissance ; (B) notation du port et son illustration.

2. La qualité visuelle des produits d'ornement

2.a. Qualité, normes et préférences des produits d'ornement

La qualité peut être définie comme « l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés et implicites » (NF EN ISO 8402 : 1994), ou encore comme « l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences » (NF ISO 9000 : 2000). Kader (2000, 2002), en parlant des produits horticoles, la définit comme un « degré d'excellence ou de supériorité » formé par « la combinaison d'attributs, de caractéristiques et de propriétés qui déterminent la valeur de chaque marchandise en fonction de son utilisation prévue ». Contrairement aux autres catégories horticoles, les plantes d'ornement sont essentiellement cultivées pour leurs valeurs esthétiques afin d'agrémenter les espaces par leur forme, leurs couleurs, voire leurs parfums (Aldous 2013, Boumaza et al. 2009, Ferrante et al. 2015, Schreiner et al. 2013).

Diverses normes peuvent être rencontrées pour encadrer le commerce des produits d'ornement et contrôler leur qualité, notamment dans le commerce à grande échelle, comme au marché aux fleurs d'Aalsmeer aux Pays-Bas (*Bloemenveiling Aalsmeer – Royal FloraHolland Flower Auction*). Ces normes peuvent être nationales ou internationales, avec par exemple celles proposées par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), l'*European Nurserystock Association* (ENA), ou encore l'*American Nursery and Landscape Association* (ANLA). Elles préconisent des standards de qualité généraux en commençant par l'utilisation des dénominations officielles, complétées par d'autres critères comme l'absence de maladies, ou encore des normes quantitatives par espèce et catégorie. Par exemple, selon les normes de l'ENA (2010), un rosier buisson issu de bouture se doit spécifiquement d'avoir au moins deux ramifications à moins de 10 cm du substrat. Ces normes n'ont pas un caractère obligatoire pour autant, et il est possible de rencontrer des agrégés en différentes catégories de qualité selon leurs critères, ou selon les prérogatives des producteurs. Néanmoins, le consommateur final est bien souvent écarté de ce processus. En effet, celui-ci n'a pas connaissance de ces standards, et il est rare que les catégories de qualité soient déterminées et affichées sur les produits finaux, directement achetés par le consommateur. De plus, leur limitation à un très faible nombre de critères simples implique qu'il est peu probable de trouver une réelle adéquation entre les catégories définies par agrégé et les attentes des consommateurs (Kohsel and Bennedsen 2001).

Pourtant, les préférences en matière d'ornement suscitent bien des questions et sont étudiées à différents niveaux selon les points de vue. On peut noter par exemple la popularité

des concours tels que *Innovation showcase* ou *Color Your Life Award* organisés lors du célèbre salon *Internationale Pflanzenmesse* (IPM) d'Essen en Allemagne, les *Plant Trials* régulièrement organisés par la *Royal Horticultural Society* (n.d.) délivrant par ailleurs le *RHS Awards of Garden Merit*, ou encore du programme européen *Euro-Trials* (Galopin et al. 2010a), au cours desquels des panels d'individus évaluent des spécimens sur un ou plusieurs aspects, pour leur capacité d'adaptation, de croissance, leurs résistances aux stress, mais surtout pour leur qualité esthétique (beauté générale, beauté du feuillage, des fleurs, etc.), et leur originalité.

Selon d'autres approches, quelques études marketing ayant recours à l'analyse conjointe ont identifié certains facteurs pour étudier les motivations d'achats des consommateurs en plantes d'ornement pour l'extérieur : l'état sanitaire, le prix, la forme, l'aspect buissonnant, la couleur des fleurs, et celle des feuilles, la hauteur finale, l'adéquation au jardin du consommateur, le prix, l'harmonie des couleurs, et les conseils de culture (Brascamp 2005, Mason et al. 2008, Townsley-Brascamp and Marr 1994). De même, tout un pan de recherche dédié à l'aménagement paysager étudie également les profils et les préférences des individus face aux types de plantes qui les entourent (Kendal et al. 2012). Aussi, récemment de nouvelles approches plus holistiques tentent d'appréhender la qualité des produits horticoles en général. Ces approches se basent sur les concepts plus fondamentaux d'attributs intrinsèques et extrinsèques créés par la demande implicite ou explicite et la satisfaction des consommateurs, via le merchandising et le packaging entourant la plante, les bénéfices perçus et la satisfaction des besoins d'ordre supérieur tels que présentés par la pyramide de Maslow (Aldous 2013, Schreiner et al. 2013). Néanmoins, sur le végétal en lui-même, la qualité visuelle de la plante reste un facteur *sine qua non* de l'appréciation par un « usager » ou de l'achat par un consommateur donné (Boumaza et al. 2009, 2010).

2.b. Comment évaluer la qualité visuelle des plantes d'ornement ?

De nombreuses approches sont proposées pour appréhender la qualité des plantes d'ornement dans le but de comparer un ou plusieurs génotypes face aux pratiques culturales, et d'optimiser les conditions de transport. Néanmoins, jusqu'à peu, le choix et l'évaluation des critères pour étudier de manière intégrative et non hédonique les composantes de la qualité visuelle des plantes d'ornement n'avaient jamais bénéficié de méthodologies reconnues (Boumaza et al. 2009, Ferrante et al. 2015). Bien qu'extrêmement détaillées, les listes de critères et leurs notations développées par l'UPOV sont établies dans l'esprit de caractériser les cultivars en dehors des influences environnementales. Ils semblent donc peu pertinents

pour étudier certaines variations liées aux pratiques culturelles, ou à la variabilité phénotypique (Crespel et al. 2013, Santagostini et al. 2014). En effet, l'environnement et les différentes conduites culturelles peuvent avoir un impact non négligeable sur les plantes sans pour autant modifier les caractéristiques qui définissent spécifiquement son cultivar (Ferrante et al. 2015). De plus, à différentes échelles, il existe toujours une certaine variabilité plus ou moins forte entre les plantes à l'intérieur d'un lot (Demotes-Mainard et al. 2013a). Des méthodes alternatives sont alors nécessaires pour caractériser objectivement les composantes de la qualité visuelle des plantes d'ornement de manière générique et suffisamment fine pour rendre compte de leur variabilité phénotypique.

Certains auteurs, notamment pour mettre en place des méthodes d'agrégés automatisés (abordés dans la section **II.3.a, p.53**), ont proposé d'utiliser quelques attributs très pertinents comme la largeur, la forme, ou la densité de la plante, mais sans expliciter une méthodologie pour leur choix (Boumaza et al. 2009). Néanmoins, la qualité visuelle d'un objet peut être définie comme une résultante de l'interaction entre la réalité physique perçue de l'objet, *i.e.* ce que nous appelons « apparence visuelle », et le jugement esthétique donc hédonique et subjectif d'un observateur (Creusen and Schoormans 2005).

Pour les produits horticoles, notamment les fruits et légumes, Kader (2000, 2002) distingue quatre composantes générales permettant de catégoriser les attributs de la qualité visuelle : la taille, la forme, la texture de surface, et la couleur. Ce raisonnement peut également s'appliquer aux plantes, mais de manière plus complexe puisque l'on peut en discuter à l'échelle de la plante entière jusqu'à l'échelle de ses différents organes, et avec une dimension temporelle plus vaste.

Afin de mieux cerner comment distinguer et étudier finement les composantes visuelles d'une plante d'ornement, il a été proposé récemment de transposer les méthodes de l'analyse sensorielle sur le rosier (Boumaza et al. 2009). Suivant les concepts de cette science couramment utilisée dans des processus de management de la qualité du secteur de l'agroalimentaire entre autres (Depledt and SSHA 2009, Meilgaard et al. 2006, Urdapilleta 2001), il a été montré qu'une plante d'ornement peut être décrite visuellement par le biais d'un groupe d'individus entraînés formant un « panel », sur un ensemble de critères ou « descripteurs sensoriels » définis et choisis rigoureusement afin d'expliquer les préférences de consommateurs vis-à-vis des propriétés visuelles de la plante (Boumaza et al. 2009, 2010).

Pour une plante entière, ces propriétés sont évolutives et ne sont que le reflet de l'expression de son développement contrôlé par l'interaction de facteurs génétiques et environnementaux à un moment donné, et auxquels s'ajoutent les pratiques culturales éventuellement utilisées. Cette notion, comme illustrée ci-après en **Figure 2**, n'est autre que celle de l'architecture d'une plante qui résulte de la nature et de l'agencement relatif de chacune de ses parties qui se forment au cours du temps (Barthélémy and Caraglio 2007).

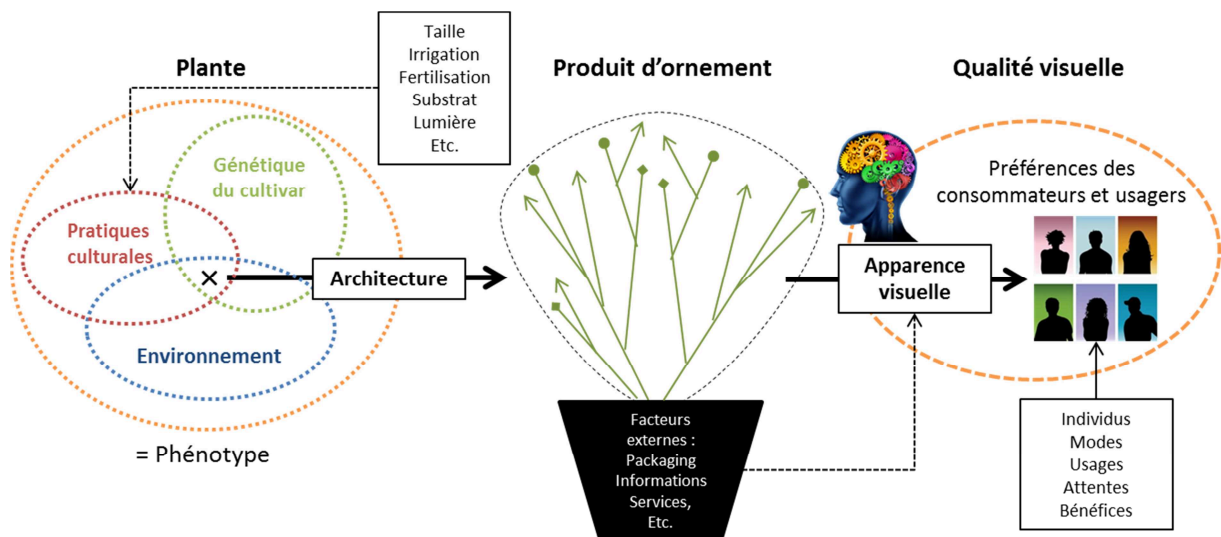


Figure 2. L'architecture d'une plante et la qualité visuelle du produit d'ornement.

L'architecture d'une plante peut être décrite et analysée à un moment donné et au cours du temps en recensant un ensemble varié de caractères et de mesures à différentes échelles allant : **(i)** de la plus grande, en considérant la plante entière comme un tout ; **(ii)** à l'intermédiaire, en considérant les différents organes avec ou sans leurs propres caractéristiques ; et **(iii)** jusqu'à la plus fine, et donc plus chronophage en terme d'acquisition de données, en intégrant les relations entre les organes, leur morphologie et leur position dans l'espace (Godin 2000). Pour cela, il est important d'une part de définir les composantes architecturales les plus pertinentes sur la qualité visuelle, et d'autre part de rechercher une simplification de l'acquisition des données. L'étude des relations entre la variabilité architecturale des plantes d'ornement et leurs propriétés visuelles, par des méthodes de caractérisations sensorielles, représente alors une approche intéressante pour détecter les éventuels leviers « génétiques » et « environnementaux » permettant d'expliquer et de moduler leur apparence visuelle (Galopin 2012, Galopin et al. 2010b).

Néanmoins, les méthodes sensorielles permettant une caractérisation précise et fiable des produits restent complexes, longues et onéreuses à mettre en place. Pour cela, des méthodes instrumentales permettant de prédire, voire d'expliquer les perceptions sensorielles

sont alors activement recherchées pour de nombreux aspects (Danzart 2009, Depledge and SSHA 2009, Mehinagic et al. 2004). L'analyse d'image ou photogrammétrie est largement utilisée dans de nombreux domaines pour caractériser des produits inertes ou vivants (Plataniotis and Venetsanopoulos 2013). Cette approche semble être une méthode instrumentale tout à fait adéquate et pertinente pour caractériser certains critères spécifiques des plantes ornementales, évaluées par analyse sensorielle, mais aussi mesurées avec des relevés architecturaux. En effet, la capture d'image numérique permet de fixer à un instant t une représentation visuelle des plantes en 2D, qui peut ensuite faire l'objet d'une analyse sensorielle et de mesures instrumentales par analyse d'image (Boumaza et al. 2010, Huché-Thélier et al. 2011, Santagostini et al. 2014). En revanche l'architecture reste l'élément essentiel qui définit l'apparence de la plante. Si l'on souhaite mieux comprendre la « construction de cette apparence », il est alors nécessaire de prendre en compte l'évolution dynamique de la construction architecturale de la plante à des échelles fines (Barthélémy and Caraglio 2007, Godin 2000).

Tableau 2. Principaux avantages et inconvénients de l'analyse architecturale, de l'analyse sensorielle et de l'analyse d'image quant à l'étude de la qualité visuelle des plantes d'ornement.

Science	
Avantages	Inconvénients et exemples de questionnement
Analyse architecturale	
<ul style="list-style-type: none"> - Description fidèle des éléments botaniques qui structurent une plante, et représentation virtuelle en 3D possible en encodant des coordonnées spatiales ; - Analyse représentative fine à globale de la topologie, la géométrie et de la morphologie des éléments ; - Compréhension du développement d'un végétal, ses constantes et sa variabilité ; - Un à deux opérateurs au minimum selon la méthode ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre important et suffisant de plantes à suivre dans le temps, complexe à déterminer ; - Chronophage, augmente avec la finesse des relevés et le développement des plantes ; - Besoin de bloquer le développement des plantes, à défaut réaliser les relevés sur de courts laps de temps ; - Biais opérateurs ; - Pas d'information directe sur la perception visuelle de la plante, à confronter à l'analyse sensorielle ; - Une plante avec dix fleurs est-elle perçue comme plus fleurie qu'une plante avec neuf fleurs ? Est-ce dépendant de leur distribution dans la plante ?
Analyse sensorielle	
<ul style="list-style-type: none"> - Représentative de la perception visuelle ; - Identification de différences absolues ; - Identifier et quantifier des descripteurs pertinents ; - Expliquer les préférences des consommateurs ; - Base de recherche robuste à confronter à des mesures instrumentales pour prédire, voire expliquer les perceptions ; - Un formateur/opérateur au minimum ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Panel de sujets entraînés / Nombreux consommateurs ; - Fatigue des sujets : pas trop de descripteurs, pas trop de produits ; - Long à mettre en place et coûteux (rémunération des individus, formation et entraînements si besoin, utilisation de consommables et des infrastructures, etc.) ; - Biais linguistique et de variabilité dans la perception des stimuli et leur intensité ; - Besoin de fixer l'apparence visuelle de la plante ; - Pas d'information fine sur l'architecture de la plante ; - Est-ce bien le nombre de fleurs épanouies qui permet de reproduire la perception de la quantité de fleurs ? La position spatiale et relative des axes peut amener à l'occultation de certaines parties de la plante, a-t-elle une influence sur cette perception ? Est-ce négligeable ?
Analyse d'image	
<ul style="list-style-type: none"> - Représentative de la vision - Nombreux critères quantitatifs - Autres caractéristiques non visibles, non mesurables autrement - Méthode d'acquisition rapide - Mesures de qualité - Rentabilisable - Un opérateur au minimum 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériel adapté plus ou moins onéreux (acquisition, stockage, traitement) ; - Mesures comparables, ou scène invariante ; - Traitement d'image plus ou moins robuste selon la complexité de la scène imagée, besoin de limiter ce biais ; - Représentation 2D de la plante avec de nombreuses occultations ; - Pas d'information pour le choix des mesures sur images qui sont les plus pertinentes en relation avec la perception visuelle ou l'architecture de la plante ; - Comment intégrer l'information des images en 2D pour ne pas négliger la 3D ? - Quelles mesures sont les plus corrélées aux variables d'études ? - Sont-elles suffisamment robustes pour réaliser des prédictions ? Avec quels outils statistiques ?

II. Introduction aux disciplines abordées

Les apports conjoints et la confrontation des méthodes développées sur le rosier buisson : **(i)** pour son analyse architecturale quantitative et qualitative (ex. Li-Marchetti et al. 2015, Morel et al. 2009, Santagostini et al. 2014) ; **(ii)** son analyse sensorielle dans ses objectifs de caractérisations non hédoniques (Boumaza et al. 2009, 2010, Huché-Thélier et al. 2011, Santagostini et al. 2014) ; et **(iii)** l'analyse d'image comme alternative aux précédentes (Santagostini et al. 2014), sont à la base de la méthode scientifique que cette thèse propose d'évaluer sur le rosier pour l'étude de la construction de l'architecture et des composantes visuelles d'un buisson ligneux d'ornement. Avant d'aborder chacune de ces approches plus précisément, le **Tableau 2** ci-contre présente selon les travaux précédemment cités les principaux avantages et inconvénients identifiés pour notre problématique. De par la pluralité des disciplines mobilisées, les parties suivantes n'ont pas l'ambition de faire l'état de l'art de chacune d'entre-elles. Elles ciblent essentiellement la présentation des éléments contextuels et bibliographiques ayant mené à la réflexion présentée dans ce manuscrit et nécessaires à l'acquisition d'un langage commun pour la collaboration scientifique.

1. L'architecture des plantes

De nombreuses méthodes de description des plantes à différentes échelles d'observation et avec différents modes de représentation sont proposées dans la littérature (Godin 2000, Pérez-Harguindeguy et al. 2013). En conséquence, cette partie n'a pas l'ambition d'être exhaustive. Elle aborde uniquement la description des propriétés macroscopiques des systèmes aériens des végétaux ligneux en présentant plus précisément ce qu'est l'analyse architecturale, nécessaire à la compréhension du vocabulaire utilisé et de la méthode de description employée par la suite pour les lecteurs non familiers à cette discipline.

Les plantes sont des organismes modulaires. Elles se développent selon des règles spécifiques par la répétition d'entités botaniques élémentaires dont les caractéristiques évoluent avec leur ontogénie. Comme la définissent Barthélémy et Caraglio (2007), l'architecture « [...] dépend de la nature et de l'agencement relatif de chacune de ces entités, et est à tout instant l'expression d'un équilibre entre les processus endogènes de croissance de la plante et les contraintes exogènes de l'environnement ». Ainsi, par l'observation et l'expérimentation, l'analyse architecturale s'efforce « [...] d'identifier ces processus endogènes pour les dissocier de la plasticité de leur expression face à l'environnement ». Appréhender l'architecture de la plante, par ses constantes, sa variabilité et sa plasticité revient donc à s'intéresser à un ensemble intégratif dont découlent plusieurs caractéristiques agronomiques majeures pour l'horticulture telles que le rendement et la résistance aux stress et pathogènes, mais aussi la qualité des récoltes et des cultures en général (Turnbull 2005).

1.a. L'analyse architecturale qualitative

Un important nombre de caractères fonctionnels peuvent être mesurés ou qualifiés pour décrire la diversité phénotypique que peuvent présenter les plantes face à l'environnement, à l'échelle d'un individu et de ses organes (Bell 1991, Pérez-Harguindeguy et al. 2013). Pour autant, malgré cette diversité, l'analyse architecturale sous sa première forme a permis de démontrer qu'indépendamment des espèces ou des familles, les plantes pouvaient être regroupées en fonction de leur mode de développement. Cette science, conceptualisée à partir des années 70 par Hallé, Oldeman et Tomlinson, a permis d'identifier 23 modes d'organisation simples qui rendent compte de l'architecture et du développement de l'ensemble des plantes étudiées : les "modèles architecturaux", nommés avec les patronymes de célèbres botanistes (Barthélémy and Caraglio 2007, Bell 1991, Hallé 2004, Hallé et al. 1978, Heuret et al. 2003). L'identification du modèle architectural d'une plante repose prioritairement sur la description de quatre critères morphologiques, simples et observables

sur ses axes : le profil de croissance, le profil de ramification, la différenciation morphologique des axes, et la position des structures reproductrices. La partie qui suit en fait une présentation succincte au travers de leurs principales modalités d'expression avec le vocabulaire tel que défini selon l'ouvrage très complet et illustré de Bell (1991), et revisité par Barthélémy et Caraglio (2007) dans la revue de référence sur le sujet.

1.a.i. Profil de croissance des axes

Les plantes émettent leurs organes (organogénèse) à partir de zones cellulaires indifférenciées à forte activité mitotique : les méristèmes apicaux. Localisés au sommet des tiges, ces méristèmes sont souvent protégés par une structure de feuilles modifiées (cataphylles) formant un bourgeon apical (**Figure 3**). Ils produisent un empilement d'unités modulaires typiques des végétaux : les phytomères appelés également métamères, et qui par allongement (extension) forment les axes feuillés. Le méristème apical produit initialement des feuilles embryonnaires indifférenciées : les primordia foliaires ou prophylls, (**Figure 3A**) qui deviennent avec l'extension de l'axe des feuilles vraies (euphylls) ou modifiées comme les écailles ou bractées. Ces feuilles s'insèrent sur les axes au niveau des nœuds qui marquent la transition entre deux métamères successifs selon un nombre et une orientation relative qui déterminent ainsi leur phyllotaxie. La portion d'axe formée entre chaque nœud est appelée un entre-nœud (**Figure 3B**). Chaque feuille porte à sa base un bourgeon axillaire ou latéral, éventuellement accompagné d'un nombre spécifique de bourgeons collatéraux. Ces bourgeons ont la même configuration fondamentale que le bourgeon apical, avec les mêmes schémas d'organogénèse et d'extension.

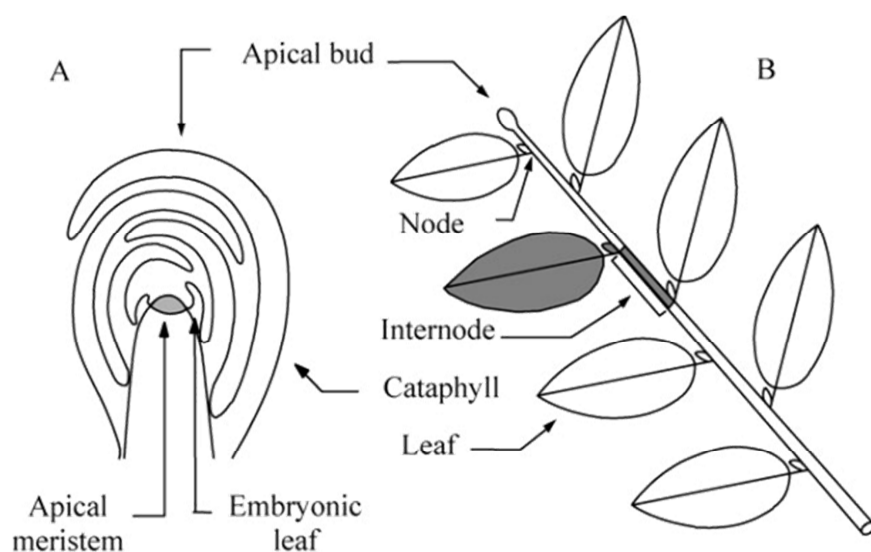


Figure 3. Schéma de l'organisation de : (A) l'apex ; (B) d'une tige feuillée (extraite de Barthélémy and Caraglio, 2007 ; d'après White, 1979 ; Caraglio and Barthélémy, 1997).

A ce niveau, deux aspects sont considérés pour caractériser le mode de croissance en longueur des axes.

(1) Les modes de croissance « indéterminée » ou « déterminée », qui se traduisent respectivement par **(1.i)** la capacité du méristème apical à maintenir un potentiel de croissance « indéfiniment », *i.e.*, l'arrêt de croissance définitif de l'axe ne s'observe que sous certaines conditions, pour des causes exogènes uniquement ; et au contraire **(1.ii)** sa transformation irréversible, florale le plus souvent, ou sa mort par abscission ou avortement pour des causes endogènes, *i.e.* qu'en conditions non limitantes, l'arrêt de croissance définitif de l'axe résulte et ou s'accompagne de processus permettant la transformation qui sont déterminés génétiquement et qui s'expriment en réponse à l'environnement et l'ontogénèse de l'axe.

(2) Les croissances « rythmique » ou « continue », qui se traduisent respectivement par **(2.i)** des variations d'activité de l'organogénèse et de croissance d'origine endogène dans l'édification de l'axe conduisant à la formation d'unité de croissances ; et **(2.ii)** un allongement continu de l'axe avec un plastochrone apparent² constant, pouvant cependant présenter des variations d'origine exogène aboutissant à la formation d'unités de croissance induite par la variation des conditions environnementales. Dans les deux cas, la transition entre deux unités de croissance peut être identifiée par des marqueurs morphologiques, très souvent par une zone d'entre-nœuds courts et une hétérophyllie (des feuilles éventuellement modifiées en écailles, ou à limbes avortées).

1.a.ii. Profil de ramification des axes

Le profil de ramification d'un axe se caractérise selon trois aspects, **(1)** la position de la ramification, **(2)** le système ramifié édifié, et **(3)** le délai entre la formation d'un bourgeon et son débourrement donnant une ramification.

(1.i) Certaines espèces (modèles de Corner et de Holtum), ou certains types d'axes ne se ramifient jamais. Au contraire, et le plus souvent, **(1.ii)** les axes sont capables de former des ramifications, *i.e.* se dupliquer en structures de même nature fondamentale : à partir des méristèmes axillaires² d'un axe noté d'ordre de ramification n (O_n), former des axes notés d'ordre de ramification $n + 1$ (O_{n+1}), eux-mêmes composés d'un méristème apical produisant des métamères.

(2) Dans le cas où la ramification est possible, certains méristèmes axillaires, selon l'endroit où ils se localisent sur les axes, et selon la croissance de l'axe porteur, forment de manière

². L'intervalle de temps séparant deux apparitions macroscopiques des feuilles est appelé phyllochrone ou encore plastochrone apparent, l'intervalle réel étant appelé plastochrone (réel).

systematique ou non des ramifications³. **(2.i)** Si l'axe porteur a une croissance indéfinie, il ne se ramifie pas en zone apicale et sera qualifié de monopode. Au contraire, **(2.ii)** si l'axe porteur a une croissance définie, sa transformation florale dans le cas le plus courant entraîne une perte de dominance de l'apex de l'axe permettant la formation de ramifications issues de méristèmes axillaires sous-jacents. Cet axe est alors qualifié de sympode mono-, di-, tri- ou polychasial selon le nombre de ramifications sous-jacentes à son apex. Sous certaines configurations, cet embranchement répété peut aboutir à des portions suffisamment linéaires pouvant être considérées comme formant un « axe » sous une définition plus large, qu'on qualifie parfois de « pseudomonopode ». En effet, l'« axe » résultant est édifié non pas par un unique méristème apical, mais progressivement par des ramifications successives issues chacune d'un méristème axillaire. Dans les deux cas, d'autres ramifications latérales vont pouvoir aussi se former en position plus distale, dans les zones basale, médiane, ou apicale sur l'axe.

(3) Une plus ou moins longue période peut entrecouper la formation d'un méristème axillaire et son débourement donnant une ramification. On distingue alors **(3.i)** les ramifications immédiates qui se forment quasi immédiatement après la formation des zones méristématiques latérales ; **(3.ii)** de celles qualifiées de différées qui se forment après une phase de latence de quelques semaines à plusieurs années, et pendant laquelle les zones méristématiques en question sont souvent renfermées dans des bourgeons protecteurs. Comme pour détecter une croissance rythmique, la présence de marqueurs morphologiques à la base des ramifications peut souvent aider à repérer le mode de ramification différé ou immédiat⁴.

Enfin, pour plus de précisions, d'autres termes aux définitions plus ou moins équivoques selon les auteurs peuvent être nécessaires et sont utilisés pour distinguer la configuration préférentielle ou la vigueur de ces ramifications relativement à leur axe porteur : en fonction de leur position le long de l'axe ; et si l'axe est plutôt incliné, en fonction des faces où sont les méristèmes axillaires dont les ramifications sont issues.

³ Pour être plus précis, la ramification peut aussi provenir du méristème apical, qui par division donne naissance à deux ou plusieurs ramifications, dites respectivement « dichotomiques » ou « polytomiques ». C'est un phénomène fréquent chez les mousses et les fougères, mais plutôt rare chez les plantes à graines. Cela concerne surtout des « herbes géantes tropicales » (angiospermes monocotylédones), des palmiers entre-autres, et amène à la définition du modèle architectural de Schoute (Hallé et al. 2004). Cela reste néanmoins rare chez les autres végétaux supérieurs. D'après Barthélemy et Caraglio (2007), le phénomène a été observé chez quelques angiospermes dicotylédones (ex. le buisson à papier : *Edgeworthia chrysantha* Lindl.) mais pas encore chez les conifères et autres gymnospermes.

⁴ Comme conseillé dans la revue de Barthélemy et Caraglio (2007), les termes ambigus (3.i) « sylleptique » et (3.ii) « proleptique » pour décrire respectivement ces deux modes ne sont pas utilisés.

1.a.iii. Position de la sexualité

La position de la sexualité sur les axes est un critère qui rend compte de la position des structures reproductrices : les fleurs et les inflorescences considérées comme un tout. A cause de l'incidence de ces structures sur le mode de ramification et de croissance de l'axe qui les porte, leur position est qualifiée de latérale ou de terminale selon qu'elles résultent de la transformation florale de méristèmes axillaires ou de méristèmes apicaux respectivement.

1.a.iv. Différenciation morphologique des axes

Sur la plante, différentes catégories d'axes sont repérables par leur morphologie, leurs fonctions et leur organisation. Ils se différencient notamment par un certain nombre de caractéristiques morphologiques et géométriques associées à ces différents états : leur orientation dans l'espace ; orthotrope (vertical), plagiotrope (horizontal à incliné) ou mixte ; leur phyllotaxie, leur mode de croissance et de ramification, l'expression de la sexualité, leur croissance primaire et secondaire, etc. C'est en relevant un nombre important de caractéristiques morphologiques (critères architecturaux classiques et sous-variantes), de mesures morphométriques (longueur, diamètre, surface foliaire, etc.), et éventuellement d'observations histologiques sur un nombre suffisant de plantes à différents stades de développement qu'il peut être possible de discerner des catégories pertinentes d'un point de vue structural et fonctionnel, et en lien avec l'activité et l'expression des méristèmes.

Par exemple, le modèle architectural de Rauh décrit des plantes comme le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) ou le coulequin (*Cecropia peltata* L.) ayant : une tige primaire (O1) orthotrope à croissance indéfinie avec une phyllotaxie spiralée, qui assure la fonction de tronc au développement monopodial caractérisé par une alternance de zones ramifiées et non ramifiées (profil de ramification rythmique); qui donne des O2 à croissance indéfinie également, orthotropes avec affaissement secondaire, portant des structures reproductrices latéralement et sans effet sur leur croissance ; et qui donnent également des monopodes plus ou moins hypotones (insertion sur la face inférieure du porteur), qui assurent la photosynthèse et la reproduction (Bell 1991, Hallé 2004, Hallé et al. 1978).

1.b. Plasticité phénotypique de l'architecture, effets du génotype et de l'environnement

Les critères architecturaux précédemment cités peuvent s'exprimer théoriquement selon un nombre très important de combinaisons différentes. Pour autant, seul un nombre restreint de combinaisons : les 23 modèles architecturaux, certes selon un continuum avec certaines spécificités et nuances parfois ; sont observés dans la nature autant chez des espèces arborescentes qu'herbacées, de climat tempéré ou tropical, phylogénétiquement proches ou

éloignés. Ces modèles sont basés sur des critères qualitatifs déterminés génétiquement, et leur expression ne montre des fluctuations que sous certaines conditions de stress et de perturbations extrêmes. Par ailleurs, le développement du système reproducteur n'est que partiellement pris en compte. Ainsi, les modèles architecturaux ne proposent qu'une certaine conformation du développement architectural d'une plante : la plus probable biologiquement dans un environnement favorable et relativement stable (Barthélémy and Caraglio 2007).

Pour autant, le phénotype des plantes à un instant donné et dans le temps est le résultat de l'expression d'une multitude d'autres caractères qui n'interviennent pas dans la définition des modèles mais qui sont tout autant caractéristiques et déterminants pour comprendre le développement d'une plante (Godin et al. 1999, Sachs and Novoplansky 1995). Selon leur « plasticité » phénotypique, une notion décrite par Gause (1947) pour nuancer le « tout génétique », ces caractères peuvent s'exprimer de manière plus ou moins variable qualitativement et ou quantitativement en réaction à certains paramètres environnementaux exogènes : on parle de la « norme de réaction » des caractères pour traduire cette éventuelle évolution (DeWitt and Scheiner 2004, Gabriel 2005, Scheiner 1993, Schlichting 1986, Via and Lande 1985). Ainsi pour un génotype donné on peut s'intéresser à détecter quels critères présentent des fluctuations face à des gradients environnementaux, et si différents génotypes présentent des réactions différentes vis-à-vis de ces gradients : on cherche donc à différencier pour les caractères ceux qui sont déterminés par l'environnement ou par le génotype, ou les deux et dans quelles proportions (par l'étude de l'héritabilité des caractères), et la présence d'interactions entre ces deux composantes dans les « temps » de la plante : chronologique, physiologique, et ontogénique (Crespel et al. 2014, DeWitt and Scheiner 2004, Galopin 2012, Galopin et al. 2010b, Via and Lande 1985).

Plus largement, même dans un environnement a priori homogène tel que pour un lot de culture d'un même génotype dans un module sous serre avec le contrôle de nombreux paramètres, il faut aussi considérer la variabilité phénotypique observée (Demotes-Mainard et al. 2013a). Ce phénomène correspond à l'expression de la plasticité phénotypique, induite par des micro-conditions locales perçues à l'échelle de la plante. De nombreuses micro-variations d'origines climatiques et pédologiques peuvent entrer en jeu. Chez les buissons ligneux en particulier, quelques études ont souligné la forte plasticité architecturale de différentes espèces, notamment face aux conditions lumineuses formées par la canopée des plantes présentes dans leur environnement (Charles-Dominique 2012, Charles-Dominique et al. 2010, 2012, 2015, Guzmán & Cordero 2016, Kawamura & Takeda 2002, 2004, Pearcy et al. 2005, Sterck et al. 2013, Valladares et al. 2000).

1.c. Concepts d'unité architecturale et de répétition

Couplées à la plasticité de leur expression, les nombreuses nuances des modalités des processus de croissance, de ramification, d'expression de la sexualité, et de différenciation morphologique observées au sein du règne végétal font que les modèles architecturaux, tels que proposés, ne sont pas suffisants pour rendre compte précisément de l'architecture des individus d'un génotype donné et de la différencier de ceux de génotypes différents. Ainsi pour un génotype donné, l'expression spécifique du modèle architectural auquel est rattachée son espèce (voire les rangs taxonomiques inférieurs) est nommée l'« unité architecturale » (Barthélémy 1991), premièrement décrite sous les termes de « diagramme architectural » par Edelin en 1977.

Représentée sous forme de diagramme, l'unité architecturale décrit la composition de l'architecture d'un génotype donné au travers de catégories hiérarchisées d'axes dont la structure et la fonction diffèrent sensiblement, selon un nombre défini et relativement restreint. Par de nombreuses observations, chacune de ces catégories peut se formaliser par des ensembles de caractéristiques qui schématisent l'organisation fondamentale du génotype étudié au cours de son ontogénèse selon un motif architectural élémentaire spécifique. Ces ensembles incluent d'une part les critères architecturaux discutés préalablement, mais aussi de nombreux autres en nombre non limité. Ainsi, les variables de description utilisées se doivent d'être les plus exhaustives possibles sur les différentes échelles d'observation au cours des différentes phases de développement, du semis à la sénescence des individus, et avec la même précision pour chaque catégorie.

Pour expliquer le cycle de vie d'une plante, on adjoint à ce premier concept, celui de « répétition » proposé par Oldeman (1974) pour décrire le processus par lequel la majorité des espèces sont capables de dupliquer leur architecture élémentaire. Premièrement vue comme un phénomène opportuniste et non prévisible, en réponse à une modification soudaine de l'environnement : par l'augmentation des ressources locales (la répétition adaptative), ou en réponse à un événement traumatique sur la structure de la plante (la répétition traumatique) ; différentes études démontrèrent que ce processus pouvait également être inhérent au développement de la plante. Il apparaît notamment après un certain niveau de différenciation : lorsque l'unité architecturale s'est complètement exprimée. Ainsi, on distingue les axes issus d'un processus de ramification séquentielle qui poursuivent l'expression spécifique de l'unité architecturale ; et ceux formant les « complexes répétitifs » qui répètent partiellement ou totalement cette unité architecturale. La répétition s'exprime à

partir de méristèmes axillaires (latents ou non) et apicaux, mais peut aussi résulter de la dédifférenciation de tissus aboutissant à des méristèmes adventifs. Ces deux concepts ont montré notamment leur pertinence pour expliquer et comprendre le cycle de vie des arbres avec la formation de leur couronne selon 10 phases, du semis à la mort de l'individu (Fay 2002, Ishii et al. 2007, Raimbault & Tanguy 1993).

D'un point de vue plus générique, Costes et al. (2014) présentent les caractéristiques d'une réitération comme « un axe ayant une longueur similaire ou plus importante que son axe porteur, et qui reproduit totalement ou partiellement le système ramifié dont il est issu ». En considérant les axes basaux formant la souche des espèces buissonnantes comme des réitérations qui répètent une unité architecturale, ces deux concepts sont-ils aussi valables pour transposer le cycle de vie des arbres à celui des buissons ? A ce jour, bien que certaines études relativement récentes mettent en avant la plasticité architecturale particulière des buissons (Charles-Dominique 2012, Charles-Dominique et al. 2010), leur développement au cours de leur cycle de vie reste peu étudié, et par défaut transposé sur celui des arbres. Des études doivent alors être conduites pour évaluer et répondre à cette hypothèse plus spécifique (com. pers. G. Galopin & Y. Caraglio).

1.d. Méthode et apport de l'analyse architecturale qualitative et quantitative par digitalisation 3D avec contact dans un champ électromagnétique

L'intégration de ses différentes sources de variabilité à l'aide d'outils de mesures et informatiques récents permettant la description fine de l'architecture et sa modélisation pour tester différentes hypothèses a été notamment possible grâce à la digitalisation 3D des structures végétales (Godin 2000). Sur la base de la décomposition modulaire des axes proposée pour la description qualitative de l'architecture, Godin et Caraglio (1998) ont proposé un encodage formel des entités selon des graphes arborescents multi-échelles (MTG ou *multiscale tree graphs*) (**Figure 4A**). Ce formalisme permet de décrire et d'intégrer la structure multi-échelle des végétaux avec les différentes entités structurelles plus ou moins détaillées qui les composent (métamères, unités de croissance, axes), les relations topologiques qui les rassemblent et leur géométrie dans l'espace (**Figure 4**) (Godin & Caraglio 1998, Godin et al. 1999). Pour obtenir les mesures nécessaires, en particulier géométriques et morphométriques, différentes méthodes plus ou moins récentes ont été proposées (Rosell & Sanz 2012). La plus courante et la plus précise actuellement reste encore la digitalisation en 3D par contact à l'aide d'un champ électromagnétique (Godin et al. 1999, Sinoquet & Rivet 1997, Sinoquet et al. 1997), comme le permet notamment le logiciel PiafDigit (Donès et al.

2006). Ce logiciel couplé à un digitaliseur 3D numérique composé d'un émetteur et d'un récepteur électromagnétique (3SPACE® FASTRAK®, Polhemus Inc.) permet ainsi l'encodage de l'architecture en MTG ainsi qu'une visualisation sur le moniteur en 3D (**Figure 4B**) et en temps réel du graphe en construction, et enfin son exportation vers des logiciels complémentaires pour leur analyse (Chambelland et al. 2008, Li-Marchetti et al. 2015, Surový et al. 2011).

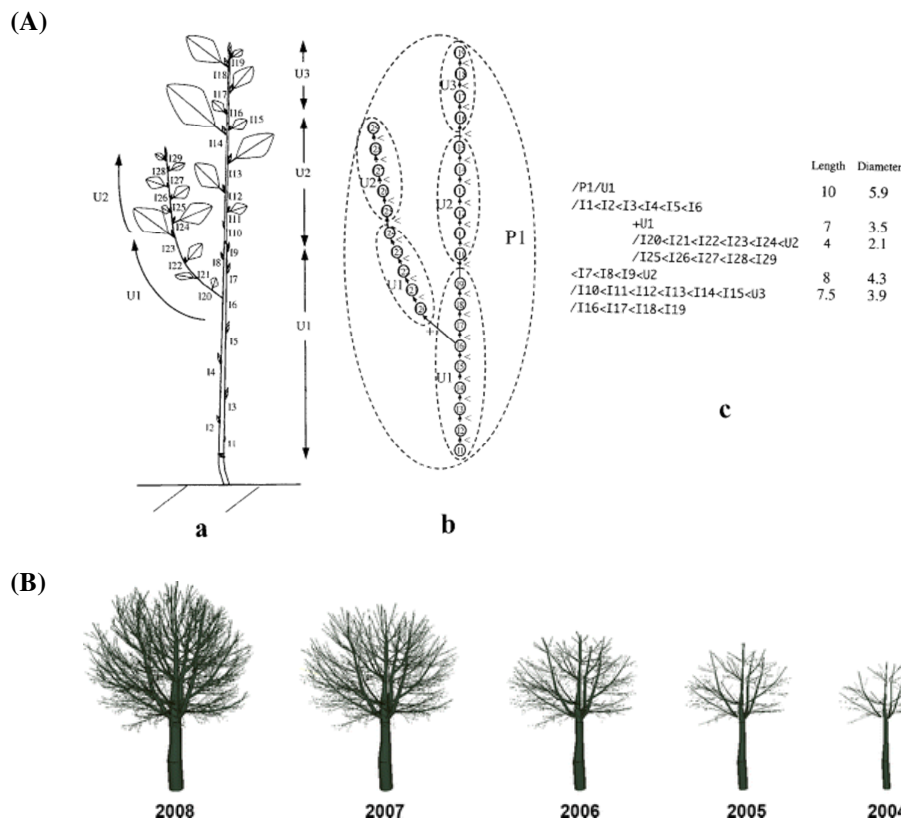


Figure 4. Encodage de l'architecture en graphe arborescent multi-échelle (MTG) et reconstruction. (A) Schéma de l'encodage multi-échelle de l'architecture d'une plante avec (a) la décomposition des éléments selon l'échelle d'étude (les métamères, les unités de croissance, les axes, la plante), (b) la représentation MTG graphique des éléments avec leurs relations topologiques, (c) l'encodage d'un MTG en une chaîne de caractères organisés pour le report de caractéristiques supplémentaires, ici longueur et diamètre des unités de croissance, on pourrait ajouter la présence ou non de feuilles, leur longueur, le stade phénologique des axes (végétatif, floral, etc.), etc. (extrait de Godin 2000) ; (B) Reconstruction 3D de la croissance d'un pin parasol (*Pinus pinea* L.) sur 5 ans à partir de mesures acquises par digitalisation 3D avec contact dans un champ électromagnétique permettant d'intégrer directement les coordonnées spatiales (x ; y ; z) pour chaque éléments digitalisés dans le MTG (extraite de Surový et al. 2011).

Cette méthode utilise un pointeur raccordé à un récepteur dirigé manuellement par un opérateur qui l'appose au niveau des éléments de la plante (contact avec la plante). Le repérage de leurs coordonnées spatiales se fait alors par triangulation du pointeur dans un champ électromagnétique envoyé par un émetteur. Un second opérateur sur un ordinateur recevant les coordonnées spatiales, peut être nécessaire afin d'assigner le type d'élément en

cours de repérage, la topologie, et renseigner éventuellement d'autres caractéristiques qualitatives et quantitatives (ex. : diamètre du métamère, état de la fleur, présence d'épines, de pigments, etc.) à l'aide des fonctions du logiciel. Bien que relativement chronophage selon le nombre et la taille des structures et l'exhaustivité des mesures, c'est la seule méthode qui à ce jour reste la plus flexible et qui permet de coder potentiellement la totalité de la plante avec ses différentes parties et d'en obtenir une visualisation numérique en 3D fiable avec un sens biologique (Turnbull 2005).

Pour l'acquisition et l'analyse de ces données si particulières, AMAPMod fut l'un des premiers logiciels proposés (Godin et al. 1997, Pradal et al. 2008). Cette démarche pour l'analyse architecturale (digitalisation 3D magnétique et codage MTG) fut notamment testée et validée pour sa pertinence sur plusieurs espèces et à différentes échelles d'études, dont les exemples multiples chez le pommier pour l'étude de la production de fruits, l'interception lumineuse du couvert végétal et les relations trophiques entre organes (Costes et al. 2006, 1999, Godin et al. 1999, Pallas et al. 2016, Saudreau et al. 2009, Sinoquet et al. 2007) ; la distribution des unités de croissance dans la couronne du noyer (Godin et al. 1999) ; la dimension fractale du feuillage, l'architecture et les relations trophiques chez le pêcher (Allen et al. 2005, Boudon et al. 2006) ; la reconstruction de la couronne et l'étude de sa croissance chez le pin parasol (Surový et al. 2011) ; sur des herbacées avec par exemple l'étude de l'interception lumineuse chez la luzerne cultivée (Louarn et al. 2012) ; ou encore pour l'étude du développement du système racinaire, appliquée sur des plantules de chêne par exemple (Tamasi et al. 2005).

En parallèle, de nombreux outils pour la modélisation des plantes virtuelles ont vu le jour. De manière triviale pour agrémenter des applications multimédias, mais surtout pour simuler, formuler et tester scientifiquement *in silico* des hypothèses selon différents scénarii de divers domaines économiquement importants comme l'agroforesterie et l'agriculture. Ces outils de modélisation présentent un potentiel considérable pour l'étude du rendement et de la qualité des produits issus des productions végétales spécialisées en général (Allen et al. 2005, Costes et al. 2008, De Visser et al. 2014, Heuvelink et al. 2004, Prusinkiewicz 1998, Vos et al. 2010) ; et quelques productions ornementales plus précisément : en particulier pour la production de roses (Buck-Sorlin et al. 2011) et de chrysanthèmes en pot (Kang et al. 2012). En outre, avec la grammaire mise au point par Lindenmayer (L-système) permettant de décrire les règles de production d'éléments répétitifs (Prusinkiewicz 1998), l'intégration de paramètres plus transversaux (cellulaires, génétiques, physiologiques, biochimiques, etc.), et d'outils informatiques de plus en plus performants ; cette approche a permis de poser les

bases conceptuelles de la modélisation des plantes virtuelles avec une vision intégrative de leur biologie face à l'environnement, formalisée de nos jours dans la littérature sous une discipline à part entière ayant pour sigle FSPM, pour *Functional-Structural Plant Modeling* : la modélisation fonctionnelle et structurale des plantes (Vos et al. 2010). On peut citer par exemple les logiciels L-studio (Karwowski & Prusinkiewicz 2004, Prusinkiewicz 1998) puis maintenant GroImp pour la simulation de croissance, et le projet OpenAlea qui reprend le flambeau d'AMAPMod avec une multitude d'outils pour la modélisation et l'analyse architecturale (Pradal et al. 2008, Vos et al. 2010).

L'utilisation de la digitalisation 3D par contact en tant que méthode de phénotypage de l'architecture des plantes permettant d'implémenter finement ces modèles reste relativement longue et représente un facteur limitant (Crespel et al. 2013, Fahlgren et al. 2015, Fiorani & Schurr 2013, Fourcaud et al. 2008, Rosell & Sanz 2012). C'est pourquoi, la recherche de méthodes simplifiées pour le phénotypage de l'architecture représente un enjeu majeur pour cette discipline scientifique, et les industries qui en découlent. De nouvelles approches, avec ou sans tentative de reconstruction 3D, se sont développées avec l'apparition récente de technologies reposant sur la vision informatisée via différents capteurs sans contact (ex. imageur RGB classique, émetteur-récepteur de lumière structurée, stéréoscopie, etc.) pour quantifier certains paramètres architecturaux à l'échelle de la plante (Chaivivatrakul et al. 2014, Chéné et al. 2012, Gongal et al. 2015, Granier et al. 2006, Harmsen & Koenderink 2009, Karkee et al. 2014, Lou et al. 2014a, 2014b, Omasa et al. 2007, Paulus et al. 2014, Phattaralerphong & Sinoquet 2005, Rosell & Sanz 2012, Shlyakhter et al. 2001, Sozzani et al. 2014, Xu et al. 2013).

Ces méthodes présentent un intérêt certain pour le phénotypage à haut-débit. Néanmoins, il faut noter que seules des architectures très simples peuvent être abordées et « décortiquées » sans peine pour le moment (type rosette et mono-tige). Pour des architectures plus complexes avec de nombreux recouvrements partiels ou complets, ces méthodes permettent de compter et mesurer des éléments suffisamment discernables mais avec un certain taux d'erreur. De plus, les dispositifs nécessaires peuvent représenter un coût non négligeable et nécessitent pour la plupart des connaissances spécifiques et avancées. En somme, pour être capable d'identifier et de décomposer de manière réaliste l'ensemble des éléments architecturaux qui constituent une plante avant de pouvoir un jour égaler la précision, le potentiel et la flexibilité quasi illimitée que permet la digitalisation 3D avec contact réalisée par un opérateur humain, ces méthodes doivent encore être substantiellement améliorées.

1.e. L'architecture du rosier

Le rosier, notamment pour la production de fleurs coupées, a été très étudié à l'échelle de la tige fleurie. Ainsi, la morphologie des tiges, la croissance, les processus de ramification et de floraison sont très bien documentés, en particulier au travers d'études sur de nombreux cultivars remontants (Roberts et al. 2003). Néanmoins, la bibliographie traitant de l'analyse architecturale globale pour comprendre le développement de cette espèce en relation avec son apparence visuelle en tant que plante d'ornement est plus pauvre (Charles-Dominique 2012, Charles-Dominique et al. 2010, Hallé 2004, Morel et al. 2009).

1.e.i. La fleur

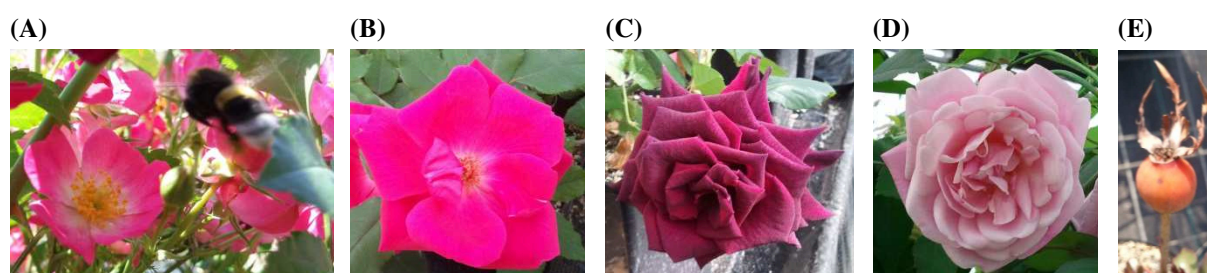


Figure 5. Apparence de la fleur du rosier : (A) une rose à cinq pétales attirant une abeille ; des roses semi-doubles à très doubles aux coloris, formes et dimensions différentes: (B) 'Radrazz' Knock Out[®]; (C) 'Meidebenne' Black Baccara[®]; (D) 'Old blush' ; et évolution en un cynorhodon : (E) 'Radrazz' (2 sépales sur 5 retirés) (M. Garbez).

La structure reproductrice en elle-même (**Figure 5**) se compose originellement de 5 sépales libres, 5 pétales libres et les étamines sont souvent en multiple de 5 (caractéristiques des *Rosaceae*), comme pour l'églantier (*R. canina* L.). Cependant, il est fréquent d'observer plus de 5 pétales par fleur (Bhattacharyya & Johri 1998). Ces pétales surnuméraires proviennent de la transformation d'étamines, ce phénomène s'appelle la duplication florale, un trait particulièrement considéré dans la sélection des cultivars. On trouve ainsi des variétés de roses à 5 pétales contre d'autres en ayant parfois près d'une centaine, d'où l'utilisation parfois de catégories (limites et classes variables selon les auteurs) comme simple ; semi-double, double ; très double.

On caractérise aussi les fleurs sur leur parfum, leur forme et leur diamètre (Bendahmane et al. 2013, Crespel et al. 2002, Debener 1999, Gudin 2000, Guterman et al. 2002, Hibrand-Saint Oyant et al. 2008, Meynet 2001, Roman et al. 2015, Tarbouriech 2001). Elles présentent également une large palette de coloris et de motifs allant du blanc au pourpre très sombre presque noir, en passant par le jaune, le bleu, et le vert (**Figure 5A-D**). Ces couleurs sont régies par la biosynthèse de pigments dont la diversité est fortement exploitée et étudiée (Azadi et al. 2016, Grotewold 2006, Gudin 2000, Ogata et al. 2005). Après pollinisation par

des insectes se nourrissant de pollen et de nectar, le réceptacle floral devient un cynorhodon (**Figure 5E**). C'est un faux fruit charnu typique du genre, aux dimensions, teintes, textures, et formes variables selon les génotypes, également utilisé pour les propriétés alimentaires, nutritives, et médicinales qu'il présente. Il renferme des akènes : les vrais fruits sur le plan botanique, utilisés comme semis (Gudin 2000, Günes & Dölek 2010, Patel 2013).

1.e.ii. L'appareil végétatif

La plupart des variétés de rosiers les plus cultivées souffrent d'une forte dépression de consanguinité après autofécondation (Debener & Mattiesch 1999). Ainsi le plus souvent la reproduction sexuée, plutôt utilisée pour l'hybridation, ne permet pas de multiplier de manière fiable le phénotype parental, ou même d'aboutir à une descendance viable.

Par conséquent, pour étudier le rosier, afin d'obtenir rapidement les lots de plantes les plus uniformes, le clonage par bouturage d'un métamère individuel sur un pied mère est la méthode privilégiée. Pour des études focalisées sur la tige, le matériel végétal est fréquemment obtenu en stimulant le développement de tiges de renouvellement en position basale par l'arcure et la taille des axes (Bredmose & Hansen 1995, Crespel et al. 2014, 2013, Iwata et al. 2012, Kawamura et al. 2011, 2014, 2015, Le Bris et al. 1998, Morel et al. 2009, Zieslin & Mor 1981a).

Une tige de rosier qui se développe dans des conditions favorables est caractérisée par une croissance continue. A l'exception des tiges primaires des variétés non remontantes, la croissance est définie par une floraison en position terminale (Costes et al. 2014, Iwata et al. 2012, Le Bris 1999, Morel et al. 2009). Les tiges florales au profil foliaire le plus complet sont composées (**Figure 6**) de la base vers l'extrémité : **(i)** d'une courte portion d'entre-nœuds courts à feuilles réduites à des écailles ou des cicatrices foliaires ; **(ii)** d'une longue portion de métamères à feuilles vraies dont le nombre de folioles et la longueur des entre-nœuds présentent un gradient le long de l'axe selon trois zones (augmentation, maximum, puis diminution) ; **(iii)** des métamères plus courts portant des feuilles réduites de type bractée ; et **(iv)** d'une fleur soutenue par un pédoncule floral. La phyllotaxie est alterne et spiralée, les feuilles vraies possèdent un rachis avec une paire de stipules adnées, et des folioles en nombre impair. Seules quelques formes primitives possèdent encore des feuilles simples. Les feuilles sont caduques, mais présentent de nombreuses déclinaisons d'apparence selon les génotypes (nombre maximum de folioles, dimensions, forme, couleur, brillance, etc.) (Gudin 2000, Meynet 2001, Olsson et al. 2000, Tarbouriech 2001).

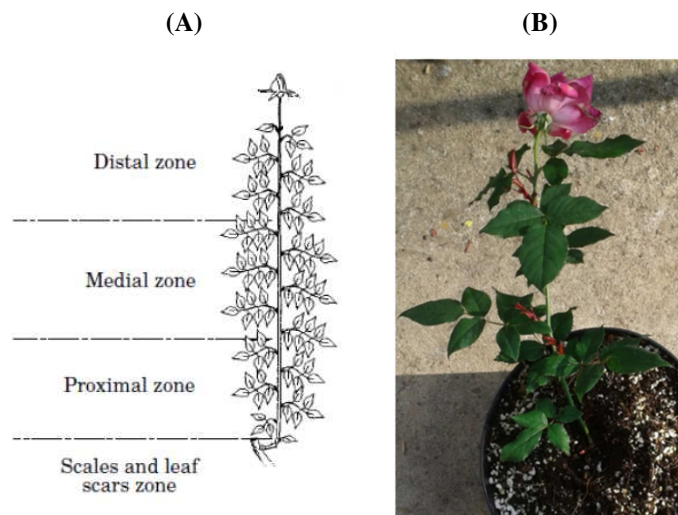


Figure 6. Morphologie et phyllotaxie d'une tige primaire de rosier fleuri : (A) schéma à plat d'une tige de renouvellement obtenue après la taille de 'Ruidriko' avec la distinction d'une zone d'écaillés et de cicatrices foliaires, et trois zones feuillées, proximale et distale avec trois ou cinq folioles, et la zone médiane (m) avec des feuilles à sept folioles, le nombre maximal chez ce cultivar (extraite et simplifiée de Le Bris et al. 1998) ; (B) Tige primaire fleurie de 'Radrazz' obtenue 86 jours après le bouturage d'un métamère à 5-7 folioles (M. Garbez ; équipe INEM, UMR IRHS).

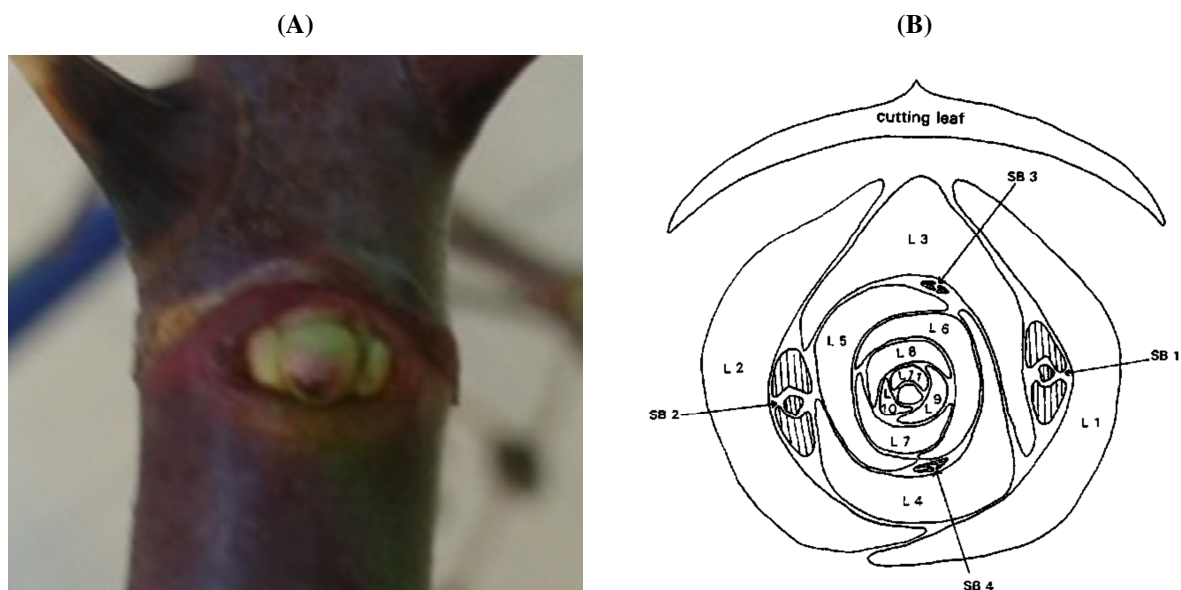


Figure 7. Triplet de bourgeons sur un métamère de rosier : (A) un nœud de 'Radrazz', le bourgeon axillaire en position centrale beaucoup plus gros que ses deux bourgeons collatéraux/secondaires les plus basaux (M. Garbez) ; (B) schéma de coupe transversale d'un bourgeon axillaire de 'Sweet Promise' montrant les feuilles embryonnaires (L), les bourgeons secondaires (SB) dont les plus basaux SB1 et SB2 visibles en A, pour lesquels on distingue pour chacun un méristème apical et deux feuilles embryonnaires (éléments hachurés), deux autres bourgeons plus apicaux et non visibles à l'œil nu, (SB3 et SB4), le méristème apical du bourgeon axillaire formant l'îlot central (extrait de Marcelis-van Acker 1993).

Sur chaque métamère le bourgeon axillaire est accompagné de deux bourgeons dits « collatéraux » ou « secondaires » opposés, plus ou moins détectables à l'œil nu selon leur position le long des tiges, et qu'on appelle parfois un « triplet » ou « complexe trigemmaire » (Figure 7A). Par microscopie, une coupe transversale du bourgeon axillaire montre que ces deux bourgeons secondaires seront les plus basaux sur la future tige, que le bourgeon axillaire en forme aussi d'autres, non visibles à l'œil nu, à l'aisselle des *primordia foliae* (Figure 7B), et qui constitueront par la suite les futurs bourgeons axillaires de la tige (Le Bris 1999,

Marcelis-van Acker 1993). Sur le plan architectural, ce triplet de bourgeons est un réel système ramifié contracté, différents des bourgeons dits « surnuméraires » ou « accessoires » (Barthélémy & Caraglio 2007, com. pers. Y. Caraglio).

Sur un plan plus macroscopique, des facteurs génétiques contrôlant la densité et l'apparence des aiguillons (**Figure 8**) et des acicules qui ornent les différents organes ont été mis en évidence. En partie à l'origine des nombreux ports et dimensions observés (**Figure 9**), il en est de même pour la croissance primaire et secondaire qui détermine le nombre de métamères que produisent les axes, leur extension, et leur diamètre (Crespel et al. 2002, Debener 1999, Kawamura et al. 2011, 2014, 2015, Morel et al. 2009, Yan et al. 2005).

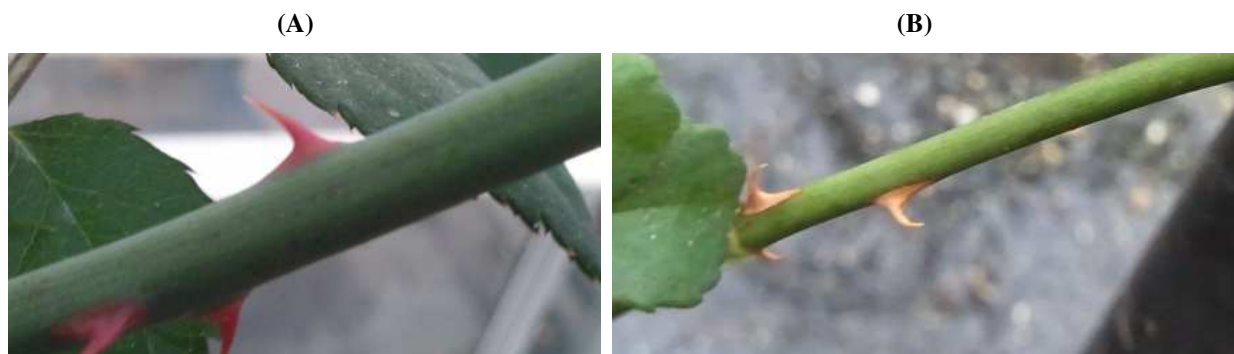


Figure 8. Différences entre des aiguillons de rosiers de géotypes différents (M. Garbez ; équipe INEM, UMR IRHS) : (A) 'Meidebenne' Black Baccara®, aiguillons acérés, relativement droits et rosés, (B) un hybride de wichurana expérimental (L. Crespel), aiguillons plus fins, recourbés et beiges.

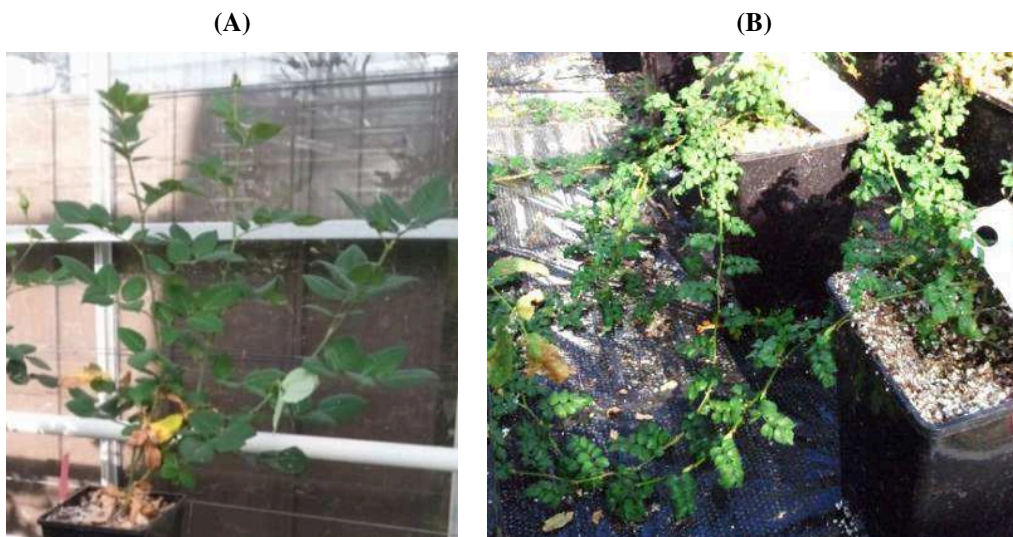


Figure 9. Port et dimensions (mesurées sur place) de deux rosiers de géotypes différents cultivés sous serre chauffée dans le même environnement (M. Garbez ; équipe INEM, UMR IRHS) : (A) 'Meidebenne' Black Baccara®, 60-70 cm de haut, 40-50 cm de large, érigé, tiges relativement courtes, droites épaisses et rigides, (B) un hybride de wichurana expérimental (L. Crespel), > 30 cm de haut, < 1 m de large, rampant, tiges très longues, fines et sarmenteuses.

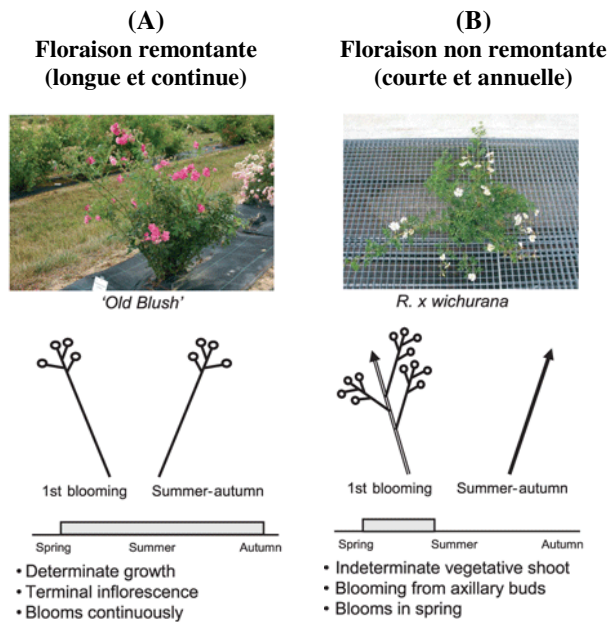


Figure 10. Les deux modes principaux de floraison chez le rosier, exemple et impact sur le développement architectural (extraite et simplifiée de Iwata et al. 2012). (A) Chez les génotypes remontants, la floraison est continue du printemps à l'automne, tous les axes fleurissent à leur extrémité, et ont donc tous une croissance déterminée. (B) Chez les génotypes non remontants il n'y a qu'une vague courte de floraison, la plante ne peut fleurir qu'une seule fois par an, entre le printemps et l'été. Les fleurs sont portées par des tiges secondaires issues de bourgeons axillaires de tiges formées l'année précédente. La tige primaire, et les tiges de renouvellement/réitérations basales qui se forment après la phase de floraison restent végétatives, et ont donc une croissance indéterminée.

Notes : Les fleurs sont représentées par des cercles. Les traits simples et doublés indiquent respectivement des axes de l'année actuelle et précédente, terminés par une flèche s'ils ont une croissance indéterminée. Les encadrés grisés indiquent les périodes de floraison.



Figure 11. Apex d'un axe avorté de 'Radrazz' (M. Garbez). Le méristème apical présente des pré-feuilles nécrosées, le bourgeon axillaire sous-jacent enfle et débouvrera certainement suite à la perte de dominance apicale.

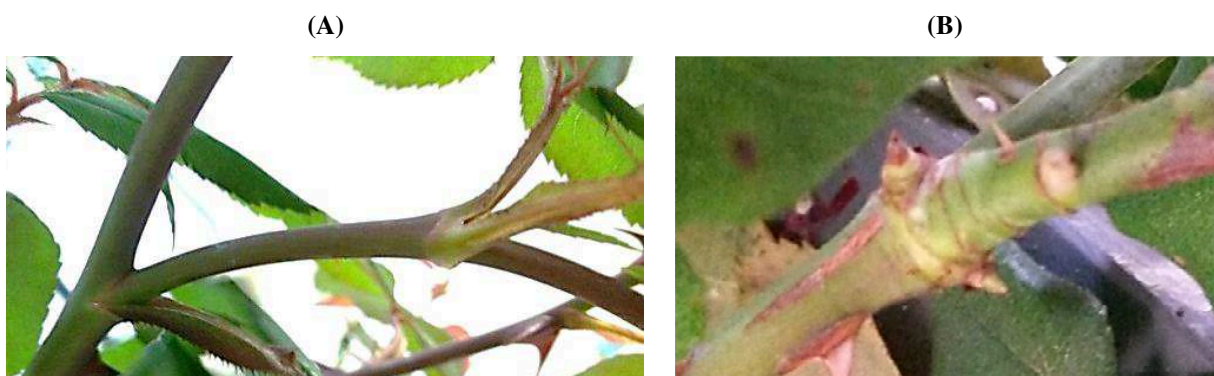


Figure 12. Dimorphisme basal des axes selon le délai avant ramification chez 'Radrazz' illustré sur les axes au profil foliaire complet (M. Garbez) : (A) une ramification immédiate en zone médiane d'un axe orthotope, l'axe « fils » ne présente aucune écaille ou cicatrice foliaire à sa base, mais un long entre-nœud : l'« hypodium » ; (B) une ramification différée en zone basale d'un axe , l'axe « fils » présente à sa base 9 écailles visibles, dont les deux plus basales avec les deux bourgeons secondaires bien visibles de part et d'autre de la base de l'axe fils, et qui formaient le triplet initial avant débourrement.

1.e.iii. Mode de floraison et ramification

Le mode d'induction florale qui détermine la remontée de floraison (**Figure 10**), et le gradient de ramification le long des axes pour le groupement plus ou moins important des fleurs, dépendent eux-aussi essentiellement de facteurs génétiques. Ces deux aspects modulent fortement le développement architectural des rosiers et donc leur apparence visuelle (Iwata et al. 2012, Kawamura et al. 2011, 2014, 2015, Roman et al. 2015).

Chez les rosiers remontants (**Figure 10A**), la croissance de tous les axes est déterminée par une floraison auto-inductible, *i.e.* tant que les conditions locales de croissance sont favorables, la floraison de tous les axes est possible (Costes et al. 2014, Iwata et al. 2012, Zieslin & Mor 1990). On peut alors observer une floraison continue qui s'étale du printemps à l'automne (**Figure 10A**). Néanmoins en cas de conditions défavorables, la transformation florale du méristème apical ne s'exprime pas et dégénère. On nomme ce phénomène l'avortement et les tiges qui en résultent sont appelées des axes avortés (**Figure 11**), ou « *blind shoots* » dans la littérature anglophone (Zieslin & Halevy 1975a, 1975b, Zieslin & Mor 1990). A la suite de la transformation florale ou de l'avortement de la tige primaire, la perte de dominance apicale permet d'activer le processus de ramification. On observe alors le débourrement de bourgeons axillaires selon un ordre d'apparition allant des plus apicaux aux plus basaux (position distale avec profil basitone). Ces débournements forment selon ce même gradient des axes de plus en plus longs qui peuvent fleurir directement et qui répètent le même schéma (Costes et al. 2014, Iwata et al. 2012, Le Bris 1999, Le Bris et al. 1998).

Suite à la floraison de la tige, la position des premiers débournements, la longueur des axes qui en résultent et leur profil foliaire déterminent la formation d'une inflorescence : une cyme plus ou moins complexe qui regroupe un nombre plus ou moins important de fleurs ; ou au contraire des fleurs très éparses bien individualisées, dites solitaires (Kawamura et al. 2011). Dans le cas des fleurs groupées, on pourra observer des axes très courts, formés par ramification immédiate en zone apicale, qui fleurissent rapidement, et qui ne portent que des feuilles modifiées (bractées) voire un faible nombre de folioles. En outre, indépendamment du regroupement des fleurs, le dimorphisme des axes se distingue aussi selon le délai de la ramification (**Figure 12**) : on repère ainsi comme pour les axes courts précédents les ramifications immédiates, puis les ramifications différées, respectivement par la présence à leur base d'un hypodium ou d'un plus ou moins grand nombre de feuilles modifiées en écailles ou limbes avortés (Costes et al. 2014, Morel et al. 2009).

Pour les variétés non remontantes (**Figure 10B**), la composition des axes n'est pas fondamentalement différente, mais en condition naturelle l'induction florale n'est pas

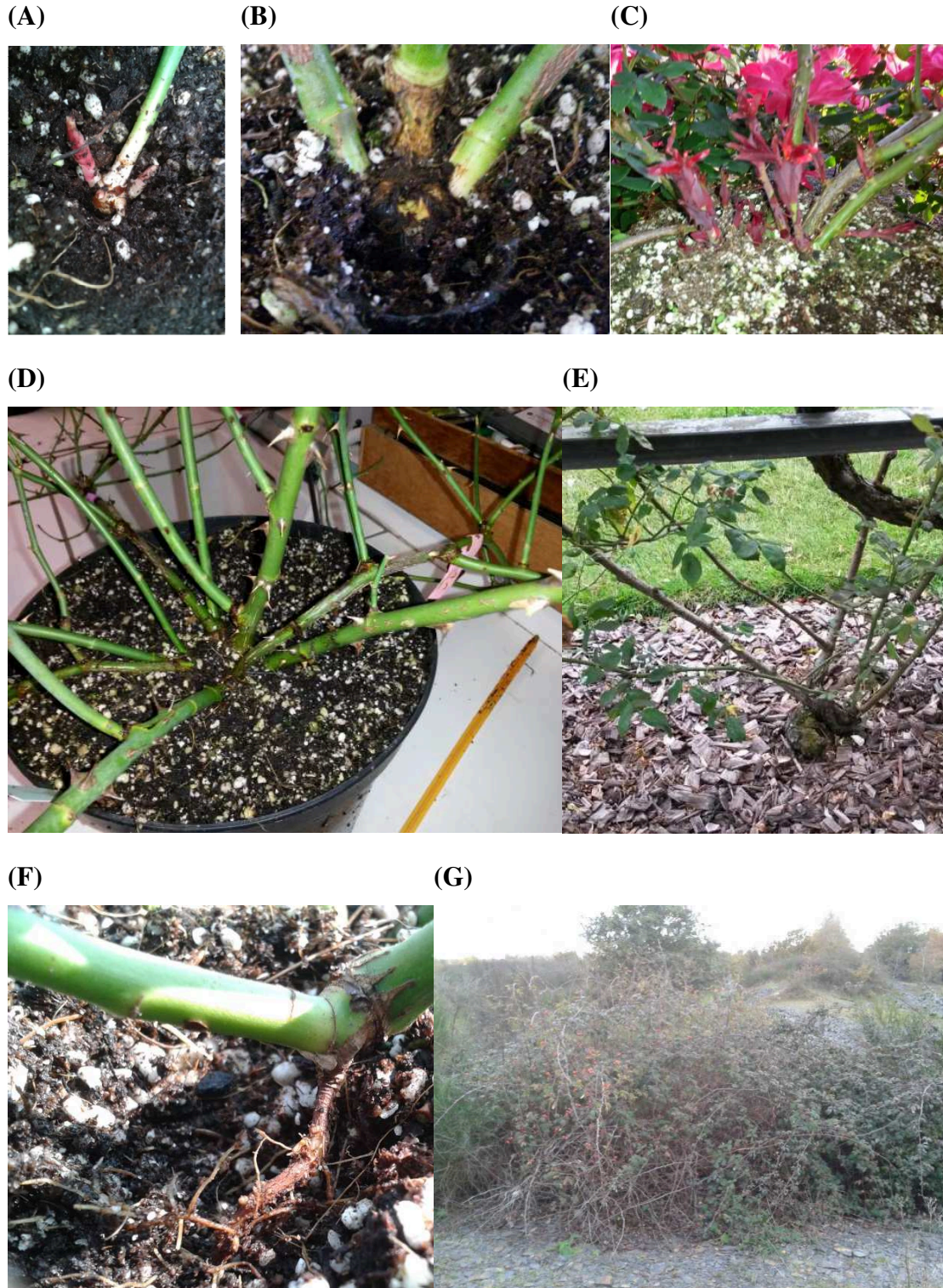


Figure 13. Développement d'un rosier sur le long terme (M. Garbez) : (A) année n, croissance de bourgeons axillaires en position proximale dans la zone écailleuse d'une tige primaire à 86 jours après bouturage en février ; (B) année n, tiges basales en hiver ; (C) année n+1, une souche l'été de quelques tiges avec de nombreux débourrements basaux ; (D) année n+2 en hiver, une souche avec de nombreuses tiges basales ; (E) une souche taillée avec quelques tiges basales ; (F) année n+2 en hiver, un métamère en position proximale d'une ramification secondaire proche du substrat qui émet naturellement des racines ; (G) un sujet mature en développement libre. **Notes :** A-D ; E ; et F sur 'Radrazz' (équipe INEM, UMR IRHS) ; F sur un *R. hybrida* non remontant et grimpant (sur le treillis d'une allée le long du Château d'Angers) ; G sur *R. canina* L. (parc des Ardoisières à Trélazé).

systematique. En effet, elle n'est possible que sous certaines conditions environnementales, en particulier grâce à la baisse des températures subie lors de la période hivernale. On remarque alors que la tige primaire présente tout d'abord une croissance indéterminée, elle ne fleurit pas et reste végétative jusqu'à l'année suivante, puis les ramifications en $n+1$ se développent en position distale essentiellement mais avec un gradient acrotone jusqu'à son extrémité. Si les conditions d'induction sont remplies certaines fleuriront en position terminale lors d'une période spécifique, souvent durant le printemps, les autres resteront végétatives jusqu'à la fin de l'année (Costes et al. 2014, Iwata et al. 2012).

1.e.iv. Sur le long terme

Indépendamment du mode de floraison, il est admis dans la littérature que la poursuite du développement chez le rosier (**Figure 13**) est assurée par la formation différée de « tiges de renouvellement » provenant de bourgeons localisés dans les zones basales et écailleuses proches du substrat, et qui se comportent comme des tiges primaires (Costes et al. 2014). Le plus souvent, pour former les rosiers et pour contrôler et dynamiser la production des fleurs coupées, on cherche notamment à favoriser ce processus avec des opérations d'arcure, de pliage, de pincement et de taille plus ou moins sévères pour provoquer le débourrement des bourgeons latéraux (axillaires ou collatéraux) les plus basaux (Zieslin & Mor 1981a). En effet, on observe assez facilement chez des sujets plus matures, buissons ou grimpants, taillés ou non, dans la nature, les parcs, ou en culture, la formation d'ensembles architecturaux plus ou moins similaires qui partent d'une souche ligneuse relativement basse qui ne forment pas un tronc individualisé. Néanmoins, la capacité à développer de nouvelles racines (rhizogenèse) sur les organes aériens, doit jouer un rôle important aussi pour la prospection horizontale de l'espace par la plante (**Figure 13F-G**). Pour autant, la rhizogenèse n'est apparemment étudiée que dans le cadre de la multiplication *in vitro*, ou pour le bouturage (Roberts et al. 2003).

1.e.v. Constance, plasticité et variabilité phénotypique de l'architecture

Chez le genre *Rosa*, les axes ont une phyllotaxie alterne spiralée, ils sont globalement caractérisés par une croissance définie par leur floraison en position terminale entraînant un mode de ramification sympodial. Les ramifications se forment d'abord de manière distale sur un axe primaire orthotrope, et leur poids entraînent le ploiement plus ou moins intense de cet axe selon leur nombre et la rigidité des tissus. Le développement ultérieur sur l'axe primaire est assuré par des « tiges de renouvellement » sur les zones de courbures qui reprennent le même schéma de développement (de l'orthotropie vers la plagiotropie). On les rapproche

ainsi comme d'autres arbres, buissons et lianes au modèle architectural de Champagnat (Costes et al. 2014, Hallé 2004, Hallé et al. 1978, Le Bris 1999). Néanmoins, le modèle de Champagnat (**Figure 14**) précise dans sa définition de base l'existence d'un tronc, absent chez les rosiers. Le modèle admet néanmoins que selon la rigidité des tissus (effets de l'environnement et du génotype), on pourra observer la formation d'un tronc bien différencié donnant forme à un arbre ou un arbuste, ou à une structure se ramifiant dès sa base et définissant le modèle buissonnant comme les rosiers « buissons ». Le type liane est également possible si les axes sont sarmenteux (très longs et flexibles) avec une forte aptitude à s'accrocher à des supports artificiels ou naturels, comme les rosiers de type grim pant et liane (Hallé 2004, Hallé et al. 1978).

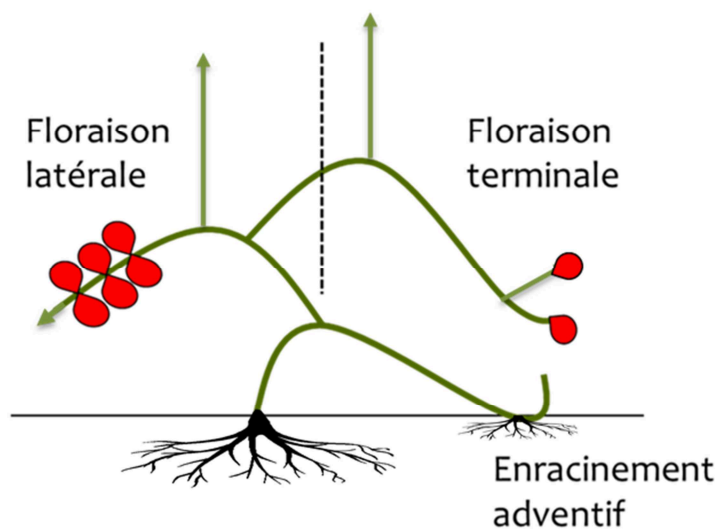


Figure 14. Schéma du modèle architectural de Champagnat (d'après Hallé 2004).

Au-delà de ce simple modèle, le développement du rosier était a priori vu comme complètement désordonné et anarchique. Cela ne fut remis en question que récemment. En effet, Morel et al. (2009) ont montré par l'analyse architecturale qualitative et quantitative en 2D de deux cultivars remontants de type « buisson moderne »⁵ : 'Radrazz' Knock Out® (KO), au port érigé et 'Meiratcan' Lovely Meilland® (LM) au port plus divergent ; que ces derniers possèdent des architectures qualitativement proches mais très différentes d'un point de vue quantitatif. Il est important de noter que les plantes étudiées ont été obtenues par bouturage, tuteurées puis analysées après cinq mois environ de culture sous serre en conditions contrôlées et non limitantes (com. pers. G. Galopin).

⁵Com. Pers. L. Crespel : ces cultivars ne sont pas à classer dans la catégorie des hybrides de thé comme mentionné dans l'article de Morel et al. (2009).

KO est constitué de 5 à 6 ordres de ramifications avec environ 26 axes, contre 17 axes sur 4 ordres chez LM. En revanche, LM possède des axes 2 à 3 fois plus longs que KO. Cependant, avec l'ensemble des variables mesurées à l'échelle de l'axe, l'étude multivariée réalisée a mis en évidence deux types d'axes très distincts chez les deux cultivars. Une analyse plus fine a montré que ces deux types pouvaient être discriminés sur la base des caractéristiques foliaires des axes et de leur nombre de métamères. Ils ont ainsi distingué des axes courts avec de petites feuilles, et des longs avec des feuilles plus grandes. Ces deux types d'axes, bien que différents d'un point de vue quantitatif entre les deux cultivars, en particulier pour les axes longs (environ 9 métamères chez KO, une vingtaine chez LM), ont permis d'expliquer la structuration topologique observée au sein des plantes selon un même profil. Les axes longs forment les premiers ordres de ramification en position proximale, puis laissent place progressivement aux axes courts dans les derniers ordres en position distale.

Sur la base de ces résultats, Crespel et al. (2013) ont défini le concept du stade de la « structure architecturale élémentaire » sur des rosiers remontants. Cette étude a proposé, pour décrire des cultivars aux ports contrastés une fois ce stade atteint, la sélection d'un nombre restreint de variables à l'échelle de la plante et de l'axe, de nature topologique, morphologique et géométrique, identifiées comme suffisantes et non redondantes pour résumer la variabilité architecturale observée entre les cultivars, mais sans intégrer la variabilité intra-clonale. Ce stade a été défini comme: « une plante d'environ 5 mois dont l'axe primaire d'ordre 1 s'est complètement développé et ramifié, conduisant à la formation d'une structure dont les axes ont atteint le stade floral en plusieurs semaines ». Implicitement cela signifie que les tiges de renouvellement basales (ou « réitérations » qu'importe le terme à ce niveau) impliquée dans la pérennité du buisson n'ont pas été considérées, même si la plupart du temps certaines sont déjà bien formées. Ainsi, bien qu'encore non démontré, il est proposé de considérer ces structures de renouvellement comme des complexes réitérés à part entière (Costes et al. 2014, Iwata et al. 2012, Kawamura et al. 2015). L'unité architecturale d'un rosier peut-elle être résumée à cette structure architecturale élémentaire et les tiges de renouvellement basales à des réitérations totales de l'unité ? La pertinence et la validité de ces concepts pour décrire le développement d'une espèce buissonnante de manière générale reste à démontrer (com. pers. Y. Caraglio & G. Galopin). Quoiqu'il en soit, ce stade « structure architecturale élémentaire » sert désormais de référence dans la bibliographie récente pour l'étude des interactions entre différents génotypes et facteurs environnementaux et de l'héritabilité chez le rosier pour sa culture en pot, en conteneur ou pour le jardin (Crespel et al. 2014, Li-Marchetti et al. 2015).

En effet, comme pour d'autres espèces ornementales, des études récentes mettent en relief la variabilité entre les génotypes, la forte plasticité phénotypique de l'architecture du rosier, et les réponses parfois variées que présentent les cultivars face à différentes pratiques culturales (Crespel et al. 2014, Ferrante et al. 2015, Gudin 2000, Li-Marchetti et al. 2015, Morel et al. 2009). En outre, avec les nombreuses études réalisées sur les rosiers pour la fleur coupée essentiellement et quelques plus rares sur les rosiers miniatures, on connaît aussi rétrospectivement les diverses réponses que peuvent présenter la croissance, la floraison et la ramification avec certains processus physiologiques reliés selon les génotypes et en fonction de pratiques culturales, par exemple :

- des méthodes classiques : densité de culture, rabattages, tailles, pincements, défoliation, et autres suppressions (Bredmose 1998, Mosher & Turner 2000, Zieslin & Mor 1981a, 1981b, 1981c, 1990) ;
- des méthodes chimiques avec des régulateurs de croissance (Jenks et al. 2001, Mor & Zieslin 1992, Müller et al. 1998) et des méthodes alternatives mécaniques qui exploitent le thigmomorphisme (Morel et al. 2012) ;
- la lumière, par sa qualité et son intensité (Abidi et al. 2013, Blom-Zandstra et al. 1995, Bredmose 1998, Cerny et al. 2003, Demotes-Mainard et al. 2013b, Girault et al. 2010, 2008, Maas & Bax 1995, Ménard & Dansereau 1995, Rajapakse & Kelly 1994, Zieslin & Mor 1990, Zieslin & Tsujita 1990) ;
- le régime hydrique et la nutrition minérale (Demotes-Mainard et al. 2013b, Huché-Théliet et al. 2011, Jenks et al. 2001, Li-Marchetti et al. 2015, Ménard & Dansereau 1995) ;
- les conditions atmosphériques de température, d'humidité et de composition gazeuse (Darlington et al. 1992, Marcelis-van Acker 1995, Zieslin & Mor 1981a, 1990, Zieslin & Tsujita 1990).

Le développement architectural à long terme du rosier reste néanmoins peu étudié. Face à la lumière, les caractéristiques architecturales sont essentiellement étudiées en terme d'effet sur l'interception lumineuse de la canopée et la photosynthèse (Percy et al. 2005, Valladares 1999, Valladares et al. 2000) ; tandis que les études sur certaines composantes de la qualité visuelle des plantes d'ornement restent rares (Rajapakse & Kelly 1994, Scuderi et al. 2012), et ne sont pas directement représentatives de la perception des consommateurs (Boumaza et al. 2009). A une échelle plus fine, le rôle majeur de la lumière dans l'activation et la régulation des processus biochimiques et hormonaux contrôlant la ramification le long des axes et sa

modulation par des facteurs génétiques et environnementaux restent encore de vastes champs d'études d'intérêts majeurs pour l'horticulture, travaillés notamment à l'UMR IRHS au sein de l'équipe Arch-E (Abidi et al. 2013, Barbier et al. 2015, Demotes-Mainard et al. 2016, Girault et al. 2010, 2008, Leduc et al. 2014, Rameau et al. 2015, Roman et al. 2016). En parallèle, la modélisation permet avec une visée intégrative de ces échelles d'études d'implémenter un modèle structural de plante virtuelle du cultivar 'Radrazz' (**Figure 15**), flexible et utile à la formulation et la vérification d'hypothèses complexes (Demotes-Mainard et al. 2013a, 2009, Favre et al. 2007, Rameau et al. 2015).



Figure 15. Représentation 3D de la croissance d'une tige primaire de 'Radrazz' simplifiée. La plante est obtenue à l'aide d'un modèle structural de la croissance dépendante d'un cumul de degrés-jours sous le logiciel L-studio (Arch-E ex. SAGAH ; Favre et al. 2007).

Pour autant, les opérations culturales privilégiées actuellement en production restent la taille et les pincements, relativement coûteux et pénibles ; et l'utilisation de régulateurs de croissance, vouée à être diminuée dans le cadre des plans Ecophyto. Ces techniques et les autres sont utilisées plus ou moins empiriquement par les producteurs (Crespel et al. 2014, Morel et al. 2012). Face à ces pratiques, le déterminisme environnemental et génétique de l'architecture du buisson et ses implications sur l'apparence visuelle ne sont encore que très peu étudiés (Crespel et al. 2013, Huché-Thélier et al. 2011, Morel et al. 2009). En outre, la modulation de l'architecture aérienne représente également une piste pertinente pouvant avoir un impact sur la résistance des plantes aux maladies et aux ravageurs (Costes et al. 2013, Larson & Whitham 1997, Simon et al. 2006, 2007).

2. La caractérisation par analyse sensorielle

2.a. Notions fondamentales d'analyse sensorielle

L'analyse sensorielle est « un acte social résultant de la collaboration de sujets » formant un panel pour être utilisés comme un instrument de mesure (Urdapilleta 2001). Elle se définit comme une science avec un ensemble de pratiques et de techniques visant l'étude et l'interprétation de façon systématique de la perception des propriétés sensorielles d'aliments, de boissons, de parfums, et d'objets divers par les sens de l'Homme. Son but intrinsèque est de caractériser le plus objectivement possible la perception sensorielle des produits étudiés et de mettre en relation ces perceptions avec l'étude des préférences et des aversions des consommateurs (Depledge & SSHA 2009, Meilgaard et al. 2006, Urdapilleta 2001).

L'utilité de cette science intervient essentiellement dans ce que l'on peut appeler le « management de la qualité », défini comme « l'optimisation de l'obtention de la satisfaction du client ». Fréquemment utilisée dans des domaines économiquement importants comme l'agroalimentaire, les cosmétiques ou l'industrie automobile, l'analyse sensorielle peut intervenir à tout moment dans la « vie » d'un produit : à sa phase de conception, de production, en sortie de production, et éventuellement dans sa reconception (Dufour-Etienne 2009).

L'originalité et la force de l'analyse sensorielle résident dans le fait qu'elle utilise l'Homme, un « outil de mesure » particulièrement puissant par sa polyvalence et ses capacités cognitives. Néanmoins, c'est un « outil » très particulier de par l'éventuelle subjectivité et variabilité de ses jugements et donc des « mesures » qu'il donne. Cela constitue la grande faiblesse de cette science pour caractériser de manière impartiale les produits. Cependant, c'est cette composante qui permet d'observer des préférences différentes entre individus, qu'il convient donc d'expliquer et d'exploiter (Strigler 2009), et qui rend notre société si richement diversifiée.

Cette subjectivité dans la description tient essentiellement des mécanismes liés à la perception des stimuli par nos sens puis de leur description verbale. D'une part, les différences de perceptions entre individus peuvent s'expliquer à la fois dans le nombre de capteurs dont chacun dispose, et dans l'efficacité de ces capteurs à transformer les stimuli auxquels ils sont exposés. D'autre part nous n'avons pas tous le même vécu, ce qui peut mener à des interprétations différentes d'un même stimulus entre individus, mais aussi pour un même individu au cours du temps (MacLeod et al. 2009, Sauvageot 1998, 2001). De plus, la description verbale repose sur un important biais qu'apporte la symbolique des mots, et

malheureusement, « (...) on ne sait jamais exactement ce que supporte réellement cet acte linguistique » (Civille & Lawless 1986, Urdapilleta 2001).

En ce sens, l'analyse sensorielle permet par différentes approches et méthodes de contrôler et de réduire au maximum, ou à défaut de tenir compte de cette source de variabilité pour caractériser les produits le plus objectivement possible, et ce afin de cerner au mieux la variabilité que présentent les préférences des consommateurs (Depledge & SSHA 2009, Næs et al. 2011, Urdapilleta 2001)

2.a.i. Démarche générale de l'analyse sensorielle

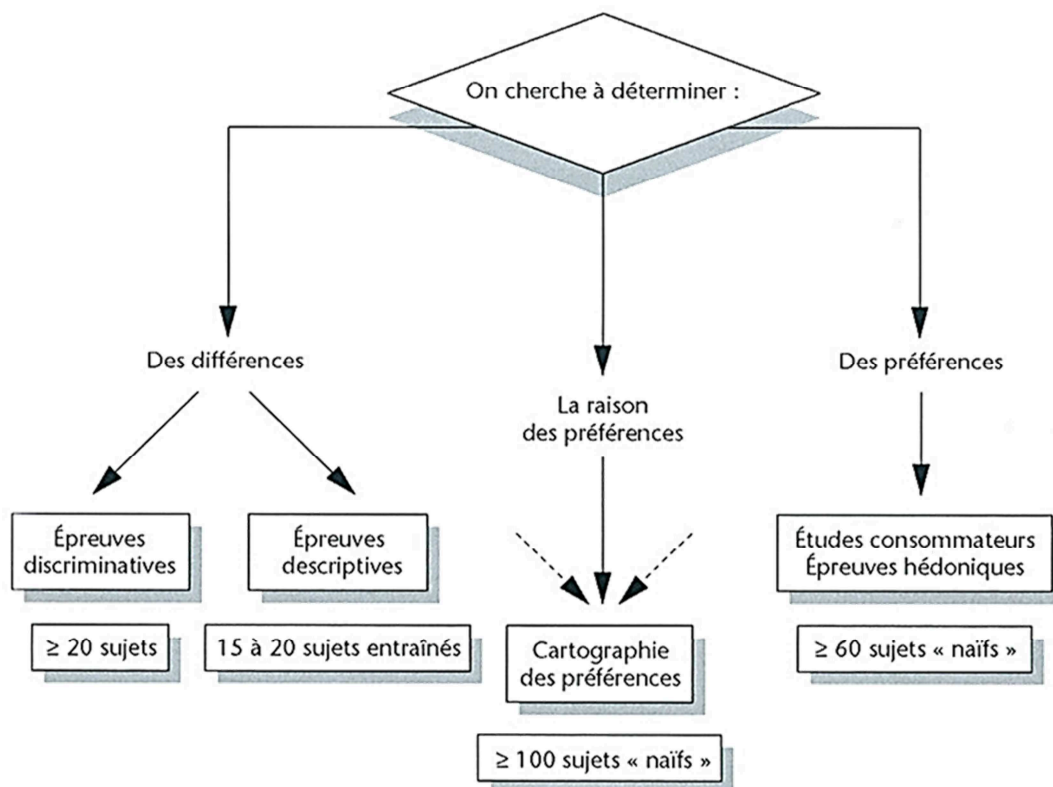


Figure 16. Grands types d'épreuves de l'analyse sensorielle et nombres de sujets (personnes) conseillés (extraite de Strigler 2009).

L'analyse sensorielle peut se mener selon les informations que l'on souhaite obtenir des produits testés et ou des consommateurs avec trois grands types d'épreuves possibles (**Figure 16**). Afin d'obtenir des résultats pertinents, le nombre et le type de personnes, appelées sujets, à utiliser pour une épreuve varient d'une quinzaine à plus d'une centaine. L'étude non hédonique des différences perceptibles entre les produits se fait au travers d'épreuves discriminatives et ou descriptives avec un relativement faible nombre d'individus sélectionnés sur la base de leurs capacités cognitives. La détermination des préférences se réalise avec de plus larges effectifs pour être représentative de la diversité des consommateurs. La

confrontation de ces deux types d'études est une démarche courante de l'analyse sensorielle pour réaliser des « cartographies des préférences » pour étudier les raisons des préférences des consommateurs : un des objectifs majeurs de la discipline (Nicod et al. 2009, Strigler 2009, Strigler et al. 2009, Varela & Ares 2012).

2.a.ii. Epreuves avec sujets naïfs ou non entraînés

Les panels de sujets « naïfs » sont constitués de personnes non entraînées et représentatives d'une population ou d'un type de consommateurs donné. Ils sont essentiellement sollicités pour réaliser des épreuves hédoniques et des études consommateurs, qui permettent d'étudier la typologie interne des consommateurs (catégories socio-professionnelles, etc...), leurs préférences vis-à-vis des produits, leur acceptabilité, le consentement à l'achat, etc. Dans ce cas, un effectif relativement important est alors nécessaire pour la mise en évidence de différentes typologies ou « segments » de consommateurs (Köster 2009, Strigler 2009, Symoneaux et al. 2012, Varela & Ares 2012).

Certaines épreuves discriminatives voire descriptives relativement simples et rapides ne nécessitent pas un entraînement particulier, par exemple les épreuves triangulaires, d'appariements, ou de tri suivi ou non d'une épreuve de verbalisation (Bijmolt & Wedel 1995, Chollet et al. 2011, Strigler et al. 2009, Varela & Ares 2012). Elles permettent d'établir si une différence de propriétés sensorielles est détectable ou non entre au moins deux stimuli, objets, entités, ou produits. Elles sont essentiellement mises en place avant tout autre type d'épreuve plus fine. En effet, il serait vain de vouloir comparer sensoriellement des produits dont les différences, si elles existent, sont imperceptibles (Strigler et al. 2009).

2.a.iii. Epreuves avec sujets entraînés : focus sur la méthode du profil sensoriel

Les panels de sujets entraînés sont majoritairement employés pour des épreuves descriptives avec quantifications. Ils sont généralement constitués d'une dizaine à une vingtaine de sujets spécifiquement entraînés et sélectionnés à plusieurs étapes pour déterminer le plus objectivement possible une description multidimensionnelle d'un ensemble de produits comparables : « l'espace produit » (Labbe et al. 2004, Strigler et al. 2009, Wolters & Allchurch 1994). En particulier, le profil sensoriel ou profil conventionnel, dérivant de la méthode d'analyse descriptive quantitative – QDA® *Quantitative Descriptive Analysis* (Stone et al. 1974) – est une des méthodes les plus répandues pour l'évaluation de grandeurs sensorielles complexes telle que l'arôme, le goût, la texture, l'aspect visuel, etc., ou encore l'ensemble des dimensions sensorielles d'un espace produit (Strigler et al. 2009).

Ce type d'épreuve recommandée par l'AFNOR vise à établir une description non hédonique d'un ensemble de produits comparables. Elle se base avant tout sur la recherche d'un minimum de descripteurs sensoriels permettant de donner un maximum d'informations sur les propriétés des produits étudiés. Ces descripteurs servent à évaluer l'intensité des propriétés, traduites à l'aide d'une échelle d'étendue variable, le plus souvent délimitée par des bornes représentant les seuils minimum et maximum d'intensité de perception. Cette échelle est structurée dans la plupart des exemples rencontrés, *i.e.* des cases à cocher numérotées à partir de 0 ou 1 et éventuellement accompagnées de mots graduant l'intensité (nulle ; très faible ; ... ; très forte). Elle permet au final la description décomposée qualitativement et évaluée quantitativement des produits sous forme de profils sensoriels comme illustré en **Figure 17**, dont les valeurs considérées sont les notes d'intensités moyennes données par les sujets pour chaque descripteur sensoriel sur chaque produit.

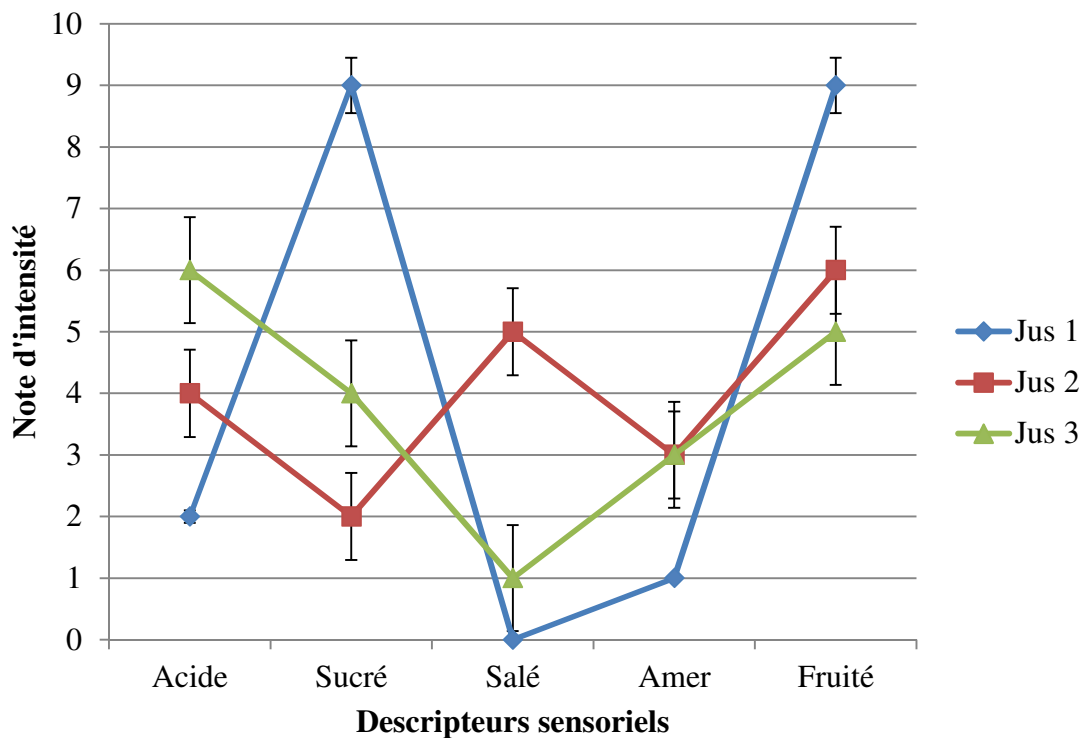


Figure 17. Comparaison du goût de trois jus de fruits par la méthode du profil sensoriel (exemple fictif inspiré de Strigler et al. 2009). **Notes :** Les valeurs présentées sont les moyennes, bornées par leurs deux intervalles de confiance, des scores attribués par les sujets pour chaque couple « jus × descripteur » évalué sur une échelle d'intensité perçue allant de 0 (nulle) à 10 (forte). Les jus comparés peuvent par exemple être des produits de marques différentes, ou être obtenus avec différents dosages d'ingrédients, ou différentes méthodes d'élaboration, etc.

La réalisation d'un profil sensoriel passe par plusieurs étapes principales: (i) la constitution d'un panel en relation avec le type de produit étudié ; (ii) l'établissement ou l'utilisation d'une liste de descripteurs adaptés à l'espace-produit à caractériser et l'entraînement du panel à son utilisation ; puis (iii) les évaluations permettant de caractériser les produits auxquels on s'intéresse. Ces étapes doivent respecter certaines recommandations, et sont accompagnées d'un grand nombre de protocoles et méthodes statistiques pour en guider la mise en place et analyser les résultats (Nicod et al. 2009, Næs et al. 2011, Strigler et al. 2009) :

- les sujets doivent pour des raisons évidentes, être volontaires, motivés, en bonne santé et ne pas présenter de caractéristiques allant à l'encontre de la perception des stimuli étudiés (phénomènes d'agnosies, maladies incapacitantes comme la cécité, etc.) ;
- les descripteurs retenus doivent être dénués de connotation hédonique, pertinents, précis, discriminants, et autant que faire se peut indépendants et exhaustifs ;
- l'entraînement et l'évaluation sont soumis à l'étude de la performance des sujets et du panel : en effet il faut s'assurer que les mesures données par les sujets sont fiables, on évalue pour cela à minima leur capacité à discriminer différents produits, leur répétabilité et l'accord entre les sujets.

Particulièrement utile pour le suivi de produits au cours du temps ou la comparaison de produits obtenus par des procédés différents, les profils sensoriels apportent également une aide pertinente dans la conception de nouveaux produits. Ils permettent ainsi la comparaison qualitative et quantitative des produits, puis la cartographie de préférences (ex. sur photographies de rosiers de Boumaza et al. 2010 en **Figure 18**) par l'étude conjointe de résultats d'épreuves hédoniques indépendantes réalisées sur les mêmes produits (Köster 2009, Murray et al. 2001, Strigler et al. 2009). En parallèle, cette épreuve fournit des données très adaptées à la recherche de mesures instrumentales liées aux propriétés que traduisent les descripteurs sensoriels (Danzart 2009, Drake et al. 1999, MacFie & Hedderley 1993, Mehinagic et al. 2004, 2006, Næs & Kowalski 1989, Yamul et al. 2013).

En tant que méthode centrale de cette thèse, la partie qui suit présente plus particulièrement l'apport du profil sensoriel pour l'étude de la qualité visuelle des rosiers buissons au travers des travaux pionniers de membres de l'équipe Arch-E en collaboration avec l'unité GRAPPE de l'ESA d'Angers essentiellement.

Tableau 3. Liste de descripteurs sensoriels retenus après évaluation de leur précision, pouvoir discriminant et indépendance (synthèse d'après Boumaza et al. 2009).

Plant part	Attribute	Description
Buds	Number of buds	Does the plant have many buds, just a few of them, or none at all?
	Bud shape	Is the bud pointed or round in shape?
Flowers	Quantity of faded flowers/fruit	Are there many faded flowers or fruit on this plant, or are there few or none at all?
	Number of flowers	Do you find this plant floriferous (bearing many flowers)?
	Flower enhancement	Are the flowers enhanced, do they sit out of the foliage, or are they hidden in the plant?
	Flower staggering	Is the flowering very spread out, staggered (<i>i.e.</i> as when the flowers are not at the same stage: some in bud or beginning to flower and others having faded, or coming to an end of their flowering), or are the flowers at the same stage?
	Flower size	Is the flower large?
	Petal shape	Are the petals quite flat, or do they fold out at the ends?
	Petal density	Estimate the quantity of petals of the flower, very simple (few petals) or very double (luxuriant) petals?
General	Flower colour loudness	Does the flower have a loud colour, or does it look faded and pastel?
	Top-sided shape	Do you find that the overall shape of this plant is more top-sided or is it flattish and wide in shape?
	Plant compactness	Is this plant very compact (<i>i.e.</i> , wind cannot blow through it and no daylight passes through it), or is it airy?)
Leaves	Leaf colour darkness	Is the colour of the leaves dark, or pale green?
	Leaf size	Are the leaves large or small?
	Leaf condition	Are the leaves in good condition, or do they display flaws such as traces of diseases, insect pests and withering?
	Foliage thickness	Is the foliage thick on the whole, or thin?
Stems	Stem vigour	Are the stems vigorous, broad, large, or rather frail?
Thorns	Thorn density	Are the thorns very spaced out, or very close together?
	Thorn breadth	Are the thorns broad, or slender?

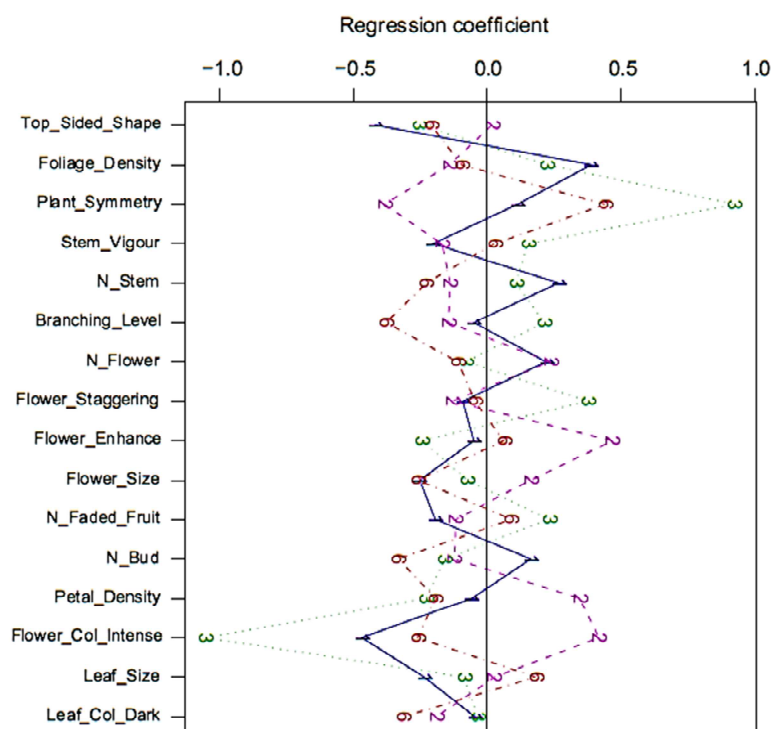


Figure 18. Explication des préférences de 5 des 6 segments de consommateurs identifiés (1 ; 2 ; 3 ; 5 ; 6) vis-à-vis de 10 photographies de rosiers de cultivars différents. **Notes :** Les coefficients de régression des descripteurs sensoriels sont obtenus après régression de la préférence moyenne de chaque segment en fonction des composantes principales des données obtenues par profil sensoriel avec 14 sujets (extraite de Boumaza et al. 2010). Par exemple, la forte symétrie du rosier et une couleur de fleurs claire sont des critères importants pour expliquer les préférences du segment 3, les consommateurs du segment 2 préfèrent par contre les rosiers moins symétriques, bien fleuris, avec des fleurs plus foncées.

2.b. La caractérisation visuelle du rosier par analyse sensorielle

En 2009, constatant le manque de méthode objective pour caractériser et comparer intra-génériquement des plantes d'ornement sur leur apparence visuelle, Boumaza et al. ont présenté un protocole appliqué au rosier buisson pour établir une liste de descripteurs sensoriels dits : non ambigus, discriminants, et indépendants (non redondants ou corrélés). Une liste initiale de descripteurs a été dressée après une enquête auprès de personnes en relation avec l'horticulture. Plus de 200 termes descriptifs ont été relevés, puis après suppression des termes hédoniques, appariement des synonymies, puis conservation de ceux cités par au moins trois personnes, 44 descripteurs ont été retenus. Chacun a ensuite été défini et accompagné d'une échelle structurée arbitrairement en 6 niveaux permettant de les évaluer (**Figure 19**).

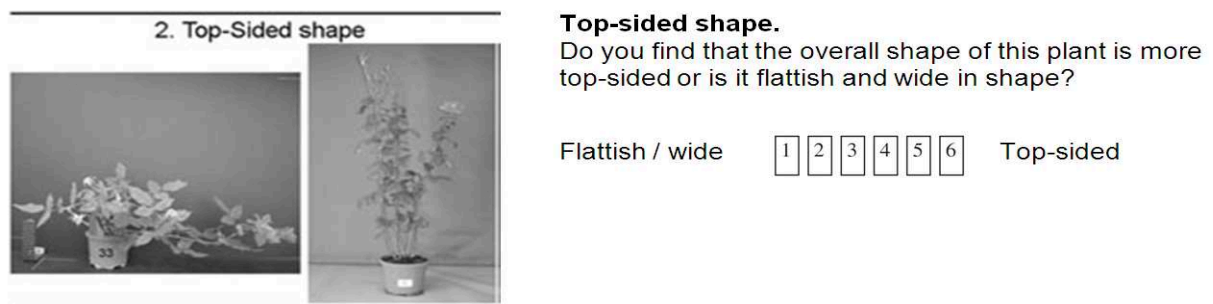


Figure 19. Exemple d'un descripteur sensoriel « Top-sided shape » (forme en hauteur) : définition, échelle de notation structurée de « en largeur / prostré » à « en hauteur » et références photographiques illustrant la note minimale et la maximale (extraits de Boumaza et al. 2009)

Selon un dispositif expérimental comportant des rosiers de cultivars différents sélectionnés pour leur différence d'apparence marquée, les plantes ont été évaluées par des sujets non entraînés mais en relation avec l'horticulture. Par différentes analyses, cette liste a été réduite à 18 descripteurs (**Tableau 3**) et a ensuite servi de base pour la mise en place de profils sensoriels avec des panels entraînés.

En première application, un profil sensoriel sur 10 photographies de rosiers (de différents cultivars non mentionnés) prises sur leur face la plus large a été réalisé, et ces mêmes photos ont servi à réaliser une épreuve hédonique avec des « consommateurs » pour qu'ils les ordonnent selon leurs préférences. Il a été possible de réaliser une cartographie interne des préférences de ces consommateurs, *i.e.* les segmenter en groupes de personnes possédant des préférences similaires, et une cartographie externe de ces segments de consommateurs : *i.e.* expliquer quels sont les descripteurs qui influencent leurs préférences et comment (**Figure 18**).

Une deuxième application par Huché-Thélier et al. (2011) du profil sensoriel de l'aspect visuel du rosier 'Radrazz' sur photographies individuelles a permis d'évaluer l'effet de trois régimes de nutrition azotée. Sur des plantes âgées de 12 semaines après le passage au stade « couleur des pétales visible » de l'axe primaire, les auteurs ont observé avec le profil sensoriel qu'une déficience continue en azote forme des rosiers perçus comme moins érigés, moins symétriques, moins feuillus, et aux tiges moins vigoureuses que ceux ayant subi une nutrition azotée non limitante (**Tableau 4**). Inversement, une restriction temporaire durant la période de floraison de l'axe primaire a permis de former des rosiers perçus comme plus symétriques, plus grands et plus vigoureux qu'avec une nutrition azotée non limitante. Ils ont également noté que les traitements n'influençaient pas la perception de la durée de la période de floraison (évaluée par la diversité des stades floraux observés) mais que par rapport aux deux autres traitements, la restriction temporaire forme des rosiers perçus avec un nombre de bourgeons floraux plus important, des fleurs plus grandes et plus visibles. Finalement, sur différents cultivars greffés et cultivés sous serre ou en extérieur, Santagostini et al. (2014) ont appliqué la méthode du profil sensoriel afin de confronter la notation de la floribondité comme définie par l'UPOV avec son évaluation par un panel entraîné sur photographies individuelles, leur analyse par mesures sur images, et le comptage manuel des fleurs sur les plantes.

Tableau 4. Aspect visuel du rosier 'Radrazz' sous différents régimes de nutrition azotée (N+N+ : confort ; N+N- : restriction temporaire ; N-N- : restriction totale). **Notes :** Pour chaque descripteur et traitement, la valeur correspond à la moyenne de 357 scores (de 1 à 9) : 17 sujets x 7 photos de rosiers différents x 3 répétitions par sujet ; les lettres indiquent les différences significatives (p-value < 5 %) entre traitements obtenues par le test de Friedman et son test de comparaison multiple associé (tiré de Huché-Thélier et al. 2011).

Visual descriptor	N+N+	N+N-	N-N-
Growth habit	5.7 ^b	6.6 ^a	4.4 ^c
Plant symmetry	4.6 ^b	6.3 ^a	3.2 ^c
Foliage density	5.4 ^a	5.5 ^a	3.6 ^b
Leaf dimensions	6.1 ^a	5.7 ^b	5.9 ^{ab}
Stem vigour	5.9 ^b	6.3 ^a	3.8 ^c
Length of flowering period	5.5 ^a	5.5 ^a	5.7 ^a
Flower display	5.2 ^b	6.4 ^a	4.7 ^c
Flower dimensions	3.5 ^c	4.9 ^a	4.3 ^b
Number of flower buds	2.1 ^b	2.7 ^a	2.1 ^b

Cependant, dans ces travaux, la tridimensionnalité des plantes a été écartée de l'analyse sensorielle. En effet, Boumaza et al. (2009) n'ont pas intégré de tels descripteurs prenant en compte cet aspect, et les travaux suivants ont été réalisés sur des photographies présentant les rosiers sur une seule de leur face : la plus développée (Boumaza et al. 2010, Huché-Thélier et al. 2011, Santagostini et al. 2014). De plus, il faut rappeler que le produit dont il est question

est « La » plante, or la variabilité entre les plantes peut être forte à l'intérieur d'un même lot de culture. Comme il l'est fortement démontré dans l'étude des propriétés sensorielles des pommes, la variabilité phénotypique présente à l'intérieur des lots peut elle aussi amener à des différences perceptibles et doit être prise en compte (Bavay et al. 2014, 2013). En d'autres termes, retranscrits dans notre problématique, il est important d'évaluer si des plantes cultivées dans un même environnement présentent elles aussi des différences visuelles perceptibles, et si oui comment quantifier ces différences et les expliquer (Demotes-Mainard et al. 2013a). En effet, c'est une préoccupation majeure pour la production en horticulture ornementale qui motive l'élaboration de procédures pour trier les plantes afin d'uniformiser les lots (Dijkstra et al. 1997, Timmermans & Hulzebosch 1996).

Néanmoins, entretenir un panel de sujets entraînés pour des caractérisations en routine n'est pas aisé, et reste relativement onéreux (Nicod et al. 2009). En outre, les tris de plantes qu'effectuent les agréeurs professionnels sur les lieux de productions sont variables dans le temps, et peu cohérents entre eux (Kohsel & Bennedsen 2001). Des méthodes instrumentales plus rapides, plus fiables et moins coûteuses, notamment basées sur la vision par ordinateur, peuvent être alors envisagées pour identifier des paramètres permettant de rendre compte des propriétés étudiées, voire les prédire (Boumaza et al. 2010, Danzart 2009, Mehinagic et al. 2004, Nicod et al. 2009, Ruiz-Altisent et al. 2010, Santagostini et al. 2014).

3. Automatisation de la caractérisation sans contact des productions végétales

Pour l'horticulture et l'industrie agroalimentaire entre autres, de nombreux systèmes permettant de quantifier diverses grandeurs physiques, géométriques, colorimétriques, et même biochimiques sont proposés pour le contrôle de la qualité des produits et des cultures de manière non destructive et plus ou moins automatisée (Magwaza & Opara 2015, Rosell & Sanz 2012, Ruiz-Altisent et al. 2010, Usha & Singh 2013).

De manière générale, la teneur en chlorophylle est très souvent utilisée comme un bon indicateur de la qualité visuelle des plantes d'ornement, car corrélée à l'inspection visuelle de l'état sanitaire et de la qualité générale des feuilles et des plantes (de non commercialisable, piètre qualité, feuilles jaunes, feuilles nécrosées ; à très bonne qualité, excellent, feuilles vert sombre, en pleine santé). Outre les méthodes chimiques destructives, cette teneur peut être estimée de manière fiable et rapide avec un analyseur de chlorophylle comme les appareils SPAD commercialisés par Konica Minolta. Elle peut aussi l'être par l'analyse colorimétrique d'images numériques : de feuilles isolées puis scannées ; de feuilles sur la plante ; de zones feuillées sur la plante entière (Ferrante et al. 2015, Pagola et al. 2009, Rorie et al. 2011, Wang et al. 2005).

Pour la qualité visuelle des plantes d'ornement, les systèmes reposant sur la caractérisation des différentes composantes visuelles que sont les dimensions, les formes, les textures de surface et les couleurs simultanément à l'échelle de la plante entière et des organes sont peu nombreux (Ferrante et al. 2015, Ruiz-Altisent et al. 2010), rarement publiés ou décrits avec peu de précision (Hemming et al. 2010).

3.a. L'agrégage automatisé des plantes d'ornement

Les systèmes d'agrégage automatisé des plantes d'ornement, essentiellement développés depuis la fin des années 80, notamment grâce à l'avènement d'outils informatiques plus abordables, se regroupent sous les termes de système de « vision » « par ordinateur - informatisée ou informatique », *i.e.* une chaîne de convoyage dotée d'un module qui par l'analyse automatisée d'une à plusieurs images de la plante entière obtenues par un ou plusieurs capteurs photosensibles permet de trier les plantes. A l'aide de diverses mesures sur image, ce type de système a pour vocation de reproduire plus objectivement et avec une meilleure constance l'agrégage manuel réalisé pour homogénéiser les lots en triant les plantes selon des catégories prédéfinies, souvent à caractères hédoniques (Ferrante et al. 2015, Hack 1992, Ruiz-Altisent et al. 2010, Silva et al. 2013). Depuis les premières tentatives de Hines et al. (1986, 1987) sur du houx et de l'azalée en conteneur, diverses approches pour le tri des

plantes d'ornement par vision informatisée ont été testées sur quelques cultivars d'espèces majeures comme le rosier, le bégonia, le cyclamen ou encore le ficus, etc. (Bennedsen 1992, Brons et al. 1993, Dijkshoorn-Dekker 1996, Dijkstra & Meuleman 1998, Dijkstra et al. 1997, Hines et al. 1986, 1987, Kohsel 2001, Meuleman & Dijkstra 1998, Timmermans 1998, Timmermans & Hulzebosch 1996). Bien que ce type de systèmes présente un avantage certain pour améliorer la productivité, la solution qu'ils apportent repose sur des références subjectives. De plus, les modèles mathématiques utilisés (réseaux de neurones artificiels : méthode de classification, cf. **II.3.c** en **p.57** avec le **Tableau 5**) sont peu robustes, peu précis et ne présentent que de faibles possibilités d'amélioration (Ruiz-Altisent et al. 2010). Néanmoins, si en situation de production, l'analyse d'image présente un avantage pour automatiser le tri des plantes d'ornement en des catégories prédéfinies de qualité (Dijkstra & Meuleman 1998, Dijkstra et al. 1997, Timmermans & Hulzebosch 1996), selon l'avancement et la couleur de la floraison (Lootens et al. 2000, Timmermans & Hulzebosch 1996), ou encore permet de prédire des notes de « beauté » attribuées par des agréeurs (Brons et al. 1993), comme pour le phénotypage au sens large, elle doit pouvoir également permettre de prédire, sans a priori de qualité ou de supériorité, des critères visuels en relation avec l'architecture des plantes et leur plasticité (Fahlgren et al. 2015, Fiorani & Schurr 2013).

Au cours de cette thèse, l'apport complémentaire de cette discipline fut essentiellement encadré et dirigé sous l'expertise de Y. Chéné, É. Belin, et D. Rousseau. Il a été jugé qu'une présentation de l'état de l'art de « l'analyse d'image » et de ses spécificités apporte peu d'intérêt quant à l'objectif principal de cette thèse. En revanche il est proposé : **(3.b)** une présentation succincte du vocabulaire utilisé dans cette discipline pour exposer brièvement sa méthodologie, puis **(3.c)** d'aborder directement la recherche de relations entre des mesures instrumentales et sensorielles sur les plantes d'ornement.

3.b. Quelques notions et vocabulaire pour l'analyse d'image

Une image numérique présente une « scène », *i.e.* une projection bidimensionnelle de la réalité physique, obtenue au travers d'une lentille optique associée à un capteur photosensible électronique aux caractéristiques techniques et de sensibilité spectrale variables qui transcode les signaux sous une forme intelligible et exploitable informatiquement.

L'analyse d'image est donc une discipline qui repose sur un vaste ensemble de méthodes plus ou moins automatisées et automatisables pour l'analyse et le traitement des « scènes » imagées afin de discerner, reconnaître et mesurer des éléments d'intérêts présents dans la scène. Ainsi, de manière directe ou non, l'analyse d'image par ordinateur intervient

pour répondre à des questions diverses et automatiser des procédés de caractérisation à plus ou moins grande échelle dans divers domaines d'études (ex. astronomie, géologie, morphologie, anatomie, histologie, génétique, etc.) et différents secteurs économiques majeurs (ex. médical, aéronautique, militaire, sécurité, automobile, agroalimentaire ; etc.) (Abràmoff et al. 2004, Plataniotis & Venetsanopoulos 2013, Ruiz-Altisent et al. 2010, Schneider et al. 2012)

De manière basique, une image numérique couleur classique est une matrice à deux dimensions composée d'un nombre fini de cases unitaires : des « pixels », couramment de forme carrée et de côté valant une unité. Le nombre de pixels composant l'image détermine sa définition, elle se note par le produit du nombre de pixels par ligne et par colonne. Sur une image, chaque pixel est donc repérable par ses coordonnées spatiales en abscisse et en ordonnée (**Figure 20**) avec un code couleur définissable selon différents espaces colorimétriques variables en fonction des capteurs, par exemple en binaire (noir et blanc), en niveaux de gris (256 nuances allant du blanc au noir), ou en couleurs codées par des paramètres définis selon des modèles cohérents avec la vision humaine comme les modèles CIE RGB, YUV, YIQ, etc., et dont les particularités présentées en détails par ailleurs (Plataniotis & Venetsanopoulos 2013) ne sont pas abordées ici par commodité.

Le nombre de pixels qui constitue une image numérique est déterminé par la résolution du capteur photographique qui dépend de la taille de sa surface et de son nombre de cellules photosensibles. Moyennant la prise en compte d'éventuelles distorsions engendrées par les lentilles optiques plus ou moins négligeables selon la précision recherchée, la dimension des pixels peut alors être associée à des longueurs métriques en fonction de la position et de l'orientation du capteur par rapport à l'objet, de sa résolution, des caractéristiques de la lentille et de sa focale. En négligeant ce phénomène au prix d'une certaine erreur, on peut tout de même réaliser cette conversion sur l'image entière en analysant le nombre de pixels composant un objet aux dimensions métriques connues et situé dans le même plan que l'objet d'étude (Ricolfe-Viala & Sánchez-Salmerón 2010).

Avant la phase de mesures, afin de faciliter l'identification et l'isolement : « la segmentation » des éléments dans la scène, il est fréquent d'effectuer différents (pré-) traitements pour réduire le « bruit » que peuvent causer les problèmes de mise au point, de cadrage et d'éclairage lors de l'acquisition des images par exemple.

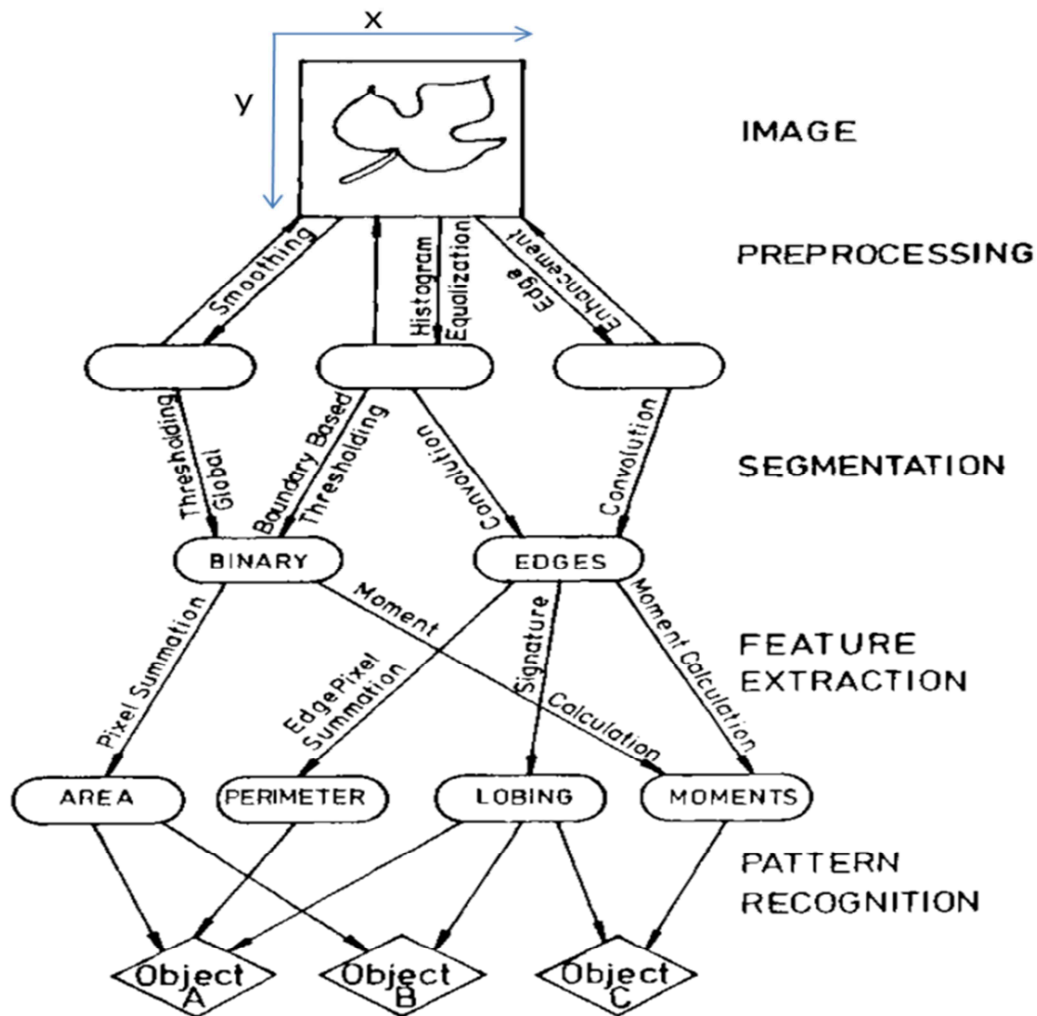


Figure 20. Principales étapes d'une analyse d'image. Exemple d'un cas de reconnaissance d'une feuille (adaptée de Hack, 1992 d'après Guyer et Miles, 1987). L'image subit un prétraitement pour retirer les artefacts, une segmentation permet ensuite de repérer les éléments d'intérêt sur lesquels les mesures seront effectuées. Les mesures peuvent ensuite être utilisées pour des problématiques de reconnaissances de formes, d'estimation de propriétés et d'assignation à des classes.

A ce niveau un large panel de méthodes de filtrage est proposé dans la littérature, les principales étant basées sur le seuillage des couleurs et la détection des contours (**Figure 20**). Une fois les éléments individualisés, la phase d'extraction des mesures à proprement parler peut être réalisée. Un nombre important de mesures caractérisant le nombre d'éléments présents, leurs distributions, les dimensions, les formes, les textures et les couleurs peut être défini. Du simple comptage d'éléments à l'estimation de distances jusqu'aux méthodes plus complexes comme par exemple avec l'analyse fractale par les descripteurs de Fourier ; l'avantage est que l'on peut par ce biais de représentation en deux-dimensions, estimer de nombreuses caractéristiques dont l'obtention par des mesures *in situ* est impossible ou n'est pas envisageable sans de lourdes difficultés (Abràmoff et al. 2004, Horgan 2001, Plataniotis & Venetsanopoulos 2013, Schneider et al. 2012, White et al. 1988). Pour cela, différentes

applications et environnements sont plus ou moins spécifiquement développés et utilisés afin d'automatiser ces processus. On peut citer par exemple ImageJ (Abràmoff et al. 2004), un logiciel libre et polyvalent, relativement abordable pour un utilisateur non expérimenté, et d'autres en particulier comme MatLab, plus adaptés pour l'automatisation et le développement d'applications.

Ensuite il s'agit d'utiliser et d'interpréter les mesures obtenues en relation avec les phénomènes étudiés. Moyennant une certaine calibration, l'utilisation des mesures sur images est parfois relativement directe, c'est souvent le cas par exemple quand on cherche à obtenir rapidement et de manière fiable des informations métriques ou colorimétriques. Au contraire, l'utilisation de ces mesures peut être plus ou moins indirecte lorsqu'elles doivent être sélectionnées préalablement pour évaluer si elles peuvent permettre de prédire voire expliquer des variables d'une autre nature que l'on cherche à modéliser mathématiquement (Danzart 2009, Du & Sun 2006, Font-i-Furnols et al. 2013, MacFie & Hedderley 1993, Mehinagic et al. 2004, Silva et al. 2013).

3.c. Relations sur plantes d'ornement entre mesures sensorielles avec des mesures sur images et des mesures architecturales

Parmi l'ensemble rencontré des études utilisant l'analyse d'image avec pour objectif l'agrèage des plantes d'ornements sur plusieurs composantes visuelles, l'adéquation de mesures obtenues de manière conventionnelle avec des mesures obtenues par analyse d'image n'a été démontrée que sur des boutures de bégonias non racinées imagées à plat, et racinées imagées de face (Dijkstra et al. 1997). Certaines études récentes voulant objectiver leur démarche, utilisent aussi des mesures sur image pour comparer l'effet de traitements sur l'apparence visuelle des plantes (par exemple Meijón et al. 2009). Néanmoins, elles n'évaluent pas préalablement la pertinence, ni même la robustesse des mesures sur images qu'elles utilisent en relation avec d'autres mesures obtenues par les méthodes conventionnelles, ou avec les caractéristiques visuelles évaluées sensoriellement.

En réalité, il semble que pour les plantes d'ornement fleuries, seules trois publications, en l'occurrence sur des rosiers (hors publications issues de ces travaux), ont traité de l'étude des relations entre des descripteurs sensoriels importants dans la qualité visuelle évalués de manière non hédonique ou des descripteurs UPOV, avec des mesures architecturales relevées manuellement avec ou sans digitalisation en 3D, et des mesures obtenues par analyse d'image.

En premier lieu, Huché-Thélier et al. (2011) ont mis en évidence des corrélations modérées entre des caractéristiques architecturales du cultivar 'Radrazz' mesurées sur l'axe d'ordre 1 et certains descripteurs sensoriels évalués sur photographies des mêmes plantes 12 semaines après. Crespel et al. (2013) ont également identifiés des corrélations faibles à modérées entre certaines de leurs variables architecturales sélectionnées pour condenser l'architecture de différents cultivars de rosiers au stade « structure architecturale élémentaire » à des notations du descripteur « port ; *growth habit* » défini par l'UPOV.

Finalement, Santagostini et al. (2014) ont comparé sur des rosiers de différents cultivars greffés l'évaluation de la floribondité selon quatre méthodologies : **(i)** celle de l'UPOV pour les examens de DHS; **(ii)** celle de l'analyse sensorielle par profil sensoriel sur photographies de rosiers ; **(iii)** le comptage manuel des fleurs sur plantes réelles (comparable à des mesures architecturales) ; et **(iv)** l'analyse d'image. Exceptées quelques incohérences avec la méthode de l'UPOV, ces méthodes sont très cohérentes et leurs mesures fortement à très fortement corrélées entre elles. Ainsi, les auteurs mettent en avant la praticité, la rapidité et la robustesse de l'analyse d'image face aux limites du profil et des méthodes sensorielles en général. Son remplacement en partie pour les épreuves « objectives » par des méthodes instrumentales plus rapides, moins coûteuses, et surtout plus reproductibles et objectives, est un objectif clé pour rendre abordable l'évaluation de l'aspect visuel des plantes d'ornement dans les organismes de recherche, d'expérimentation et de sélection, ainsi que chez les producteurs.

Ces études ont montré des corrélations parfois très intéressantes. Pour autant, il faut garder à l'esprit que la corrélation entre des variables ne signifie pas que ces variables sont forcément liées par une relation causale. La littérature regorge d'exemples triviaux à ce sujet. La répétition des expériences et la mise en place de protocoles adéquats permettent en partie de vérifier si des relations détectées sont pertinentes et explicatives (Wright 1921). Néanmoins, l'étude des corrélations seules, en particulier lorsque les données sont traitées de manière non paramétrique, ne permet en aucun cas d'extrapoler sur la manière d'utiliser les différentes variables instrumentales identifiées comme corrélées pour prédire la variable d'intérêt et donc leur potentiel réel : dans notre cas, les mesures architecturales ou sur images pour prédire les mesures sensorielles.

Pour prédire des mesures, on cherche à déterminer des modèles mathématiques parcimonieux et précis, et si possible valables pour réaliser dans l'avenir des prédictions sur du matériel similaire (Borra & Di Ciaccio 2010, Zucchini 2000). La modélisation prédictive repose sur un large éventail de méthodes en constante évolution et amélioration. Le choix de ces méthodes dépend fortement de la nature des données, de leur dimension (taille de

l'échantillon : n ; et nombre de variables : p). Plus ou moins complexes et lourdes en puissance de calcul requise, ces méthodes présentent chacune leurs avantages et inconvénients et sont plus ou moins adaptées à différents objectifs (Danzart 2009, MacFie & Hedderley 1993, Mehinagic et al. 2004, Nœs & Kowalski 1989, Seisonen et al. 2016).

Pour cette thèse, une importante formation sur ces méthodes et leurs déclinaisons qui s'articulent autour : du prétraitement des variables, leur sélection en fonction du type de modélisation (cf. ex. de méthodes en **Tableau 5**), puis de l'évaluation des capacités prédictives des modèles par différentes méthodes de ré-échantillonnage, a été nécessaire. Elle a notamment été appuyée par J.-M. Labatte, et G. Hunault et réalisée sur la base de : Kuhn & Johnson (2013) très complet sur les méthodes de modélisation prédictive d'un point de vue statistique ; et la section consacrée à la régression d'un point de vue pratique pour l'analyse sensorielle par Danzart (2009).

Tableau 5. Diversité des méthodes pour la modélisation prédictive : un résumé de différentes méthodes non exhaustives de modélisations et de leurs caractéristiques en règle générale (extrait de Kuhn & Johnson 2013). **Notes :** n : taille de l'échantillon ; p : nombre de prédicteurs disponibles, CS (center-scaling) : normalisation, dont transformation des variables ; NZV (near zero variance) : méthodes de détection des prédicteurs aux variances nulles ou faibles ; Corr (correlation) : réduction du nombre de prédicteurs sur la base de leurs corrélations réciproques et éventuellement avec la variable à prédire.

Model	Allows $n < p$	Pre-processing	Interpretable	Automatic feature selection	# Tuning parameters	Robust to predictor noise	Computation time
Linear regression [†]	×	CS, NZV, Corr	✓	×	0	×	✓
Partial least squares	✓	CS	✓	○	1	×	✓
Ridge regression	×	CS, NZV	✓	×	1	×	✓
Elastic net/lasso	×	CS, NZV	✓	✓	1-2	×	✓
Neural networks	✓	CS, NZV, Corr	×	×	2	×	×
Support vector machines	✓	CS	×	×	1-3	×	×
MARS/FDA	✓		○	✓	1-2	○	○
K -nearest neighbors	✓	CS, NZV	×	×	1	○	✓
Single trees	✓		○	✓	1	✓	✓
Model trees/rules [†]	✓		○	✓	1-2	✓	✓
Bagged trees	✓		×	✓	0	✓	○
Random forest	✓		×	○	0-1	✓	×
Boosted trees	✓		×	✓	3	✓	×
Cubist [†]	✓		×	○	2	✓	×
Logistic regression*	×	CS, NZV, Corr	✓	×	0	×	✓
{LQRM}DA*	×	NZV	○	×	0-2	×	✓
Nearest shrunken centroids*	✓	NZV	○	✓	1	×	✓
Naïve Bayes*	✓	NZV	×	×	0-1	○	○
C5.0*	✓		○	✓	0-3	✓	×

[†]regression only *classification only

Symbols represent affirmative (✓), negative (×), and somewhere in between (○)

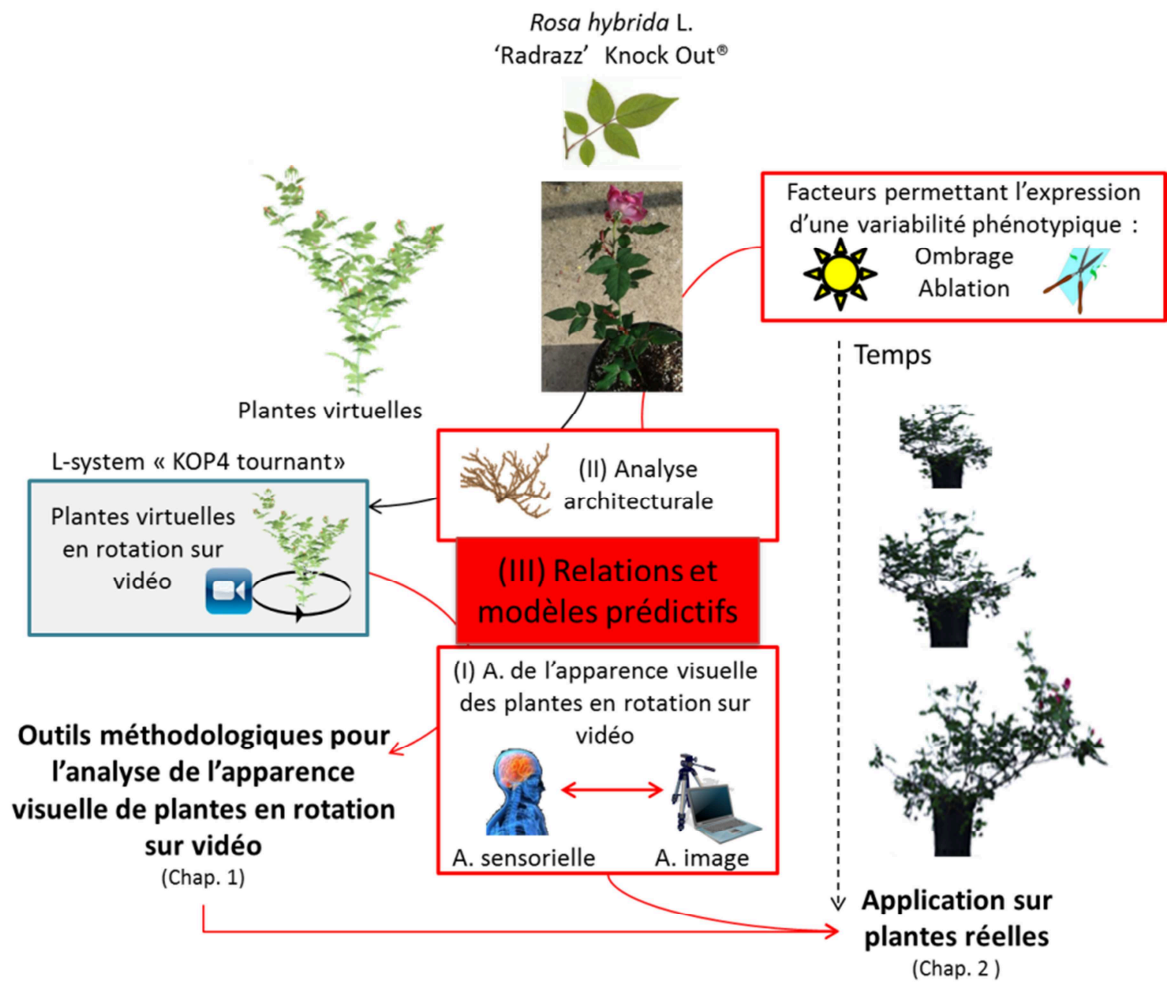


Figure 21. Présentation schématique de la démarche expérimentale selon les axes (I ; II ; et III) et les deux chapitres (chap.). Les flèches et les encadrés en rouge mettent en avant les apports spécifiques de cette thèse.

III. Démarche scientifique proposée

Les éléments contextuels présentés peuvent être plus largement retranscrits sous la forme d'une problématique générale : « *L'exploitation des caractéristiques intrinsèques du buisson d'ornement peut-elle permettre de proposer des leviers d'actions permettant de répondre aux attentes des consommateurs et à leurs espaces de vie ?* », déclinable plus précisément en différentes questions pertinentes d'un point de vue académique et scientifique : Comment caractériser l'architecture du buisson ? / Comment caractériser objectivement son apparence visuelle ? / Quelles sont les relations entre l'architecture et les caractéristiques visuelles ? / Ces relations sont-elles valables – et comment s'organisent-elles dans le temps - et sous différentes conditions culturelles ?

Ces questions, en raison du produit marchand dont il est question, s'accompagnent naturellement d'interrogations sur un plan appliqué pour les sélectionneurs, producteurs, et distributeurs : Comment l'apparence visuelle et l'architecture peuvent influencer l'acte d'achat des consommateurs ? / Comment utiliser les connaissances pour rester en adéquation avec l'évolution de la demande des consommateurs ? / Comment organiser et utiliser les connaissances pour proposer des produits et concepts innovants ?

Pour répondre aux questions d'ordre scientifique, trois axes de recherche ont été définis selon le schéma proposé ci-contre (**Figure 21**).

Axe I - Analyse de l'apparence visuelle des plantes (d'un ou plusieurs lots de buissons ligneux d'ornement) en rotation sur vidéo

Proposer et tester des outils méthodologiques basés sur l'analyse sensorielle et l'analyse d'image qui intègrent la 3D des plantes et la variabilité phénotypique intra-culturelle : (**Chapitre 1**) préalablement, sur des rosiers virtuels simples mais représentatifs d'un lot d'environ cinq à six mois en conditions de culture non limitantes, pour éprouver l'approche proposée ; (**Chapitre 2**) puis à plusieurs stades de développement sur différents lots de plantes réelles soumises à un gradient environnemental et donc potentiellement plus contrastées. L'approche proposée et présentée repose sur l'utilisation de vidéos permettant la présentation des plantes en rotation, fixant ainsi le matériel végétal tout en conservant l'ensemble de ses facettes, et donc sa structure 3D.

L'objectif étant en finalité de vérifier s'il est possible de prédire l'apparence visuelle de plantes d'ornement évaluées objectivement par caractérisation sensorielle à l'aide de mesures obtenues par analyse d'image.

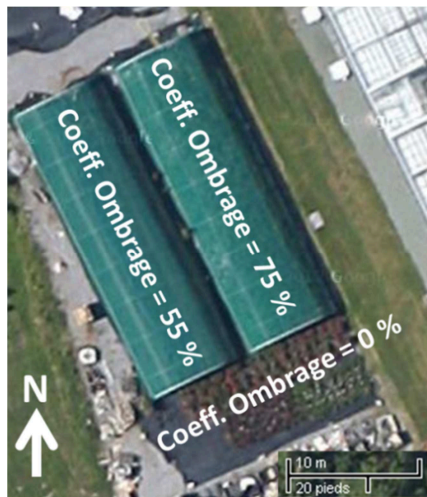
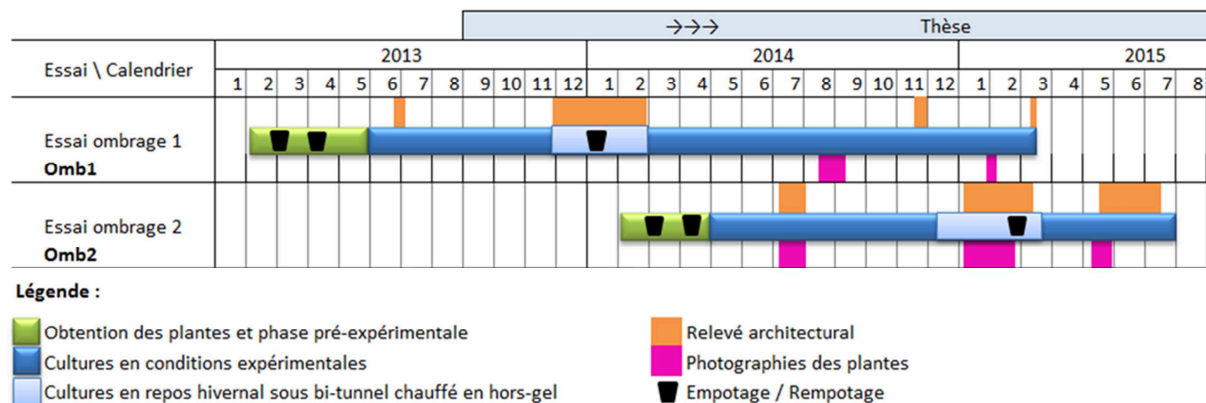


Figure 22. Plateforme hors-sol de culture utilisée sur le site expérimental de l'IRHS à Angers (47°28'45.8"N, 0°36'32.3"O, altitude: 48 m) pour les essais avec le facteur lumière. Les tunnels sont recouverts par un écran ayant un coefficient d'ombrage de 55 % pour l'un, et de 75 % pour le second (maillage de fibres vertes et noires en polyéthylène 100 % résistant aux ultra-violets, Texinov® ; MDB Texinov, Saint-Didier-de-la-Tour, France). La parcelle sans tunnel représente la modalité témoin, avec un coefficient d'ombrage de 0 %. (M. Garbez ; via <http://maps.google.fr/>, ©2014 Google, DigitalGlobe, image satellite du 18/07/2012).

(A)



(B)

Essais	Données acquises	Objectifs
Omb1	Architecturales Images	Calage pour effectuer les mesures architecturales Base de données architecturales Montage du système et test pour l'acquisition des photographies Obtention de vidéos pour former le panel d'analyse sensorielle
Omb2	Architecturales Images et mesures Sensorielles	Caractérisation architecturale Formation du panel d'analyse sensorielle Caractérisation sensorielle par profil sensoriel Caractérisation par analyse d'image Prédiction de l'apparence visuelle via architecture / via images

Figure 23. Organisation pratique de la démarche expérimentale : (A) calendrier synthétique de culture et d'acquisition des données pour les plantes cultivées sous différents niveaux d'ombrage ; (B) données acquises et objectifs en fonction des essais.

Axe II – Analyse architecturale pour l'étude des buissons ligneux d'ornement

Etudier le développement architectural d'un buisson au travers du modèle rosier avec le cultivar 'Radrazz' Knock Out® sous deux approches : la première en utilisant la lumière, décisive par sa qualité et sa quantité pour la croissance et la ramification du rosier, comme facteur permettant d'observer une plasticité phénotypique plus accrue, et la seconde, en réponse à une pratique culturale traumatique courante en production.

(i) Avec une approche fondamentale, la lumière a été choisie comme facteur appliqué selon trois modalités d'ombrage (**Figure 22**) pour accentuer la diversité architecturale afin d'étudier l'architecture d'un buisson et sa plasticité en conduite libre à différents stades. Dès à présent, il convient d'insister sur le fait que l'étude des effets de la lumière sur le développement architectural du rosier n'est en aucun cas l'objet de cette thèse. La finalité visée avec l'application de ce facteur est de générer un large continuum architectural permettant potentiellement de travailler sur une plus vaste étendue de différences visuelles entre les plantes. Au-delà, la lumière, impliquée dans de nombreux processus du développement des végétaux, est un facteur commun à une grande majorité de travaux de l'équipe Arch-E pour l'étude du rosier à différentes échelles. Pour ce facteur, deux essais ont été mis en place. Le premier essai (Omb1), par anticipation au commencement de cette thèse, a été mis en place en février 2013, et a servi à caler les méthodes pour effectuer les relevés architecturaux par digitalisation 3D et mettre au point un système d'acquisition d'images de plantes en rotation. Le second (Omb2), mis en place en février 2014, est l'essai sur lequel nous avons appliqué ces méthodes pour l'obtention des résultats (**Chapitre 2**) permettant de répondre aux objectifs des axes II et III identifiés pour cette thèse selon le protocole illustré en **Figure 23**.

(ii) De manière appliquée, la première pousse mise en place par le rosier est habituellement supprimée par la taille dans les pratiques horticoles. Son ablation plus ou moins tardive peut avoir une influence sur la poursuite du développement de la plante, et donc potentiellement impacter son apparence visuelle. Nous avons alors proposé de tester cette hypothèse en situation de production au sein des Pépinières Desmartis avec un facteur ablation reposant sur trois conditions de suppression plus ou moins tardive de la première pousse. Malheureusement, l'essai mis en place a été biaisé par l'endommagement sévère de nombreuses pousses par des ravageurs. Ne permettant pas de réaliser une analyse pertinente vu le faible nombre restant de plantes « exploitables », il a été choisi de ne pas présenter cet essai qui devra être reconduit ultérieurement.

Axe III – Analyse de Relations et de modèles prédictifs entre l’architecture d’un buisson ligneux d’ornement et son apparence visuelle

Evaluer s’il est possible d’identifier via l’essai Omb2 certaines composantes architecturales clés en lien avec l’apparence visuelle, et leur potentiel pour établir des modèles prédictifs de cette apparence. La substitution de la méthode du profil sensoriel par l’analyse d’image est considérée dans l’axe I. Pour cet axe-ci, il a été choisi dans cette thèse d’utiliser les mesures sensorielles comme les variables réponses de référence à expliquer, et les mesures architecturales comme les variables explicatives.

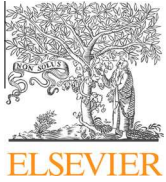
Finalement, l’application et le transfert de ces méthodes pour l’étude des préférences des consommateurs en fonction de différents paramètres (visuels et ou architecturaux), puis de leur adaptation pour d’autres plantes d’ornement, en particulier chez *Lagerstroemia* L. (lilas des indes), seront abordés non pas expérimentalement, mais de manière critique comme élément de conclusion de ce manuscrit.

Chapitre 1 : Méthodologie sur plantes virtuelles pour la
caractérisation visuelle en trois dimensions de plantes d'ornement

I. Avant-propos

Comme il a été présenté au cours de l'introduction, l'analyse sensorielle sur rosier s'est rapidement orientée vers l'utilisation de photographies pour la présentation des plantes. La photographie permet de figer l'apparence visuelle des plantes, et facilite ainsi énormément la mise en place des épreuves sensorielles. Néanmoins, la configuration 3D de la plante ne peut pas être fidèlement retranscrite à l'aide d'une simple photographie. De plus, les études réalisées se sont essentiellement focalisées sur la caractérisation de plantes contrastées, par le choix de différents cultivars, ou par l'exposition d'un cultivar à gradient environnemental à l'échelle des lots de plantes. Or, même dans un lot de plantes cultivées dans les meilleures conditions, il subsiste toujours une certaine variabilité entre elles. Quels moyens utiliser pour faciliter la mise en place de l'analyse sensorielle et prendre en compte la 3D des plantes ? La variabilité architecturale observable au sein d'un lot de plante est-elle source de différences visuelles suffisamment prononcées pour être perceptibles et explicables ? Le profil sensoriel est-il adapté pour identifier et quantifier des différences ? Peut-on les prédire par une méthode instrumentale automatisable ?

Ces questions sont préalables et nécessaires à la définition d'une méthodologie et à son évaluation pour étudier les relations entre apparence visuelle et architecture des plantes. Elles ont été abordées dans un premier temps par le biais d'outils informatiques permettant la modélisation de plantes virtuelles pour leurs nombreux avantages aux travers de deux articles présentés ci-après. Les résultats présentés dans le premier article: « *Assessing the visual aspect of rotating virtual rose bushes by a labeled sorting task* », paru en 2015 dans *Food Quality and Preference*, et le second : « *Predicting sensorial attribute scores of ornamental plants assessed in 3D through rotation on video by image analysis: a study on the morphology of virtual rose bushes* », paru en 2016 dans *Computers and Electronics in Agriculture*, furent tous deux présentés oralement sous une forme préliminaire par D^r Ronan Simoneaux, respectivement lors du 10th et du 11th Pangborn Sensory Science Symposium en 2013 à Rio de Janeiro au Brésil (Garbez et al. 2013) et en 2015 à Gothenburg en Suède (Garbez et al. 2015). *In fine*, sur plantes virtuelles, ces travaux démontrent : (i) la possibilité et la pertinence d'utiliser un support vidéo pour présenter les plantes en rotation pour la caractérisation de leur apparence visuelle par analyse sensorielle ; (ii) la possibilité de prédire cette caractérisation, via des modèles de régression linéaire simples ou peu complexes, en utilisant des résumés statistiques de mesures sur image acquises sur les trames extraites des vidéos montrant les différentes facettes des plantes au cours de leur rotation.



Assessing the visual aspect of rotating virtual rose bushes by a labeled sorting task



M. Garbez^a, G. Galopin^a, M. Sigogne^b, P. Favre^{b,c}, S. Demotes-Mainard^b, R. Symoneaux^{d,*}

^a Agrocampus Ouest, Centre d'Angers, UMR 1345 IRHS (Agrocampus Ouest, INRA, Université d'Angers), SFR QUASAV 4207, 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France

^b INRA, UMR 1345 IRHS (Agrocampus Ouest, INRA, Université d'Angers), SFR QUASAV 4207, 42 rue Georges Morel, 49071 Beaucauzé, France

^c University of Fribourg, Department of Biology, Plant Biology, Chemin du Musée 10, 1700 Fribourg, Switzerland

^d Groupe ESA, UPSP GRAPPE, SFR QUASAV 4207, 55 rue Rabelais, BP 30748, 49007 Angers Cedex 01, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 September 2013

Received in revised form 5 June 2014

Accepted 11 June 2014

Available online 19 June 2014

Keywords:

Free sorting

Verbalization task

Rotating virtual plant video

Rosa hybrida

Ornamental plant

ABSTRACT

Aesthetics is one of the major parameters for consumers when buying a rose bush. Therefore, managing this quality is important for agronomists. Tools are needed to assess visual characteristics and to find links with architectural plant parameters. Sensory analyses were developed using real plants and photographs as stimuli. With technology and modeling improvements, using virtual plants could presents numerous advantages. This study demonstrated the feasibility of using rotating virtual rose bush videos as stimuli for a labeled sorting task. The virtual rose bush reflected a natural within-crop variability of one cultivar based on bud breaks location and axes length. Two panels of subjects closely linked to the horticulture sector sorted and described 40 rotating virtual rose bush videos. Non-metric Multidimensional Scaling (MDS) results for both panels were similar and allowed us to highlight five groups of virtual rose bushes with their specific sensory characteristics and their own most representative products using a combination of the paragons and the most typical products. This approach revealed that subjects detected high visual differences between products, and that by using rotation, they were able to integrate 3D properties about variations around plant facets. Finally, a labeled sorting task is a powerful method for preliminary exploration of the visual aspect of virtual plants.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Introduction

The visual quality of ornamental plants is a specific criterion that plays a major role in the purchase triggering. This quality stands on visual characteristics tightly linked to a 3D component that is the plant architecture which results from the characteristics and the spatial organization of the aerial organs (Boumaza, Demotes-Mainard, Huché-Théliér, & Guérin, 2009; Morel, Galopin, & Donès, 2009). Impacts of growing practices on some architectural parameters are well-known for numerous plant species. Nonetheless, growers and breeders make use of them more or less empirically, and resulting effects on visual properties from a sensory point of view still poorly studied (Crespel, Le Bras, Relion, & Morel, 2014; Huché-Théliér et al., 2011).

Recently, Boumaza et al. (2009) transposed the sensory approach to the ornamental field with one of the most famous ornamental plants as model: the rose bush. This approach made it possible to select sensory attributes according their unambiguity,

discrimination power, and independence using plants directly as stimuli. For some sensory attributes about shape properties like “top-sided shape”, “rounded form”, “shape filling” and “plant compactness”, the subjects were asked to look only one plant facet: the one with the plant label visible. For the others attributes, subjects were allowed to turn the plants around, but this was not a requirement. Unfortunately, this study did not make it possible to integrate the plant 3D in the reduced final list of sensory attributes. Using single facet picture of plants as stimuli, following sensory studies on rose bushes based on the previous of Boumaza et al., (Boumaza, Huché-Théliér, Demotes-Mainard, Le Coz, & Nathalie, 2010; Huché-Théliér et al., 2011; Santagostini et al., 2014) have discarded the plant 3D. However, plants have multiple facets, and the sensory perception of this should be investigated. Furthermore, architectural variations among a single rose bush crop composed of plants from the same cultivar and grown in the same conditions could be high (Demotes-Mainard et al., 2013). The implications of this variability among such crops need to be studied to better understand how much this variability could impact plants' visual properties, and to target the key architectural parameters related thereto.

* Corresponding author. Tel.: +33 (0) 2 41 23 55 55; fax: +33 (0) 2 41 23 55 00.

E-mail address: r.symoneaux@groupe-esa.com (R. Symoneaux).

Using plants from a same cultivar grown in a unique environment recorded on video while rotating as stimuli for sensory evaluations could be therefore an interesting way to investigate: (i) if the human eye can distinguish visual differences among such a crop; and (ii) if it integrates or not the plant 3D for the characterization. For this, using virtual modeling represents an efficient alternative to counteract some limitations that occurs with real plants and photographs like for presenting the plants' various facets or defoliated plants as mentioned by Boumaza et al. (2010). Indeed, virtual plant modeling offers many advantages for various experimental issues (Heuvelink, Tijsskens, & Kang, 2004). It enables a quick generation of large samples that can be visualized and manipulated in 3D on computer screens. Virtual plant growth can be easily monitored, controlled and stopped with various parameters. Also, architectural parameters of virtual plants can be directly obtained from the modeling process, whereas it is very time-consuming and tedious on real plants (Crespel, Sigogne, Donès, Relion, & Morel, 2013). In addition, using virtual plants does not involve growing costs, and allows taking and moving them readily thanks to data storage devices.

In this context, using *Rosa hybrida* as a model, our research project aims to better understand the dynamic relationships existing between the architectural construction of the bush and its visual appearance. For this, an objective and suitable method for visual characterization of virtual and real plants that integrate their 3D is needed. In the present paper, a first attempt to use as stimuli virtual rotating plants generated from architectural data of a single rose bush crop for a sensory evaluation of their visual appearance is presented.

The sensory profile derived from the quantitative descriptive analysis (QDA[®]) methodology (Stone, Sidel, & Singleton, 1974) is a well-known suitable tool to explore sensory properties of complex products. It could have been used first, however before establishing a sensory profile, it is important to know if the product space studied presents perceptible differences. Otherwise, there is no reason to do so (Strigler, Touraille, Sauvageot, Barthélémy, & Issanchou, 2009). This is particularly relevant when studying genetically identical plants grown in the same environment. Thus, a labeled sorting task *i.e.* a free sorting followed by a verbalization task (Bécue-Bertaut & Lê, 2011) was preferred for a first attempt. This sensory procedure appears to be a quick and effective way to characterize a such product space, and could provide solid bases for guiding subsequent analyses such as sensory profiles (Chollet, Lelièvre, Abdi, & Valentin, 2011). The sorting task has been tested on various types of products and has proved itself to be an effective, well-established method that makes it possible to know if a product space shows an underlying perceptual or conceptual structuring. This task requires little time and people who are familiar with the product field but not necessarily trained (Abdi, Valentin, Chollet, & Chrea, 2007; Chollet et al., 2011; Varela & Ares, 2012). It is a suitable method to reveal eventual differences and similarities within a large sample. Indeed, Bijmolt and Wedel (1995) showed that when using free sorting compared to other discriminative tasks (paired or triadic comparisons, conditional ranking), subjects expressed less fatigue, less boredom, better task insight, and they took less time to complete the task. Nevertheless, sorting tasks alone do not provide any information about the properties used by the subjects to evaluate the products. Thus, a verbalization task could follow the sorting in order to interpret the eventual underlying structure of the product space (Chollet et al., 2011; Faye, Courcoux, Giboreau, & Qannari, 2013). Therefore, a labeled sorting task was judged to be an appropriate method to investigate quickly if it is possible: (i) to use videos of rotating virtual plants as stimuli; (ii) to perceive visual differences among plants from a same cultivar and grown in the same conditions; and (iii) to integrate the plant 3D in the characterization.

Materiel and methods

Sample collection: Rotating virtual rose bush videos

Forty rotating virtual rose bush videos (referred to below as virtual rose bushes or products) were collected (see Video 1 for an example of a rotating virtual rose bush video and Fig. 1 for a frame still of this video). To obtain these virtual rose bushes, data from an architectural analysis of five-month old 'Radrazz' (a *Rosa hybrida* cultivar marketed under the name of Knock Out[®]) cultivated under controlled non-restrictive conditions were used (Morel et al., 2009). These data made it possible to create a matrix for a normalized plant that combine according to the location of the buds: (i) the probability of bud break; and (ii) the probability that the bud break give a short or long axis. The matrix and its usage rules presented thereafter, were then implemented in a former virtual plant structural model of the 'Radrazz' cultivar (Favre et al., 2007) built using L-studio, a Lindenmayer system-based plant-modeling software (Karwowski & Prusinkiewicz, 2004), making it possible to generate rotating plants *in silico* using a structural and probabilistic model. Then videos of the rotating plants were recorded with CamStudio[™], a free screen-recording software (CamStudio, n.d.).

More precisely, this model considers short and long axes respectively composed of 3 and 9 metamers, each formed by an internode, a node, a leaf and a bud. Axes are edified by vegetative terminal apices which turn at the end of their growth into flowers and then into fruits. The modeling process starts by the growth of a first branching order 1 long axis. Then, a random selection ordered according to the decreasing bud break probability of each metamer is done to sample which buds give branching order 2 axes. A second random selection is done to sample which bud breaks give long or short axes. At each new branching order edified, the numbers of long and short axes of the current step are compared to respective minimum and maximum threshold values. If thresholds are not fulfilled, the algorithm discards the axes and restarts the random selections on the inferior branching order until it does. Then the process continues until the plant has formed branching order 5 axes.

Since data of Morel et al. (2009) were obtained from plants of the same cultivar grown in the same conditions, the modeling process reflects thus the architectural variability within a similar crop.

Subjects

Thirty-four volunteers closely linked to the horticulture sector were recruited from the Research Institute on Horticulture and Seeds (RIHS), the French Group for the Study and Control of Varieties and Seeds (GEVES), and the French Institute for life, food and horticultural sciences and landscaping (Agrocampus Ouest), none of whom had followed specific training for this experiment. The subjects were divided into two panels on the basis of their background characteristics (Table 1): panel 1 composed of 16 students (94% under 26 years old), and panel 2 composed of 18 engineers, researchers and technicians (94% over 26 years). This strategy was chosen for two reasons: (i) a priori, the two panels differ on the basis of their horticultural product knowledge; (ii) the availability of the subjects did not allow a repetition, thus comparison between panels could be used for the task reproducibility assessment.

Sensory test conditions and procedure

The test took place in computer labs with identical 17" CRT monitors configured with their optimal preset 1600 × 1200 resolution. The subjects were placed on individual workstation sufficiently spaced from each other to avoid communication between them. Virtual rose bushes were coded with three-digit numbers

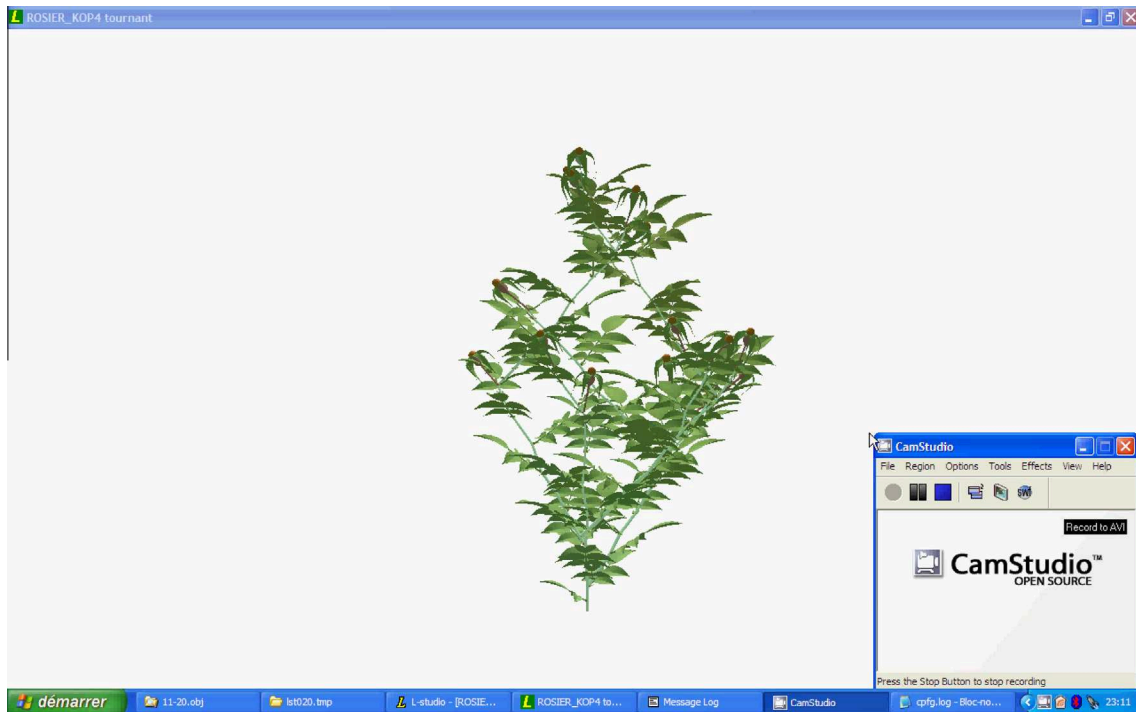


Fig. 1. A frame still in reduced size of a rotating virtual rose bush video (R_20).

Table 1

Distribution of the background characteristics of the subjects for the two panels of Experiment 1.

	Panel 1 (n = 16)	Panel 2 (n = 18)
<i>Age</i>		
16–25 years	15	1
26–35	1	3
36–45		8
46–55		4
≥56		2
<i>Gender</i>		
Female	7	14
Male	9	4
<i>Working on ornamental plants</i>		
No	4	12
Yes	12	6
<i>Occupational category</i>		
Engineer/Researcher		6
Student	16	
Technician		12

and presented on individual Microsoft® PowerPoint files containing a slide with coded buttons hyperlinked to the virtual rose bush video files. Buttons were displayed from left to right and from top to bottom according to a William Latin square-based design adaptation. Subjects had to click on these buttons to watch associated virtual rose bushes in a pop-up window and had to close it before opening another one.

Subjects were first asked to “sort the virtual rose bushes into homogeneous groups according to their visual similarity (you can make as many groups as you want)” by moving buttons on their own PPT slide. Subjects could see each virtual rose bush as many times as necessary. Then, they were asked to write their groups down on paper and to “give some words to describe and differentiate each group (do not use a drawing or diagram)”. So as not to influence the sorting, subjects were not aware of the purpose of the second step before the first one was completed.

Data analysis

Product mapping and clustering

Sorting results were encoded in dissimilarity matrices respectively for panel 1, panel 2, and pooled panel, representing for each product pair the number of subjects who did not put them together in a same group. These matrices were then analyzed with a non-metric procedure of multidimensional scaling (MDS) and the final configurations were selected using a stress scree plot (Faye et al., 2004). Sorting consistency was evaluated by separately analyzing Panel 1 and 2 and then appraising the similarity of their product configurations by the regression vector coefficient (RV) and its statistical significance (Faye et al., 2004; Josse, Pagès, & Husson, 2008). In parallel, a Hierarchical Cluster Analysis (HCA) was performed with Ward’s method on the dissimilarity matrix obtained for the three panel configurations to identify groups of similar virtual rose bushes. In addition, the Rand Index (RI) was computed to quantify the similarity between the partitions of the two panels (Faye et al., 2004; Hubert & Arabie, 1985).

Then, for the group illustrations, two representativeness notions were combined in order to select a representative virtual rose bush for each group of products: (i) paragons: the products closest to their group center; (ii) the most typical products: products the farthest from the other group centers (Husson, Josse, & Pagès, 2010). The five best paragons and most typical products were retained within each group. The best paragon among the virtual rose bushes that were given by each group was selected as the most representative of its group.

Description analysis and transcoding for product mapping interpretation

The description analysis and transcoding followed an adaptation of the method provided by Symoneaux, Galmarini, and Mehinagic (2012) for comment analysis of consumer’s likes and dislikes. Five ornamental plant experts read group descriptions in detail and separated each into individual expressions. Experts

Table 2
Encoding descriptions: examples of data coding for four group descriptions.

Description	Expression	Reduction	Category	Quant. mod.	Loc. mod.	Shape mod.	Color mod.	Lexical item
Flared habit, open, often unbalanced habit, inhomogeneous.	- Flared habit	- Flared	Shape			Flared		Shape_Flared
	- Open	- Open	Shape			Open		Shape_Open
	- Often unbalanced habit	- Unbalanced	Symmetry	0				Symmetry_0
	- Inhomogeneous	- Inhomogeneous	Homogeneity	0				Homogeneity_0
Denuded base, good branching (first branches departure too high).	- Denuded base	- Denuded base	Branching	0	B			Branching_0B
	- Good branching	- Good branching	Branching	2				Branching_2
	- First branch	- Branches high	Branching	2	A			Branching_2A
	- departure too high							
Branching on the whole axis but symmetric.	- Branching on the whole axis	- Branching on the whole axis	Branching	2	D			Branching_2D
	- But symmetric	- Symmetric	Symmetry	2				Symmetry_2
Intermediate branching, unbalanced plant, less favorable aesthetic.	- Intermediate branching	- Intermediate branching	Branching	2	M			Branching_2 M
	- Unbalanced plant	- Unbalanced	Symmetry	0				Symmetry_0
	- Less favorable aesthetic	- Less aesthetic	Hedonic					
Dark foliage, red fruits, small size, slightly branched.	- Dark foliage	- Dark foliage	Foliage color int.	2				Foliage color int._2
	- Red fruits	- Red fruits	Fruit color				Red	Fruit color_Red
	- Small size	- Small	Height	0				Height_0
	- Slightly branched	- Slightly branched	Branching	1				Branching_1

Quant. mod. (Quantification trait): 0 (not); 1 (slightly or moderately); 2 (presence or a lot).

Loc. mod. (Location trait): B (Basal); M (Median); A (Apical); D (Diffuse).

Foliage color Int. (Foliage color Intensity).

refined those expressions into “reductions”, keeping their essential meanings without interpretation. They then created categories that integrated all visual dimensions evoked by the subjects such as shape, branching, foliage density, etc.; meaningless or uninformative and hedonic expressions were discarded. In the cases of overly ambiguous synonyms or antonyms, a non-over-grouping and non-over-interpretation strategy was chosen. They also associated traits related to intensity, color, location and shape with these categories in order to clarify the meaning of each reduction.

The combination of categories and traits for the reduction transcoding are subsequently referred to as “lexical items” (see Table 2 for some transcoding examples). If several reductions for a description were transcoded into the same lexical item, duplicates were removed to keep only one of them per description. The lexical items were then reallocated to each product. The magnitude of each lexical item was computed over the products as the maximum number of occurrences for one product minus the minimum. Only those with a magnitude greater than 3 were kept for the mapping interpretation. To project lexical items on the product space for interpreting MDS dimensions, Pearson correlations between lexical items (number of occurrences for each product) and MDS dimensions (product coordinates on each dimension) were computed (Faye et al., 2004).

Statistical analysis

Statistical analyses were performed with the R environment (R Development Core Team., 2012). The following packages were used: MASS (Venables & Ripley, 2002) for non-metric MDS; FactoMineR (Husson, Josse, Lê, & Mazet, 2013) for RV computing; stats for HCA (R Development Core Team, 2012); and mclust (Fritsch, 2012) for RI computing.

Results

Sorting analysis

The stress scree plot (Fig. 2) showed that no clear rupture could be detected for the three stress patterns. Nevertheless, a stress of 0.1 is considered to be sufficient to determine an acceptable fit with the observed dissimilarity (Faye et al., 2004; Krzanowski & Marriott, 1994). With a stress of 0.09 for each panel and 0.08 for

the pooled panel, the five-dimensional configurations fulfilled this criterion and were kept for subsequent analysis.

The five dimensional product mapping obtained with panel 1 and those with panel 2 returned a highly significant RV equal to 0.75 (p -value < 0.001). From different studies, Vidal, Silva Cadena, and Correa (2014) reported that “the minimum RV value that has been considered as indicator of good agreement between sample configurations ranges from 0.65 to 0.85”. They also argued that if two mappings of same products return a significant RV, then it can be concluded that information gathered in the two mappings is similar. Despite this, RV interpretations should be done with care since it is dependent of the data dimensionality and inertia (Ares et al., 2014; Tomic, Forde, Delahunty, & Næs, 2013). In the present study, the RV value and its significance suggested two rather coherent product mappings with some differences. In order to precise this proximity, a HCA on each panel data was performed on their respective dissimilarity matrix. The two resulting product partitions obtained showed a quite good crosschecking (Table 3): for both panels, five core groups of products could be distinguished, and only seven products out the 40 were not classified similarly. With a RI = 0.88, we can assume that the two partitions as the product mappings shared a quite large amount of similar information. We thus concluded that the sorting reproducibility was good enough to consider a global mapping of the pooled panel data without occulting too much information.

Equally, the pooled panel data also made it possible to distinguish the previous five groups of virtual rose bushes represented on the MDS mapping (Fig. 3). The first dimension (36.8% of the total inertia) opposes Groups 1 and 2–Groups 5 and 4. The second dimension (26.4%) splits Groups 1 and 4 from the others. The third and fourth dimensions (15.6 and 11.7%) both separate Group 3 from Groups 5 and 1 and from Groups 2 and 4. With this partition, the most representative virtual rose bushes are R_20, R_08, R_04, R_06 and R_25 for Groups 1 to 5, respectively (Videos 1, 2, 3, 4 and 5, respectively. See Fig. 4 for a picture of the virtual rose bushes).

Description analysis and transcoding for product mapping interpretation

Using the descriptions given by the subjects allowed a sensory interpretation of the product space. After removing hedonic (e.g.,

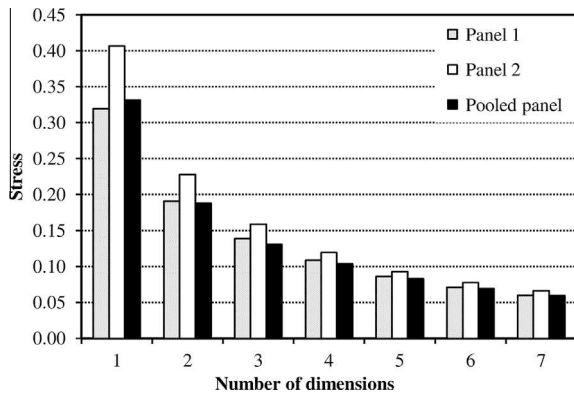


Fig. 2. Stress scree plot: stress value according to the number of dimensions involved in the MDS procedure carried out on the data for each panel and for the pooled panel.

Table 3

Confusion matrix for the 40 virtual rose bushes according to the two partitions obtained from product clustering of each panel data. Products that were not classified similarly between the two partitions obtained are pointed out in bold.

Panel 2 partition	Panel 1 partition					Total
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	
Group 1	6	2	3			11
Group 2			7			7
Group 3		6				8
Group 4				2		8
Group 5					6	6
Total	6	8	10	10	6	40

“interesting aspect”, “aesthetic”, “unpleasant”), meaningless or misunderstood expressions (e.g., “model”, “one axis”, “fructification with two axes”) and lexical items in duplicate, 631 reductions out of the 703 initial ones isolated from the descriptions given by the subjects were kept for subsequent analysis. Each reduction was associated with one of the 81 lexical items, each composed of an association of one of the 24 description categories indicated by the experts and the traits necessary to specify their characteristics. The most recurrent description categories (Fig. 5) concerned the branching of the rose bushes (16.5% of the reductions), their symmetry (14.7%), their compactness (13.9%), their shape (11.7%), their height (9.8%) and their foliage color intensity (7.8%). Foliage density, homogeneity and fruit quantity were the second most prevalent categories (3.6 to 4.3% for each). Nonetheless, a significant difference in the distribution of the description categories observed for the two panels (data not shown) was found (Fisher’s exact test for count data returned a p -value < 0.001). Panel 1 was more focused on foliage and fruit color properties, the homogeneity, and the order 1 stem length (the major axis of the plant) than panel 2, more focused on the foliage density, the fruit quantity, and the shape regularity.

After reallocation of the 81 lexical items to the virtual rose bushes, 25 of them fulfilled the chosen magnitude criterion of 3 and were kept for the product mapping interpretation. Both represented 76.2% of the 3045 occurrences observed for all lexical items. On the basis of the correlation analysis between the lexical items and the MDS dimensions (Fig. 6; the fifth dimension is not clearly related to any lexical items and is not shown). The product clustering (Fig. 3) could be thus interpreted: Group 1 is composed of compact rose bushes, symmetrical, highly branched from bottom to top, homogeneous, small, regularly-shaped and very leafy; Group 2 differs from Group 1 by a greater height, greater branching and compactness on top and an absence of basal branching; Group 4 is composed of asymmetric rose bushes, slightly leafy, not very branched, heteroge-

neous, loose, frail and top-sided; Group 5 differs from Group 4 by a vertically compressed or Y shape, an absence of basal branching, long stems and a non-characterization by asymmetry; Group 3 is the most heterogeneous and forms an intermediary group between Groups 2 and 4. It is mainly composed of tall rose bushes, more branched on the top than on the bottom; some are asymmetric and others have heterogeneous branch lengths or a lighter foliage.

So, the main differences explaining the product space structuration sat on the branching degree and location, the foliage density, the compactness, the symmetry, the shape and its regularity, the homogeneity, and the height. Interestingly, “Homogeneity_2” and “Shape_regularity_2” were closely linked and both strongly opposed to “Homogeneity_0”. Both were not part of the most recurrent description categories but they were well-linked to the first MDS dimension like for the quantitative lexical items of “Branching”, “Foliage density” and “Compactness”. This implies that uniformity of the plant’s facets along the rotation according general shape and or eventually more focused characteristics was considered by the subjects. This consideration was related to the major direction of the product space which reflects also in a same way the quantitative level of compactness, branching and foliage density of the virtual rose bushes.

Discussion

The subjects performed the task in an hour and half to two hours. They did not express a particular annoyance or boredom showing that they are able to deal with videos of rotating virtual plant and that such an experiment is easily doable. Non-metric MDS product mappings showed that subjects perceived differences and similarities between the virtual rose bushes that can be resumed in a five dimensional space. Using the RV, sorting results of the two panels were judged as reflecting a rather good concordance. However, RV interpretations and comparisons with other studies should be done with care since both the data dimensionality and the size of difference among the products have an impact on this index. This stress yet highlighted need of other criteria less sensitive and more suitable than the RV, but also than the modified RV (or RV2), to measure similarity between data matrices (Ares et al., 2014; Tomic et al., 2013; Vidal et al., 2014). Anyway, in this experiment, a similar five groups partitioning was found for both panels (RI = 0.88). Therefore, the sorting was judged to be sufficiently reproducible to consider a pooled panel for which a similar product partitioning was also found. Panel results comparison for identical sensory tasks is an usual strategy, for example : to study expertise level effect (Chollet et al., 2011), or for cross-cultural studies (Bécue-Bertaut & Lê, 2011). Here, it appeared also as an interesting strategy to investigate the global task reproducibility.

From a standpoint on sensory methodology for the sample size, as suggested by Faye et al. (2004), a sorting task of products tasted in the mouth is more tiring than a sorting of products evaluated on visual and tactile properties. Here, subjects’ feelings and time needed to complete the task did not suggest an oversized stimuli sample. Using beers as stimuli, Chollet et al. (2011) addressed the sample size effect on sorting task efficiency, and concluded that an optimum sample size around 12 products allowed better results. The authors argued that the number of products that can be efficiently sorted strongly depends of the product nature, the resemblance degree between products, and of the short-term memory abilities of the subjects. On this particular point, for a sorting task or other sensory methods, further investigations should be done to better understand plant sample size effects on the product characterization and the panel(ist) performance. Nevertheless, for a sorting task, so as not to take advantage of the subjects’ short-term memory, and for improving the test usability, it would

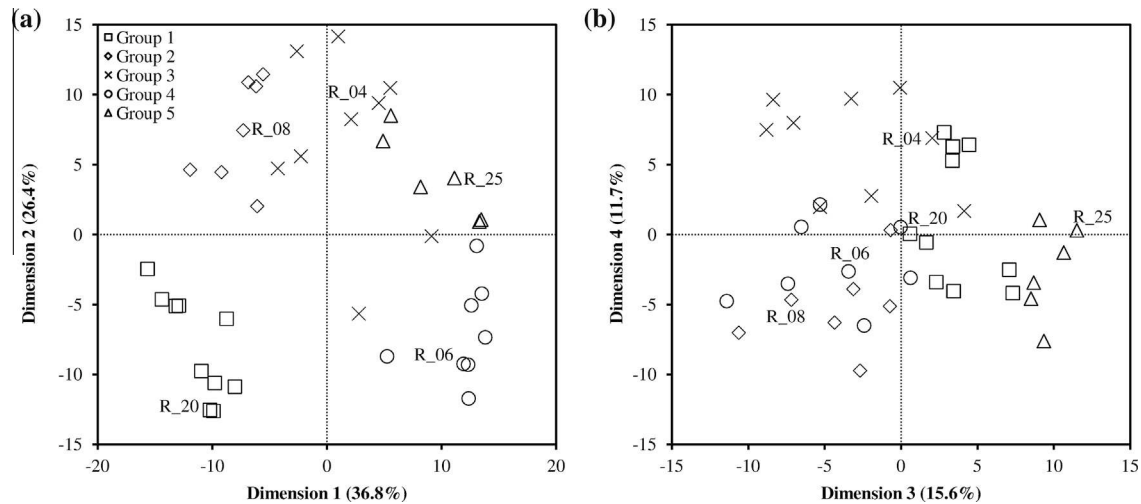


Fig. 3. MDS product mapping and groups identified by clustering: (a) on the first two dimensions; (b) on dimensions 3 and 4. Representative products of the groups are indicated by their name next to their markers.

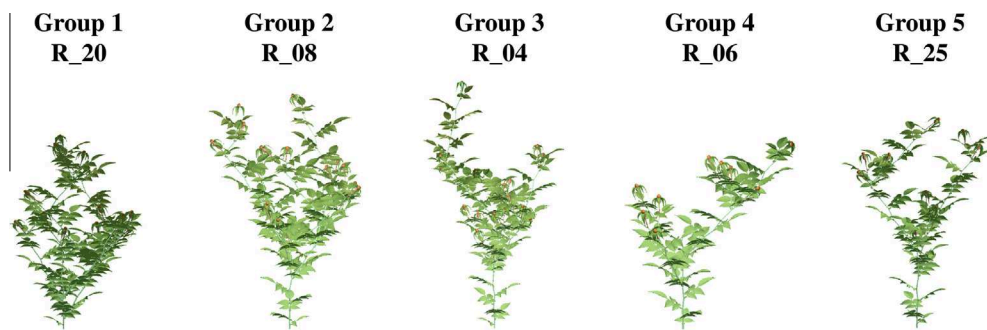


Fig. 4. The most representative virtual rose bush of each group identified by clustering.

perhaps be possible to improve the setup by using a real simultaneous presentation of the virtual plants. For example, a presentation on a large tactile screen with the possibility to sort directly the videos simultaneously played would be a valuable task improvement.

From an agronomic point of view, as mentioned by Demotes-Mainard et al. (2013), interplant variability of various architectural parameters within a rose bush crop is quite high. Here, with only two architectural parameters that govern branching and axis length, the number of stimuli used ($n = 40$) was sufficient to generate visual differences perceptible by the human eye. This stresses that plants' visual appearance is effectively conditioned by their architecture. Thus, architectural within-crop variability could constitute a product differentiation source that should be studied for a better crop control as required either to increase crop uniformity, or contrary, to generate new product segmentations. Nonetheless, transposition and evaluation on plants at various development stages and with more than two variable architectural parameters should be done to investigate and confirm this.

The verbalization task allowed for a rough description of the virtual rose bushes showing a perceptual structuration with large differences between at least four out of the five identified groups. These differences are mainly based on the general appearance of the plants rather than on precise characteristics of the aerial organs. Except for the buds, which are barely visible, and for the thorns, not apparent on these virtual plants, as the flowers, the vocabulary obtained and used to interpret the product mapping is effectively reliable for the attributes dealt with Boumaza et al. (2009, 2010) obtained

by another methodology for several cultivars and used for the 'Radrazz' alone (Huché-Théliér et al., 2011). This stresses the need to enhance some virtual organ faithfulness to be more exhaustive. Nonetheless, in these studies, the plant height was not being part of the sensory lexicon as reported here. Else, in the initial sensory attribute list of Boumaza et al., "Habit evenness", the attribute the most connected to a 3D perception of the plant was proposed with this definition: "an even habit" means that the plant organs are evenly spread over the plant, and one sees the same thing when turning the plant.", which was rejected because of unambiguity requirements. In the presented results, the description categories "Shape regularity" and "Homogeneity" cover well this previous "Habit evenness" attribute. Lexical items of these description categories were unequally cited by the two panels highlighting some differences in the vocabulary employed by the subjects, but lexical item projection on the product mapping showed that they were in fact closely linked. Moreover they were well related to the first dimension of the product mapping like for quantitative lexical items of "Branching", "Foliage density" and "Compactness" categories, which presented also links between them. Thus, regarding the meaning and original terms they covered, it would have been possible to merge "Shape regularity" and "Homogeneity" together since both depict an integration of the plant 3D by the assessment of the shape uniformity and or uniformity of others characteristics along the plant rotation. So, using rotating plant videos, this study showed that subjects were able to naturally integrate and verbalize plant facet variations. Concerning the proximity of the only quantitative lexical items related to "Compactness", "Branching" and "Foliage

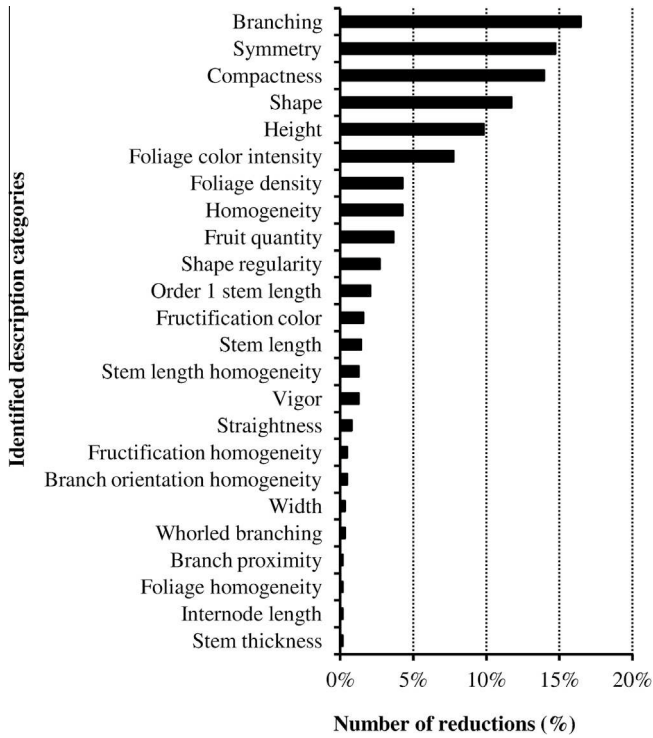


Fig. 5. Number of reductions (%) by identified description categories.

density”, this relation was also reported by Boumaza et al. (2009). Previous authors preconized to use “Twiggy plant”, and “Foliage thickness” but not “Compactness” for independence requirement. As argued by the authors, the plant compactness depends of the foliage quantity and the branching degree. However, the size and the 3D shape of the plant could be seen also as compactness determinants. This suggests the need of a better understanding and definition of this multidimensional characteristic frequently misused in the ornamental sector, but also, both facts stress again the delicacy of free description analyzes and sensory attribute list elaboration (Boumaza et al., 2009; Symoneaux et al., 2012).

Finally, a labeled sorting task was a suitable tool to explore quickly the product space and highlight its structuration. The task allowed highlighting representative products and a rich descriptive lexicon basis. As reported already, this kind of preliminary task provides much valuable information to set up subsequent sensory experiments (Chollet et al., 2011; Giboreau, Navarro, Faye, & Dumortier, 2001). Indeed, for a better characterization of such a product space that presents continuous variations, scale-based methods as the sensory profile appear to be more suitable than categorization ones. This is particularly true especially for subsequent envisaged studies on correlation researches between sensory and instrumental data obtained from the plant architecture and images (Chéné et al., 2012; Santagostini et al., 2014). With further complementary researches, integrated methodological tools to better fulfill consumers’ expectations can be sketched for forward thinking growers. The genesis of such tools can stand on the advantages provided by virtual plant modeling devices which integrate genotype and environment interactions’ effects on architectural parameters, and their within crop variability (Crespel et al., 2014; Demotes-Mainard et al., 2013). Such devices associated with instrumental 3D characterization related to visual sensory properties could provide interesting support decision tools for guiding cultural practices toward ornamental plants with specified visual characteristics.

Also, other research areas could also be highly interested by the alternatives that allow virtual modeling devices especially, e.g. : to get more faithful and more normalized product presentation, to get or control easily intrinsic product parameters, to get quickly large sample sets for fulfilling experimental and statistical requirements, and so on. As an example in another domain, Griffiths and Kulke (2002) presented a study in which virtual modeling and video recording have already been used for sensory evaluation of clothing movement of different fabrics in order to develop sensory descriptors and to relate visual descriptors to some fabric mechanical properties.

Conclusions

In this study, the use of rotating virtual rose bush videos as stimuli for a sensory evaluation of their visual appearance was investigated. Virtual plants were obtained through a structural

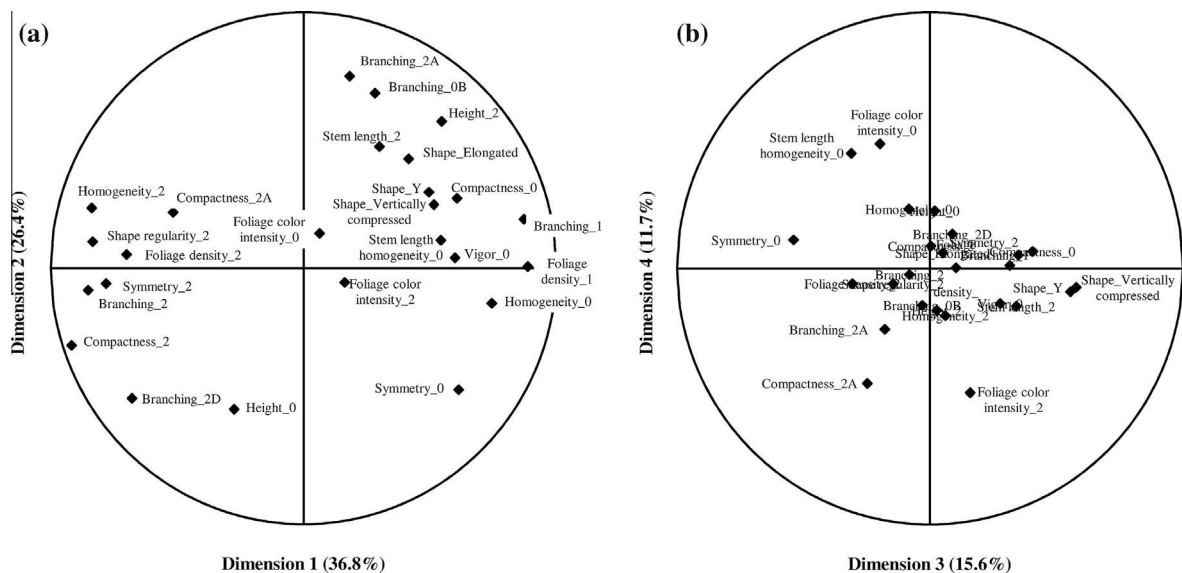


Fig. 6. Correlations between lexical items and: (a) the first two MDS dimensions; (b) the third and fourth MDS dimensions.

and probabilistic modeling process reflecting the variability of bud breaks location and axes length within a five-month old 'Radrazz' crop. The sensory evaluation consisted in a labeled sorting task of 40 videos performed by two panels with different background characteristics, mainly of occupational status and age.

Comparing results of the two panels was an effective way for assessing and showing the global task reproducibility. Even if few differences in the product partitions and the frequencies of the description categories have been highlighted, outcomes obtained in each panel were globally similar. While only considering the variability of two core architectural development parameters in the modeling process, the task enabled to assert that within a rose bush crop, this variability is sufficient to generate substantial visual differences structuring the product space.

Using rotating plant videos allowed the subjects to integrate three-dimensional properties that are not accessible using only one plant facet. This stresses the importance to consider the plant 3D configuration, and the need to better investigate how this could be integrated with sensory and other instrumental methods. However, even if some improvements can be considered like using large tactile screens, using videos of rotating virtual plant as stimuli for a labeled sensory task is quite feasible. Also, it does not seem to be inappropriate for a sensory profile.

Finally, this experiment showed that: (i) rotating virtual plants could be used as stimuli; (ii) high visual differences can be perceived within a single rose bush crop; (iii) using rotation, the subjects can integrate the plant 3D in the characterization. So, knowing that the product space presents large perceptible differences, this experiment provided a solid basis for more rapid panel formation in order to establish a sensory profile for the same type of products. A labeled sorting task is therefore an interesting tool for: (i) quickly exploring the product space; (ii) the identification of product references; and (iii) drawing-up preliminary attribute list.

Acknowledgments

The authors thank the Pays de la Loire Regional Council for their financial support, L. Crespel and Ph. Morel for their expert opinions, G. Wagman for the English correction of the manuscript. Finally, the authors thank all of the people who took part in the sensory test, and also the two anonymous reviewers for their relevant advices on the manuscript.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.06.008>.

References

- Abdi, H., Valentin, D., Chollet, S., & Chrea, C. (2007). Analyzing assessors and products in sorting tasks: DISTATIS, theory and applications. *Food Quality and Preference*, 18(4), 627–640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2006.09.003>.
- Ares, G., Antúnez, L., Giménez, A., Roigard, C. M., Pineau, B., Hunter, D. C., et al. (2014). Further investigations into the reproducibility of check-all-that-apply (CATA) questions for sensory product characterization elicited by consumers. *Food Quality and Preference*, 36, 111–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.03.010>.
- Bijmolt, T. H. A., & Wedel, M. (1995). The effects of alternative methods of collecting similarity data for Multidimensional Scaling. *International Journal of Research in Marketing*, 12(4), 363–371. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8116\(95\)00012-7](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8116(95)00012-7).
- Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., & Guérin, V. (2009). Visual characterization of the esthetic quality of the rosebush. *Journal of Sensory Studies*, 24(5), 774–796. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-459X.2009.00238.x>.
- Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Demotes-Mainard, S., Le Coz, E., Nathalie, L., Pelleschi-Travier, S., et al. (2010). Sensory profiles and preference analysis in ornamental horticulture: The case of the rosebush. *Food Quality and Preference*, 21(8), 987–997. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2010.05.003>.

- Bécue-Bertaut, M., & Lê, S. (2011). Analysis of multilingual labeled sorting tasks: Application to a cross-cultural study in wine industry. *Journal of Sensory Studies*, 26(5), 299–310. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-459X.2011.00345.x>.
- CamStudio. (n.d.). CamStudio (Version 2.00). Retrieved from <http://camstudio.org>.
- Chéné, Y., Rousseau, D., Lucidarme, P., Bertheloot, J., Caffier, V., Morel, P., et al. (2012). On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, 82, 122–127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2011.12.007>.
- Chollet, S., Lelièvre, M., Abdi, H., & Valentin, D. (2011). Sort and beer: Everything you wanted to know about the sorting task but did not dare to ask. *Food Quality and Preference*, 22(6), 507–520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.02.004>.
- Crespel, L., Le Bras, C., Relion, D., & Morel, P. (2014). Genotype × year interaction and broad-sense heritability of architectural characteristics in rose bush. *Plant Breeding*. <http://dx.doi.org/10.1111/pbr.12157>.
- Crespel, L., Sigogne, M., Donès, N., Relion, D., & Morel, P. (2013). Identification of relevant morphological, topological and geometrical variables to characterize the architecture of rose bushes in relation to plant shape. *Euphytica*, 191(1), 129–140. <http://dx.doi.org/10.1007/s10681-013-0902-6>.
- Demotes-Mainard, S., Bertheloot, J., Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Guéritaine, G., Guérin, V., et al. (2013). Rose bush leaf and internode expansion dynamics: Analysis and development of a model capturing interplant variability. *Frontiers in plant science*, 4(418). <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2013.00418>.
- Favre, P., Guéritaine, G., Andrieu, B., Boumaza, R., Demotes, S., Fournier, C., et al. (2007). Modelling the architectural growth and development of rosebush using L-systems. Poster presented at the Workshop Growth Phenotyping and Imaging in Plants. France: Montpellier.
- Faye, P., Brémaud, D., Durand Daubin, M., Courcoux, P., Giboreau, A., & Nicod, H. (2004). Perceptive free sorting and verbalization tasks with naive subjects: An alternative to descriptive mappings. *Food Quality and Preference*, 15(7–8), 781–791. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2004.04.009>.
- Faye, P., Courcoux, P., Giboreau, A., & Qannari, E. M. (2013). Assessing and taking into account the subjects' experience and knowledge in consumer studies. Application to the free sorting of wine glasses. *Food Quality and Preference*, 28(1), 317–327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.09.001>.
- Fritsch, A. (2012). mclust: Process an MCMC sample of clusters (Version 1.0). Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=mclust>.
- Giboreau, A., Navarro, S., Faye, P., & Dumortier, J. (2001). Sensory evaluation of automotive fabrics: The contribution of categorization tasks and non verbal information to set-up a descriptive method of tactile properties. *Food Quality and Preference*, 12(5–7), 311–322. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-3293\(01\)00016-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-3293(01)00016-7).
- Griffiths, P., & Kulke, T. (2002). Clothing movement–visual sensory evaluation and its correlation to fabric properties. *Journal of sensory studies*, 17(3), 229–255. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-459X.2002.tb00345.x>.
- Heuvelink, E., Tijskens, P., & Kang, M. Z. (2004). Modelling product quality in horticulture: An overview. In M. Fink & C. Feller (Eds.), *Proceedings of the international workshop on models for plant growth and control of product quality in horticultural production* (pp. 19–30). Postdam, Germany: Acta Horticulturae (ISHS).
- Hubert, L., & Arabie, P. (1985). Comparing partitions. *Journal of Classification*, 2(1), 193–218. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01908075>.
- Huché-Théliér, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., et al. (2011). Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 325–334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.007>.
- Husson, F., Josse, J., Lê, S., & Mazet, J. (2013). FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining with R (Version 1.21). Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=FactoMineR>.
- Husson, F., Josse, J., & Pagès, J. (2010). Principal component methods - hierarchical clustering - partitioning clustering: Why would we need to choose for visualizing data? Technical report. Applied Mathematics Department, Agrocampus Ouest. Retrieved from http://factominer.free.fr/docs/HPCP_husson_josse.pdf.
- Josse, J., Pagès, J., & Husson, F. (2008). Testing the significance of the RV coefficient. *Computational Statistics & Data Analysis*, 53(1), 82–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csda.2008.06.012>.
- Karwowski, R., & Prusinkiewicz, P. (2004). The L-system-based plant-modeling environment L-studio 4.0. In C. Godin, J. Hanan, W. Kurth, A. Lacoite, A. Takenaka, P. Prusinkiewicz, T. De Jong, C. Beveridge & B. Andrieu (Eds.), *Proceedings of the 4th international workshop on functional-structural plant models* (pp. 403–405). Montpellier, France: UMR AMAP.
- Krzanowski, W. J., & Marriott, F. H. C. (1994). *Multivariate analysis: Part I, distributions, ordination and inference*. New York: Kendall.
- Morel, P., Galopin, G., & Donès, N. (2009). Using architectural analysis to compare the shape of two hybrid tea rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 120(3), 391–398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2008.11.039>.
- R Development Core Team. (2012). R: A language and environment for statistical computing (Version 2.15.2). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org/>.
- Santagostini, P., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., Leduc, N., Bertheloot, J., Guérin, V., et al. (2014). Assessment of the visual quality of ornamental plants. Comparison of three methodologies in the case of the rosebush. *Scientia Horticulturae*, 168, 17–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.01.011>.
- Stone, H., Sidel, J., & Singleton, R. C. (1974). Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis. *Food Technology*, 28(11), 24–34.

- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageot, F., Barthélémy, J., & Issanchou, S. (2009). Les épreuves discriminatives et descriptives. In F. Depledge & SSHA (Eds.), *Évaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 99–197). Paris: Lavoisier.
- Symoneaux, R., Galmarini, M. V., & Mehinagic, E. (2012). Comment analysis of consumer's likes and dislikes as an alternative tool to preference mapping. A case study on apples. *Food Quality and Preference*, 24(1), 59–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.08.013>.
- Tomic, O., Forde, C., Delahunty, C., & Næs, T. (2013). Performance indices in descriptive sensory analysis – A complimentary screening tool for assessor and panel performance. *Food Quality and Preference*, 28(1), 122–133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.06.012>.
- Varela, P., & Ares, G. (2012). Sensory profiling, the blurred line between sensory and consumer science. A review of novel methods for product characterization. *Food Research International*, 48(2), 893–908. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2012.06.037>.
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern applied statistics with S* (4 ed.). New York: Springer.
- Vidal, L., Silva Cadena, R., Correa, S., Ábalos, R. A., Gómez, B., et al. (2014). Assessment of global and individual reproducibility of projective mapping with consumers. *Journal of Sensory Studies*, 29(1), 74–87. <http://dx.doi.org/10.1111/joss.12083>.



Original papers

Predicting sensorial attribute scores of ornamental plants assessed in 3D through rotation on video by image analysis: A study on the morphology of virtual rose bushes



M. Garbez^{a,*}, Y. Chéné^b, É. Belin^b, M. Sigogne^c, J.-M. Labatte^d, G. Hunault^e, R. Symoneaux^f, D. Rousseau^g, G. Galopin^a

^a Agrocampus Ouest, Institut de Recherche en Horticulture et Semences (IRHS) – UMR 1345, SFR 4207 QuaSaV, 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France

^b Université d'Angers, Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS) – EA 731, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France

^c INRA, Institut de Recherche en Horticulture et Semences (IRHS) – UMR 1345, SFR 4207 QuaSaV, 42 rue Georges Morel, 49071 Beaucauzé Cedex, France

^d Université d'Angers, Faculté des Sciences, Département de Mathématiques, 2 Boulevard de Lavoisier, 49045 Angers Cedex, France

^e Université d'Angers, Laboratoire Hémodynamique, Interaction, Fibrose, et Invasivité tumorale Hépatique (HIFIH) – UPRES EA 3859, SFR 4208 ICAT, 4 rue Larrey, 49933 CHU Angers, France

^f Groupe ESA, Unité de Recherche en Agroalimentaire sur les Produits et les Procédés (UR GRAPPE), SFR 4207 QuaSaV, 55 rue Rabelais, BP30748, 49007 Angers Cedex 01, France

^g Université de Lyon, Centre de Recherche en Acquisition et Traitement de l'Image pour la Santé (CREATIS); CNRS – UMR 5220; INSERM – U1206; INSA-Lyon; Université Claude Bernard Lyon 1, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 May 2015

Received in revised form 24 December 2015

Accepted 2 January 2016

Keywords:

Ornamental plant

Sensory profile

Image analysis

Linear regression

Rotating 3D virtual plant video

Rosa hybrida

ABSTRACT

The visual appearance of a plant is tightly linked to its 3D architecture, and can be characterized by means of sensorial experiments. Providing a method to manage image features to predict objective visual traits of real or *in silico* ornamental plants seen and assessed in rotation, could be a valuable tool to take into account the 3D of the plants in order to reach faster, more faithful and more reproducible hedonic-free characterizations. The present study aims to present a simple approach to manage image data from rotating plant videos in order to predict some visual characteristics as beforehand determined through a non-hedonic sensory evaluation. It is proposed to implement plant morphometrical descriptors using common descriptive statistics computed from 2D features measured along the plant rotation with the aim to integrate the 3D of the plants in order to evaluate the potential of the proposed approach, the present experiment used virtual plants. First, a sensory profile on 20 virtual rose bushes videos for which 12 plant morphology-related sensory attributes were developed is presented. In parallel, 2D features from the video frames have been extracted considering an 8°-rotation interval and their discriminant power have been checked. Results showed that each sensory attributes presented at least one strong and significant linear relationship with a specific morphometrical descriptor (Pearson's correlation coefficient ≥ 0.8 , p -values < 0.001). A stepwise predictor selection procedure to design ordinary least squares (OLS) regression models allowed quite good modeling of the sensory attributes with no more than four morphometrical descriptors (adjusted $R^2 \geq 0.9$). Regression on components and penalized models presented also good to acceptable fit, but model cross-validation (CV) and model complexity confirmed the relevance of the OLS models and their selected morphometrical descriptors (R^2 -CV ≥ 0.9 and root mean square error of prediction < 0.7) and strengthened the pertinence of transposing this image data management for experiments with real plants considering also their color characteristics thus achieving a proof of the concept.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

Abbreviations: CV, cross-validation; MD, morphometrical descriptor; OLS, ordinary least squares regression; PBI, plant binarized image; PCI, plant convex hull image; PCR, principal component regression; PFI, plant filled image; PLSR, partial least squares regression; RMSEP, root mean square error of prediction; SA, sensory attribute; VRB, virtual rose bush.

* Corresponding author. Tel.: +33 241 225 434.

E-mail address: mgarbez@agrocampus-ouest.fr (M. Garbez).

1. Introduction

The visual quality of ornamental plants is a key parameter of the purchase triggering by consumers (Townsend-Brascamp and Marr, 1994; Aldous, 2013; Schreiner et al., 2013). This criterion is still quite complex since plant visual quality judgment, which can be seen as the plant visual appearance appreciation for a given

person, is both individual and subjective (Higginbotham, 1987; Boumaza et al., 2010). Visual appearance of plants can be seen as the result of the type and the number of aerial organs, and more specifically their morphology, their geometry and their topology (*i.e.* the relative positioning of organs in space). In other words, it is a result of their architecture, which is governed by genotypic and environmental factors (Barthélémy and Caraglio, 2007; Crespel et al., 2013; Li-Marchetti et al., 2015). Understanding and controlling architecture of ornamental plants represent therefore an interesting lever to manage their visual appearance, and *in fine* to better fulfill consumers' expectations thanks to knowledge about their requirements (Boumaza et al., 2010; Huché-Thélier et al., 2011; Garbez et al., 2015).

Recently, Boumaza et al. (2009) proposed with success to expand the sensory analysis methods to ornamental plants for studying the visual quality. Using as stimuli various cultivars of potted rose bushes (*Rosa hybrida* L.), a list of sensory attributes describing visual traits was compiled and then used for further studies as a basis to set up sensory profiles derived from the quantitative descriptive analysis (QDA[®]) methodology (Stone et al., 1974). It allowed the obtainment of objective visual characterizations of the plants according to various sensory attributes (e.g.: foliage thickness, top-sided shape, plant symmetry, etc. ...) assessed quantitatively by a panel of trained subjects. Then it allowed explaining consumers' preferences in relation with the objective visual characterization of the plants (Boumaza et al., 2010). Firstly, Boumaza et al. (2009) used real plants as stimuli, but none of the finally selected sensory attributes integrated explicitly the plant 3D. Thereafter, to ensure the possibility to reproduce the experiment, and normalize the stimuli presentation, Boumaza et al. (2010) and derived subsequent studies (Huché-Thélier et al., 2011; Santagostini et al., 2014) used single facet photographs of potted rose bushes with more or less adjusted lists of attributes.

However plants are not flat objects, their visual appearance could be side-view dependent (Kohsel and Bennedsen, 2001), presenting various facets of a plant could thus help to realize its 3D configuration. Indeed, a sensory experiment based on a labeled sorting task of rotating virtual rose bush videos allowed untrained subjects to integrate the plants' 3D thanks to rotation (Garbez et al., 2015). Nonetheless, sensory analyzes are time-consuming and costly to set up for routine applications. It is especially true for sensory profile experiments which are a necessary basis for precise and robust product characterization in routine, and that imply to form and maintain a dedicated panel of trained subjects (Labbe et al., 2004). So, instrumental tools are needed to automatically replicate such sensory characterizations of ornamental plants (Santagostini et al., 2014). Computer vision systems have been widely developed for grading and sorting purposes in ornamental production sector these last thirty years. Several systems using one to five front views combined or not with top view of potted plants or cuttings for assessing their visual quality have been already presented (e.g. Hines et al., 1987; Brons et al., 1993; Dijkshoorn-Dekker, 1996; Timmermans and Hulzebosch, 1996; Dijkstra et al., 1997; Dijkstra and Meuleman, 1998; Kohsel, 2001). Such systems combined with automated conveying infrastructures provide significant enhancement for the productivity, the uniformity in crops, and the quality management. However, when dealing with aesthetical, this approach is still limited by the complexity to define simple and common standards of ornamental plant appreciation, which anyway cannot be totally consistent with the various consumers' expectations (Kohsel and Bennedsen, 2001; Boumaza et al., 2010). For all that, image analysis-based methods of such computer vision systems could be used to develop hedonic-free automated visual characterization of ornamental plants (Santagostini et al., 2014; Fahlgren et al., 2015). Indeed, using grafted rose bushes, Santagostini et al. (2014) highlighted good correlations between

objective floribundity sensorial assessments and image analysis measurements made on plant single facet photographs.

Also, as for grading and digital image phenotyping processes, to reach characterizations of the plants as realistic as possible, their 3D configuration should be taken in account (Kohsel and Bennedsen, 2001; Fahlgren et al., 2015; Garbez et al., 2015). This 3D integration could be obtained allowing the subjects to look at the real plants directly. However, even with a precise observation protocol, the plants show rapid changes in their growth and appearance. It is thus preferable to present the plants in a stable condition as with several photographs, or better using video (Garbez et al., 2015). Despite the deadlines for achieving the image or video acquisition, the results are more reliable. For this on real plants, a vision system with camera allowing multiple-views acquisitions and their management is needed (e.g. Harmsen and Koenderink, 2009; Chaivivatrakul et al., 2014; Lou et al., 2014a, 2014b). Videos of rotating plants can be obtained with a turntable-based vision system. It is also possible to emulate this stimulus presentation easily using virtual plant modeling. This alternative may present many interesting advantages according to several experimental aims (Garbez et al., 2015), e.g. to present the various facets of the plants at several stages of development from multiplication to flowering with or without leaves; or to generate a sample restituting the architectural variability of some parameters observed during experiments. Furthermore it enables to assess preliminary the potential of some methods for future experiments on real plants with many varied noise sources, such as for testing sensory and image analyzes.

The main research objective addressed here is to develop automated tools to substitute sensory profiles of ornamental plants with trained panels in order to connect and explain their visual properties together with architectural traits. Firstly, providing a simple method to predict various objective visual traits of real or virtual ornamental plants, as seen and assessed in rotation on videos, is sought to substitute the upkeep of a trained panel. In this context, the present study aims to evaluate the concept of managing feature sets from multiple front-view images of plants to predict their visual characteristics beforehand assessed through a sensory profile. Before conducting experiments with real plants, a previous work showed that sensory analyzes could be conducted using videos of rotating virtual rose bushes (Garbez et al., 2015). Here to prove the addressed concept, the study used the same videos and presents: (1) the set-up of a sensory profile; (2) a proposition of an image analysis feature extraction method and its data management to integrate the plant rotation; and (3) the possibility to relate and predict the sensorial characterizations with the transformed image features. The literature is full of examples addressing prediction issues under various conditions and approaches. Outside arguments provided by statisticians for a given modeling method, all of them are susceptible to lead at results quite dependent of the studied data nature and configuration. To illustrate this, testing methods derived from three of the most common linear regression approaches have been used (Kuhn and Johnson, 2013): (i) ordinary least squares regression (OLS) with stepwise predictor selection; (ii) penalized models (ridge, LASSO and elastic net); and (iii) pre-processing predictors for dimension reduction by regression on components with principal component regression (PCR) and partial least squares regression (PLSR).

2. Material and methods

2.1. Rotating virtual rose bush videos

The present study used rotating virtual rose bush videos later called virtual rose bushes (VRBs) developed in

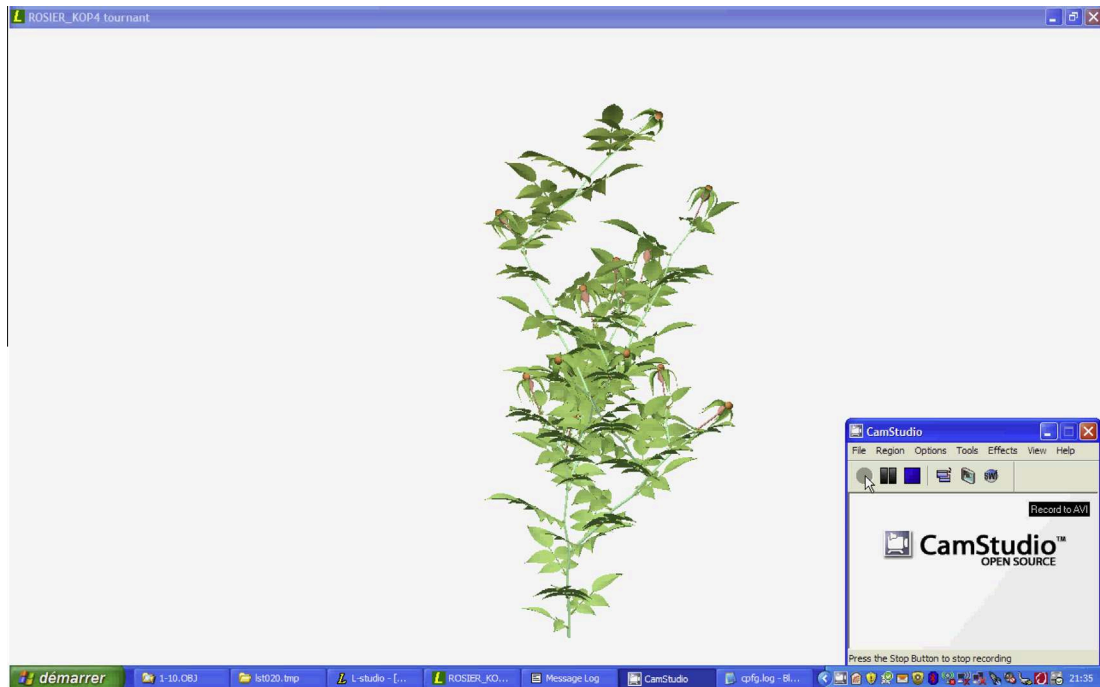


Fig. 1. A frame still in reduced size of the rotating virtual rose bush video R_01.

Garbez et al. (2015). Those virtual plants were obtained with a 3D structural model of *Rosa hybrida* 'Radrazz' (Favre et al., 2007) implemented with three core architectural parameters: (1) the number of axes; (2) their location or topology; and (3) their morphologic type (short or long), determined from a five-months old crop of pot plants cultivated in a greenhouse under controlled non-restrictive conditions (Morel et al., 2009). This implemented structural and probabilistic model allowed to generate rotating plants *in silico* through L-studio, a Lindenmayer system based plant-modeling software (Karwowski and Prusinkiewicz, 2004). Then, the virtual plants were individually recorded as digital video files with the free screen-recording software CamStudio™ (RenderSoft, 2002) for storage and further experiments (see Video 1 for an example of a rotating virtual rose bush video and Fig. 1 for a frame still of the video). Since data used were obtained from plants of the same cultivar grown in the same conditions, generated virtual plants thus reflect the captured architectural variability within a similar crop (Garbez et al., 2015).

2.2. Sensory profile of the rotating virtual rose bushes videos

First, 19 individuals were selected to form a sensory evaluation panel for characterizing the visual appearance of the virtual rose bushes (VRBs) following a sensory profile approach (Boumaza et al., 2010). The individuals were selected among students from the French Institute for life, food and horticultural sciences and landscaping (Agrocampus Ouest, Angers center). Along seven hours in five sessions, the subjects were solicited by a panel leader to consensually develop a list of sensory attributes (SAs) adapted to the VRBs and then to be trained for their scoring. The list was created on the basis of the lexicon highlighted by a labeled sorting task on 40 VRBs (Garbez et al., 2015), previous sensory attribute lists developed for assessing visual characteristics of various rose bush pot plants (Boumaza et al., 2009, 2010; Huché-Théliet et al., 2011) and expert opinions. Finally, the panel formulated 12 SAs (Table 1) related to the general aspect of the plants, detailing characteristics related to branching, dimensions, foliage, symmetry, shape and its homogeneity, each one accompanied with a

definition and a 10-point structured scale illustrated with anchor words or expressions.

Secondly, 20 VRBs unknown from the subjects (denoted R_01 to R_20 in this experiment) were selected as the products to be characterized for the sensory profile. The characterization was done in duplicate, *i.e.* the subjects evaluated the 20 products upon the 12 SAs on two scoring sessions which were held several days apart. Scoring sessions took place in computer labs with identical 17" CRT monitors disposed to avoid subject interactions and configured with their optimal preset 1600 × 1200 resolution. VRB files were labeled with random three-digit numbers and they were presented to the subjects thanks to hyperlinked buttons on individual Microsoft® PowerPoint files. Subjects were asked to assess the VRBs one by one for all the 12 SAs on paper sheets. For this, they had to follow the imposed "from left to right and from top to bottom" opening video sequences defined by a William Latin square-based design adaptation (Garbez et al., 2015). Subjects could watch each VRB as many times as desired before scoring it, thought back-trackings were not allowed once done.

Then, the panel performance was checked through: (1) the repeatability and (2) the reproducibility of the panel scores for each product and SA combination (Rossi, 2001); (3) the consonance of the subject scores for each SA by Principal Component Analysis (PCA) (Dijksterhuis, 1995; Boumaza et al., 2010); and lastly (4) the discriminating power of each SA from three-factor analysis of variance with mixed effects (session factor as fixed, the subject factor as random) and interactions (Næs and Langsrud, 1998; Bavay et al., 2014). Then, PCA of the "products × SAs" matrix of average scores (over sessions and subjects; the products or VRBs as rows, and the SAs as columns) and hierarchical clustering (Euclidean distance and Ward's criterion on PCA coordinates) were used to analyze correlations between SAs and achieve a synthetic description of the VRBs.

2.3. Image analysis

45 RGB images per virtual rose bush (VRB) were extracted with an 8°-rotation interval using VirtualDub, a video capture and

Table 1
Sensory attribute definitions and panel performance. Repeatability: for a given product, the square root of the pooled variance of the scores between sessions; reproducibility: for a given product, the standard deviation of the subject mean scores (Rossi, 2001); consonance: total variance (%) accounted for by the first principal component of the mean “products × subjects” matrix (Dijksterhuis, 1995; Boumazza et al., 2010); discriminating power: *F*-ratio and significance of the product factor effect from three-way mixed ANOVA (Næs and Langsrud, 1998; Bavay et al., 2014).

Sensory attribute	Definition	Repeatability ^a	Reproducibility ^a	Consonance (%)	Discriminating power (<i>F</i> -ratio)
Branching amount	Quantification of the ramification: (1) sparsely branched to (10) highly branched	0.79 ± 0.04	0.91 ± 0.06	89.7	137.9***
Branching location	Location of the ramification: (1) rather at the bottom to (10) rather at the top	0.84 ± 0.06	0.93 ± 0.05	80.2	64.8***
Branching regularity	Evaluation of the regularity of the ramification on the order 1 axis: (1) very located to (10) very regular	0.99 ± 0.07	1.12 ± 0.07	84.7	87.9***
Compactness	Evaluation of the occupation intensity of the reel volume of the rose bush in its prospected volume: (1) very loose to (10) very compact	0.98 ± 0.07	0.98 ± 0.07	85.6	92.2***
Foliage density	Quantification of the foliage density: (1) sparsely leafy to (10) highly leafy	0.98 ± 0.05	1.27 ± 0.06	81.1	69.6***
Height	Quantification of the vertical size: (1) very small to (10) very tall	0.92 ± 0.08	0.85 ± 0.05	82.3	71.5***
Horizontal symmetry	Quantification of the symmetry along a horizontal axis passing at the mid-height of the rose bush: (1) very asymmetric to (10) very symmetric	1.19 ± 0.06	1.24 ± 0.06	71.0	41.4***
Shape homogeneity	Evaluation of the shape invariance during the rotation: (1) very variant to (10) very regular	0.90 ± 0.09	0.93 ± 0.08	81.6	73.5***
Top-sided shape	Evaluation of the elongation: (1) very trailing to (10) very top-sided	1.12 ± 0.05	1.63 ± 0.06	71.9	40.4***
Vertical symmetry	Quantification of the symmetry along a vertical axis passing by the order 1 axis of the rose bush: (1) very asymmetric to (10) very symmetric	1.27 ± 0.07	1.35 ± 0.07	74.0	47.4***
Width	Quantification of the width of the widest size: (1) very thin to (10) very wide	0.93 ± 0.05	0.93 ± 0.04	84.4	88.9***
Width regularity	Evaluation of the width invariance during the rotation: (1) width very variant to (10) width very invariant	1.22 ± 0.07	1.07 ± 0.07	79.8	66.3***

^a Each value represents the mean ± SE over the 20 products from the measurements computed on 38 scores for each product (19 subjects × 2 sessions).
*** *p*-value < 0.001.

processing software (Lee, 2010). Extracted RGB images were processed with basic image analysis procedures (Ibaraki and Dutta Gupta, 2014) using ImageJ, a free image-processing software (Abramoff et al., 2004). Software elements with an invariant location were removed from the RGB images, then they were converted in greyscale images before being binarized using a thresholding segmentation process. For this, thresholds from image-histograms were fixed using the fact that pixel colors from plants presented grey intensity values ranging from 1 to 247, whereas the uniform color background was coded with a fixed grey intensity value of 248. Thereby, it enabled to obtain (1) “plant binarized images” (PBIs), on which plants’ pixels are in black and the background’s pixels in white. Thereafter, a filling holes process was used on the PBIs to get (2) “plant filled images” (PFIs), on which the holes within the plants’ silhouettes, later called closed holes, were filled in black. Finally, the same filling process allowed with an additional ImageJ plugin for convex hull selection (Landini, 2007) to get (3) “plant convex hull images” (PCIs), on which plant’s convex hulls were filled in black. Thus, three image sets, PBIs, PFIs and PCIs (Fig. 2) were ready for the feature processing.

In the aim to cover as much as possible the sensory dimensions addressed in this study, a total of 100 various features (dimensions, areas, shape descriptors, etc. . . , detailed in Appendix A), with some integrating landmarks coordinates, were designed arbitrarily. All the features were measured on the 45 images of each VRB, and then their discriminative power was evaluated using one-way ANOVA with the VRBs as factor. Thereafter, discriminant features (error margin $\alpha = 0.05$) were processed to be transformed into variables characterizing the VRBs in their whole. For this, seven descriptive statistics per feature were computed over the 45 values obtained for each VRB: (1) the minimum; (2) the median; (3) the mean; (4) the maximum; (5) the standard deviation; (6) the coefficient of variation; and (7) the amplitude. Descriptive statistics of the image features are referred to below as morphometric descriptors (MDs) (Fig. 3). Thus, with 7 descriptive statistics for each of the 100 features, 700 MDs were obtained.

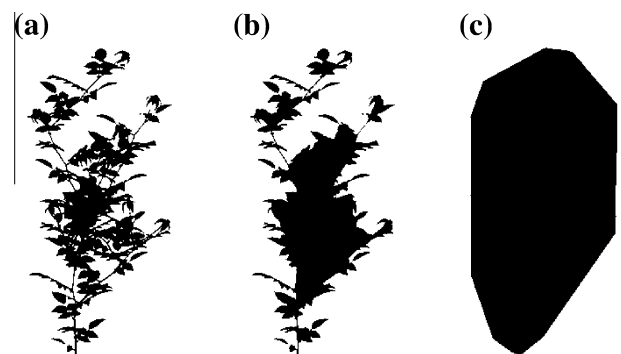


Fig. 2. Illustration of the image processing of the first extracted RGB image from the virtual rose bush R_01 (presented in Fig. 1): (a) plant binarized image (PBI); (b) plant filled image (PFI); (c) plant convex hull image (PCI).

2.4. Relating morphometric descriptors and sensory attributes

The sensory attribute (SA) variables were defined as the average scores over sessions and subjects of the 20 virtual rose bushes (VRBs) and have been analyzed conjointly with the 700 morphometric descriptor (MD) variables defined as the descriptive statistics of the image features. First, linear relationships between all the SA and MD pairs were evaluated with the Pearson’s correlation coefficient (r_p). Then, each SA was regressed against the standardized MDs as potential predictors using the linear regression approaches detailed thereafter according to the following general equation:

$$\mathbf{Y} = \beta_0 + \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad (1)$$

where $\mathbf{Y} = \{Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_n\}$ is the average scores of the n individuals for one sensory attribute (here $n = 20$ virtual rose bushes), β_0 is the intercept if \mathbf{Y} is not centered, $\mathbf{X} = \{X_{1,1}, \dots, X_{i,j}, \dots, X_{n,p}\}$ the standardized model matrix of the $n \times p$ predictors, $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_p\}$ the regression coefficients of the p predictors, and $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_n\}$

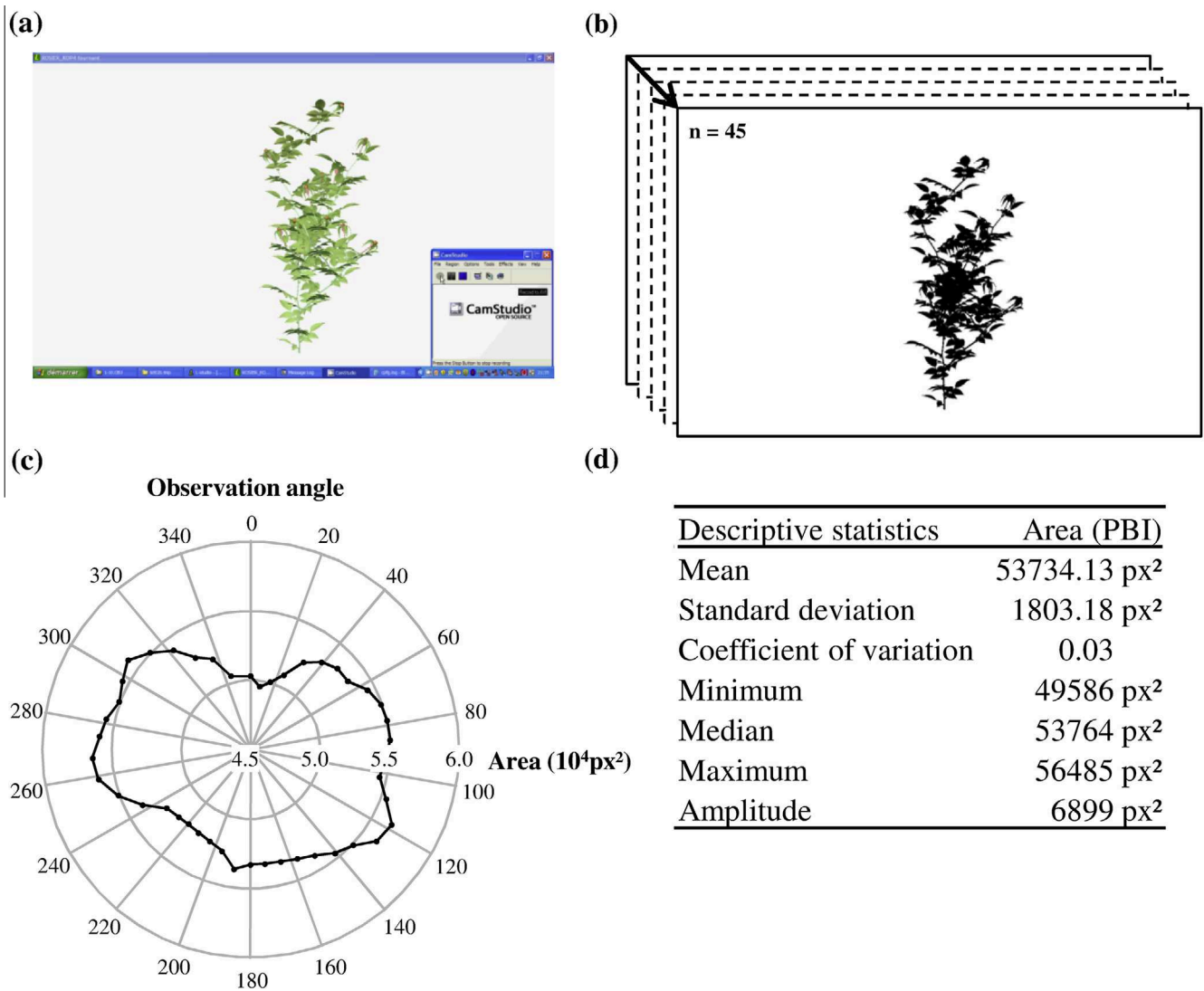


Fig. 3. Illustrated example on the virtual rose bush R_01 of the computation to obtain the morphometric descriptors of the image feature “Area (PBI)” which measures the surface of black pixels on plant binarized images: (a) a frame still in reduced size of the rotating virtual rose bush video; (b) illustration of the corresponding set of 45 plant binarized images (PBI) used for the feature extraction; (c) polar plot of “Area (PBI)” measured with an 8°-rotation interval as a function of the observation angle; (d) the corresponding seven descriptive statistics computed from the 45 values of “Area (PBI)” for R_01.

the error of the model resulting from the differences between observed and predicted values of Y , that are assumed to be independent and following a normal distribution with mean 0 and variance σ^2 .

2.4.1. Ordinary least squares regression (OLS)

Ordinary least squares regression (OLS), with one or multiple predictors, is the most basic approach used to model and predict a quantitative variable. Its core objective is to find minimum-bias parameter estimates minimizing the sum of the square errors (SSE) or a function of it (Kuhn and Johnson, 2013). However, as in the present case (700 MDs > 20 VRBs), this method is not usable with more predictors than individuals. To overcome this statistical requirement, a forward/backward stepwise procedure for the predictor selection was used with the Bayesian Information Criterion (BIC) (Schwarz, 1978; Zucchini, 2000).

Goodness of fit in function of the number of selected MDs was evaluated with the traditional coefficient of determination (R^2) and its adjusted form (R^2_{adj}) penalizing the model complexity (Spiess and Neumeyer, 2010). Predictive ability was evaluated by leave-one-out cross-validation (CV) with the R^2 (R^2 -CV) and the root mean square

error of prediction (RMSEP), both computed from the observed sensory scores and the CV-predicted ones (Borra and Di Ciaccio, 2010; Spiess and Neumeyer, 2010). Lastly, the parameter significance was evaluated with Student’s t tests.

2.4.2. Penalized models: ridge, lasso and elastic net regression methods

Ridge regression, Least Absolute Shrinkage and Selection Operator regression (LASSO), and elastic net regression all refer to linear regression methods using penalties to compute parameter estimates of lower variances while minimizing the model error. Those methods stand on the fact that under standard assumptions, the error of a linear model can be expressed in a combination of model variance and model bias. Allowing a small bias increase may be accompanied by a more consequent variance decrease and thus a smaller SSE than with OLS (Kuhn and Johnson, 2013). These three methods, also regrouped under the name of shrinkage methods, can be resumed as in finding the parameter estimates $\hat{\beta}$ according to the following optimization problem (Zou and Hastie, 2005) for Eq. (1) where Y is considered to be centered for simplification:

$$\hat{\beta} \arg \min_{\beta} \{Y - X\beta\}, \text{ subject to } \lambda \left((1 - \alpha) \|\beta\|_2^2 + \alpha \|\beta\|_1 \right) \quad (2)$$

where $\alpha \in [0, 1]$ is the tuning parameter determining the penalty used, i.e. which of the three methods is employed. When $\alpha = 0$, $\lambda \geq 0$ the shrinkage parameter is applied with $\|\beta\|_2^2 = \sum_{j=1}^p \beta_j^2$ which corresponds to the ridge regression penalty; when $\alpha = 1$, the shrinkage is only applied with $\|\beta\|_{11} = \sum_{j=1}^p |\beta_j|$ which corresponds to the penalty used for LASSO; and it is applied to a mix of both penalties when $\alpha \in]0, 1[$ which corresponds to the elastic net method. Penalized models are described as relevant alternatives to OLS in order to circumvent multicollinearity and to solve small sample and large predictor set problems. While ridge regression does not perform predictor selections, this method have no predictor selection and omission biases. However to achieve parsimonious models by continuous shrinkage and predictor selection, LASSO enables to select at most n predictors before saturation. In the case where n is quite greater than p , the elastic net method which merges the advantages of ridge regression and LASSO is described as being superior (Zou and Hastie, 2005; Kuhn and Johnson, 2013).

For each sensory attribute (SA), leave-one-out cross-validation (CV) was used to compute the lambda parameter across an alpha sequence from 0 to 1 with an increment of 10^{-3} . Elastic net models have been considered only if they presented a smaller RMSEP than with ridge regression or LASSO. Goodness of fit was evaluated using the R^2 and the R_{adj}^2 computed from the complete sample, and predictive abilities with the R^2 -CV and the RMSEP.

2.4.3. Dimensional reduction before regression: principal component and partial least squares regression methods (PCR and PLSR)

Regression on components are methods proposed to investigate if predictions can be improved using all the information given by the predictive variables while resuming them in a reduced number of uncorrelated latent variables, also called dimensions, or components (Kuhn and Johnson, 2013). Two related approaches of regression on components were tested: (1) the Principal Component Regression (PCR); and (2) the Partial Least Squares Regression (PLSR).

According to PCR, components are built from the predictors in order to maximize their variance as the principal component analysis method does, whereas in PLSR, components are built to maximize both their variance and their correlation with the response variable(s) (Mevik and Wehrens, 2007). For PLSR, uniresponse models (PLSR1) and multiresponse models (PLSR2) were investigated separately.

For each sensory attribute and regression method, the number of components to keep was chosen in order to minimize the RMSEP computed from CV. As for before, goodness of fit was evaluated with the R^2 and predictive abilities with the R^2 -CV and the RMSEP. The R_{adj}^2 was not considered for those methods since all the predictors are used to construct the components.

2.5. Statistical analyses

Data management and statistical analyses were performed under the R environment (R Development Core Team, 2012) with additional functions from the packages detailed thereafter. PCA and hierarchical clustering were done using *FactoMineR* (Husson et al., 2013); ANOVA with *GAD* (Sandrini-Neto and Camargo, 2013). OLS models were designed with the stepwise predictor selection procedure of MASS (Ripley et al., 2013) and cross-validated using *cvTools* (Alfons, 2012). Penalized models were designed and evaluated using *glmnet* (Friedman et al., 2015), PCR and PLSR models with *pls* (Mevik and Wehrens, 2007).

3. Results

3.1. Sensory profile of the rotating virtual rose bushes videos

Performance checks (Table 1) showed that average repeatability and reproducibility measurements didn't allow highlighting any particular sensory attribute (SA) for which the panel was not enough performant. Individual and average measurements over the virtual rose bushes (VRBs or products) (Table 1), and over the SAs (**data not shown**) were all lower than the threshold value of 2 used by Boumaza et al. (2010). Consonance measurements (Table 1) revealed that the subjects' scores were highly correlated since all the SAs returned a consonance measurement over 70%. Finally, through ANOVA results, a strong and highly significant product effect was shown for all the SAs (Table 1; p -values < 0.001) confirming both their effective discriminating power and the relatively good overall performance of the panel. Nonetheless, ANOVA results revealed also significant but very slight effects from the subject factor (**data not shown**) indicating some scoring behavior differences between the subjects. Confrontation of these results with consonance measurements implied that these differences were mainly related to subject scaling effects rather than pure ranking disagreements. However, considering both performance indicators, the results indicated a slightly lower performance and product discrimination with "Branching location", "Vertical symmetry", "Width regularity", "Horizontal symmetry" and "Top-sided shape". Obviously, when seen in rotation, the visual traits addressed by these SAs may be highly plant's facet-dependent. So, the lower performance could be a consequence of higher perceived anisotropies of these visual traits when the plants are seen in rotation, and thus they may exhibit more scoring difficulty.

Besides this, the results indicated that the subjects were sufficiently performant to consider all the sensory attributes (SAs) as enough consensual and discriminant. Therefore, all the data: 19 subjects; 20 products: the virtual rose bushes (VRBs); 2 scoring sessions; and the 12 SAs, were used to compute the mean "products \times SAs" matrix. Its principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering allowed presenting correlations between SAs and a synthetic description of the VRBs (Fig. 4). Five principal components (PCs) explaining 95.9% of the overall variance were considered. The two firsts PCs explaining 70.6% of the inertia enabled to clearly distinguish the four groups of VRBs identified by clustering. Correlation circles allowed a perceptive interpretation of the product space and to highlight the SAs correlated between each other. PC1 clearly opposes the group A to the groups C and D. It mainly reflects strong to moderate associations between "Branching degree", "Foliage density" and "Compactness", between "Horizontal symmetry" and "Shape homogeneity"; it is also positively related to the "Branching regularity". PC1 highlights also their moderate to strong oppositions with the moderate association between "Branching location" and "Top-sided shape". PC1 is also positively related to the "Width" and the "Width regularity" but these SAs are not correlated between each other. PC2 opposes group B to groups A and C. This dimension reflects mainly the strong association between "Vertical symmetry" and the "Shape homogeneity". PC2 is also positively related to the "Branching location" which presents a strong opposition with "Branching regularity" and "Horizontal symmetry". PC3 allowed highlighting the association between "Top-sided shape" and "Width regularity" and their opposition with the "Width". Lastly, PC4 is related to the "Height", and any of SAs are related to PC5. Finally, this obtained partition and respective characterizations are quite coherent with the preliminary labeled sorting task experiment (**data not shown**) and strengthen the fact that the within-crop variability of the branching topology and length of the axes could be sufficient to generate groups of plants with different visual properties.

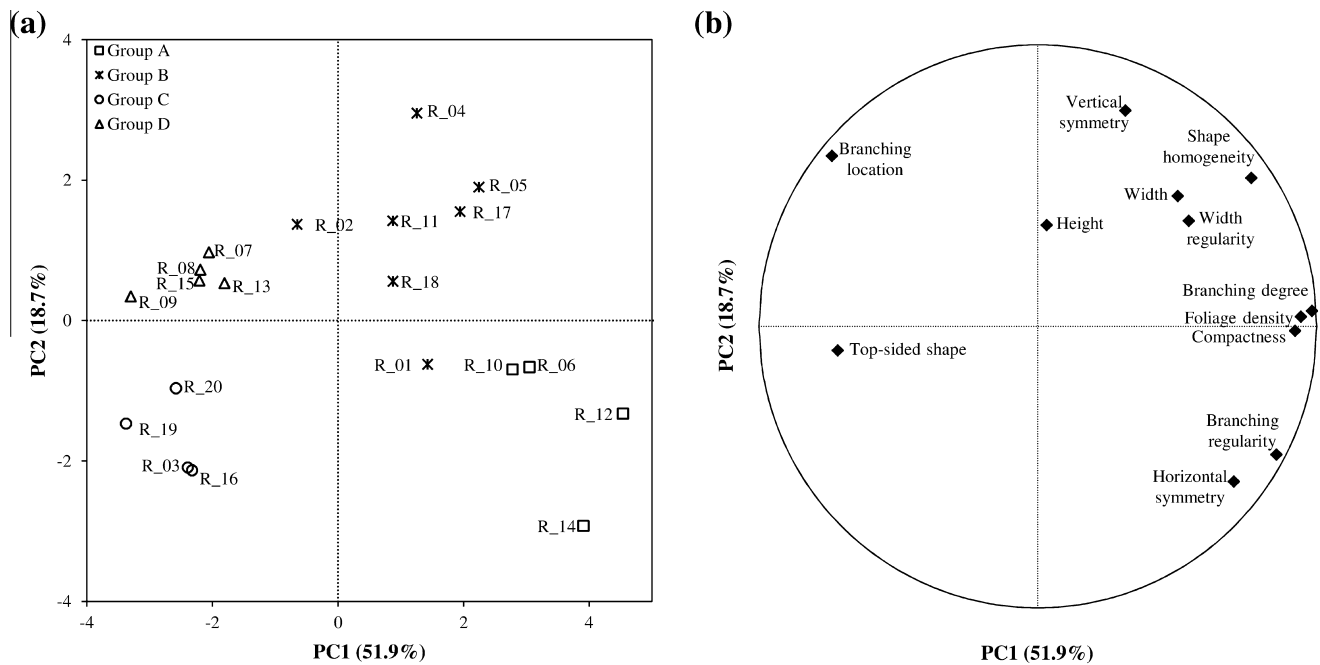


Fig. 4. Biplots of standardized Principal Component (PC) analysis of the mean “products \times sensory attributes” matrix: (a) product mapping (virtual rose bushes R_01 to R_20) and clustering (Groups A–D); (b) sensory attribute mapping.

3.2. Image analysis

As presented in the material and methods section, hundred features were developed in order to cover as much as possible the sensory dimensions referred with the aim to predict them from the image data. Except the color characteristics which were not dealt in this study, the various features developed from the three image types (PBI, PFI, and PCI) should be useful to assess the addressed visual dimensions. Such data, *i.e.* successive measurements recorded along the plant rotation for each feature, could be used to compare plants between them. It can be chosen to directly study carefully selected image features if clear relations with traits of interest are previously known or if they are a priori assumed: *e.g.* physical dimensions related to the plant size are typical characteristics that could be studied without too much misinterpretation risks. In other hand, polar plot analysis could be used to assess anisotropies and thus the variability of the plant facets through the evolution of the feature measurements along rotation (Fig. 3). Beside this, if plant rotation is not taken in account, the data could be used for plant comparison using inferential tests. In the present study, the effective discriminant capacity of the features was evaluated with one-way ANOVAs with the VRBs as factor. Surprisingly, all analyses returned a strong and highly significant effect of the VRB factor (p -values < 0.001) showing that all the features present the capacity to distinguish significant differences between at least two VRBs.

Computing descriptive statistics from the features made it possible to get morphometrical descriptors reflecting the variability of the plant facets induced by their 3D nature. It gives the possibility to make plant comparisons from this standpoint and to use all these MDs as potential predictors instead of only considering mean values. Nonetheless, strong correlations could be found between similar features measured on different image kinds and between features incorporating same parameters, *e.g.* with the surface of black pixels on PBI, on PFI and on PCI. Thus, correlations could be also found between MDs computed from different features or from the same one. This could be used to select features and MDs according to their correlations and discriminant capacities. It

implies also to use appropriate regression methods to set up predictive models.

3.3. Relating morphometric descriptors and sensory attributes

3.3.1. Correlative approach

Each sensory attribute (SA) presented a strong and significant correlation with at least one morphometrical descriptor (MD) (Table 2). Indeed, each SA presented a Pearson's correlation coefficient over 0.68 in absolute value with at least one specific MD, the threshold value to conclude on a significant correlation with a p -value < 0.001 when the sample size $n = 20$.

Among the 12 couples of variables, the strongest correlations ($r_p = 0.96$) were found: (1) between the SA “Height” and the MD “maximum of Height_P” which measures the height of the plant from its base to its upperpart; and (2) between the SA “Branching degree” and the MD “maximum of N_holes” which measures the number of opened and closed holes. At the opposite, the lowest were for the SAs concerning the “Horizontal symmetry”, “Vertical symmetry” and “Width regularity”.

However, the best correlations identified for each SA were over 0.80 in absolute value and highly significant. From these results, it is noteworthy that all the three image sets (PBI, PFI, and PCI) enabled to get MDs being among the best correlated to the SAs. This remark was not notified with the several descriptive statistics. Indeed, standard deviation and amplitude were not used for computing the MDs among the highest correlation links found. Mean and median descriptive statistics were used for “Branching regularity”, “Compactness”, “Top-sided shape” and “Vertical symmetry”. This suggests that the subjects scored these SAs integrated a “sum up” of plant image features along the rotation, either by averaging, or by considering their distributions. At the opposite, the coefficient of variation was used for “Width regularity”, the minimum for “Horizontal symmetry” and “Shape homogeneity”, and the maximum for five other SAs. These latter are particularly plant facet-dependent. The nature of the descriptive statistics used in the MDs being the best correlated thereto assumes that the subjects addressed these ones, either by integration of image feature

Table 2
Highest correlations (Pearson's correlation coefficient: r_p) with the morphometrical descriptors identified for each sensory attribute.

Sensory attribute	r_p	Morphometrical descriptor		Descriptive statistic
		Feature code	Feature type; feature description	
Branching degree	0.96	N_Holes	Count number of holes and area distribution of the holes; number of holes, the sum of opened and closed holes	Maximum
Branching location	−0.84	Filling_Convex (PFI)	Shape and shape filling; convex hull filling, without taking into account the closed holes	Maximum
Branching regularity	0.90	Area_B (PFI)	Area of the black pixels; under the middle of the plant height on PFI	Median
Compactness	0.93	Filling_Convex (PBI)	Shape and shape filling; convex hull filling, taking into account the holes	Median
Foliage density	0.92	N_C_Holes	Count number of holes; of closed holes	Maximum
Height	0.96	Height_P	Length; plant height.	Maximum
Horizontal symmetry	0.80	Area_B (PFI)	Area of the black pixels; under the middle of the plant height on PFI	Minimum
Shape homogeneity	0.88	M_Width_Ratio (PCI)	Matched pixels relative to unmatched pixels according to symmetry axis; vertical, through the middle of the plant width, without taking into account the holes	Minimum
Top-sided shape	−0.88	Size_Ratio_Unor	Shape and shape filling; aspect ratio unoriented	Mean
Vertical symmetry	−0.80	Delta_Angle	Absolute differences of angles and lengths; between the angles formed by the plant base, a horizontal line and each bounding box top corner	Mean
Width	0.93	Width_P	Length; plant width	Maximum
Width regularity	−0.80	Area_T (PCI)	Area of the black pixels; above the middle of the plant height on PCI	Coefficient of variation

r_p : Pearson's correlation coefficients computed on 20 virtual rose bushes have to be over |0.68| to be significant with an error margin $\alpha = 0.001$.
PBI: Plant Binarized Image; PFI: Plant Filled Image; PCI: Plant Convex Hull Image.

Table 3
Goodness of fit and predictive abilities of the sensory attributes' models obtained by means of ordinary least squares regression with stepwise selection and leave-one-out cross-validation. The first column block presents the results for the models with only one morphometrical descriptor, the second presents the models reaching an $R_{adj}^2 \geq 0.9$ in first.

Sensory attribute	Model with one MD			First model with an $R_{adj}^2 \geq 0.9$				
	R^2	R^2 -CV	RMSEP	NP	R^2	R_{adj}^2	R^2 -CV	RMSEP
Branching degree	0.93	0.91	0.59	1	0.93	0.92	0.91	0.59
Branching location	0.70	0.63	0.85	3	0.92	0.90	0.87	0.50
Branching regularity	0.81	0.78	0.95	3	0.97	0.97	0.96	0.42
Compactness	0.87	0.84	0.72	2	0.94	0.93	0.92	0.50
Foliage density	0.84	0.79	0.75	3	0.95	0.94	0.92	0.46
Height	0.93	0.91	0.40	1	0.93	0.92	0.91	0.40
Horizontal symmetry	0.64	0.48	1.24	3	0.95	0.94	0.91	0.51
Shape homogeneity	0.78	0.73	0.77	2	0.92	0.91	0.90	0.46
Top-sided shape	0.77	0.72	0.75	3	0.96	0.95	0.94	0.35
Vertical symmetry	0.64	0.57	1.17	4	0.92	0.90	0.88	0.60
Width	0.87	0.85	0.60	2	0.93	0.92	0.90	0.48
Width regularity	0.65	0.58	1.19	3	0.92	0.91	0.87	0.68

R^2 : coefficient of determination; R^2 -CV: R^2 computed from leave-one-out Cross-Validation; RMSEP: Root Mean Square Error of Prediction computed from leave-one-out cross-validation; NP: Number of Predictors.

anisotropies, or by focusing on minimal/maximal image feature thresholds, all along the plants' rotation.

3.3.2. Predictions

For most of the sensory attributes (SAs), ordinary least squares regression (OLS) models with only one morphometrical descriptor (MD) gave quite good results (Table 3). Indeed with one predictor, leave-one-out cross-validation (CV) returned root mean square error of prediction (RMSEP) lower than 1, and R^2 -CV higher than 0.6 for all the models except for "Horizontal symmetry", "Vertical symmetry" and "Width regularity". Subsequent stepwise predictor selection steps allowed drastic fit quality and prediction improvements. At each step of the stepwise procedure, goodness of fit increased reaching near the perfect regression ($R^2 = 1.00$) with some ten MDs for all the SAs. Even with the adjusted R_{adj}^2 penalizing the models' complexity, same patterns were observed (Fig. 5).

Therefore, the less complex model presenting an $R_{adj}^2 \geq 0.9$ for each SA was conserved for subsequent comparisons (Table 3). The most complex model was for "Vertical symmetry" with 4 MDs to reach the chosen threshold whereas only one MD was enough for "Branching degree" and "Height". However, besides the low number of MDs used in the models, they were quite accurate and had good prediction abilities ($R^2 > 0.9$, R^2 -CV ≥ 0.9 and RMSEP < 0.7).

Looking in details at the model equations, and particularly at the standardized coefficients, allowed interpreting how the SAs

could be predicted and which image parameters influence the resulting visual properties. As example, the model with the highest R^2 -CV was for "Branching regularity", it included: (i) (+0.93***) the median value of the area of black pixels measured on PBI; (ii) (−0.51***) the mean value of the plant height; and (iii) (+0.21**) the minimum value of the number of unmatched pixels according to a vertical symmetry axis through the plant base on PBI. So, the branching regularity on the first order axis seems to be related to: high median values of the plant's projected surface considering all the open and closed holes; low plant height; and low threshold of vertical asymmetry (expressed here in terms of unmatched pixels), with the plant base as reference and considering all the holes here again. At the opposite, the model with the lower R^2 -CV was for "Width regularity" which included: (i) (−1.00***) the coefficient of variation of the area of the black pixels above the middle of the plant on PCI; (ii) (+0.57***) the maximum of the number of matched relative to unmatched pixels according to a vertical symmetry axis through the middle of the plant width on PFI; and (iii) (−0.28***) the mean balance of top and bottom areas of black pixels (ratio with the smallest value being the numerator) on PCI. So in this model, the regularity of the plant width along the rotation seems to be related to: low relative fluctuations of the projected surface displayed by the shape of the top of the plant; high threshold of relative symmetry (expressed here using both matched and unmatched pixels); and then dissymmetry constancy between top

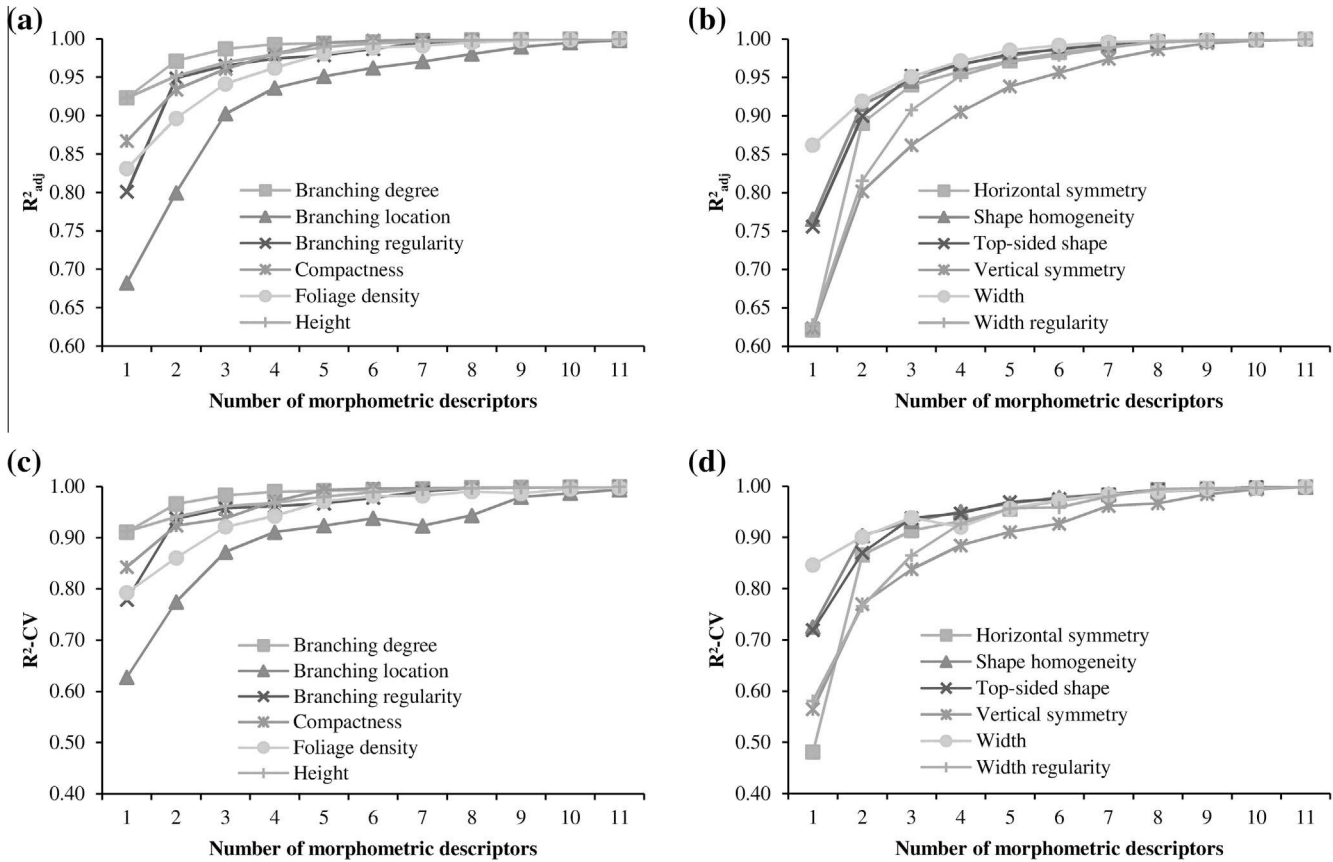


Fig. 5. Quality evolution of the models to regress and predict the sensory attribute scores as a function of the number of morphometrical descriptors selected as predictors by a stepwise selection procedure through ordinary least squares regression: (a and b) evolution of the adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}); (c and d) evolution of the R^2 computed from leave-one-out cross-validation (R^2-CV).

and bottom parts regardless the parts where the plant is more developed.

In parallel to these results, penalized models (Table 4) presented very few interesting characteristics. Considering the three methods, at least one led to a model presenting an $R^2 > 0.88$ for each SA, indicating quite good fits. Nonetheless, any elastic net model with a smaller prediction error than ridge regression and LASSO models was found for “Top-sided shape”. Ridge regression models presented good fits (R^2) ranging from 0.61 for the SA “Top-sided shape” to 0.96 for “Branching degree”, whereas in average LASSO and elastic net methods provided even more accurate models ($R^2 > 0.7$ and ≥ 0.85 respectively). Some models even reached an $R^2 \geq 0.95$ like with LASSO and elastic net for “Branching degree”, “Branching location”, or “Shape homogeneity”.

Unsurprisingly, as a consequence of the mixing parameter computation method, CV showed that elastic net models always outperformed the ridge regression and LASSO ones (Table 4). Interestingly, whereas ridge regression models for “Branching regularity” and “Foliage density” presented noticeable improved predictive abilities, prediction of the other SAs was improved more consistently with the less complicated models provided by LASSO. However, even though elastic net models had the best predictive abilities, comparing their R^2-CV and RMSEP with both ridge and LASSO models did not show any drastic improvements since the better one was for “Compactness” with an R^2-CV increase of 0.08 and a decrease of 0.13 for RMSEP.

Comparing predictive abilities of the OLS and penalized models (Tables 3 and 4) highlighted some penalized models outperforming the one predictor-based OLS models. Indeed, the elastic net and LASSO models for “Branching degree” and “Branching location”

had very slightly superior R^2-CV , and a more consequent RMSEP drop was noticed with the both methods for “Branching location”. Quite better R^2-CV were also observed for “Top-sided shape” and “Shape homogeneity” with LASSO and elastic net method respectively, with an even more competitive RMSEP for the last SAs (0.77 with OLS vs. 0.58 with elastic net). Interestingly, the three penalized model regression methods obtained for the SA “Width regularity” had also a better predictive ability (RMSEP ranging from 0.87 to 0.94) than OLS model with one MD (RMSEP = 1.19) especially with LASSO (RMSEP = 0.89). Nonetheless, except LASSO and elastic net models for “Branching degree” which presented slightly smaller prediction errors than its OLS model (RMSEP = 0.49 and 0.47 respectively and 0.59 with OLS), all the other SAs were even far better predicted using OLS, R^2_{adj} threshold and stepwise predictor selection approach. However, without considering ridge regression models, LASSO and elastic net models were not more parsimonious since the less complex was the LASSO model for “Width” with two MDs like with the OLS model but it did not present better characteristics (Tables 3 and 4). For this SA example, the first MD selected in both OLS and LASSO models was the maximum of the plant width (Width_P) with a positive coefficient. The second selected MD in the OLS model (data not shown) was the amplitude of the Feret maximum diameter (Feret_Max) with a negative coefficient and being moderately correlated to the first MD ($r_p = 0.61$), whereas in the LASSO model, it was the median of the Feret minimum diameter (Feret_Min) with a positive coefficient, but being strongly correlated to the first selected MD ($r_p = 0.90$) (data not shown). For the other LASSO models, more predictors have been selected, the most complex were for the SAs “Branching degree”, “Branching location” and “Shape homogeneity” with 14, 15, and 16 selected MDs respectively.

Table 4
Goodness of fit and predictive abilities of the sensory attributes' penalized models obtained with the ridge, LASSO, and elastic net regression methods and leave-one-out cross-validation.

Sensory attribute	Ridge ($\alpha = 0$, NP = 700)				LASSO ($\alpha = 1$)					Elastic net							
	λ	R^2	R^2 -CV	RMSEP	λ	R^2	NP	R^2 adj	R^2 -CV	RMSEP	λ	α	R^2	NP	R^2 adj	R^2 -CV	RMSEP
Branching degree	38.78	0.96	0.85	0.76	0.06	0.99	15	0.98	0.94	0.49	0.16	0.417	0.99	33	NA	0.94	0.47
Branching location	37.90	0.84	0.51	0.97	0.10	0.97	14	0.90	0.65	0.82	0.12	0.810	0.97	15	0.88	0.66	0.81
Branching regularity	44.92	0.91	0.68	1.14	0.53	0.82	8	0.71	0.52	1.40	28.34	0.002	0.91	451	NA	0.70	1.11
Compactness	107.11	0.83	0.62	1.13	0.34	0.89	10	0.80	0.63	1.11	1.31	0.189	0.92	55	NA	0.71	0.99
Foliage density	74.89	0.85	0.62	1.01	0.53	0.79	4	0.75	0.52	1.14	7.60	0.025	0.89	155	NA	0.67	0.94
Height	30.67	0.88	0.56	0.89	0.22	0.93	3	0.93	0.88	0.48	0.25	0.875	0.93	5	0.91	0.88	0.47
Horizontal symmetry	125.58	0.69	0.29	1.45	0.30	0.89	10	0.79	0.34	1.40	0.86	0.425	0.85	27	NA	0.36	1.37
Shape homogeneity	61.37	0.87	0.68	0.83	0.04	0.99	16	0.97	0.85	0.58	0.04	0.942	0.99	16	0.97	0.85	0.58
Top-sided shape	136.10	0.61	0.31	1.18	0.07	0.98	9	0.97	0.82	0.61	–	–	–	–	–	–	–
Vertical symmetry	93.67	0.70	0.31	1.48	0.25	0.89	12	0.74	0.30	1.49	8.11	0.016	0.86	235	NA	0.38	1.40
Width	93.43	0.83	0.62	0.94	0.57	0.74	2	0.72	0.60	0.97	7.92	0.026	0.88	161	NA	0.69	0.85
Width regularity	30.44	0.92	0.74	0.94	0.13	0.97	12	0.92	0.73	0.97	13.30	0.004	0.94	416	NA	0.77	0.89

λ : shrinkage parameter; α : mixing parameter determining the penalties used; R^2 : coefficient of determination; R^2 -CV: R^2 computed from leave-one-out Cross-Validation; RMSEP: Root Mean Square Error of Prediction computed from CV; NP: Number of Predictors; NA: Not Available value for R^2_{adj} since $NP \geq 20$.

Table 5
Goodness of fit and predictive abilities of the sensory attributes' models obtained by regression on components methods and leave-one-out cross-validation: Principal component regression (PCR); Partial least squares regression with uniresponse model (PLSR1); PLSR with multiresponse model (PLSR2).

Sensory attribute	PCR				PLSR1				PLSR2			
	R^2	R^2 -CV	RMSEP	NC	R^2	R^2 -CV	RMSEP	NC	R^2	R^2 -CV	RMSEP	NC
Branching degree	1.00	0.90	0.61	18	1.00	0.91	0.58	7	0.99	0.91	0.60	15
Branching location	0.97	0.74	0.70	16	0.90	0.43	1.05	3	0.99	0.64	0.83	13
Branching regularity	0.96	0.81	0.87	13	0.94	0.71	1.09	3	0.99	0.78	0.96	8
Compactness	0.91	0.78	0.85	6	1.00	0.80	0.82	18	0.92	0.75	0.91	6
Foliage density	0.89	0.70	0.90	6	1.00	0.78	0.76	12	0.97	0.70	0.90	6
Height	0.99	0.77	0.65	16	0.99	0.73	0.70	6	0.98	0.72	0.72	11
Horizontal symmetry	0.94	0.72	0.91	12	0.97	0.54	1.17	5	0.94	0.69	0.96	9
Shape homogeneity	0.93	0.76	0.72	10	0.94	0.77	0.71	3	0.80	0.74	0.75	3
Top-sided shape	0.97	0.50	1.00	14	0.99	0.44	1.06	6	1.00	0.54	0.96	16
Vertical symmetry	0.97	0.50	1.25	18	0.89	0.57	1.17	3	0.99	0.51	1.25	17
Width	1.00	0.74	0.78	18	0.95	0.70	0.83	3	0.99	0.75	0.76	15
Width regularity	0.97	0.85	0.72	13	0.96	0.73	0.96	3	0.96	0.84	0.74	10

R^2 : coefficient of determination; R^2 -CV: R^2 computed from leave-one-out Cross-Validation; RMSEP: Root Mean Square Error of Prediction computed from CV; NC: Number of components.

In contrast, except for “Branching location”, “Height” and “Shape homogeneity”, all the elastic net models were over parametrized like for “Branching regularity” with 451 MDs, leading to incomputable R^2_{adj} . Using this statistics, it was notable that the fit quality of LASSO models was not globally better than with $R^2_{adj} \geq 0.9$ OLS models. The three comparable elastic net models presented only similar R^2_{adj} (differences < 0.06 ; Tables 3 and 4). Marginally superior R^2_{adj} were also observed with LASSO for “Branching degree”, “Shape homogeneity”, “Top-sided shape”, “Height”, “Width regularity”, and “Branching location” (differences ranging from 0 to 0.06). Nonetheless, LASSO models for the other SAs presented R^2_{adj} even more inferior (differences ranging from 0.13 to 0.26), indicating that the selected OLS models can be considered as more parsimonious.

Except the PLSR2 model of “Shape homogeneity”, regression on component methods led to models presenting excellent fit with $R^2 \geq 0.90$ (Table 5). However CV highlighted the small relevance of these models regarding the large differences between respective R^2 and R^2 -CV. Furthermore, only better predictive abilities were observed in comparison to the one predictor-based OLS models obtained for “Branching location” (PCR and PLSR2), “Branching regularity” (PCR), “Horizontal symmetry”, “Shape homogeneity” and “Width regularity” (with the three methods). Nonetheless here also, any of those methods led to better predictions than with the OLS models selected using the R^2_{adj} threshold. Despite these results, interesting information may also be obtained comparing models' characteristics in order to investigate if the variability of

the responses can be related with the variability in the predictors' space. In such cases, PCR outperforms PLSR models (in predictive ability and number of components), but here this was not observed.

4. Discussion

The originality of this study stands on presenting how image features from rotating plants recorded on video could be processed in a simple way, and analyzed together with multiple visual traits assessed by a hedonic-free sensory method. Indeed, most of the grading and sorting oriented experiments presented image features which aim to a priori mathematically translate some considered visual traits governing the ornamental value according to experts' knowledge. Then image features are selected and weighted to reproduce the tasks done by the professionals (e.g. Brons et al., 1993; Timmermans and Hulzebosch, 1996). But following this approach, relations between proposed image features and hedonic-free human perceptions are not directly studied. Even recently, Meijón et al. (2009) used some image features for evaluating the quality of potted azaleas but without presenting how they selected them. As example, in order to measure the plant branching degree they used a roughness parameter computed from the ratio between the total plant perimeter and its convex hull the perimeter. Unfortunately, they did not present how strong this parameter is related to plant architecture measurements or objective visual assessments. Inversely, for

studying the floribundity of grafted rose bushes, [Santagostini et al. \(2014\)](#) proposed to compute from single plant facet photograph the relative flower area as the ratio of the area covered by flowers to that covered by the entire plant. Their study demonstrated the strong correlation of this image feature with different flower-related sensory assessment methods made on the same photographs and the number of hand counted flowers on the corresponding plants. Therefore, the present study stresses again the care that should accompany the use of an image feature to relate it to a visual characteristic perception.

The aim of this study being to assess the relevance of an image feature management to predict objective visual traits, comparisons between presented results and previous sensory experiments on rose bushes ([Boumaza et al., 2010](#); [Huché-Théliér et al., 2011](#); [Santagostini et al., 2014](#); [Garbez et al., 2015](#)) were not a priority. However, some interesting findings have been highlighted. As element of comparisons, the sensory attribute “Shape regularity” used in this work was sufficiently consensual to be considered, whereas in the study of [Boumaza et al. \(2009\)](#) based on direct assessments of potted rose bushes, their sensory attribute “Habit evenness” quite close to the latter, was considered as too ambiguous according to their criteria. Similarly, here “Branching degree” and “Branching location” were enough consensual, whereas both “Number of branches” and “Branching height” proposed by [Huché-Théliér et al. \(2011\)](#) for single facet photograph assessments were not. Also, [Boumaza et al. \(2010\)](#) suggested that for sensory characterization, using videos of rotating plants or also several photographs (with and without leaves) may enhance panel performance and supplement the characterization. In the present study, three panel performance indicators employed by these latter authors were used in the same way. From them, it could be noticed that the observed panel performance compared to the one they reported seemed globally better. This strengthens the assumption that the plant 3D should be taken in account for visual characterization as suggested by [Kohsel and Bennedsen \(2001\)](#) who highlighted the need to present several facets of the plants to reduce grading inconsistencies from experts. But finally, a specific sensory experiment using real plants and their virtual representations, both presented through free exploration, single and multiple facet photographs, as in rotation on video, should be undertaken to determine effectively how the plant presentation influences the panel performance and the characterization of the plants. It would be thus possible to effectively determine if virtual modeling can be used to make more concrete extrapolations for studying the visual quality and the visual appearance of real plants.

From a standpoint considering the possibility to predict the sensory attributes from the image data regardless of the statistical approach used, one may wonder how much images are needed, and how it could be defined. When dealing with sensory analysis, it could be easily assumed that the higher the number of facets seen is, the more the subjects will be able to integrate them all in a whole, as the video presentation of the plants in rotation enabled it. But obviously, when dealing with image analysis, the higher the image number to process is, the more the image processing is time-consuming and it comes with storage space issues. However, once the image feature extraction is done, this side effect does not present a bottleneck for the computational time required with the proposed morphometrical descriptors computing method which represents the core of this paper.

As remarked by [Dijkstra et al. \(1997\)](#), feature measurements of a same plant may vary in function of the plant orientation. Thus, with repeated measurements regardless of the plant orientation, they used a consistency indicator to only select the features presenting low variations. This approach can be extrapolated in the present proposed methodology either by analyzing the consistency

of specific morphometrical descriptors of interests, or either by looking at their correlations with the sensory attributes and the prediction quality of the models, both using the number of input images as a study variable. Similarly, studying the variations in the image feature measurements along the plant rotation may also help to determine which image input number and morphometrical descriptors can be more relevant. Thus, it could be possible to select a reduced or a larger number of images, and to compute only some morphometrical descriptors with more precautions for subsequent studies on similar plants. This choice should take in account the accuracy expected and the data storage space availability. Whatever this number of images needed, an automated turntable coupled with a digital camera represents a relevant device for transposing this methodology on real plants ([Harmsen and Koenderink, 2009](#); [Fahlgren et al., 2015](#)). To obtain such videos, two approaches can be envisaged: (1) recording the plant rotation on digital video files, note that it implies to extract the frames from the videos for the image analysis; or (2) taking several plant facets photographs with a desired rotation interval, note that it implies to merge the multiple images into videos for the sensory analysis. Nonetheless, it should be kept in mind that with this kind of devices, many noise sources related to the scene configuration and variation in lighting may complicate the image processing and the feature extraction. Also, as the proposed approach stands on using morphometrical descriptors able to reflect the eventual variability of the plant facets, the scene configuration and the sensor resolution must enable to catch a sufficient range of this eventual variation. Here, virtual modeling enabled the obtainment of plant videos free from such artifacts, and thus presented a strong advantage to assess easily the potential of the morphometrical descriptor computing method proposed, this regardless of complex pattern recognition and image segmentation issues.

Concerning statistical approaches used, most of the studies addressing automatic classification for ornamental plant grading by image analysis concluded that neural networks implemented with image features data, eventually pre-processed, outperformed OLS model obtained with stepwise predictor selection or dimensional reduction, and discriminant analysis methods ([Brons et al., 1993](#); [Timmermans and Hulzebosch, 1996](#); [Dijkstra et al., 1997](#)). For more broadly sensory attribute prediction issues, many studies investigated also the relevance of several statistical approaches for quantitative predictions from varied instrumental measures. As example, [Brockhoff et al., 1993](#) tested OLS with forward then backward predictor selections, PCR, PLSR, ridge regression and continuum regression to predict sensory attributes describing the smell of apples and preferences from gas chromatography measures. The study concluded that PLSR and ridge regression enabled to achieve better predictions. [Togari et al. \(1995\)](#) compared OLS and stepwise predictor selection, PCR, and PLSR to predict tea aroma sensory attributes from gas chromatographic measures. The authors obtained good results with all the three methods, but PLSR and OLS models led to similar predictive abilities that were slightly better than PCR models. [Downey et al. \(2005\)](#) showed that PLSR outperformed PCR to predict sensory attributes describing taste of Cheddar cheeses from near-infrared spectroscopy measures. Here, the correlation results demonstrated that the visual appearance of plants is strongly related to several descriptive statistics resuming the pattern of 2D image features recorded along plant rotation. Subsequently, even though near all the tested regression methods provided models presenting acceptable to high goodness of fit, any one surpassed the relevance, the robustness and the parsimony of the OLS models obtained with the BIC-based stepwise predictor selection aborted at an adjusted R^2 threshold. Nonetheless, an extensive range of other statistical approaches exists, and new ones are continuously proposed in

order to reach models using only the best feature sets and providing the most satisfying predictive abilities (Kuhn and Johnson, 2013; Silva et al., 2013). Similarly to recent methods using data condensation coupled with variable selection methods as the backward variable selection method for PLSR (Pierna et al., 2009) or sparse PLSR (Lee et al., 2011); Menéndez et al. (2012) also proposed with success to predict sensory attributes describing the taste of tomatoes from metabolic profiles using a methodology combining predictor selection from LASSO and elastic net methods followed by model selection with BIC. These points strongly stress that the choice of the statistical approach obviously represents a crucial step to assess whether or not if predictive modeling can be achieved, thus it is recommended to always address some different approaches. However in order to propose routine applications set up on the basis of a more robust predictor selection adapted for a specific genus or cultivar, it would be very valuable, even essential, to analyze on various plant samples the results obtained with several regression, predictor selection and cross-validation methods to predict quantitative responses, but also qualitative ones with the sensory attributes scores beforehand subjected to classification procedures to check the remanence of the selected predictors as partially addressed for the sensory attribute “Width”.

Despite the satisfying results obtained here for all the sensory attributes with OLS, the sensory attributes for which the panel performance was inferior were those related to visual traits presenting potentially more variations between the plant facets. Interestingly these attributes presented a lower correlation with their respective best correlated morphometrical descriptor, and needed more predictors to reach the chosen adjusted R^2 threshold. Regardless of the statistical approach used, it is therefore relevant to ask if the notation protocol and the panel training can be eventually improved, and if other features not used in this study would be more appropriate. Considering the extensive image analysis literature, other approaches can be investigated to supplement the proposed feature acquisition and morphometrical descriptor computing method. Besides, to enhance the prediction of plant visual appearance characterizations with instrumental methods and particularly to relate it with plant biological parameters, various sensing technologies coupled with classic cameras can be investigated for obtaining many other uni- and multiscale 2D or 3D plant measurements (for reviews see Ruiz-Altisent et al., 2010; Rosell and Sanz, 2012; Rousseau et al., 2015). Indeed many various 2D measuring methods designed for local and global shape, color and texture analyses on classic digital images can be integrated with the present approach. For example, pixels' data of plant and plant part images can be processed by principal component analysis in order to resume without a priori their variations in a low number of eigenvectors available for plant visual appearance characterization (Horgan, 2001) and already presented its relevance with pot rose grading using an unsupervised approach (Kohsel, 2001).

Also, when considering consecutive images of rotating plants, the plant motion can be managed using target tracking algorithms for accurate flower counting, and which can be extrapolated for other plant organs (Harmsen and Koenderink, 2009). Using specific sensors or filters for non-conventional imaging techniques gazing specific spectral ranges such as with chlorophyll fluorescence analysis and thermal imaging can be investigated to integrate some parameters related to the physiological and health status of the plants (Belin et al., 2013) which are also core quality components of the horticultural products. Moreover, some sensing technologies can be highly relevant in order to obtain accurate 3D measurements directly: e.g. ultrasonic sensors (Ruixiu et al., 1989; Schumann and Zaman, 2005), stereovision devices (Parsons et al., 2009; Lati et al., 2013; Lou et al., 2014a), light detection and

ranging (LIDAR) laser sensors (Rosell et al., 2009; Delagrangé and Rochon, 2011; Xu et al., 2013); low-cost structured lighting sensors (Chéné et al., 2012). However, even with such technologies, accounting the plant 3D through monitoring or merging the measurements over several viewpoints persists. A way to improve this stands on investigating 3D reconstruction methods enabling 3D measurements from reconstructed plants instead of using features from individual plant facets. While such measurements can be easily obtained for virtual plants through the modeling process and its outputs, such reconstructing methods can be envisaged with several facet photographs of real plant but also of virtual plants obtained by modeling or 3D digitizing (e.g. Shlyakhter et al., 2001; Phattaralerphong and Sinoquet, 2005; Quan et al., 2006; Tan et al., 2007; Lou et al., 2014b).

5. Conclusion and perspectives

The proposed approach demonstrated its relevance to predict the various visual traits of the virtual plants used. It confirmed the pertinence to take in account several types of view of the plant, *i.e.* the morphology of the plant itself, its convex hull, without the holes (closed, opened or both), and more importantly the variability of its facets. Image features obtained along the plant rotation enabled to discriminate the plants, to characterize them through polar plots and descriptive statistics, and give the possibility to compare them with subsequent inferential tests. Constructing morphometrical descriptors from the image features using descriptive statistics enabled to highlight quite strong correlations with the addressed sensory attributes. Subsequently, ordinary least squares regression allowed good modeling of the sensory attributes with no more than four specific morphometrical descriptors. Cross-validations confirmed the best performance of the OLS regression models obtained with stepwise predictor selection. However, using and combining various methods and their results on larger samples is strongly recommended to select optimal model for routine application that ideally are strongly accurate, parsimonious, explicative and flexible.

Finally, this study showed that: (1) sensory profiles could be conducted using rotating virtual plant videos as stimuli; (2) image analysis is appropriate to extract features from the videos; (3) these one can be analyzed in various statistical ways; that (4) some descriptive statistics of image features can be related to the sensory attributes; and (5) that only a few number enables to model and predict the sensory attributes by means of basic linear models.

Even if complementary investigations can be conducted, particularly about the input number of images, the color data integration, and about comparing statistical approaches for predictor selection, this study showed clearly the potential of the proposed methodology to predict the hedonic-free characterization of the visual appearance of virtual plants presented in rotation with a good accuracy. Current works using much larger samples of real plants cultivated under contrasted environments and characterized repeatedly over time with sensory, image and architectural measurements will enable us to address more deeply the potential of the proposed concept.

Hopefully, this study depicts the premises of a possible methodology for replacing the sensory analyzes in the aim to develop an automated visual appearance characterization tool for ornamental plants. Such device could be either drafted for real plants, but also it can be coupled to a virtual plant modeling process integrating the architectural variability resulting from phenotypic plasticity, and genotype and environment interactions' effects. By coupling both the advantages of a virtual modeling device and automated

phenotyping for sensory and architectural characterizations, support-decision tools in order to reach better fulfillments of the consumers' expectations can be sketched for forward thinking growers and breeders to help them in conducting their crops and selection processes.

Acknowledgments

The authors thank the Pays de la Loire Regional council for their financial support, and all of the people who took part in the panel for the sensory experiment. The authors thank also V. Clement, and A. Collette, for their strong investments in the set-up of the sensory experiment, and L. Crespel for its relevant expert opinion on this work.

Appendix A. Features obtained from the image analysis

For some features, three object selection processes were used: (1) the plant bounding box selection (BBS); (2) the plant convex hull selection (CHS) obtained through the convex hull plus additional ImageJ plugin (Landini, 2007) and (3) the plant bounding box selection for which the width is equal to twice the largest half-width (BBSHW). A first set of 6 features giving landmarks coordinates (Fig. A.1) were only extracted to be used in formulas with a second set of 41 features that were directly obtained from the ImageJ software. These two sets allowed designing a third set of 49 features which are formulas designed using features from the first two sets. All of these features are presented in Table A.1 following this classification.

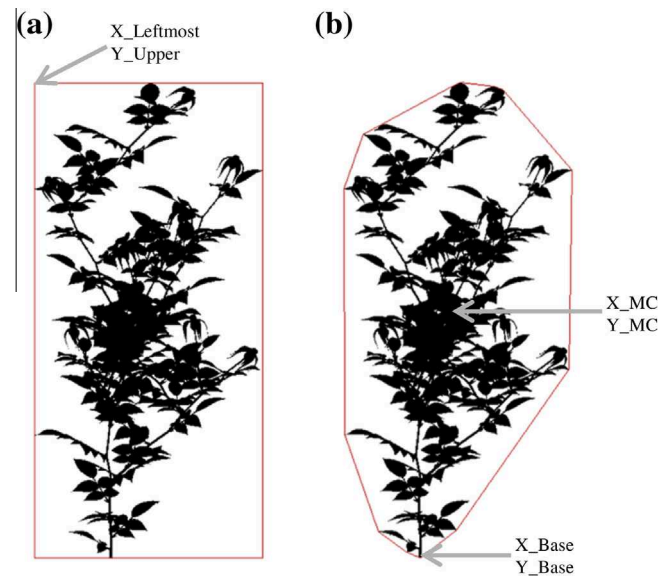


Fig. A.1. Landmark coordinates obtained with ImageJ: (a) X coordinate of the leftmost point and Y coordinate of the upper point (X_Leftmost; Y_Upper) using the bounding box selection (BBS); (b) coordinates of the mass center (X_MC; Y_MC) and the plant base (X_Base; Y_Base) using a convex hull selection (CHS).

Appendix B. Supplementary material

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.001>.

Table A.1

List of the features obtained or computed from ImageJ.

Feature set/feature type/feature	Code	Obtainment/formula
Landmark coordinates		
- X coordinate of the plant base	X_Base	CHS
- Y coordinate of the plant base	Y_Base	CHS
- X coordinate of the mass center	X_MC	CHS
- Y coordinate of the mass center	Y_MC	CHS
- X coordinate of the leftmost point	X_Leftmost	BBS
- Y coordinate of the upper point	Y_Upper	BBS
Direct features		
<i>Area of the black pixels</i>		
- On PBI	Area (PBI)	PBI
- On PFI	Area (PFI)	PFI
- On PCI	Area (PCI)	PCI
- At the left of the plant base on PBI	Area_L (PBI)	PBI
- At the left of the plant base on PFI	Area_L (PFI)	PFI
- At the left of the plant base on PCI	Area_L (PCI)	PCI
- At the right of the plant base on PBI	Area_R (PBI)	PBI
- At the right of the plant base on PFI	Area_R (PFI)	PFI
- At the right of the plant base on PCI	Area_R (PCI)	PCI
- Under the middle of the plant height on PBI	Area_B (PBI)	PBI
- Under the middle of the plant height on PFI	Area_B (PFI)	PFI
- Under the middle of the plant height on PCI	Area_B (PCI)	PCI
- Above the middle of the plant height on PBI	Area_T (PBI)	PBI
- Above the middle of the plant height on PFI	Area_T (PFI)	PFI
- Above the middle of the plant height on PCI	Area_T (PCI)	PCI
<i>Length</i>		
- Of the plant height	Height_P	PBI; BBS
- Of the plant width	Width_P	PBI; BBS
- Of the Feret maximum diameter ^a	Feret_Max	PBI; CHS
- Of the Feret minimum diameter ^b	Feret_Min	PBI; CHS
<i>Perimeter</i>		
- Of the plant outline	Perim_P	PFI
- Of the convex hull outline	Perim_CH	PBI; CHS

(continued on next page)

Table A.1 (continued)

Feature set/feature type/feature	Code	Obtainment/formula
<i>Count number of matched pixels according to a symmetry axis</i>		
– Vertical, through the plant base on PBI	M_Base (PBI)	PBI; BBS
– Vertical, through the plant base on PFI	M_Base (PFI)	PFI; BBS
– Vertical, through the plant base on PCI	M_Base (PCI)	PCI; BBS
– Vertical, through the middle of the plant width on PBI	M_Width (PBI)	PBI; BBSHW
– Vertical, through the middle of the plant width on PFI	M_Width (PFI)	PFI; BBSHW
– Vertical, through the middle of the plant width on PCI	M_Width (PCI)	PCI; BBSHW
– Horizontal, through the middle of the plant height on PBI	M_Height (PBI)	PBI; BBS
– Horizontal, through the middle of the plant height on PFI	M_Height (PFI)	PFI; BBS
– Horizontal, through the middle of the plant height on PCI	M_Height (PCI)	PCI; BBS
<i>Count number of holes</i>		
– Of closed holes	N_C_Holes	PBI
– Of opened holes	N_O_Holes	PFI and PCI
<i>Count number of unmatched pixels according to a symmetry axis</i>		
– Vertical, through the plant base on PBI	UM_Base (PBI)	PBI; BBS
– Vertical, through the plant base on PFI	UM_Base (PFI)	PFI; BBS
– Vertical, through the plant base on PCI	UM_Base (PCI)	PCI; BBS
– Vertical, through the middle of the plant width on PBI	UM_Width (PBI)	PBI; BBSHW
– Vertical, through the middle of the plant width on PFI	UM_Width (PFI)	PFI; BBSHW
– Vertical, through the middle of the plant width on PCI	UM_Width (PCI)	PCI; BBSHW
– Horizontal, through the middle of the plant height on PBI	UM_Height (PBI)	PBI; BBS
– Horizontal, through the middle of the plant height on PFI	UM_Height (PFI)	PFI; BBS
– Horizontal, through the middle of the plant height on PCI	UM_Height (PCI)	PCI; BBS
Computed features		
<i>Angle</i>		
– Formed by the bounding box top-left corner, the plant base and a horizontal line	Angle_L	Arctan(Height_P/Width_L)
– Formed by bounding box top-right corner, the plant base and a horizontal line	Angle_R	Arctan(Height_P/Width_R)
<i>Area</i>		
– Of the bounding box	Area_BB	Width_P × Height_P
– Of the closed holes	Area_C_Holes	Area (PFI)–Area (PBI)
– Of the opened holes	Area_O_Holes	Area (PCI)–Area (PFI)
– Of the holes (closed and opened)	Area_Holes	Area (PCI)–Area (PBI)
<i>Count number of holes and area distribution of the holes</i>		
– Number of holes, the sum of opened and closed holes	N_Holes	N_C_Holes + N_O_Holes
– Average area of the closed holes	C-Holes_Distrib	Area_C_Holes/N_C_Holes
– Area of the holes relative to the number of closed holes	Holes_C-Holes_Distrib	Area_Holes/N_C_Holes
– Area of the opened holes relative to the number of closed holes	O-Holes_C-Holes_Distrib	Area_O_Holes/N_C_Holes
– Area of the closed holes relative to the number of opened holes	C-Holes_O-Holes_Distrib	Area_C_Holes/N_O_Holes
– Area of the holes relative to the number of opened holes	Holes_O-Holes_Distrib	Area_Holes/N_O_Holes
– Average area of the opened holes	O-Holes_Distrib	Area_O_Holes/N_O_Holes
– Area of the closed holes relative to the number of holes	C-Holes_Holes_Distrib	Area_C_Holes/N_Holes
– Average area of the holes	Holes_Distrib	Area_Holes/N_Holes
– Area of the opened holes relative to the number of holes	O-Holes_Holes_Distrib	Area_O_Holes/N_Holes
<i>Length and relative length</i>		
– Width of the left side from the plant base	Width_L	X_Leftmost–X_Base
– Width of the right side from the plant base	Width_R	Width_P–Width_L
– Height of the mass center	Height_MC	Y_Base–Y_MC
– Horizontal length from the mass center to the plant base	Length_MC_Base	X_Base–X_MC
– Horizontal deviation of the mass center relative to the plant width	Dev_MC_Width	Dev_MC_Base/Width_P
– Vertical deviation of the mass center relative to the plant width	Dev_MC_Height	Height_MC/Height_P
<i>Absolute differences of angles and lengths</i>		
– Between the right and left widths from the base plant	Delta_Half_Width	Width_L–Width_R
– Between the angles formed by the plant base, a horizontal line and each bounding box top corner	Delta_Angle	Angle_L–Angle_R
<i>Shape and shape filling</i>		
– Aspect ratio orientated according to the image	Size_Ratio_Or	Width_P/Height_P
– Aspect ratio unorientated	Size_Ratio_Unor	Feret_Min/Feret_Max
– Geometric eccentricity based on Feret diameters ^c	Ecc_Feret	$\sqrt{(1-(Feret_Min/2)^2/(Feret_Max/2)^2)}$
– Bounding box filling by the plant, taking into account the holes	Filling_BB (PBI)	Area (PBI)/(Width_P × Height_P)
– Bounding box filling by the plant, without taking into account the closed holes	Filling_BB (PFI)	Area (PFI)/(Width_P × Height_P)
– Bounding box filling by the plant, without taking into account the holes	Filling_BB (PCI)	Area (PCI)/(Width_P × Height_P)
– Plant filling	Filling_Plant	Area (PBI)/Area (PFI)
– Convex hull filling, taking into account the holes	Filling_Convex (PBI)	Area (PBI)/Area (PCI)
– Convex hull filling, without taking into account the closed holes	Filling_Convex (PFI)	Area (PFI)/Area (PCI)
– Bounding circle filling, taking into account the holes	Filling_Circle (PBI)	Area (PBI)/((0.5 × Feret_Max) ² × π)
– Bounding circle filling, without taking into account the closed holes	Filling_Circle (PFI)	Area (PFI)/((0.5 × Feret_Max) ² × π)
– Bounding circle filling, without taking into account the holes	Filling_Circle (PCI)	Area (PCI)/((0.5 × Feret_Max) ² × π)

Table A.1 (continued)

Feature set/feature type/feature	Code	Obtainment/formula
<i>Matched pixels relative to unmatched pixels according to symmetry axis</i>		
– Vertical, through the middle of the plant width, taking into account the holes	M_Width_Ratio (PBI)	M_Width (PBI)/UM_Width (PBI)
– Vertical, through the middle of the plant width, without taking into account the closed holes	M_Width_Ratio (PFI)	M_Width (PFI)/UM_Width (PFI)
– Vertical, through the middle of the plant width, without taking into account the holes	M_Width_Ratio (PCI)	M_Width (PCI)/UM_Width (PCI)
– Vertical, through the base plant	M_Base_Ratio (PBI)	M_Base (PBI)/UM_Base (PBI)
– Vertical, through the base plant, without taking into account the closed holes	M_Base_Ratio (PFI)	M_Base (PFI)/UM_Base (PFI)
– Vertical, through the base plant, without taking into account the holes	M_Base_Ratio (PCI)	M_Base (PCI)/UM_Base (PCI)
– Horizontal, through the middle of the plant height	M_Height_Ratio (PBI)	M_Height (PBI)/UM_Height (PBI)
– Horizontal, through the middle of the plant height, without taking into account the closed holes	M_Height_Ratio (PFI)	M_Height (PFI)/UM_Height (PFI)
– Horizontal, through the middle of the plant height, without taking into account the holes	M_Height_Ratio (PCI)	M_Height (PCI)/UM_Height (PCI)
<i>Plant Area distribution</i>		
– Top area relative to the bottom area, taking into account the holes	Area_T_B (PBI)	Area_T (PBI)/Area_B (PBI)
– Top area relative to the bottom area, without taking into account the closed holes	Area_T_B (PFI)	Area_T (PFI)/Area_B (PFI)
– Top area relative to the bottom area, without taking into account the holes	Area_T_B (PCI)	Area_T (PCI)/Area_B (PCI)
– Left and right area balance, taking into account the holes	Area_Vert_Bal (PBI)	Ratio of Area_L (PBI) and Area_R (PBI) ^d
– Left and right area balance, without taking into account the closed holes	Area_Vert_Bal (PFI)	Ratio of Area_L (PFI) and Area_R (PFI) ^d
– Left and right area balance, without taking into account the holes	Area_Vert_Bal (PCI)	Ratio of Area_L (PCI) and Area_R (PCI) ^d
– Top and bottom areas balance, taking into account the holes	Area_Hori_Bal (PBI)	Ratio of Area_B (PBI) and Area_T (PBI) ^d
– Top and bottom areas balance, without taking into account the closed holes	Area_Hori_Bal (PFI)	Ratio of Area_B (PFI) and Area_T (PFI) ^d
– Top and bottom areas balance, without taking into account the holes	Area_Hori_Bal (PCI)	Ratio of Area_B (PCI) and Area_T (PCI) ^d
<i>Shape complexity</i>		
– Perimeter of the plant squared relative to its area, taking into account the holes	Shape_Comp_P (PBI)	Perim_P ² /Area (PBI)
– Perimeter of the plant squared relative to its area, without taking into account the closed holes	Shape_Comp_P (PFI)	Perim_P ² /Area (PFI)
– Perimeter of the convex hull squared relative to its area, taking into account the holes	Shape_Comp_CH (PBI)	Perim_CH ² /Area (PBI)
– Perimeter of the convex hull squared relative to its area, without taking into account the closed holes	Shape_Comp_CH (PFI)	Perim_CH ² /Area (PFI)
– Perimeter of the convex hull squared relative to its area, without taking into account the holes	Shape_Comp_CH (PCI)	Perim_CH ² /Area (PCI)

BBS: Bounding Box Selection; BBSHW; Bounding Box Selection for which the width is equal to twice the largest Half-Width of the plant; CHS: Convex Hull Selection; PBI: Plant Binarized Image; PFI: Plant Filled Image; PCI: Plant Convex Hull Image.

^a The longest distance between two border points of the plant.

^b The smallest distance between two straight lines, plant border tangent and perpendicular to the Feret maximum diameter.

^c Equal 0 for circle; less than 1 for ellipse; equal to 1 for parabola, not applicable for hyperbola here.

^d The smallest value being at the numerator.

References

- Abràmoff, M.D., Magalhães, P.J., Ram, S.J., 2004. Image processing with ImageJ. *Biophoton. Int.* 11, 36–42.
- Aldous, D.E., 2013. Extrinsic and intrinsic attributes used in the selection and quality control of ornamental crops. *Acta Hort.* (ISHS) 970, 59–67.
- Alfons, A., 2012. cvTools: Cross-Validation Tools for Regression Models (Version 0.3.1). <<http://cran.r-project.org/web/packages/cvTools/index.html>>.
- Barthélémy, D., Caraglio, Y., 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Ann. Bot.* 99, 375–407.
- Bavay, C., Brockhoff, P.B., Kuznetsova, A., Maître, I., Mehinagic, E., Symoneaux, R., 2014. Consideration of sample heterogeneity and in-depth analysis of individual differences in sensory analysis. *Food Qual. Prefer.* 32, 126–131.
- Belin, É., Rousseau, D., Boureau, T., Caffier, V., 2013. Thermography versus chlorophyll fluorescence imaging for detection and quantification of apple scab. *Comput. Electron. Agric.* 90, 159–163.
- Borra, S., Di Ciaccio, A., 2010. Measuring the prediction error. A comparison of cross-validation, bootstrap and covariance penalty methods. *Comput. Stat. Data Anal.* 54, 2976–2989.
- Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Huché-Thélier, L., Guérin, V., 2009. Visual characterization of the esthetic quality of the rosebush. *J. Sens. Stud.* 24, 774–796.
- Boumaza, R., Huché-Thélier, L., Demotes-Mainard, S., Le Coz, E.L., Leduc, N., Pelleschi-Travier, S., Qannari, E.M., Sakr, S., Santagostini, P., Symoneaux, R., Guérin, V., 2010. Sensory profiles and preference analysis in ornamental horticulture: the case of the rosebush. *Food Qual. Prefer.* 21, 987–997.
- Brockhoff, P., Skovgaard, I., Poll, L., Hansen, K., 1993. A comparison of methods for linear prediction of apple flavour from gas chromatographic measurements. *Food Qual. Prefer.* 4, 215–222.
- Brons, A., Rabatel, G., Ros, F., Sevilla, F., Touzet, C., 1993. Plant grading by vision using neural networks and statistics. *Comput. Electron. Agric.* 9, 25–39.
- Chaivivatrakul, S., Tang, L., Dailey, M.N., Nakarmi, A.D., 2014. Automatic morphological trait characterization for corn plants via 3D holographic reconstruction. *Comput. Electron. Agric.* 109, 109–123.
- Chéné, Y., Rousseau, D., Lucidarme, P., Bertheloot, J., Caffier, V., Morel, P., Belin, É., Chapeau-Blondeau, F., 2012. On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Comput. Electron. Agric.* 82, 122–127.
- Crespel, L., Sigogne, M., Donès, N., Relion, D., Morel, P., 2013. Identification of relevant morphological, topological and geometrical variables to characterize the architecture of rose bushes in relation to plant shape. *Euphytica* 191, 129–140.
- Delagrangé, S., Rochon, P., 2011. Reconstruction and analysis of a deciduous sapling using digital photographs or terrestrial-LiDAR technology. *Ann. Bot.* 108, 991–1000.
- Dijkshoorn-Dekker, M.W.C., 1996. The influence of light and temperature on the dynamic behaviour of *Ficus benjamina* 'Exotica'. *Acta Hort.* (ISHS) 417, 65–68.
- Dijksterhuis, G., 1995. Assessing panel consonance. *Food Qual. Prefer.* 6, 7–14.
- Dijkstra, J., Meuleman, J., 1998. Grading *Dieffenbachia* plants at different growth stages using digital image processing. *Acta Hort.* (ISHS) 421, 99–110.
- Dijkstra, J., Pompe, J., Meuleman, J., Speelman, L., 1997. The application of digital image processing in grading of begonia pot plants. *Neth. J. Agric. Sci.* 45, 143–161.
- Downey, G., Sheehan, E., Delahunty, C., O'Callaghan, D., Guinee, T., Howard, V., 2005. Prediction of maturity and sensory attributes of Cheddar cheese using near-infrared spectroscopy. *Int. Dairy J.* 15, 701–709.
- Fahlgren, N., Gehan, M.A., Baxter, I., 2015. Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Curr. Opin. Plant Biol.* 24, 93–99.
- Favre, P., Guéritaine, G., Andrieu, B., Boumaza, R., Demotes, S., Fournier, C., Galopin, G., Huché-Thélier, L., Morel, P., Guérin, V., 2007. Modelling the architectural growth and development of rosebush using L-systems. Poster Presented at the Workshop «Growth Phenotyping and Imaging in Plants». Montpellier, France.
- Friedman, J., Hastie, L., Simon, N., Tibshirani, R., 2015. glmnet: Lasso and Elastic-Net Regularized Generalized Linear Models (Version 2.0-2). <<http://cran.r-project.org/web/packages/glmnet/index.html>>.
- Garbez, M., Galopin, G., Sigogne, M., Favre, P., Demotes-Mainard, S., Symoneaux, R., 2015. Assessing the visual aspect of rotating virtual rose bushes by a labeled sorting task. *Food Qual. Prefer.* 40 (Part B), 287–295.
- Harmsen, S.R., Koenderink, N.J.J.P., 2009. Multi-target tracking for flower counting using adaptive motion models. *Comput. Electron. Agric.* 65, 7–18.

- Higginbotham, J.S., 1987. Want to sell to supermarkets? Think like a supermarket buyer. *Am. Nurseryman* 165, 133–139.
- Hines, R.L., Sistler, F.E., Wright, M.E., Brown, L., 1987. Establishing grading standards for container-grown plants. *Am. Soc. Agric. Eng.* 87–6053, 11.
- Horgan, G.W., 2001. The statistical analysis of plant part appearance—a review. *Comput. Electron. Agric.* 31, 169–190.
- Huché-Théliér, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., Guérin, V., 2011. Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Sci. Hortic.* 130, 325–334.
- Husson, F., Josse, J., Lê, S., Mazet, J., 2013. *FactoMineR: Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining with R (Version 1.21)*. <<http://cran.r-project.org/package=FactoMineR>>.
- Ibaraki, Y., Dutta Gupta, S., 2014. Image analysis for plants: basic procedures and techniques. In: Ibaraki, Y., Dutta Gupta, S. (Eds.), *Plant Image Analysis: Fundamentals and Applications*, first ed. CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 25–40.
- Karwowski, R., Prusinkiewicz, P., 2004. The L-system-based plant-modeling environment L-studio 4.0. In: Godin, C., Hanan, J., Kurth, W., Lacoite, A., Takenaka, A., Prusinkiewicz, P., De Jong, T., Beveridge, C., Andrieu, B. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models*, UMR AMAP, Montpellier, France, pp. 403–405.
- Kohsel, L., 2001. New unsupervised approach for solving classification problems with computer vision. *Acta Hortic. (ISHS)* 562, 361–375.
- Kohsel, L., Bennedsen, B.S., 2001. Performance of human experts grading pot roses in a commercial environment. *Acta Hortic. (ISHS)* 562, 273–283.
- Kuhn, M., Johnson, K., 2013. *Applied Predictive Modeling*. Springer, New York, USA.
- Labbe, D., Rytz, A., Hugi, A., 2004. Training is a critical step to obtain reliable product profiles in a real food industry context. *Food Qual. Prefer.* 15, 341–348.
- Landini, G., 2007. *Convex Hull Plus (Version 1.2)*. <<http://www.mecourse.com/landini/software/software.html>>.
- Lati, R.N., Filin, S., Eizenberg, H., 2013. Estimating plant growth parameters using an energy minimization-based stereovision model. *Comput. Electron. Agric.* 98, 260–271.
- Lee, A., 2010. *VirtualDub (Version 1.9.11)*. <<http://www.virtualdub.org/index.html>>.
- Lee, D., Lee, W., Lee, Y., Pawitan, Y., 2011. Sparse partial least-squares regression and its applications to high-throughput data analysis. *Chemometr. Intell. Lab. Syst.* 109, 1–8.
- Li-Marchetti, C., Le Bras, C., Relion, D., Citerne, S., Huché-Théliér, L., Sakr, S., Morel, P., Crespel, L., 2015. Genotypic differences in architectural and physiological responses to water restriction in rose bush. *Front. Plant Sci.* 6, 355.
- Lou, L., Liu, Y., Han, J., Doonan, J.H., 2014a. Accurate multi-view stereo 3D reconstruction for cost-effective plant phenotyping. In: Campilho, A., Kamel, M. (Eds.), *11th International Conference on Image Analysis and Recognition*. Springer, Vilamoura, Portugal, pp. 349–356.
- Lou, L., Liu, Y., Sheng, M., Han, J., Doonan, J.H., 2014b. A cost-effective automatic 3D reconstruction pipeline for plants using multi-view images. In: Mistry, M., Aleš, L., Witkowski, M., Melhuish, C. (Eds.), *15th Towards Autonomous Robotic Systems*. Springer, Birmingham, UK, pp. 221–230.
- Meijón, M., Rodríguez, R., Jesús Cañal, M., Feito, I., 2009. Improvement of compactness and floral quality in azalea by means of application of plant growth regulators. *Sci. Hortic.* 119, 169–176.
- Menéndez, P., Eilers, P., Tikunov, Y., Bovy, A., van Eeuwijk, F., 2012. Penalized regression techniques for modeling relationships between metabolites and tomato taste attributes. *Euphytica* 183, 379–387.
- Mevik, B.H., Wehrens, R., 2007. The pls package: principal component and partial least squares regression in R. *J. Stat. Softw.* 18, 1–24.
- Morel, P., Galopin, G., Donès, N., 2009. Using architectural analysis to compare the shape of two hybrid tea rose genotypes. *Sci. Hortic.* 120, 391–398.
- Næs, T., Langsrud, Ø., 1998. Fixed or random assessors in sensory profiling? *Food Qual. Prefer.* 9, 145–152.
- Parsons, N.R., Edmondson, R.N., Song, Y., 2009. Image analysis and statistical modelling for measurement and quality assessment of ornamental horticulture crops in glasshouses. *Biosyst. Eng.* 104, 161–168.
- Phattaralerphong, J., Sinoquet, H., 2005. A method for 3D reconstruction of tree crown volume from photographs: assessment with 3D-digitized plants. *Tree Physiol.* 25, 1229–1242.
- Pierna, J.A.F., Abbas, O., Baeten, V., Dardenne, P., 2009. A Backward Variable Selection method for PLS regression (BVSPS). *Anal. Chim. Acta* 642, 89–93.
- Quan, L., Tan, P., Zeng, G., Yuan, L., Wang, J., Kang, S.B., 2006. Image-based plant modeling. *ACM Trans. Graph.* 25, 599–604.
- R Development Core Team, 2012. *R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 2.15.2)*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <<http://www.R-project.org>>.
- RenderSoft, 2002. *CamStudio (Version 2.00)*. <<http://camstudio.org>>.
- Ripley, B., Venables, B., Hornik, K., Gebhardt, A., Firth, D., 2013. *MASS: Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS (Version 7.3-23)*. <<http://cran.r-project.org/package=MASS>>.
- Rosell, J.R., Llorens, J., Sanz, R., Arno, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Escolà, A., Camp, F., Solanelles, F., Gràcia, F., 2009. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1505–1515.
- Rosell, J.R., Sanz, R., 2012. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Comput. Electron. Agric.* 81, 124–141.
- Rossi, F., 2001. Assessing sensory panelist performance using repeatability and reproducibility measures. *Food Qual. Prefer.* 12, 467–479.
- Rousseau, D., Chéné, Y., Belin, E., Semaan, G., Trigui, G., Boudehri, K., Franconi, F., Chapeau-Blondeau, F., 2015. Multiscale imaging of plants: current approaches and challenges. *Plant Meth.* 11, 6.
- Ruixiu, S., Wilkerson, J.B., Wilhelm, L.R., Tompkins, F.D., 1989. A microcomputer-based morphometer for bush-type plants. *Comput. Electron. Agric.* 4, 43–58.
- Ruiz-Altisent, M., Ruiz-García, L., Moreda, G.P., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E.C., Diezma, B., Nicolai, B., García-Ramos, J., 2010. Sensors for product characterization and quality of specialty crops—a review. *Comput. Electron. Agric.* 74, 176–194.
- Sandri-Neto, L., Camargo, M.G., 2013. *GAD: Analysis of Variance from General Principles (Version 1.1.1)*. <<http://cran.r-project.org/package=GAD>>.
- Santagostini, P., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., Leduc, N., Bertheloot, J., Guérin, V., Bourbeillon, J., Sakr, S., Boumaza, R., 2014. Assessment of the visual quality of ornamental plants: comparison of three methodologies in the case of the rosebush. *Sci. Hortic.* 168, 17–26.
- Schreiner, M., Korn, M., Stenger, M., Holzgreve, L., Altmann, M., 2013. Current understanding and use of quality characteristics of horticulture products. *Sci. Hortic.* 163, 63–69.
- Schumann, A.W., Zaman, Q.U., 2005. Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size. *Comput. Electron. Agric.* 47, 25–40.
- Schwarz, G., 1978. Estimating the dimension of a model. *Ann. Stat.* 6, 461–464.
- Shlyakhter, I., Rozenoer, M., Dorsey, J., Teller, S., 2001. Reconstructing 3D tree models from instrumented photographs. *IEEE Comput. Graphics Appl.* 21, 53–61.
- Silva, L.O.L.A., Koga, M.L., Cugnasca, C.E., Costa, A.H.R., 2013. Comparative assessment of feature selection and classification techniques for visual inspection of pot plant seedlings. *Comput. Electron. Agric.* 97, 47–55.
- Spieß, A.N., Neumeyer, N., 2010. An evaluation of R2 as an inadequate measure for nonlinear models in pharmacological and biochemical research: a Monte Carlo approach. *BMC Pharmacol.* 10, 6.
- Stone, H., Sidel, J., Singleton, R.C., 1974. Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis. *Food Technol.* 28, 24–34.
- Tan, P., Zeng, G., Wang, J., Kang, S.B., Quan, L., 2007. Image-based tree modeling. *ACM Trans. Graph.* 26, 7. Article 87.
- Timmermans, A.J.M., Hulzebosch, A.A., 1996. Computer vision system for on-line sorting of pot plants using an artificial neural network classifier. *Comput. Electron. Agric.* 15, 41–55.
- Togari, N., Kobayashi, A., Aishima, T., 1995. Pattern recognition applied to gas chromatographic profiles of volatile components in three tea categories. *Food Res. Int.* 28, 495–502.
- Townsley-Brascamp, W., Marr, N.E., 1994. Evaluation and analysis of consumer preferences for outdoor ornamental plants. *Acta Hortic. (ISHS)* 391, 199–208.
- Xu, W., Su, Z., Feng, Z., Xu, H., Jiao, Y., Yan, F., 2013. Comparison of conventional measurement and LiDAR-based measurement for crown structures. *Comput. Electron. Agric.* 98, 242–251.
- Zou, H., Hastie, T., 2005. Regularization and variable selection via the elastic net. *J. Roy. Stat. Soc. Ser. B (Stat. Methodol.)* 67, 301–320.
- Zucchini, W., 2000. An introduction to model selection. *J. Math. Psychol.* 44, 41–61.

Chapitre 2 : Etude des relations entre l'architecture du rosier et son apparence visuelle

I. Avant-propos

Ce chapitre présente la transposition sur plantes réelles de la méthode mise au point sur les rosiers virtuels pour la caractérisation visuelle par analyse sensorielle sur vidéo, et la possibilité d'identifier des mesures instrumentales qui permettent sa prédiction.

Les objectifs visés étant **(i)** de dégager certaines composantes architecturales pour l'étude du cycle de vie d'un buisson ligneux en relation avec son apparence visuelle ; et **(ii)** de tester la généricité de la méthode sensorielle et sa prédiction par l'analyse des séquences d'images formant les vidéos face à une diversité architecturale plus étendue. Cette diversité repose sur trois lots d'une vingtaine de plantes issues du cultivar 'Radrazz' (essai Omb2, cf. **III, p. 61**), cultivées en extérieur respectivement dans trois environnements lumineux différents, et suivies à trois stades de développement : en végétation à cinq et 15 mois, et en phase hivernale à 12 mois.

Cette transposition méthodologique est présentée au travers de deux articles émanant de ma rédaction personnelle, et prêts à être soumis à la lecture et à l'évaluation des collaborateurs identifiés comme co-auteurs. **(i)** Le premier article, « *Relate and predict visual attributes of an ornamental plant from architectural components: A new approach on rose bush for objective evaluation of the visual quality* », proposé pour *Scientia Horticulturae*, présente plus particulièrement la réalisation du profil sensoriel et l'identification de composantes architecturales impliquées dans l'apparence visuelle du rosier ; **(ii)** le second, « *Plant visual appearance assessments in 3D predicted from image analysis: rotating virtual plant methods applied to real rose bush videos* », pour *Computer and Electronics in Agriculture*, aborde directement la prédiction de la caractérisation visuelle avec l'intégration de mesures sur séquences d'images des plantes, comme cela fut possible sur les vidéos de rosiers virtuels. De manière secondaire, ce deuxième article questionne d'une part l'impact du nombre d'images utilisées pour l'analyse des descripteurs morphométriques ; puis l'impact de la défoliation sur l'apparence de la plante, et donc sur les valeurs numériques des bases de données construites après cette opération pour faciliter la digitalisation des axes.

In fine, ce chapitre démontre l'intérêt de la méthodologie proposée, par sa généricité et l'avantage que présente le support vidéo utilisé pour les analyses. Cette approche a permis d'identifier des composantes architecturales qualitatives dont le nombre et les caractéristiques permettent de prédire, voire d'expliquer l'apparence visuelle d'un rosier buisson. Cette dernière étant elle aussi prédictible par l'analyse d'un nombre défini d'images sur des plantes réelles. Pour autant, certaines limites quant à la caractérisation des organes à une échelle

individuelle et l'importance d'inclure dans les relevés des mesures à l'échelle des métamères, notamment sur le délai de ramification et les organes foliaires, représentent le futur challenge pour compléter cette démarche.

Garbez et al. (M1)

Manuscript 1 (M1) to be proposed as an original research paper in *Scientia Horticulturae*

Relate and predict visual attributes of an ornamental plant from architectural components: A new approach on the rose bush for objective evaluation of the visual quality

M. Garbez ^{a, b}, R. Symoneaux ^c, É. Belin ^d, Y. Caraglio ^e, Y. Chéné ^d, N. Donès ^f, J.-B. Durand ^{g, h}, G. Hunault ⁱ, D. Relion ^a, M. Sigogne ^a, D. Rousseau ^j, G. Galopin ^{a, *}

a: IRHS, INRA, Agrocampus Ouest, Université d'Angers, SFR 4207 QUASAV, 42 rue Georges Morel, CS 60057, 49071 Beaucouzé Cedex, France

b: Pépinières Desmartis, route d'Agen, 24100 Bergerac, France

c: Unité de Recherche GRAPPE, Univ Bretagne Loire, Ecole Supérieure d'Agricultures (ESA), INRA, SFR 4207 QUASAV, 49000 Angers Cedex, France

d: Université d'Angers, Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS) EA 731, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France

e: AMAP, CIRAD, CNRS, INRA, IRD, UM, 34398 Montpellier Cedex 5, France

f: PIAF, INRA, UCA, 63000 Clermont-Ferrand, France

g: Virtual Plants, C.C. 06002 95, rue de la Galéra, 34095 Montpellier Cedex 5, France

h: Laboratoire Jean Kuntzmann, MISTIS, INRIA Grenoble - Rhône-Alpes, 655 avenue de l'Europe, Montbonnot 38334 Saint Ismier Cedex, France

i: Université d'Angers, Laboratoire Hémodynamique, Interaction, Fibrose, et Invasivité tumorale Hépatique (HIFIH) UPRES EA 3859, SFR 4208 ICAT, 4 rue Larrey, 49933 CHU Angers, France

j: Université de Lyon, Centre de Recherche en Acquisition et Traitement de l'Image pour la Santé (CREATIS), CNRS - UMR 5220, INSERM - U1044, Université Lyon 1, INSA-Lyon, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne, France

*Corresponding author: Gilles Galopin

Postal address: Agrocampus Ouest - 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France

Tel.: (+33)-241-225-434

Email address: ggalopin@agrocampus-ouest.fr

Keywords

Woody
ornamental plant;
Rosa hybrida;
Visual
appearance;
Architectural
analysis;
Sensory profile;
Linear regression

Abstract

Within ornamental horticulture context, visual quality of plants is a critical criterion for consumers looking for immediate decorative effect products. Studying links between architecture and its phenotypic plasticity in response to growing conditions and the resulting plant visual appearance represents an interesting lever to propose a new approach for managing product quality from specialized crops. Objectives of the present study were to determine whether architectural components may be identified across different growing conditions (1) for studying over time the architectural development of a shrub; and (2) to relate them to and predict sensory attributes data characterizing multiple visual traits of the plants. The approach addressed in this study stands on the sensory profile method using a repeat blooming modern rose bush (cv Radrazz) presented in rotation using video stimuli. Plants were cultivated under a shading gradient in three distinct environments (natural conditions, under 55, and 75% shading net.). Architecture and video of the plants were recorded during three stages, from 5 to 15 months after plant multiplication. Except for visual traits at the scale of the organs, panel performance was highly satisfying for most of the sensory attributes listed. Strong correlations (Spearman's coefficient ranging from 0.72 to 0.98) were found between them and architectural variables extracted from phytomer to plant scale data. Acceptable to very satisfying models were obtained (Q^2 ranged from 0.49 to 0.95, normalized RMSEP < 17.3%) with simple ordinary least squares regression and variable transformation to encompass non-linear relationships. The proposed approach presents therefore a powerful way to get better insights into the architecture of shrub plants together with their visual appearance to target processes of interests in order to optimize growing conditions or select the most fitting genotypes across breeding programs, with respect to contrasted consumer preferences.

1. Introduction

Visual quality of ornamental plant is a key parameter playing a major role in the purchase triggering for consumers (Ferrante et al. 2015; Schreiner et al. 2013; Townsley-Brascamp and Marr 1994). Nonetheless, it is a complex notion standing on the individual and subjective appreciation of the product design or appearance by a given individual. Thus preferences are mainly related to aesthetical judgments and diverge between people for numerous reasons (Boumaza et al. 2010; Creusen and Schoormans 2005; Higginbotham 1987).

Effects of growing practices evaluated on various plant parameters measured with destructive or contactless methods are rather well-documented (Ferrante et al. 2015). Nonetheless, in such studies, a plant with pleasant visual appearance is too often seen as univocal and consumer preferences as homogeneous. Therefore even if manual or automatized grading occurs, actually the likeliness to observe a simple relation and good concordance between visual quality grades with specific preferences and expectations of the consumers is small (Garbez et al. 2016; Kohsel and Bennedsen 2001). From past decades, quality management of fresh horticultural products, especially fruits and vegetables, strongly benefited from the sensory evaluation science (Meilgaard et al. 2006). Its recent application on the rose bush showed also the strong relevance for providing a common background as of objectifying and harmonizing visual quality studies on ornamental plants using real plants (Boumaza et al. 2009), single plant facet pictures (Boumaza et al. 2010; Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014), and virtual plants presented in rotation on video (Garbez et al. 2016; 2015).

However, nowadays ornamental woody plants are still very often subject to pruning or growth regulator applications to modulate plant growth for an empirical control of their quality. Taking benefits from the phenotypic plasticity and knowledge about the variability of the architectural responses against environmental factors represents a valuable way to better control plant visual appearance with more reasoned, cheaper, and greener growing practices (Crespel et al. 2014; Demotes-Mainard et al. 2013b; Galopin et al. 2010; Huché-Thélier et al. 2011; Li-Marchetti et al. 2015; Morel et al. 2012). Understanding and controlling architecture is therefore an interesting lever to address ornamental plant design management, and *in fine* to better fulfill expectations of the consumers thanks to knowledge about their requirements. Detecting links between architectural parameters and hedonic-free assessments of visual traits is thus needed to investigate if putative underlying key biological processes could be targeted. This approach, necessary to address visual quality of ornamental plants, cannot remain

empirical. Thus, identification of visual attributes is necessary on the one hand to analyze their relations with the architectural components, the subject of this publication, and on the other hand to further understand the preferences of the consumers. However, literature about relations between perception of plant visual appearance traits and such architectural parameters for explaining consumer preferences is still poorly documented (Scuderi et al. 2012). First studies on rose bushes demonstrated the high potential of this approach through correlative studies either using young plants, or addressing for specific aims a limited number of visual descriptors selected from a sensory method or picked out from UPOV guideline for *Rosa* L. (Crespel et al. 2013; Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014).

Main research objectives addressed in the present study concern (1) the architectural characterization over time of the rose bush without any pruning enabling to take in account all the potential basal sprouts, and (2) if architectural components can be identified in relation to some visual traits and used for predicting them independently of plant age and growing conditions. The same rose bush cultivar was conducted under three contrasted shading conditions inducing higher phenotypic variability. The architecture of the plants was recorded three times over 15 months of cultivation. In parallel, visual traits of the plants were characterized through a sensory profile trial using videos presenting them in rotation as stimuli. The paper presents: (1) the sensory profile of the plants on videos using multiple sensory attributes describing general aspects of the plants and their organs; (2) the architectural monitoring over the three acquisition stages, and the generation of plant-scale architectural variables; for (3) a correlation and ordinary least square regression study with the aim to predict the relevant and consensual sensory attributes using architectural variables as predictors.

2. Material and methods

2.1. Plant material and data acquisition

The experiment used recurrent-flowering rose bushes from the Radrazz cultivar (*Rosa hybrida* L. 'Radrazz', marketed under Knock Out[®]) and the light as a means of inducing more consequent phenotypic differences between plants. Plants were outdoors cultivated in pot under three shading levels in the experimental facilities of the IRHS (French Research Institute on Horticulture and Seeds, Angers, France; 47°28'45.8"N, 0°36'32.3"W, altitude: 48 m) and subjected three-time over 15 months to a double characterization: of their architecture, using a 3D magnetic digitizing contact method; and of their visual appearance, through a sensory profile using as stimuli rotating plant videos edited from front view image

sequences. **Figure 1** schematizes the cultural conditions and periods of data acquisition detailed thereafter.

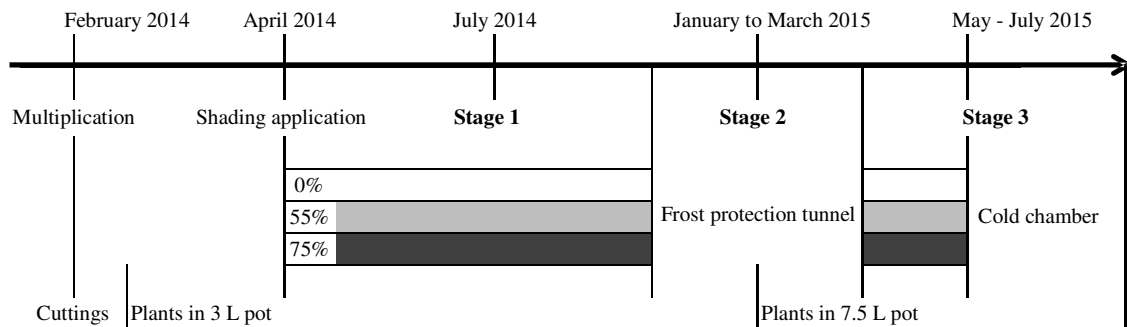


Figure 1. Schematic representation of the cultural management conditions and stages for the periods of data acquisition.

2.1.1. Cultural conditions

As represented in **Figure 1**, plants were obtained from single node cuttings harvested the 4th February 2014 and individually placed in plugs for rooting as described in teammate protocols (Demotes-Mainard et al. 2013b; Morel et al. 2012). Experimental conditions started the 25th April 2014, with young plants in 3 L pot aged of 81 days since cutting harvest chosen as time reference for dating plant age. Sixty flowered and homogeneous plants intended to be characterized were randomly and evenly assigned in three environments on a soilless culture ground: (1) without shading screen; (2) under a tunnel covered with a 55%; or (3) 75% shading screen. Both screens were commercial products made of black and green 100% UV resistant polyethylene fibers (Texinov[®]; MDB Texinov, Saint-Didier-de-la-Tour, France). The plants intended to be characterized were disposed with supplementary borderline plants in staggered rows at a density of 1.1 plant.m². Pots were locked on steel wire meshes to prevent plant falls and damages. The first data collection (stage 1 – S1) occurred during summer 2014. Then at mid-December 2014, plants were moved toward a frost protection tunnel to ensure any damages from freezing on roots and future young shoots. S2 took place during plant winter rest. Plants were then repotted in 7.5 L pot after acquisition. Finally, plants were replaced the 25th February 2015 toward their respective environment at a lower density (0.8 plant.m⁻²) till the last acquisitions for S3 in May 2015.

Potting steps were done with a well-draining substrate (custom mix made by Faliénor; Vivy, France) composed of Irish peat, perlite, and coir (50:40:10 in volume ratio), the main amended with 1 kg.m⁻³ of PG-Mix[™] 14-16-18. Irrigation was supplied to each plant by mean of a four-way manifold valve (nominal flow of 4 L.h⁻¹) with drippers during plant growth, and

manually during potential frost periods. Watering schedules of the three environments were individually adjusted according to microclimatic conditions and substrate moisture status of the plants to prevent growth limitation by hydric conditions. Water was completed for fertigation with liquid 3:2:6 N-P₂O₅-K₂O ratio solution (Plant-Prod® 15-10-30; Plant Products, Leamington, ON, USA) with adjusted pH at 6.5 and EC at 1.2 mS.cm⁻¹, from the experiment beginning in April till the end of August 2014, and from April 2015 till the end of the plant cultivation in May 2015.

2.1.2. Plant acquisitions

2.1.2.1. Image capture and edition of rotating plant videos

A specific enclosure was set for capturing images sequences of potted plants in rotation. It was composed of a metallic structure (2.25 m height × 3 m width × 6 m length) covered with an occulting black fabric avoiding uncontrolled light variations, a blue photographic cloth (DynaSun, W003; Confidence Europe GmbH, Essen, Germany) for background, and a carpet of similar color on the floor. Plant rotation and image capture were computationally controlled through a user-interfaced turntable (custom built device; Forumgraphic SA, Cassis, France). In order to obtain comparable images across data collection, system parameters were chosen and fixed for all the experiment duration testing the image capture on potted rose bushes of different ages from other experiments.

Center of the turntable (height of 30 cm) was placed at 1.4 m from the background, and 4.5 m from a front 12 bits 10Mpx CMOS color camera (GigE UI-5490SE; IDS Imaging Development Systems GmbH, Obersulm, Germany) placed at 70 cm height from the floor. Focus was achieved with a standard zoom lens (Tevidon® 2/10; Docter Optics Components GmbH, Neustadt an der Orla, Germany). Scene illumination was controlled with daylight lamps (temperature color ranging from 5500 to 6500 °K): four linear LED lamp lines in lateral position surrounding the turntable, two superior fluorescent tubes, and an annular LED lamp around the camera to enhance front lighting. Light variations in the scene were assessed and reduced using two-dimensional graphs of pixel intensities from the “plot profile” function of ImageJ (Abràmoff et al. 2004) on greyscale images of the plant-less scene. Parameters for plant image sequence capture were set to: 360 images (resolution of 3840 × 2748) obtained along rotation intervals of one degree with break of seven seconds for plant stabilization before image capturing. The time to capture a complete plant image sequence was thus fixed to 42 minutes. Before each sequence acquisition, the image of the blue background with the turntable and a plant-less pot filled with substrate was recorded for image analysis purposes.

Once the image sequences for the last stage (S3) were obtained, all the sequences were converted in AVI videos using ImageJ. Video parameters chosen were 3° between consecutive frames, thus 120 images per plant, with a frame rate of 10 frames.s⁻¹ and JPEG compression (**Appendix 1**). Those parameters were selected on the basis of a parallel survey realized with 17 volunteer people. On contrasted performance computers, people were asked to score the video quality of different parameter combinations for the video edition of different plant image sequences (**data not shown**).

2.1.2.2. *Plant architecture recording*

Rosa plants present stems with defined growth by terminal flowering (or abortion), and subsequent sympodial branching in all axes. For recurrent flowering varieties as ‘Radrazz’, axes are modules with continuous growth composed of phytomers edified by a single terminal meristem which organogenesis ceases with autonomous floral induction (Costes et al. 2014; Le Bris et al. 1998; Morel et al. 2009; Zieslin and Mor 1990). The phytomer is the basic structural and functional unit of vascular plant body. Generated by apical meristem of the shoots, the phytomers form the leafy axes by superposition, and higher order axes through branching resulting mostly from the outgrowth on node region of lateral bud(s) inserted at the leaf axil(s) (Barthélémy and Caraglio 2007).

Plant architecture recording was done using the PiafDigit software (Donès et al. 2006). It consisted of encoding with a Fastrack[®] 3D digitizer (Polhemus, Colchester, VT, USA) the 3D coordinates of the phytomers constituting all apparent plant axes together with their topological relation (succession or branching) and some morphological features (Crespel et al. 2013; Li-Marchetti et al. 2015; Morel et al. 2012; 2009). Branching order notation followed the “birth” organization of the axes, *i.e.* the first axis sprouting from the cutting was denoted as the 1st branching order, its lateral buds growth leading to second branching order axes and so on. This primary structure was labeled in this study the “elementary architectural system”. Proximal axes sprouting at or under the substrate level, sometimes called “renewal canes” (Zieslin and Mor 1981) and empirically seen as total reiterated complexes (Costes et al. 2014; Kawamura et al. 2015) of an “elementary architectural structure stage” (Crespel et al. 2013; Li-Marchetti et al. 2015), were denoted also as first branching order axes. These axes and all their descendants were further labeled as forming the “delayed architectural systems”. Morphologic features consistently recorded throughout the experiment consisted of reporting the apex state of the axes, and measuring with a digital caliper the basal diameter of each first branching order and the mid-length diameter for all the axes.

2.1.2.3. Timing and management of the plant data acquisitions

Durations of the field measurements and the time between the two different acquisitions on a same plant within data collection were main key factors to maximize synchronicity of the characterizations and thus the data reliability. Therefore, to get comparable data between the shading environments during each stage, biases from field measurements duration were circumvented by alternating regularly small batches of plants from the three environments along the acquisitions. Also, it has been chosen to capture the images sequences of the plants before respective architecture recording which required more time with the increasing plant growth. Thus specific management of the acquisitions was conditioned according to the stages and number of digitized plant architectures diminished over time (**Table 1**).

Table 1

Details and totals of plant sample sizes over stages and across shading environments according to the data collected.

Stages	Plant age	Video	Sensory	Architecture	Relation ¹
<i>Shading levels</i>					
Stage 1	5 months	59	57	53	52: 36/16
	0%	19	19	18	17: 12/5
	55%	20	19	17	17: 12/5
	75%	20	19	18	18: 12/6
Stage 2	12 months	60	57	46	45: 30/15
	0%	20	19	16	15: 10/5
	55%	20	19	15	15: 10/5
	75%	20	19	15	15: 10/5
Stage 3	15 months	60	57	33	33: 24/9
	0%	20	19	11	11: 8/3
	55%	20	19	11	11: 8/3
	75%	20	19	11	11: 8/3
Total		179	171	132	130: 90/40

1: First number indicates the number of plants characterized at both sensory and architectural levels; the second and third numbers separated by a slash detail respectively the number of observations used for calibration and for validation of the predictive models.

Stage 1 took place from the 8th to the 25th July, thus on approximately five-months-old plants. The relatively low developments of the plants enabled to make both acquisitions on several plants within the same day. Within the 17 days, image capture was successful for 59 out the 60 plants (one sequence of images was partially loss), and it was possible to achieve the architecture recording of 18 plants per shading level but one file was damaged. Thus 53 architectures of plants were obtained at S1. During the S2, from the 5th January to the 11th March, the winter rest status of the leafless plants ensured occurrence of only relatively few macroscopic changes except the beginning of some bud bursts. Images of all the plants were taken while the architecture of 46 plants aged of approximately one year in average were obtained within this period. Lastly, S3 started the 11th May 2015, plants were thus in growth

and flowering. To prevent biases from the longer time needed for architecture records (from 4 to 12 hours per plant in average), plants were immediately defoliated after their image capture; subsequently plastic color rings were used to code the status of the axes before conveying the plants within the same day in dark cold chambers, with minimum temperature consigns set under 1.9°C ensuring stop of growth and branching (Crespel et al. 2014; 2013; Demotes-Mainard et al. 2013a; Huché-Théliier et al. 2011). Image acquisitions for all the sixty plants were done within two weeks, while only 33 of them were subjected to complete architecture recording within two months, from the 18th May to the 17th July 2015. Both these last acquisitions reflected thus 15-months-old plants. Independently of the stages and shading environments, 179 rotating plant videos and 132 plant architecture records were finally obtained for subsequent characterizations (**Table 1**).

2.2. Plant characterizations

2.2.1. Visual characterization

Following an adaptation of Garbez et al. (2016) and Huché-Théliier et al. (2011), 171 different videos for the same 19 plants by shading environments at the three acquisition dates (**Table 1**), were selected as the products to be visually characterized by a trained panel of 20 subjects according to a sensory profile approach derived from the quantitative descriptive analysis (QDA[®]) method (Stone et al. 1974). Along the panel formation during 10 hours in five sessions, 17 sensory attributes were elicited for describing the plants (**Table 2**): 12 were related to plant general aspect traits: the volume, the height, and the width of the plant; the quantity of branching, leaves, flowers, fruits, and carrier axes; the growth habit of the shape, its uniformity, its balance, and lastly the plant density. Five other attributes described organ properties within the plant: the size and the color of the leaves; the height in the plant of the flowers, the height in the plant of the vegetative organs (leaf and axes, or axes only); and the clustering of the flowers within the plant.

All the 171 products and four duplicates for repeatability controls, next to 31 other plant videos used for another purpose not dealt here, were scored upon the 17 attributes on paper sheets by the 20 subjects in 8 scoring sessions of an hour in average (25 to 27 videos to score per subject and session). Formation and scoring sessions took place in a computer lab with identical LCD monitors in standard mode configuration with optimal preset 1920 × 1080 resolution, and disposed to avoid communication between subjects. Subjects were not informed about cultural conditions and ages of the plants. All the videos and their duplicates were anonymized with three-digit number codes. Thus for each plant, the videos presenting

respectively its three acquisitions stages can also be considered as presenting three different plants.

To limit the task difficulty for the participants, scoring sessions consisted in the characterization of two out of three consecutive batches of videos: a first batch formed with plants presenting leaves and flowers (S1 and S3 pooled), and a second formed either with videos of plants during rest phase (S2) or with flowering plants beforehand defoliated manually after the image acquisition for S3 and not dealt here. To prevent any order effect, videos were presented according to an optimal design arrangement based on a William's Latin square arrangement adaptation and randomization and imposed to the subjects using VLC media player (VideoLAN project, France) and individual playlist scripts.

Performance of the panel for each sensory attribute was assessed with common approaches presented in previous studies using rose bushes (Boumaza et al. 2010; Garbez et al. 2015; Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014). Repeatability and reproducibility (Rossi 2001) average measurements over products were used respectively to assess the ability of the subjects to score consistently the duplicated videos, and to score the products as the other panel subjects. The agreement between subjects was analyzed through principal component analysis (PCA), with subjects as columns and products as rows, to highlight outlying subjects and compute a consonance measurement of the scores as the variance accounted for the first PC (Dijksterhuis 1995). Finally, score differences between products were assessed by four-way mixed analysis of variance (ANOVA) modeling (Kuznetsova et al. 2015). The analysis model included the subjects as a random factor with stages and shading environments as fixed factors, plants as a nested and fixed factor within shading environments, and their interactions. Significance of the score differences between products was used to evaluate the discriminating power of the attributes and the global panel performance. It was tested through the effect on scores of the three-way interaction between plants in shading levels and stages. Discussions were undertaken for discarding attributes for which the panel performance components were eventually judged as not enough sufficient. Then, PCA of the "products \times attributes" matrix of average scores was carried out to achieve a synthetic description of the relations between the attributes, and of the visual characteristics of the plants presented on videos.

Table 2

Sensory attribute definitions and panel performance indices. The first block of rows reports the consensual attributes with the best panel performance; the second reports those with unsatisfying performance indices highlighted in italic characters.

Sensory attribute	Definition	Repeatability ¹	Reproducibility ²	Consonance (%)	Discriminating power (<i>F</i> -ratio)
Flowers ³	Quantity of flowers: (0) no flower to (10) very high amount of flowers	0.54 ± 0.07	0.52 ± 0.46	93.2	15.5 ^{***}
Height	Plant height from collar : (1) very small to (10) very tall	0.60 ± 0.02	0.84 ± 0.15	88.4	55.5 ^{***}
Width	Plant width along rotation: (1) very thin to (10) very wide	0.71 ± 0.04	1.00 ± 0.18	76.9	8.1 ^{***}
Density	Plant density: (1) very loose, large and numerous holes within the plant silhouette to (10) very dense, any holes within the plant silhouette	0.71 ± 0.05	1.45 ± 0.32	69.6	7.5 ^{***}
Leaves ³	Quantity of leaves: (0) no leaf to (10) very high amount of leaves	0.76 ± 0.05	0.89 ± 0.49	79.4	8.1 ^{***}
Volume	Volume of the shape delimited by the plant contour: (1) very small to (10) very large volume	0.77 ± 0.04	1.03 ± 0.21	84.4	10.6 ^{***}
Carriers	Quantity of strong carriers axes: (0) no carrier axis to (10) very numerous carrier axes	0.79 ± 0.07	1.21 ± 0.23	72.3	8.1 ^{***}
Fruits	Quantity of fruits: (0) no fruit to (10) very high amount of fruits	0.80 ± 0.10	1.09 ± 0.35	83.4	12.8 ^{***}
Branching	Quantity of branches: (0) no branch to (10) very high amount of branches	0.82 ± 0.09	1.14 ± 0.25	78.4	4.0 ^{***}
Balance	Balance of the plant silhouette shape : (1) very unbalanced and dissymmetric to (10) very balanced plant evenly developed with constant shape along the rotation	0.93 ± 0.13	1.49 ± 0.29	65.2	10.6 ^{***}
Habit	Growth habit, shape elongation of the plant: (1) very spreading habit to (10) very upright habit	0.98 ± 0.07	1.09 ± 0.21	64.1	26.0 ^{***}
Flower height ³	Height of the flowers in the plant: (1) very down to (10) very high in the plant	0.77 ± 0.07	0.68 ± 0.66	77.9	43.6 ^{***}
Growth height	Height of the growth organs (axes or both axes and leaves if present) in the plant: (1) very down in the plant to (10) very high in the plant	0.83 ± 0.10	0.88 ± 0.35	42.5	6.3 ^{***}
Leaf size ³	Average size of the leaves: (1) very small to (10) very large leaves	0.88 ± 0.10	1.02 ± 0.52	36.3	6.9 ^{***}
Leaf color ³	Green darkness of mature leaves: (1) very clear to (10) very dark leaves	0.93 ± 0.08	1.32 ± 0.54	53.3	3.2 ^{***}
Flower clustering ³	Proximity of the flowers : (1) not particularly grouped, very homogeneously distributed in the plant to (10) flowers forming only one distinct cluster	1.12 ± 0.13	0.89 ± 0.90	82.4	39.7 ^{***}
Uniformity	Complexity of the plant shape formed by the growth organs : (1) very irregular with several distinct blocks to (10) very regular forming an indivisible shape	1.17 ± 0.12	1.66 ± 0.37	60.8	9.0 ^{***}

1: Values are means ± standard errors over the 8 duplicated videos of the pooled standard deviations of the subject scores between replications.

2: Values are means ± standard errors over the 171 different videos of the standard deviations of the subject scores.

3: Attributes for which the score 0 means no corresponding organ in the plant, and thus for which videos of the plants during winter rest (Stage 2) were not considered for consonance and discriminating power assessments.

Table 3

Axis-scale data extracted from plant architectures recorded along the experiment and involvements in standardized principal component analysis of weighted determined axis pooled observations ($n = 33690$). The first block of rows reports quantitative variables and Pearson correlations with principal components (PC) if not negligible (N if $r_p < 0.3$ in absolute value). The second block reports variables characterizing the axes and conditions treated as supplementary qualitative data with eta-squared indices measuring the proportion of variance explained on PC.

<i>Data type</i> – Variable	Category	PC fulfilling Kaiser criterion and variance explained (%)		
		PC1 (37.6%)	PC2 (23.3%)	PC3 (12.8%)
Quantitative data				
Length	Morphology	0.92	N	N
Number of phytomers	Morphology	0.88	N	N
Median diameter	Morphology	0.78	N	N
Number of branched nodes	Morphology	0.74	N	N
Relative location of branching insertion ¹	Geometry	-0.69	N	N
Curvature ²	Geometry	-0.65	N	N
Cord ² angle with the vertical	Geometry	N	0.62	N
Lateral distance of the insertion ³	Geometry	-0.60	0.46	0.64
Lateral distance of the extremity ³	Geometry	N	0.60	0.74
Vertical distance of the insertion ³	Geometry	N	-0.89	0.38
Vertical distance of the extremity ³	Geometry	N	-0.86	0.34
Azimuth ⁴	Geometry	-	-	-
Basal diameter ⁵	Morphology	-	-	-
Qualitative data				
Elementary versus delayed systems	Topology	0.01	0	0.15
Branching order	Topology	0.33	0.02	0.12
Apex state	Morphology	0.05	0.04	0.05
Stage	Condition	0.01	0.01	0.08
Shading	Condition	0	0.02	0.03
Stage : Shading	Condition	0.01	0.04	0.12
Stage : Plant	Condition	0.02	0.1	0.17
Plant	Condition	0.01	0.05	0.09

1: Computed as the ratio between length of the portion from the base of the bearing axis to the insertion point of the axis in question and the total length of the bearer. It thus tends to 0 if the axis is a basal branching and to 1 if it is apical one. The ratio was set to 0 for all the branching order 1 axes.

2: Computed as 1 minus the ratio between axis cord length: the axis cord is the straight line from the base to the extremity of the axis; and the axis length. It thus equal to 1 for axes completely recurved, and tends to 0 for straight axes.

3: Distances are computed from the plant collar to the point mentioned in the variable name.

4: Not considered in the multivariate analysis since azimuth of the axes cannot be individually compared between plants, but only extracted for plant-scale variables.

5: Not considered in the multivariate analysis since it only concerned the first branching order axes, but extracted for plant-scale variables.

2.2.2. Architectural characterization for generating plant architectural descriptors

Architectural records were converted into MTG files (Multi-scale Tree Graph; Godin and Caraglio 1998) through PiafDigit for extracting axis-scale variables using the *amlPy* interface module under the OpenAlea platform (Bonnard and Pradal 2008; Crespel et al. 2013; Morel et al. 2009; Pradal et al. 2008). Variables extracted concerned the morphology, the topology and the geometry of the axes completed with experimental information (plant index, shading level and stage of acquisition; **Table 3**).

Effectiveness of the architectural differences between the shading treatments over stages was assessed considering the determined axis observations, *i.e.* the axes which organogenesis has been stopped by floral transformation of their apex. Blind shoots were considered as determined axes too since apical meristem abortion also implies the arrest of the axis organogenesis. Branching (number of axes) and organogenesis (number of phytomers) were separately analyzed by mixed ANOVA modeling and Bonferroni's correction method for *post hoc* tests with error level $\alpha = 0.05$. Models included stages and shading environments as fixed factors, plants as a nested random factor within the shading environments, and their interactions.

Extracted axis-scale variables were then subjected to PCA to analyze major variation sources between determined axis observations (Morel et al. 2009), and further used to generate a database of plant-scale variables that can be potentially related to the studied visual traits. Plant-scale variables selected by Crespel et al. (2013) and used in Li-Marchetti et al. (2015) were straightforwardly extracted for comparison purposes. Other variables integrating axis-scale variables at the plant level were defined with descriptive statistics such as sum, mean, median, quantiles, ranges, empirical standard deviation, minimum, maximum and coefficient of variation, according to the relevance of their use. The most important quantitative axis-scale variable highlighted by PCA was used to generate a supplementary qualitative variable determined from comparative analysis of different clustering and validation approaches. This qualitative variable was used like the branching order and the apex state to generate other more detailed variables. In parallel, the 3D coordinates of phytomers were extracted from the MTG files to be analyzed individually as 3D point clouds under the R environment (R Development Core Team 2015). Basic functions as for integration of the axis-scale variables enabled the computation of other features at whole-plant scale, such as landmark coordinates, metric distances, and spatial variances characterizing the phytomer cloud of the plants. In addition, volumetric estimation of the plants was obtained though computing the 3D convex hull volume enclosing the phytomers

using the *alphahull R* package (Pateiro-López and Rodríguez-Casal 2010). Finally, the database integrated also some complementary variables built on previous ones. Thus, more than a thousand plant-scale architecture-based variables ($p = 1,209$) were collected and available as potential predictors for relationship study with the sensory attributes (categorization of the variables and examples in **Table 4**).

Table 4

Examples of architectural variables at plant-scale gathered according to methods used and description categories proposed from the 1209 variables extracted.

Method			
Category	Examples of variables		
Direct integration of the axis-scale variables			
Morphology	Number of axes, Cumulated number of phytomers Number of open flowers, Number of dry fruits, Number of open and faded flowers Proportion of flowering axes, Proportion of vegetative axes, Cumulated number of phytomers of the determined axes Cumulated length of the vegetative axes Mean number of branched nodes, Mean length, Mean diameter at median length Mean length of the axes ended by a fresh to dry fruit		
Topology	Number of 1st branching order axes Maximum branching order Mean branching order Mean relative location of branching insertion for the 2 nd branching order axes		
Geometry	Mean cord angle, Mean lateral distance Median lateral distance Quantile 5% of the cord angle Coefficient of variation of the lateral distance Standard deviation of vertical distance		
Axis length clustering			
Number of axes per identified length class*, summary statistics detailed thereafter			
Class label	Intervals (cm)	$M \pm SE$ (cm)	n determined axis observations
- tiny	[0; 7[2.4 ± 0.0	20551
- small	[7; 18[11.9 ± 0.0	8011
- medium	[18; 35[23.8 ± 0.1	4202
- long	[35; 88[46.1 ± 0.3	926
Phytomer cloud 3D analysis			
Convex hull volume Maximum width, maximum height, Height of the barycenter, Median height, Quantile 95% of pairwise lateral distances Cumulated variances on the 3 dimensions, cumulated variances on the horizontal plane			
Mixing variables from different methods			
Mean number of phytomers on tiny determined axes Number of axes divided by maximum branching order Cumulated basal diameter of 1 st branching order axes Number of long axes divided by volume Mean relative location of branching insertion of the 2 nd branching order long axes Cumulated length of the short axes divided by volume Standard deviation of the lateral distance of the medium axes Mean curvature of the 1 st and 2 nd branching order long axes Interquartile range of the azimuth of the long and medium axes Range of the cord angle of the medium axes Maximum width divided by maximum height			

* Fisher-Jenks and k-means algorithms assessed for addressing the axis length clustering led to the same results.

2.2.3. Relating visual and architectural characterizations

Out of the 171 products characterized by sensory profile, 130 corresponding plant architecture recordings were available (**Table 1**). Sensory attribute variables were defined as the average subject scores by product and analyzed conjointly with plant-scale architectural descriptors. Links between pairs of sensory attribute variables and plant architectural descriptors were first evaluated with Spearman's correlation coefficient (r_s) to detect eventual monotonic relationships (Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014). Then, prediction of the sensory attributes variables was tested with simple linear regression through ordinary least squares (OLS), the most common and simple regression method (Kuhn and Johnson 2013; Næs et al. 2011), using the plant architectural descriptors as potential predictors one by one without any stage- or shading-based parameters.

In order to assess their relevance and genericity, the models were first calibrated through 10 repeats of 10-folds cross-validation on two-thirds of the data ($n = 90$ plants observations over stages and shading environments), and then validated on the remaining third (Borra and Di Ciaccio 2010; Kuhn and Johnson 2013). Data partitioning was the same for all the sensory attributes, *i.e.* with a balanced-based design according to stages and shading environments with a 2:1 ratio random sampling within all the 9 crossed conditions (**Table 1**). Goodness of fit was evaluated with the traditional coefficient of determination and lack of fit with the root mean square error for the entire calibration data (respectively R^2 and RMSE), and through 10-10 folds cross-validation (respectively R_{CV}^2 and, $RMSE_{CV}$). Coefficients of determination and root mean square error of prediction computed from the validation dataset (respectively Q^2 and RMSEP) were then used to assess the predictive ability of the models with unknown data. Common transformations (power, root, log, exponential and inverse) and normality supervised power-transformations of Yeo-Johnson were applied to the predictors (Yeo and Johnson 2000) with the aim to better satisfy required linear modeling assumptions (Kuhn and Johnson 2013) while exploiting more deeply the data still using a relatively simple modeling approach.

2.2.4. Statistical analyzes

Statistical analyses were conducted under the R environment (R Development Core Team 2015) with additional functions from the packages detailed thereafter. PCA were conducted with *FactoMineR* (Husson et al. 2016) using centered and scaled data. Variable discretization was performed with *classInt* (Bivand et al. 2015), by increasing number of classes through k-means (Steinley 2006) and Fisher-Jenks algorithms (Anchang et al. 2016;

Murray and Shyy 2000). Quality and stability of the solutions were assessed using elbow graphical method, clusterwise Jaccard similarity statistics under bootstrap resampling with *fpc* (Hennig 2008; Hennig 2015), and Davies-Bouldin cluster separation measurements (Davies and Bouldin 1979) with *clusterSim* (Walesiak and Dudek 2015). Mixed models were designed using *lme4* (Bates et al. 2016) and analyzed with ANOVA function of *car* (Fox et al. 2016) with type II sums of squares procedure (Langsrud 2003). Subsequent multiple comparisons were done according to the Bonferroni's adjustment method on least-squares means from *lsmeans* (Lenth 2016). When required, Kenward-Roger's degrees of freedom estimations were used for statistical inferences (Kuznetsova et al. 2015; Spilke et al. 2005). Data partitioning and modeling between sensory and architectural data were done using *caret* (Kuhn 2016).

3. Results

3.1. Visual characterization

ANOVA analyses showed that all the attributes were significantly discriminant (the product effect, *i.e.* the interaction “plant: shading : stage”, was highly significant with p -value < 0.001) indicating thus a relatively acceptable global panel performance (**Table 2**). Means and standard errors of repeatability measurements for all the attributes except ‘uniformity’ and ‘flower clustering’ were relatively low and not so variable (maximum $M = 1.17$ and maximum $SE = 0.13$), indicating very little and similar differences of the subject scores over duplicated videos. Reproducibility measurements indicated that differences between subject scores on same videos were also rather low and stable excepted for ‘uniformity’, ‘flower clustering’, ‘flower height’, ‘leaf color’, and ‘leaf size’ (M over 1.50; SE over 0.50), indicating more relative differences between subject scores on same videos, eventually coupled with difference inconsistencies between the videos and the subjects. Finally, acceptable to very high consonance measurements confirmed with previous results the very good performance and consensual appropriation of the 11 others attributes out the 17 (**Table 2**). Thus, the panel seemed to be quite more efficient with the attributes concerning quantity and plant size assessments, then for relatively more complex ‘density’ and ‘habit’, and finally ‘balance’ which directly asked the subjects to integrate in 3D the plant shape thanks to rotation. Therefore, ‘leaf color’, ‘leaf size’, ‘flower height’, ‘flower clustering’, ‘growth location’ and also ‘uniformity’ were not further considered in the analyses because of their lack of consensus and thus leading to poor reliability for establishing predictive models. Such results may be interpreted from various factors. These attributes may be reconsidered about

their relevance and their definitions, according to the plants studied and means of their presentations addressing light in the scene, and distance of the views for example.

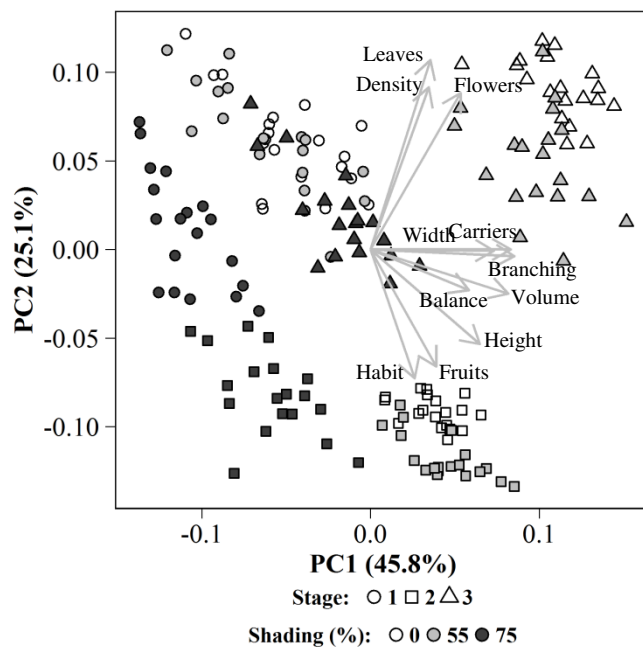


Figure 2. Biplot of the standardized principal component (PC) analysis of the mean “product × attributes” matrix. The 171 plant videos being the products (rows) are plotted using grayscale shades for shading environments, and symbols for acquisition stages. The arrows indicate the direction of the 11 sensory attributes (the columns, defined as average subject scores by product).

Principal component analysis (PCA) of the average score matrix for the 171 products and the 11 kept sensory attributes allowed some relations to be identified between visual characteristics, and to highlight how they structured the plants throughout shading environments and stages (**Figure 2**). Four principal components (PC) were considered according to the Kaiser criterion, which explained 93.4% of the overall variance. However the first plan accounted for 70.9% and was sufficient to well discriminate main characteristics of the plants within stages and shading environments. Globally, PC1 and PC2 structured the plants according to V-shaped patterns separating the plants characteristics chronologically and then with large to more subtle differences between shading levels. PC1 (45.8% of the variance) synthesized plant dimensions, branching and shape equilibrium over stages with the shading level diminution. Not surprisingly, it reflected very high to moderate correlations between ‘branching’ and ‘carriers’, ‘volume’ ‘width’ and ‘height’, and then ‘balance’. Highest Pearson correlations for ‘balance’ were with carriers ($r_p = 0.62$) and branching ($r_p = 0.60$) which presented the strongest association ($r_p = 0.92$) between all attributes pairs. Plant

characteristics were essentially structured by age and sub-structured by shading level diminution. Interestingly, scores for plants grown under 75% of shade were systematically lower than those grown under 0 and 55% which were more similar. PC2 (25.1%) strongly reflected the expected very high correlation between ‘leaves’ and ‘flowers’, and their respective high and moderate correlation with plant density. PC2 opposed those attributes to ‘fruits’ and ‘habit’ presenting a negligible correlation ($r_P = 0.25$), and ‘height’ also moderately reflected on PC2, with the strongest correlation observed between ‘fruits’ and ‘leaves’ but with a low opposition link ($r_P = -0.42$). It thus showed a structuration of the products according to the presence or absence of leaves and flowers, separating, as expected, S1 and S3 far from S2 plant characteristics. Then, it showed also a sub-structuration within stage groups according to the quantity of leaves and flowers for S1 and S3; and according to density, habit, fruits and height for the three stages enabling to separate the three shading levels for their characteristics at S2 and S3. However, it only separated plants grown under the highest shading level at S1.

Thus, the subjects were able to detect various noticeable visual differences easily explainable by shading and plant age. However the large to moderate inertia observed (**Figure 2**) within the shading environments at each stage indicated that various within-crop visual differences between plants were perceptible. Thus subsequent relations between architecture and visual appearance were addressed considering the videos with their corresponding recorded plant architectures as different plant observations for taking in account all the observed variability.

3.2. Architectural characterization

Throughout the three stages, 41341 axis observations were collected; some axes eventually observed up to three times. 81.5% concerned observations of determined axes with 21.7% of them being blind shoot observations, 18.3% were for vegetative axes and 0.2% were unclassified. In average, number of determined axes and their number of phytomers per plant presented similarly a decrease according to shading intensity, with respective increase over stages, while respective variations increased with plant development (**Figure 3**). Poisson distributions with log-link function, often more adapted for count data modeling, enabled to circumvent assumption violations observed with linear modeling. Models fitted well the data at hand (over dispersion Chi-square tests both presented $p < 0.001$); both were highly relevant and presented low effects from plants as suggested by conditional and marginal R^2 , both over 0.97 (Nakagawa and Schielzeth 2013). For both the two variables, deviance table analyses

confirmed the significant effects from stage and shading, as their interaction (Wald chi-square test p -values < 0.001), and 95 % confidence interval of the variance accounted by the plants within shading environments revealed that, even low, the effects from plants were significant. In accordance with the trends observed (**Figure 3**), multiple comparisons confirmed the significant differences ($\alpha = 0.05$) between all the modality combinations excepted for the number of phytomers between S2 under shading of 55% and S3 under 75%. However, product mapping (**Figure 2**) beforehand revealed that plants from these two batches were even perceived quite differently by the panel. Therefore, it strengthened again the influence of the light for plant development through both organogenesis and branching processes of the primary growth. It confirmed also the effectiveness of sampling plant architectures under different environmental conditions throughout time to expand substantially the architectural variability of the products presented for visual characterization.

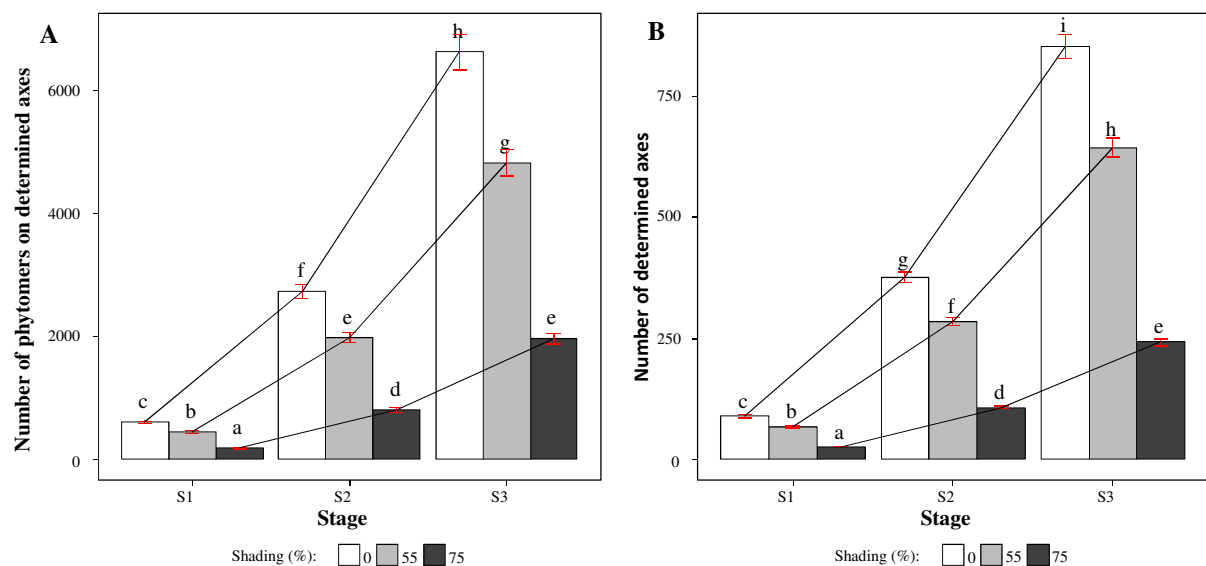


Figure 3. Whole-plant organogenesis (**A**) and branching (**B**) considering determined axis observations across shading levels and over stages. Values are least-squares mean estimates with standard errors obtained from generalized linear mixed models with Poisson distribution of measurements made on $n = 11$ to 18 plants, for a total of $N = 132$ plant architecture records. Different letters indicate significant differences detected with the Bonferroni's *post hoc* test (error level $\alpha = 0.05$).

Even though shading induced large differences on plant organogenesis and branching over time, it did not explained most of the variability observed at the axis-scale for all the other architectural variables. Indeed, PCA of pooled determined axis observations (**Table 2**) predominantly reflected primary growth of the axes, then orientation and spatial location. As

observed with PCA of the pooled observations, the axis length and the number of phytomers were also consistently the most contributive and the most correlated variables to the first PC for separated stage analyses (**data not shown**). However, the branching order was the only one qualitative variable contributing to a non-negligible part of the first variation source within the data (33% on PC1). This suggested thus that the major variability between axes concerned the within-plant axis primary growth variability across branching orders, and that variability was rather consistent over stages and more important than that observed between-plants grown under same or different shading levels. Also, for avoiding redundant information between insertion and extremity distances, PCA highlighted that considering the extremity location only (vertical and horizontal distances from the plant collar) was sufficient.

Clustering approaches used for the analysis of the length of the axes, chosen for its larger variance and constancy of the metric unit (contrarily to phytomer length), suggested that, when considering the experimental conditions separately (**data not shown**) or pooled, an optimal and consistent solution was obtained with 4 classes. Identified classes, latter respectively called: tiny, short, medium, and long axes which characteristics for the determined axis observations are presented within **Table 4**, were observed in all the plants whatever the stage and the shading level (**Appendix B**). Interestingly relative distribution of the classes according to branching orders and the two types of architectural systems used (elementary versus delayed) highlighted a recurrent and rather stable pattern in the three shading environments and over stages. Notably, the first axis of the cuttings was medium carrying long, medium, short and tiny axes, while the first branching orders of the delayed architectural systems in almost all the observations were long axes. However, orientations of the first branching order axes may lead to consider distinct axis categories with different profiles according to shading intensity (**Appendix B**). This suggested a strong genotypic determination, at least for a topology-based axis length qualitative structuration, but possibly a large phenotypic plasticity for other architectural variables according to the environmental conditions.

Then, for consistency in the database of the axis-scale variables, classes were then attributed to the previously unconsidered axes (vegetative and unclassified axes) in PCA before generating the plant-scale architectural variables since they were present on the plants characterized by the panel.

Table 5

Spearman correlation matrix between sensory attributes (columns) and respective architectural plant-scale variables (rows) the most correlated thereto for the entire dataset ($N = 130$ plant videos). Bold values indicate the most correlated architectural variable to each sensory attribute.

	Flowers	Volume	Height	Branching	Leaves	Fruits	Width	Carriers	Density	Habit	Balance
N. of PCVB to OF	0.98	NS	NS	0.27	0.91	-0.34	0.24	0.20	0.68	-0.34	NS
C. N. of phytomers of the axes ended by FB to OF	0.94	NS	NS	0.29	0.95	-0.31	0.20	0.24	0.76	-0.35	NS
C. length of the axes ended by FB to OF	0.91	NS	NS	0.25	0.95	-0.30	NS	0.22	0.78	-0.35	NS
N. of fresh fruits	-0.25	0.45	0.26	0.69	-0.19	0.93	0.35	0.73	NS	NS	0.49
N. of LMS axes up to BO3	0.24	0.77	0.50	0.96	0.22	0.61	0.71	0.91	0.28	NS	0.53
Mean vertical distance of the determined axes	-0.23	0.43	0.64	NS	-0.33	NS	0.18	NS	-0.55	0.77	0.41
N. of LM axes up to BO3	NS	0.84	0.60	0.93	NS	0.59	0.76	0.92	NS	NS	0.54
Max. width	NS	0.92	0.73	0.74	NS	0.35	0.93	0.72	NS	NS	0.37
Convex hull volume	NS	0.97	0.80	0.83	NS	0.47	0.90	0.80	NS	0.23	0.47
Max. vertical distance of the determined axis	NS	0.86	0.97	0.47	NS	0.21	0.71	0.44	-0.46	0.55	0.28
Mean lateral distance of the axes divided by max. width	NS	0.54	0.44	0.53	NS	0.32	0.45	0.50	NS	0.32	0.72

NS: Non-significant Spearman's correlation coefficient, $rS < 0.172$ in absolute value for 130 observations at error level $\alpha = 0.05$. N.: Number; Max.: maximum; C: Cumulated; Q95: Value that cut off the first 95% of the sorted values in ascending order. FB: floral bud; PCV: Petal Color Visible Bud; OF open flower. L: long; M: Medium; S: Short. BO: Branching Order followed by the level, BO1 is the first branching order.

Table 6

Predictive abilities of the OLS models minimizing the root error mean square error on validation test set (RMSEP) to predict each sensory attribute.

Attribute	Architectural variable	PP	Model calibration ¹		Model validation	
			$n = 90$ plant videos		$n = 40$ plant videos	
			R_{CV}^2	RMSE _{CV}	Q^2	RMSEP
Flowers	N. of OF	SR	0.97 ± 0.03	0.49 ± 0.19	0.95	0.53
Volume	Convex hull volume	CR	0.95 ± 0.02	0.40 ± 0.09	0.95	0.39
Height	Max. vertical dist. of the determined axes	YJ	0.95 ± 0.03	0.44 ± 0.09	0.93	0.46
Fruits	N. of fresh fruits	SR	0.95 ± 0.04	0.47 ± 0.13	0.91	0.63
Branching	N. of LMS axes up to BO4	SR	0.93 ± 0.04	0.53 ± 0.12	0.94	0.47
Leaves	C. length of the axes ended by FB to OF	SR	0.92 ± 0.05	0.81 ± 0.24	0.96	0.49
Carriers	N. of LM axes up to the BO3	Raw	0.83 ± 0.08	0.66 ± 0.14	0.89	0.49
Width	Max. width (of the phytomer cloud)	YJ	0.88 ± 0.08	0.50 ± 0.12	0.84	0.55
Habit	Q95 vertical dist. divided by Q95 lateral dist.	CR	0.63 ± 0.23	0.81 ± 0.18	0.66	0.80
Density	N. of FB to OF	SR	0.61 ± 0.20	1.11 ± 0.17	0.67	0.97
Balance	Max. width divided by mean vertical distance	C	0.54 ± 0.19	1.13 ± 0.22	0.49	1.09

1: values are means \pm standard deviations computed from 10 repeats of 10-fold cross-validation (CV). PP: Pre-processing transformation of the architectural variables, YJ: Yeo-Johnson; SR: Square Root, CR: Cubic Root; C: Cube. N: Number; Max.: maximum; C: Cumulated; Q95: Value that cut off the first 95% of the sorted values in ascending order. FB: Floral Bud; OF: Open Flower. L: Long; M: Medium; S: Short. BO: Branching Order followed by the level, BO1: first branching order.

3.3.3. Relating visual and architectural characterizations

Significant high to very high correlations were found for all the sensory attributes with at least one architectural plant-scale variable (**Table 5**). Very strong relations were found for the attributes assessing quantity and metric traits, the smallest Spearman's correlation coefficient (r_s) was 0.92 between 'carriers' and the number of long and medium axes up to the third branching order; and the highest was 0.98 between 'flowers' and the number of floral buds with petal color visible and open flowers. Lower but still high correlations ranging from 0.72 to 0.78 were found for 'balance', 'density' and 'habit'. While correlations of the architectural variables the most related to 'habit' and 'balance' with the other attributes were indeed lower, the cumulated length of the axes ended by a floral bud to an open flower was much more correlated to 'flowers' and 'leaves' than with 'density'. Overall, similar correlations were found for the same attributes with different variables and on the opposite, especially with the variables related to 'flowers', 'leaves', and 'density'; to 'carriers' and 'branching'; then to 'volume', 'width' and 'height'.

Correlations do not imply causations and may vary considering the sub-samples studied. Thereby, cross-validation on calibration data and validation on unknown data undertaken using OLS models with predictor transformations enabled the predictive efficiency of the available plant-scale architectural variables to be assessed more robustly. **Table 6** summarizing the statistics of the models minimizing the prediction error with unknown data (RMSEP), showed that the most correlated architectural variables highlighted previously were not necessarily those leading to the best models, and that non-linear relationships were in most cases much more adapted. Overall, predictive abilities of the models obtained were quite remarkable especially for the sensory attributes related to metric and quantity traits. The less accurate model presented a relative error of prediction that did not exceeded 17.3%, corresponding to the range normalized RMSEP of 1.09 for the attribute 'balance'.

Models with lesser performances in prediction were obtained for 'density', 'habit' and 'balance' suggesting potential links between panel performance for the sensory attributes and predictive abilities of the models that can be expected. Indeed, predictive abilities of the models for 'habit' and 'balance' were among the lowest, but used highly relevant architectural variables as for the other models contrarily to the one obtained for 'density' using the number of floral buds and open flowers. Such organs were not present during winter rest of the plants as presented at S2 videos, and thus may not be so relevant for predicting 'density'. Therefore deeper analyses may be interesting for such attributes to investigate if predictions could be

improved with possibly a “leafy / not leafy” parameter as with a more elaborate variable selection procedure and with multivariate regression methods for highlighting more relevant combinations of architectural parameters.

4. Discussion

As it was desired for the experiment of the present study, light modulation through shading applications enabled us to induce phenotypic plasticity for the architecture of the ‘Radrazz’ rose bush. As already highlighted and especially exploited for the production of cut roses, results confirm the strong influence of light on the rose architecture, especially for its initial signal role in the regulation and expression of the process related to organogenesis and branching, which determine the number of axes, the axis growth, the number of flowers and thus fructification, and by extension the plant shape (Crespel et al. 2014; Leduc et al. 2014; Zieslin and Mor 1990), and more generally the plant visual appearance.

From ecological and botanical point of views, results strengthen observations made about the large phenotypic plasticity of shrubs, often in response to light gradients, enabling them to adopt highly contrasted architectural development strategies according to local conditions (Charles-Dominique 2012; Charles-Dominique et al. 2010; 2012; 2015; Guzmán and Cordero 2016; Kawamura and Takeda 2002; 2004; Pearcy et al. 2005; Sterck et al. 2013; Valladares et al. 2000). Certainly, with respect to our aims, this study is still limited to address robustly the architectural development of shrubs throughout their life cycle. First investigations (**not shown**) using both axis length and phytomers number variables have not resulted in relevant and biologically explainable axis partitions. Nonetheless, to resume the observed variability between axes and for predicting branching and carrying branch amounts, present results highlighted the relevance of the axis length-based segmentation proposed, e.g. as used for apple tree architecture phenotyping and modeling (Costes et al. 2003; Pallas et al. 2016). Indeed, with age, delayed branching (proleptic), which is discernable with little scaly phytomers at the basis of the axes, is more and more prevalent within plants. Thus, without data at the phytomer scale, the architecture of ‘Radrazz’ cannot be firstly and thoroughly explained using the number of phytomer per axis only. More interestingly, beyond the contrasted plants obtained with the shading experiment design, complementary results showed that this axis-length-based segmentation provided a quite stable pattern for the axis length distribution closely linked to branching orders within plants. Most of the basal sprouts leading to the architectural systems here labeled as “delayed” were carried by longer axes, well supporting the first part of the definition for reiteration summarized in Costes et al.

(2014): a shoot with a comparable or longer length than its parent shoot and that partially or totally repeats the parental branching system. However, together with length, the orientation of the first branching order axes suggested quite different functions and different profiles between shading conditions. Supporting the reiteration definition with respect to the architectural unit and its total reiteration concepts (Barthélémy and Caraglio 2007), quite relevant for tree life cycle (Fay 2002; Ishii et al. 2007; Raimbault and Tanguy 1993), seems thus present some inconsistencies for transposing the pattern and terminology used for trees to the rose bush and more generally to shrubs (Barthélémy and Caraglio 2007; pers. com. Y. Caraglio and G. Galopin). Indeed, to observe plainly the Champagnat model (Costes et al. 2014; Hallé et al. 1978), 'Radrazz' has to develop relay and renewal shoots, seen up to now as reiterated complexes, but quite different from the "elementary architectural structure stage" (Crespel et al. 2013; Li-Marchetti et al. 2015) and its development. Nonetheless, by definition, total reiteration does not lead to newest axis categories and thus should not be integrated to define neither the architectural model, nor the architectural unit. Similar observations led to revisit the Tomlinson model for basitonic branching plants (Cremers and Edelin 1995). We may ask thus if the reiteration process for shrub plants should be revisited or refined to integrate the hypothesis that this process may be necessary to the architectural unit construction ("establishment phase", see Barthélémy and Caraglio 2007) rather than a duplication of the first primary axis. Future analysis of the data using Hidden Markov chains Tree (HMT) model (Durand et al. 2005) together with similarity and distance indices between tree-structured data (Ferraro and Godin 2000; 2003; Segura et al. 2008) to investigate finely typology of the axes together with their topology and mutual matching may enable addressing more deeply such a hypothesis to further propose more relevant concepts for the life cycle pattern of shrubs forming bushes.

Concerning the more applied context dealt here, the study demonstrated the relevance of the method proposed for studying the relationships between plant architecture and main visual components addressed. At this level, reliability of the sensory results remains nonetheless questionable. Video stands enabled to avoid all possible product alteration during sensory tasks, especially critical for the state of the flowers. Panel performance, difficult to apprehend with respect to perception variability between subjects, individual repeatability and fatigue remain thus decisive in such experiments. During panel formation, 17 sensory attributes were finally proposed. They were not all strictly similar but very close and coherent with the vocabulary and attributes highlighted for virtual 'Radrazz' rose bushes assessed using video (Garbez et al. 2015, 2016) or for real rose bushes assessed without stands, or

using unique plant facet photographs (Boumaza et al. 2009; 2010; Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014). Among the 17 sensory attributes, the panel performance was good enough for 11 of them. Consensual attributes were related to plant size and shape, and amount quantification. The other six, not considered here, are nonetheless interesting, and may be more variable and relevant for studying other cultivars than ‘Radrazz’, or for experiments with other cultural practices. Besides, enhancing panel training with more precise protocol notation, definitions, and product references for the attributes and practice scaling test tasks with feedback for calibration is highly recommended (Findlay et al. 2007; Labbe et al. 2004; Rainey 1986; Wolters and Allchurch 1994). Furthermore, the stand used as stimuli according to the scale of the characterization should be investigated. Presenting organs *ex-planta* on static images as stimuli for assessing characteristics at the organ scale such as ‘leaf size’, or also ‘flower color loudness’ or “flower dimension’ not investigated here, may be thus more efficient for this level of characterization.

Finally, results obtained previously using virtual rose bush videos were confirmed with real plant material with the validation of a protocol (number of videos, scoring sessions, and subjects). The obtained models enabled us to identify architectural variables with good predictive ability and especially relevant for explaining the visual appearance construction of the rose bush. They reflected branching, growth and sexual expression of the axes as their structuration in space, especially critical in the architectural establishment of the rose bush. Such variables enabled here the characterization of the plants cultivated under three contrasted shading environments with a reduced and coherent set over time. The large number of architectural variables that can be obtained, as here considering the methodological choice made, led to numerous comparable predictive models with quite acceptable results for each sensory attribute. Such results should thus lead the experimenters to carefully address the relevance of the variables selected from biological and practical viewpoints, and thus investigate more specific analyses, merging expert knowledge and advanced statistical methods adapted to variable selection and modeling under the “ $n < p$ ” conditions (Kuhn and Johnson 2013; Silva et al. 2013; Zucchini 2000) as illustrated previously with virtual rose bush and predictive image analysis-based models (Garbez et al., 2016). Upcoming analyses will address on the real plants the relevance of this previously tested image analysis method with more elaborated predictive modeling procedures, which may present relevant results especially for sensory attributes concerning complex multidimensional visual traits, as here with the plant growth habit, its density and its balance. Improvements of the approach may concern image (size and resolution) and scene management for video edition in order to

provide the most adapted plant visualization. Comparing results obtained from same plants presented using different stands is nevertheless necessary to get more precise insights about the visual perception of ornamental plants.

Appendix A. Images and videos of the rose bushes to be hosted online.

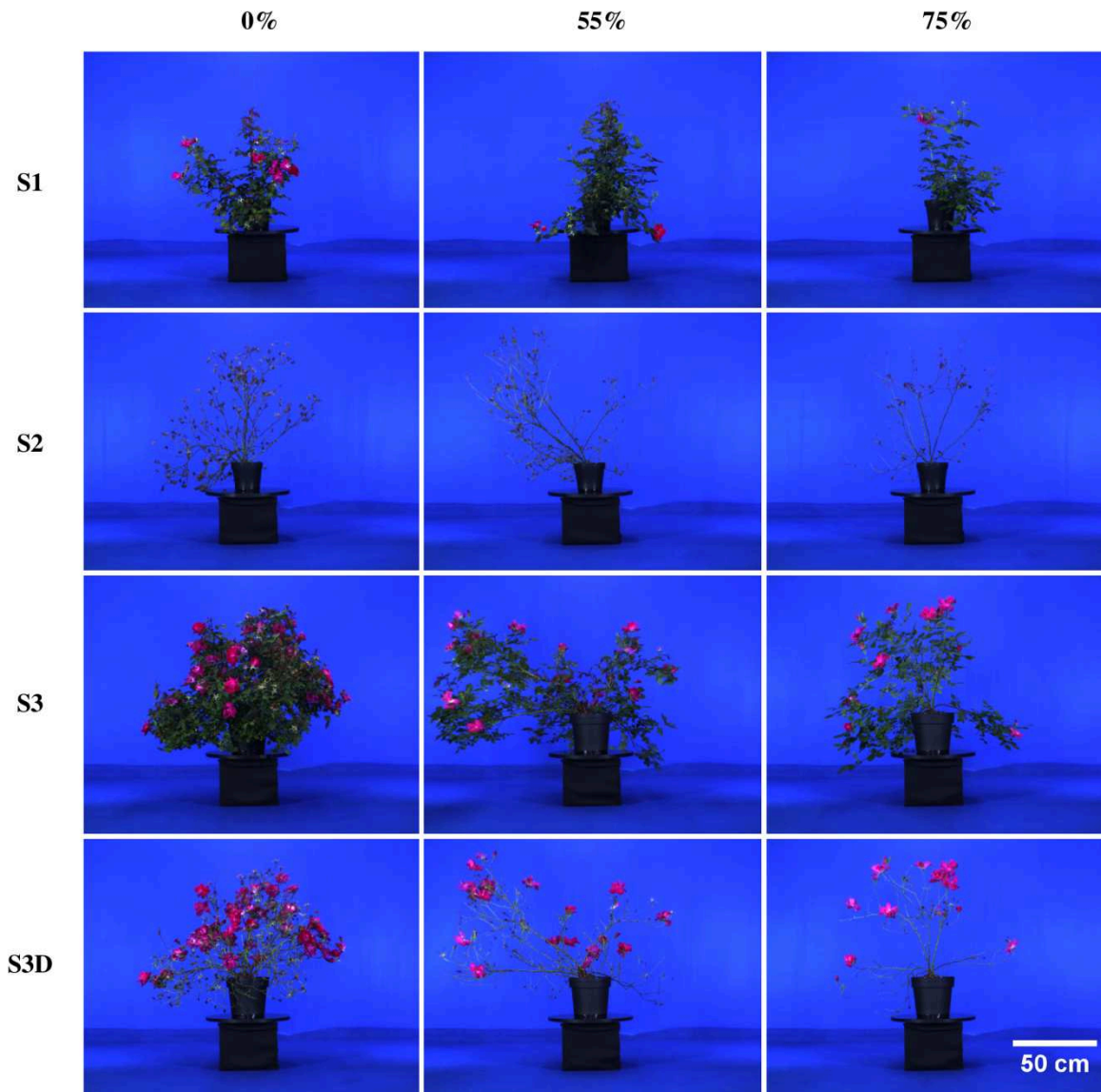


Figure A.1. Panel of cropped and reduced size images of three rose bushes from the shading environments (from the left to the right: 0, 55 and 75% of shading) over the three acquisition stages (from the top to the bottom: S1, S2, and S3), and manually defoliated at the third stage (S3D).

Appendix B. Architectural analysis complements.

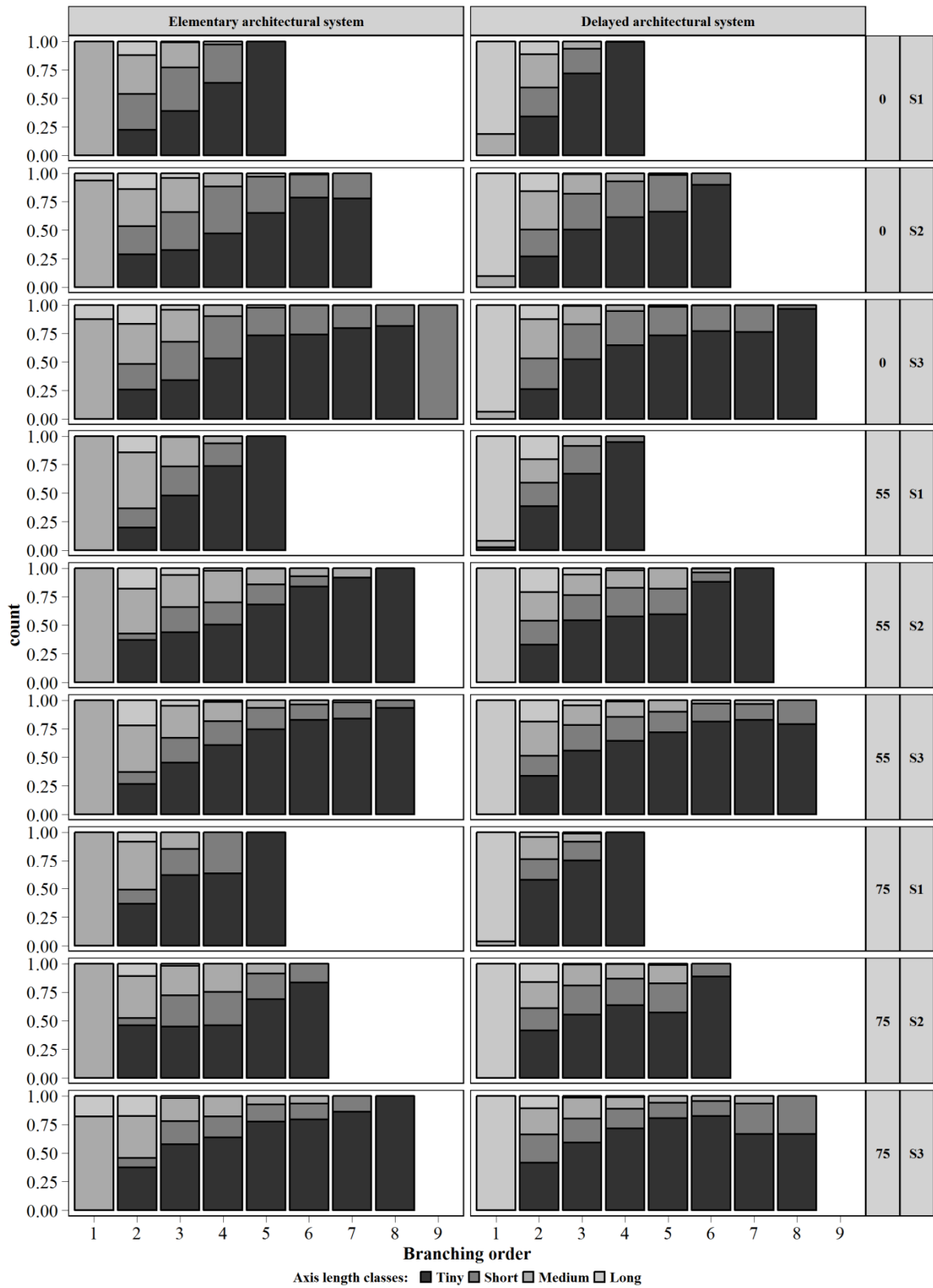


Figure B.1. Relative distribution of the axes according to branching orders and architectural systems across shading environments (0, 55, and 75%) and over the three acquisition stages (S1, S2, and S3).

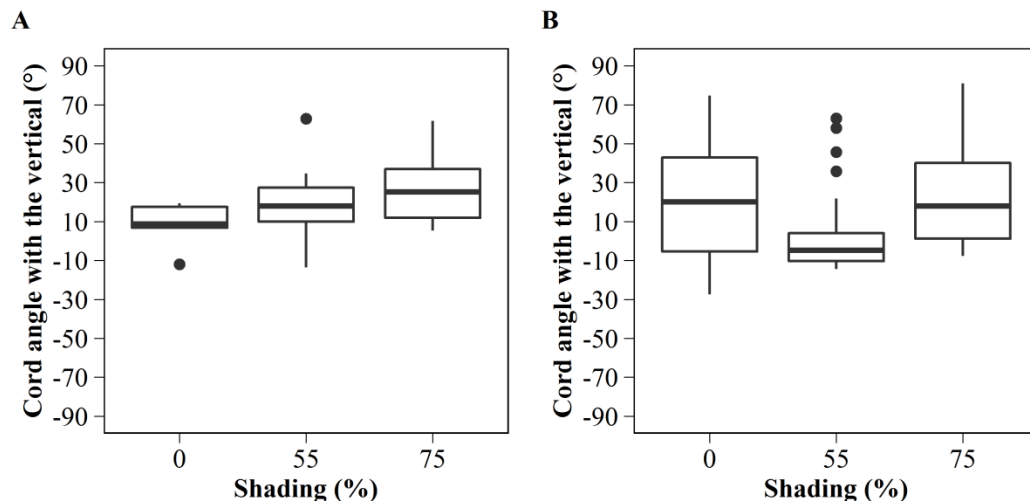


Figure B.2. Boxplots for cord angle of the axes (stage 3 observations) at the first branching orders according to shading levels (0, 55, and 75%): **(A)** at the first order of the elementary architectural system (median axes); and **(B)** at the first order of delayed architectural systems (long axes).

References

- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11(7), 36-42.
- Anchang, J. Y., Ananga, E. O., & Pu, R. (2016). An efficient unsupervised index based approach for mapping urban vegetation from IKONOS imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 211-220.
- Barthélémy, D., & Caraglio, Y. (2007). Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99(3), 375-407.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2016). lme4: Linear mixed-effects models using 'Eigen' and S4. Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=lme4>
- Bivand, R., Ono, H., Dunlap, R., & Stigler, M. (2015). classInt: Choose Univariate Class Intervals (Version 0.1–23). Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=classInt>
- Bonnard, C., & Pradal, C. (2008). amlPy Reference manual. Retrieved from http://openalea.gforge.inria.fr/wiki/lib/exe/fetch.php?media=documentation:amlpy_manual.pdf
- Borra, S., & Di Ciaccio, A. (2010). Measuring the prediction error. A comparison of cross-validation, bootstrap and covariance penalty methods. *Computational Statistics & Data Analysis*, 54(12), 2976-2989.
- Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliier, L., & Guérin, V. (2009). Visual characterization of the esthetic quality of the rosebush. *Journal of Sensory Studies*, 24(5), 774-796.
- Boumaza, R., Huché-Théliier, L., Demotes-Mainard, S., Le Coz, E. L., Nathalie, Pelleschi-Travier, S., Qannari, E. M., . . . Guérin, V. (2010). Sensory profiles and preference analysis in ornamental horticulture: The case of the rosebush. *Food Quality and Preference*, 21(8), 987-997.
- Charles-Dominique, T. (2012). *Analyse des relations entre plasticité architecturale des buissons et prolifération de leurs populations*. (PhD.), Université de Montréal - Université Montpellier II.
- Charles-Dominique, T., Edelin, C., & Bouchard, A. (2010). Architectural strategies of *Cornus sericea*, a native but invasive shrub of Southern Quebec, Canada, under an open or a closed canopy. *Annals of Botany*, 105(2), 205-220.
- Charles-Dominique, T., Edelin, C., Brisson, J., & Bouchard, A. (2012). Architectural strategies of *Rhamnus cathartica* (*Rhamnaceae*) in relation to canopy openness. *Botany*, 90(10), 976-989.
- Charles-Dominique, T., Edelin, C., Bouchard, A., Legendre, P., & Brisson, J. (2015). Using intra-individual variation in shrub architecture to explain population cover. *Oikos*, 124(6), 707-716.
- Costes, E., Crespel, L., Denoyes, B., Morel, P., Demene, M.-N., Lauri, P.-E., & Wenden, B. (2014). Bud structure, position and fate generate various branching patterns along shoots of closely related Rosaceae species: a review. *Frontiers in Plant Science*, 5(666).
- Costes, E., Sinoquet, H., Kelner, J.-J., & Godin, C. (2003). Exploring within-tree architectural development of two apple tree cultivars over 6 years. *Annals of Botany*, 91(1), 91-104.

- Cremers, G., & Edelin, C. (1995). Etude de l'architecture aérienne de quelques plantes tropicales à ramification basitone: vers une révision du modèle de Tomlinson. *Canadian Journal of Botany*, 73(9), 1490-1503.
- Crespel, L., Le Bras, C., Relion, D., & Morel, P. (2014). Genotype \times year interaction and broad-sense heritability of architectural characteristics in rose bush. *Plant Breeding*, 133(3), 412-418.
- Crespel, L., Sigogne, M., Donès, N., Relion, D., & Morel, P. (2013). Identification of relevant morphological, topological and geometrical variables to characterize the architecture of rose bushes in relation to plant shape. *Euphytica*, 191(1), 129-140.
- Creusen, M. E. H., & Schoormans, J. P. L. (2005). The different roles of product appearance in consumer choice. *Journal of Product Innovation Management*, 22(1), 63-81.
- Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*(2), 224-227.
- Demotes-Mainard, S., Bertheloot, J., Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Guéritaine, G., Guérin, V., & Andrieu, B. (2013). Rose bush leaf and internode expansion dynamics: analysis and development of a model capturing interplant variability. *Frontiers in Plant Science*, 4(418).
- Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., Morel, P., Boumaza, R., Guérin, V., & Sakr, S. (2013). Temporary water restriction or light intensity limitation promotes branching in rose bush. *Scientia Horticulturae*, 150, 432-440.
- Dijksterhuis, G. (1995). Assessing panel consonance. *Food Quality and Preference*, 6(1), 7-14.
- Donès, N., Adam, B., & Sinoquet, H. (2006). PiafDigit—software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser and for the acquisition of plant architecture. Clermont-Ferrand, France: UMR PIAF INRA-UBP.
- Durand, J. B., Guédon, Y., Caraglio, Y., & Costes, E. (2005). Analysis of the plant architecture via tree-structured statistical models: the hidden Markov tree models. *New Phytologist*, 166(3), 813-825.
- Fay, N. (2002). Environmental arboriculture, tree ecology and veteran tree management. *Arboricultural Journal*, 26(3), 213-238.
- Ferrante, A., Trivellini, A., Scuderi, D., Romano, D., & Vernieri, P. (2015). Post-production physiology and handling of ornamental potted plants. *Postharvest Biology and Technology*, 100, 99-108.
- Ferraro, P., & Godin, C. (2000). A distance measure between plant architectures. *Annals of Forest Science*, 57(5), 445-461.
- Ferraro, P., & Godin, C. (2003). An edit distance between quotiented trees. *Algorithmica*, 36(1), 1-39.
- Findlay, C. J., Castura, J. C., & Lesschaeve, I. (2007). Feedback calibration: A training method for descriptive panels. *Food Quality and Preference*, 18(2), 321-328.
- Fox, J., Weisberg, S., Adler, D., Bates, D., Baud-Bovy, G., Ellison, S., . . . Graves, S. (2016). car: Companion to Applied Regression (Version 2.1-2). Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=car>
- Galopin, G., Mauget, J.-C., & Morel, P. (2010). Morphogenetic analysis of the phenotypic variability of the architectural unit of *Hydrangea macrophylla*. *Annals of Forest Science*, 67(3).
- Garbez, M., Chéné, Y., Belin, É., Sigogne, M., Labatte, J. M., Hunault, G., . . . Galopin, G. (2016). Predicting sensorial attribute scores of ornamental plants assessed in 3D through rotation on video by image analysis: a study on the morphology of virtual rose bushes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 331-346.
- Garbez, M., Galopin, G., Sigogne, M., Favre, P., Demotes-Mainard, S., & Symoneaux, R. (2015). Assessing the visual aspect of rotating virtual rose bushes by a labeled sorting task. *Food Quality and Preference*, 40(Part B), 287-295.
- Godin, C., & Caraglio, Y. (1998). A multiscale model of plant topological structures. *Journal of Theoretical Biology*, 191(1), 1-46.
- Guzmán, Q. J. A., & Cordero, R. A. (2016). Neighbourhood structure and light availability influence the variations in plant design of shrubs in two cloud forests of different successional status. *Annals of Botany*, 118(1), 23-34.
- Hallé, F., Oldeman, R. A. A., & Tomlinson, P. B. (1978). *Tropical trees and forests: an architectural analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hennig, C. (2008). Dissolution point and isolation robustness: robustness criteria for general cluster analysis methods. *Journal of Multivariate Analysis*, 99(6), 1154-1176.
- Hennig, C. (2015). fpc: Flexible Procedures for Clustering (Version 2.1-10). Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=fpc>
- Higginbotham, J. S. (1987). Want to sell to supermarkets? Think like a supermarket buyer. *American Nurseryman*, 165(7), 133-139.
- Huché-Théliér, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., & Guérin, V. (2011). Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 325-334.
- Husson, F., Josse, J., Lê, S., & Mazet, J. (2016). FactoMineR: Multivariate exploratory data analysis and data mining with R (Version 1.31.5). Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=FactoMineR>

- Ishii, H. T., Ford, E. D., & Kennedy, M. C. (2007). Physiological and ecological implications of adaptive reiteration as a mechanism for crown maintenance and longevity. *Tree Physiology*, 27(3), 455-462.
- Kawamura, K., Hibrand-Saint Oyant, L., Thouroude, T., Jeauffre, J., & Foucher, F. (2015). Inheritance of garden rose architecture and its association with flowering behaviour. *Tree Genetics & Genomes*, 11(2), 1-12.
- Kawamura, K., & Takeda, H. (2002). Light environment and crown architecture of two temperate *Vaccinium* species: inherent growth rules versus degree of plasticity in light response. *Canadian Journal of Botany*, 80(10), 1063-1077.
- Kawamura, K., & Takeda, H. (2004). Rules of crown development in the clonal shrub *Vaccinium hirtum* in a low-light understory: a quantitative analysis of architecture. *Canadian Journal of Botany*, 82(3), 329-339.
- Kohsel, L., & Bennedsen, B. S. (2001). Performance of human experts grading pot roses in a commercial environment. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 562, 273-283.
- Kuhn, M. (2016). caret: Classification and Regression Training (Version 6.0-68). Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=caret>
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling*. New York, USA: Springer.
- Kuznetsova, A., Christensen, R. H. B., Bavay, C., & Brockhoff, P. B. (2015). Automated mixed ANOVA modeling of sensory and consumer data. *Food Quality and Preference*, 40, 31-38.
- Labbe, D., Rytz, A., & Hugi, A. (2004). Training is a critical step to obtain reliable product profiles in a real food industry context. *Food Quality and Preference*, 15(4), 341-348.
- Langsrud, Ø. (2003). ANOVA for unbalanced data: Use Type II instead of Type III sums of squares. *Statistics and Computing*, 13(2), 163-167.
- Le Bris, M., Champeroux, A., Bearez, P., & Le Page-Degivry, M. T. (1998). Basipetal gradient of axillary bud inhibition along a rose (*Rosa hybrida* L.) stem: growth potential of primary buds and their two most basal secondary buds as affected by position and age. *Annals of Botany*, 81(2), 301-309.
- Leduc, N., Roman, H., Barbier, F., Péron, T., L. H.-T., Lothier, J., . . . Sakr, S. (2014). Light signaling in bud outgrowth and branching in plants. *Plants*, 3(2), 223-250.
- Lenth, R. V. (2016). lsmeans: Least-Squares Means (Version 2.23). Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=lsmeans>
- Li-Marchetti, C., Le Bras, C., Relion, D., Citerne, S., Huché-Thélier, L., Sakr, S., . . . Crespel, L. (2015). Genotypic differences in architectural and physiological responses to water restriction in rose bush. *Frontiers in Plant Science*, 6(355).
- Meilgaard, M. C., Carr, B. T., & Civille, G. V. (2006). *Sensory evaluation techniques* (4 ed.): CRC press.
- Morel, P., Crespel, L., Galopin, G., & Moulia, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching of garden rose. *Scientia Horticulturae*, 135, 59-64.
- Morel, P., Galopin, G., & Donès, N. (2009). Using architectural analysis to compare the shape of two hybrid tea rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 120(3), 391-398.
- Murray, A. T., & Shyy, T.-K. (2000). Integrating attribute and space characteristics in choropleth display and spatial data mining. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(7), 649-667.
- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133-142.
- Næs, T., Brockhoff, P., & Tomic, O. (2011). *Statistics for sensory and consumer science*: John Wiley & Sons.
- Pallas, B., Da Silva, D., Valsesia, P., Yang, W., Guillaume, O., Lauri, P.-E., . . . Costes, E. (2016). Simulation of carbon allocation and organ growth variability in apple tree by connecting architectural and source-sink models. *Annals of Botany*, 118(2), 317-330.
- Pateiro-López, B., & Rodríguez-Casal, A. (2010). Generalizing the convex hull of a sample: the R package alphahull. *Journal of Statistical Software*, 34(5), 1-28.
- Pearcy, R. W., Muraoka, H., & Valladares, F. (2005). Crown architecture in sun and shade environments: assessing function and trade-offs with a three-dimensional simulation model. *New Phytologist*, 166(3), 791-800.
- Pradal, C., Dufour-Kowalski, S., Boudon, F., Fournier, C., & Godin, C. (2008). OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling. *Functional Plant Biology*, 35(10), 751-760.
- R Development Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing (Version 3.2.3). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org/>
- Raimbault, P., & Tanguy, M. (1993). La gestion des arbres d'ornement. Ire partie : une méthode d'analyse et de diagnostic de la partie aérienne. *Revue Forestière Française*, XLV(2), 97-117.
- Rainey, B. A. (1986). Importance of reference standards in training panelists. *Journal of Sensory Studies*, 1(2), 149-154.
- Rossi, F. (2001). Assessing sensory panelist performance using repeatability and reproducibility measures. *Food Quality and Preference*, 12(5-7), 467-479.

- Santagostini, P., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., Leduc, N., Bertheloot, J., Guérin, V., . . . Boumaza, R. (2014). Assessment of the visual quality of ornamental plants: Comparison of three methodologies in the case of the rosebush. *Scientia Horticulturae*, *168*, 17-26.
- Schreiner, M., Korn, M., Stenger, M., Holzgreve, L., & Altmann, M. (2013). Current understanding and use of quality characteristics of horticulture products. *Scientia Horticulturae*, *163*, 63-69.
- Scuderi, D., Giuffrida, F., Toscano, S., & Romano, D. (2012). Growth, physiological response, and quality characteristics of weeping fig in response to shading levels and climatic conditions. *HortScience*, *47*(11), 1586-1592.
- Segura, V., Ouangraoua, A., Ferraro, P., & Costes, E. (2008). Comparison of tree architecture using tree edit distances: application to 2-year-old apple hybrids. *Euphytica*, *161*(1-2), 155-164.
- Silva, L., Koga, M. L., Cugnasca, C. E., & Costa, A. H. R. (2013). Comparative assessment of feature selection and classification techniques for visual inspection of pot plant seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, *97*, 47-55.
- Spilke, J., Piepho, H.-P., & Hu, X. (2005). A simulation study on tests of hypotheses and confidence intervals for fixed effects in mixed models for blocked experiments with missing data. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, *10*(3), 374-389.
- Steinley, D. (2006). K-means clustering: a half-century synthesis. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, *59*(1), 1-34.
- Sterck, F. J., Duursma, R. A., Pearcy, R. W., Valladares, F., Cieslak, M., & Weemstra, M. (2013). Plasticity influencing the light compensation point offsets the specialization for light niches across shrub species in a tropical forest understorey. *Journal of Ecology*, *101*(4), 971-980.
- Stone, H., Sidel, J., & Singleton, R. C. (1974). Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis. *Food Technology*, *28*(11), 24-34.
- Townsley-Brascamp, W., & Marr, N. E. (1994). Evaluation and analysis of consumer preferences for outdoor ornamental plants. *Acta Horticulturae (ISHS)*, *391*, 199-208.
- Valladares, F., Wright, S. J., Lasso, E., Kitajima, K., & Pearcy, R. W. (2000). Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a Panamanian rainforest. *Ecology*, *81*(7), 1925-1936.
- Walesiak, M., & Dudek, A. (2015). clusterSim: Searching for Optimal Clustering Procedure for a Data Set (Version 0.44-2). Retrieved from <https://cran.r-project.org/package=clusterSim>
- Wolters, C. J., & Allchurch, E. M. (1994). Effect of training procedure on the performance of descriptive panels. *Food Quality and Preference*, *5*(3), 203-214.
- Yeo, I. K., & Johnson, R. A. (2000). A new family of power transformations to improve normality or symmetry. *Biometrika*, *87*(4), 954-959.
- Zieslin, N., & Mor, Y. (1981). Plant management of greenhouse roses. Formation of renewal canes. *Scientia Horticulturae*, *15*(1), 67-75.
- Zieslin, N., & Mor, Y. (1990). Light on roses. A review. *Scientia Horticulturae*, *43*(1), 1-14.
- Zucchini, W. (2000). An introduction to model selection. *Journal of Mathematical Psychology*, *44*(1), 41-61.

Garbez et al. (M2)

Manuscript 2 to be proposed for publication in *Computers and Electronics in Agriculture*

Plant visual appearance assessments in 3D predicted from image analysis: rotating virtual plant methods applied to real rose bush videos

M. Garbez ^{a, b}, É. Belin ^c, Y. Chéné ^c, N. Donès ^d, G. Hunault ^e, D. Relion ^a, M. Sigogne ^a, R. Symoneaux ^f, D. Rousseau ^g, G. Galopin ^{a, *}

a: IRHS, INRA, Agrocampus Ouest, Université d'Angers, SFR 4207 QUASAV, 42 rue Georges Morel, CS 60057, 49071 Beaucouzé Cedex, France

b: Pépinières Desmarts, route d'Agen, 24100 Bergerac, France

c: Université d'Angers, Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS) EA 731, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France

d: PIAF, INRA, UCA, 63000 Clermont-Ferrand, France

e: Université d'Angers, Laboratoire Hémodynamique, Interaction, Fibrose, et Invasivité tumorale Hépatique (HIFIH) UPRES EA 3859, SFR 4208 ICAT, 4 rue Larrey, 49933 CHU Angers, France

f: Unité de Recherche GRAPPE, Univ Bretagne Loire, Ecole Supérieure d'Agricultures (ESA), INRA, SFR 4207 QUASAV, 49000 Angers Cedex, France

g: Université de Lyon, Centre de Recherche en Acquisition et Traitement de l'Image pour la Santé (CREATIS), CNRS - UMR 5220, INSERM - U1044, Université Lyon 1, INSA-Lyon, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne, France

*Corresponding author: Gilles Galopin

Postal address: Agrocampus Ouest - 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France

Tel.: (+33)-241-225-434

Email address: ggalopin@agrocampus-ouest.fr

Keywords

Ornamental plant;
Sensory profile;
Video;
Image analysis;
Linear regression;
Rosa hybrida

Abstract¹

Sensory methods applied to ornamental plants enable studying more objectively plant visual quality key drivers of consumer preferences. However, management upkeep of a trained panel for sensory profile is time-consuming, not flexible and represents non-negligible costs. The present paper achieves the proof of the concept proposed by Garbez et al. (2016) about using morphometrical descriptors integrating 2D image features from rotating virtual rose bush videos to predict their visual appearance according to different sensory attributes. Using real plants cultivated under a shading gradient and imaged in rotation during three development stages, rather acceptable error prediction of the sensory attributes ranging from 6.2 to 19.8% (normalized RMSEP) were obtained with simple ordinary least squares (OLS) regression models and linearization. The most accurate model obtained was for the flower quantity perception. However, with less than 3 facets analysis per video, prediction error for this attribute exceeded 10%. Finally, a secondary analysis highlighted in most of the studied traits a significant influence of defoliation, especially critical for plant shape, stressing therefore the impact of the leaves on plant architecture and thus visual appearance,

1. Introduction

To objectivize ornamental plant visual quality studies, visual assessments from human perception point of view following non-hedonic sensory analysis methods represent a powerful and pragmatic way to compare the plants. Developed on rose bush plants, panelists, thanks to training, seem quite adaptable to various supports for plant presentation, at different

¹ Abbreviations: CV, cross-validation; MD, morphometrical descriptor; OLS, ordinary least squares regression; PBI, plant binarized image; PCI, plant convex hull image; PFI, plant filled image; RMSEP, root mean square error of prediction

development stages, from different genotypes or cultural practices, but also within batches (Boumaza et al. 2009; 2010; Garbez et al. 2016; 2015; Huché-Thélier et al. 2011). However, upkeeping a perennial trained panel, by essence limited by people readiness, fatigue and individual performance, implies also a non-negligible financial burden.

Especially addressed in Garbez et al. (M1), the visual appearance of a rose bush is intimately linked to its architecture (Garbez et al. 2015; Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014). Governed by environmental and genotypic influences, architecture is resulting from the different botanical entities, with their proper morphologic and geometric characteristics, located in a 3D space and arranged topologically either by succession or branching relations (Barthélémy and Caraglio 2007; Godin 2000; Li-Marchetti et al. 2015). To study visual appearance in relation with the plasticity of plant architecture in routine without long-term panel managements, growers, breeders and scientists in horticultural research centers such as the IRHS, need therefore faster and more objective methods providing consistent measurements in order to set automated characterization processes.

Using images of single facet of different rose bush cultivars, Santagostini et al. (2014) demonstrated that the “area ratio of the flowers surface over complete plant surface” was highly correlated (Spearman’s correlation coefficient r_s for $n = 10$ observations) with the number of hand counted flowers ($r_s = 0.82$), and ‘floribundity’ sensory attributes assessed with scoring ($r_s = 0.90$) and ranking ($r_s = 0.92$). For other attributes assessed on 20 rotating virtual rose bush videos representing approximately five-months-old plants after complete petal abscission, Garbez et al. (2015) obtained good predictive models with ordinary least squares (OLS) regression. The OLS models used very few morphometric descriptors (MD) obtained from descriptive statistics summarizing values of image features extracted from 45 side views (facets) all around the plants, *i.e.* interspaced by 8° rotation interval.

To achieve a final proof of the concept, the present paper addresses the transposition of this morphometric descriptor computation approach on real ‘Radrazz’ rose bushes cultivated in container. The genericity of the approach is presented with a domain application extension generated using videos presenting the plants cultivated under different shading environments at three stages of development: the first and third times with leaves and flowers, interspaced by a second stage during rest phase presenting plants without leaves and flowers.

With this main goal, two other complementary objectives are addressed: **(i)** the reduction of the number of images for the morphometric descriptor computation, considered for modeling the sensory attribute related to the flower quantity perception; **(ii)** the impact of plant defoliation before architecture digitizing. Indeed, from related and other experiments

conducted at the IRHS, large rose bush architecture data are available. However, most of them are obtained after plant defoliation to ease the digitizing (Crespel et al. 2014; 2013; Li-Marchetti et al. 2015). From such databases, virtual plants used for various subsequent experiments can be reconstructed directly or generated by modeling. If significant, defoliation effects may thus be considered according to experimental aims.

2. Material and methods

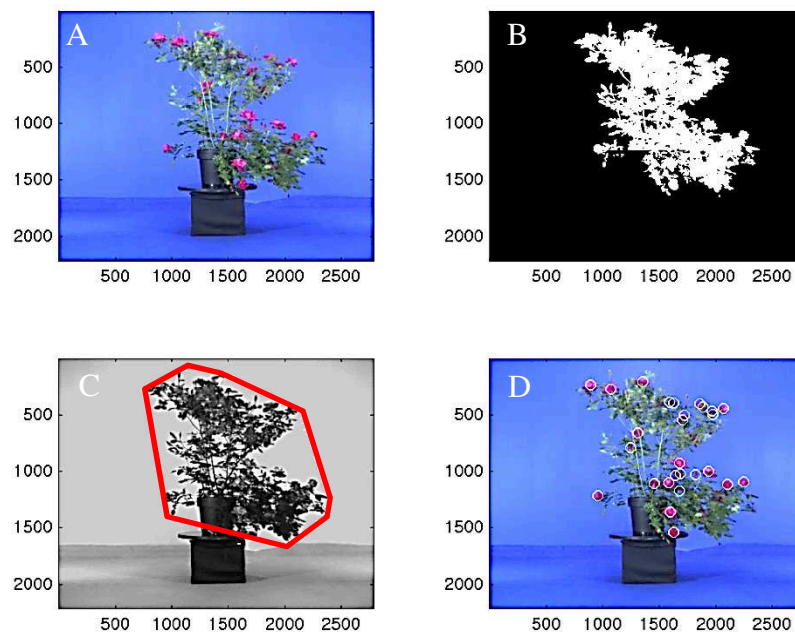


Figure 1. Illustration for plant image acquisition and processing: **(A)**: an image in reduced size of a rose bush grown under a 55% shading net at the third acquisition stage (S3; 15 months of age since cutting harvest); **(B)** corresponding plant binarized image assembling the flowers to the rest of the plant; **(C)** convex hull projection (in red) on A in grayscale; **(D)** location and counting flowering elements from the flower mask projected on A.

As fully described in Garbez et al. (M1), plants used were ‘Radrazz’ Knock Out[®] potted rose bushes (*Rosa hybrida* L.) which were subjected to a characterization of their visual appearance according to a sensory profile with trained panelists using rotating plant video as stimuli (**Figure 1**). Outside duplicates, videos assessed consisted in: **(i)** 171 different videos (19 plants × 3 shading environments × 3 stages) obtained in natural condition, *i.e.* in flowering during plant growth or without leaf and flower during the plant rest phase (**Table 1**); and **(ii)** 27 other different videos (9 plants out of the 19 plants by shading environment) presenting 27 different plants in flowering manually defoliated after the third and last acquisition stage.

2.1. Plant material and sensory profile

To sum-up Garbez et al. (M1) experiment, plant material was obtained from single node cuttings, then after rooting and first flowering, three plant batches were formed to be outdoor cultivated in container and under contrasted shading conditions : natural condition (a control without shading net, labeled 0%), under a 55% shading net; and under a 75% shading net. During a year and a half in parallel of plant architecture recording, multiple front views of the plants were imaged using a motorized turntable coupled with a CCD camera at three stages: first stage (S1) in early summer at 5 months of age, plants with flowers and leaves; S2 in late autumn-winter, during rest phase, at 12 months of age, plants without leafy or flowering axes; and S3 before summer, at 15 months of age after cutting harvest, in full flowering. After respective plant image acquisition for S3, plants were defoliated to ease the architecture digitizing by contact. For studying the impact of removing leaves on plants, approximately half of them were subjected to image acquisition a second time immediately after defoliation to constitute a separate sample denoted S3D. Image stacks of the plants were then used to edit videos presenting them in rotation. Thereafter, a panel of 20 trained subjects (panelists) was solicited for establishing the visual characterization of the plants over the 198 different videos. Plant videos were anonymized, and thus scored independently of the acquisition time and the shading condition of the plants. The sensory attributes considered were related to plant dimensions, shape, branching, leaves and flowering. In the present study, the attributes beforehand highlighted as not enough consensual (Garbez et al. M1) were not considered. The studied variables were the attribute average scores of the panelists per product (plant video), which were considered as the response variables to be predicted (**Table 1**).

2.2. Image analysis and computation of the morphometric descriptors

Rose bushes front view image sequences were obtained with a specifically devised RGB imaging system detailed in Garbez et al. (M1). Each rose bush in its black pot was positioned on a black motorized turntable located in room with a blue background after image capture of the scene with a plant-free pot (**Figure 1**). Then, front view images of the plant were acquired every 1° of the turntable, thus for a total of 360 plant facet.

The method to process such images is based on a three-step algorithm developed using MatLab environment (The MathWorks®, Inc.) which computes a binary mask of the branches and the flowers of the plant from a RGB image. Various thresholds are used in this algorithm. Each value of threshold is automatically calculated by Otsu method (Otsu 1979) so that it

provides some genericity to the algorithm detailed below. (i) First step aims to obtain a unique bounding box of the rose bush with its pot for the 360 poses. This consists in evaluating the bounding box of the binarized z-projection of 8 poses taken every 45°. The binarization of image is obtained with a simple thresholding. This bounding box is then applied on the 360 images of the plant and the image without plant. Such a bounding box both reduces the spatial size of images to be processed and the non-homogeneity of the borders of background. (ii) Second step evaluates the position of the pot from the image acquired without plant. (iii) Third step is included in a loop for the processing of the 360 images. Each image is decomposed into two regions: a large region where the background is a blue background and a smaller region corresponding to what is in front of the black pot and the turntable. In the region with the blue background, segmentation by thresholding on the blue channel of original RGB image separates the branches (but not robustly the flowers) of the plant from the background, providing a binary mask for this first region. For the region with the pot and turntable, the algorithm computes a changing of color space from RGB to HSV where the channel "Hue" is selected because branches in front of the pot and turntable have a higher hue level than the pot and the turntable. This is followed by a thresholding segmentation and a non-linear filtering on binary image by succession of morphological operations such as erosion/dilation to eliminate spurious isolated pixels remaining. This provides a binary mask for this second region. The binary mask of all branches is then rebuilt by combining the binary masks obtained for the two regions. For the detection of flowers, the RGB image is transformed into YIQ image. The intensity channel is selected since it presents the best contrast among the tested color space (RGB, YIQ and HSV) between the flowers and the rest of the image. Segmentation by thresholding is applied to this channel to obtain a binary mask of the flowers. The reconstruction of the complete binary mask of the plants: plant binarized images (PBI) is the addition of the binary mask of the branches and the binary mask of the flowers. With such a binary mask, the algorithm both computes a binary mask of the plants with filled holes into the branches: plant filled images (PFI) and a binary mask of the convex hull of the plants: plant convex hull images (PCI).

From there, image features were then extracted to implement various morphometric descriptors (MD) as introduced by Garbez et al. (2016), *i.e.* using descriptive statistics of image features along plant rotation considering PBI, PCI and PFI, some based on sub-regions sampling defined with symmetry axes, and then for flower masks (**Figure 1**). The plant base was always the lowest point for virtual rose bushes (presented without pot). With real ones it has to be defined as the top of pot center; however axes may still be under this point. Thus

features previously proposed were adapted and completed with a dissociation made for this aspect. For the flower mask, features considered here were the number of isolated groups of pixels assigned to flowers; the average, quantiles, the standard deviation and the cumulated area of their surface. As proposed by Santagostini et al. (2014), the area ratio of the flowers' surface to the plant surface was also extracted, and then as for the features obtained from the complete plant masks, the corresponding MD variables were computed with descriptive statistics of the measurements along plant rotation.

2.3. Statistical analysis

According to two separate investigations, data management and statistical analyzes were conducted under the R environment (R Development Core Team 2015) with additional functions from additional packages mentioned thereafter.

The first investigation, conducted using the *caret* package (Kuhn 2008; 2016), concerned the main objective of the present paper: testing the predictive modeling of the sensory attributes scores with MD on real rose bushes. It used the 171 videos available for the three natural condition stages. Sensory attribute variables were defined as the average score of the panelists by product and analyzed conjointly with the MD. For assessing the relevance of the MD as predictors, the analysis was based respectively for calibration and validation of the models, on a 2:1 ratio random sampling within all the nine pairwise crossed conditions (stage \times shading).

In a first approach, links between the sensory attribute variables and the MD were first evaluated with the Spearman's correlation coefficient (r_s) to detect eventual monotonic relationships from the calibration dataset. Then prediction of the sensory attributes variables was tested with simple linear regression through ordinary least squares (OLS), the most common and simple regression method (Kuhn and Johnson 2013; Næs et al. 2011) using the MD as potential predictors one by one and without any stage- or shading-based parameters. Goodness of fit was evaluated with the traditional coefficient of determination and lack of fit with the root mean square error for the entire calibration data (respectively R^2 and RMSE), and through 10-10 folds cross-validation (respectively R_{CV}^2 and, $RMSE_{CV}$). Coefficient of determination and root mean square error of prediction computed from the validation dataset (respectively Q^2 and RMSEP) were then used to assess the predictive ability of the models with unknown data. Common transformations (power, root, log, exponential and inverse) and normality supervised power-transformation of Yeo-Johnson were applied to the predictors

(Yeo and Johnson 2000) with the aim to better satisfy required linear modeling assumptions (Kuhn and Johnson 2013) while exploiting more deeply the data still using a relatively simple modeling approach. This analysis was conducted on the plants from the three pooled stages, only with the features obtained from the complete plant mask over 45 plant facets (8° interval) as previously tested for virtual plants.

Secondly, the potential of the MD obtained from the masks of the flowers and the image number effect for the prediction of the sensory attribute related to flowering were separately analyzed using plant videos at S1 and S3 (no flower detected for S2). For this second step, modeling was conducted with the flowering specific MD computed from 120 images (3° interval, the same used for video edition), then 45, 15, 3, and finally only one facet. For the one facet test, thus only one value per image feature extracted was available; the image selected was the largest plant facet as done in related studies (Boumaza et al. 2010; Huché-Thélier et al. 2011; Santagostini et al. 2014), and preferred for simplicity (pers. com. R. Boumaza).

For the second objective: assessing the macroscopic effects of defoliation on plant before its digitizing, the analysis was conducted with the 54 videos made with the plants which were imaged before and after manual defoliation during the third stage: 27 S3D videos, and the 27 corresponding S3 videos just before defoliation. Effect of the defoliation on plant architecture was assessed for each sensory attribute with average scores of the panelists per plant compared with paired data tests. Tests used were performed using the *stats* package functions using the Student's *t*-test (Welch's adaptation for unequal variances) or the Wilcoxon signed-rank test (with continuity correction in the normal approximation for the *p*-value) if the Shapiro-Wilk test rejected the normality hypothesis with error level $\alpha = 0.05$.

3. Results and discussion

3.1. Predictive modeling

For each sensory attribute excepted for quantity of 'Fruits', high to very high significant correlations were found with many MD from the plant binary masks (r_s ranging from 0.7 to 0.94 in absolute value; **Table 1**). Cross-validations did not highlight specifically overfitted models, however the models minimizing RMSEP reported were not necessarily based on the most correlated MD. For dimensions (width, volume, and height), habit, density, leaf, flower and branching quantity related attributes, minimizing RMSEP models explained rather quite a large amount of the response variables (both R^2 , R^2_{CV} and $Q^2 > 0.7$).

Table 1

Sample statistics for the sensory attributes and ordinary least square models from plant binary mask morphometric descriptor minimizing the root mean square error on the validation dataset (RMSEP). The first row for each attribute concerns the calibration dataset ($n = 117$ plant videos); the second is for the validation dataset ($n = 54$ plant videos).

Sensory attribute and average score per video statistics				Model calibration			Cross-validation ⁴		
Code	Anchor scores	Range ¹	Mean \pm SD ¹	Transformation ² , morphometrical descriptor ³	r_s	R^2	RMSE	R_{CV}^2 Q^2	RMSE _{CV} RMSEP
Width	1: thin	[3.1 : 8.8]	6.0 \pm 1.3	YJ, Max. - Area of plant left part on PCI	0.89	0.72	0.71	0.75 \pm 0.09	0.70 \pm 0.13
	10: wide	[2.1 : 8.7]	5.9 \pm 1.4					0.84	0.55
Volume	1: small	[2.2 : 8.6]	5.8 \pm 1.7	YJ, Med. - Perimeter of plant outline	0.93	0.87	0.62	0.88 \pm 0.05	0.62 \pm 0.10
	10: large	[1.8 : 9.1]	5.7 \pm 1.9					0.90	0.57
Habit	1: spreading	[1.6 : 8.3]	5.1 \pm 1.2	Raw, Min. - Angle between plant base horizon and top right corner of the bounding box	0.85	0.79	0.57	0.80 \pm 0.11	0.56 \pm 0.16
	10: upright	[1.6 : 7.9]	4.9 \pm 1.3					0.80	0.59
Height	0: small	[2.1 : 9.1]	5.9 \pm 1.7	Log, Max. vertical distance between plant base and top	0.89	0.83	0.70	0.84 \pm 0.08	0.69 \pm 0.15
	10: tall	[2.1 : 9.2]	5.6 \pm 1.7					0.87	0.62
Density	1: loose	[1.6 : 9.0]	4.8 \pm 1.8	YJ, Range - Plant area ratio (PBI / PFI)	-0.84	0.74	0.91	0.74 \pm 0.12	0.90 \pm 0.17
	10: dense	[1.8 : 8.4]	4.9 \pm 1.8					0.85	0.68
Balance	1: unbalanced	[1.8 : 8.4]	5.0 \pm 1.6	YJ, CoV. - Area of plant right part on PBI	-0.75	0.58	1.02	0.60 \pm 0.17	1.01 \pm 0.19
	10: balanced	[1.8 : 8.5]	4.9 \pm 1.7					0.70	0.91
Carriers	0: no carrier axis	[2.1 : 7.9]	5.1 \pm 1.4	YJ, Max. - Area of plant above base part on PFI	0.80	0.62	0.89	0.65 \pm 0.14	0.88 \pm 0.17
	10: high amount of.	[2.2 : 8.1]	5.1 \pm 1.6					0.66	0.93
Flowers	0: no open flower	[0.0 : 8.9]	2.6 \pm 2.8	Sqrt, Med. - Area of plant under base part on PFI	0.88	0.84	1.13	0.86 \pm 0.09	1.11 \pm 0.31
	10: high amount of.	[0.0 : 7.5]	2.4 \pm 2.6					0.87	0.94
Branching	0: no branch	[2.1 : 8.2]	5.2 \pm 1.9	YJ, Max. - Area of plant above base part on PFI	0.87	0.73	0.96	0.75 \pm 0.10	0.96 \pm 0.16
	10: high amount of.	[1.8 : 8.1]	5.2 \pm 1.9					0.72	1.00
Leaves	0: no leaf	[0.0 : 8.5]	3.4 \pm 2.8	YJ, Mean - Area of the closed holes (PFI-PBI) relative to the total number of holes (PCI-PFI)	-0.90	0.85	1.06	0.87 \pm 0.07	1.05 \pm 0.24
	10: high amount of.	[0.0 : 8.4]	3.5 \pm 2.9					0.86	1.07
Fruits	0: no fruit	[0.2 : 8.1]	3.2 \pm 2.1	Raw, Min. - Area of the closed holes (PFI-PBI)	0.40	0.42	1.60	0.47 \pm 0.21	1.59 \pm 0.35
	10: high amount of.	[0.6 : 8.0]	3.4 \pm 2.1					0.49	1.46

1: Values computed from average scores of the 20 trained panelists for sensory profile of the videos.

2: YJ: Yeo-Johnson power transformation; Sqrt: Square root transformation.

3: PBI: Plant Binarized Image; PFI: Plant Filled Image; PCI: Plant Convex Hull Image; CoV: Coefficient of Variation.

4: Values computed on calibration dataset are mean \pm standard deviation computed from 10 repeats of 10-fold cross-validation (CV).

Nonetheless, all the models except for ‘Fruits’ presented an acceptable accuracy on calibration and also validation datasets (maximum error indices < 1) especially for ‘Volume’ with error of 7.8% (normalized RMSE to response range), while the worst were for carriers and branching (RMSEP = 0.93 and 1.00 respectively) leading to prediction errors of 15.9 and 16.0% (**Table 1**). Interestingly, most of the relations reported were not linear, however few seem tightly specific. For instance, for ‘Height’, our model was rather consistent with that formerly presented in Garbez et al. (2016), but log transformation better linearized the relation and led to Q^2 increasing from 0.83 to 0.87, and NRMSEP decreasing from 10.1 to 8.8%. Also, in general, it was noteworthy that Yeo-Johnson (YJ) normality-supervised power transformation yielded to better results. For the ‘Width’, mean width of the bounding box ($r_s = 0.91$) did not outperformed the measurement of the YJ area of plant left part on PCI. While plant MD enabled us to report an acceptable model for ‘Flowers’, similar models were reported for ‘Branching’ and ‘Carriers’, closely related by essence, but none was satisfying for the fruits. This was not expected for the flowers, nonetheless this reflects again that the number of flowers is tightly associated with the plant vegetative development level (Garbez et al. M1). For fruits, no specific image feature was designed since this specific segmentation seems unfeasible with the color information and image analysis methods tested up to now.

Therefore, plant 3D reconstruction does not seem to be particularly needed for instance. However, as demonstrated with the virtual material (Garbez et al. 2016), multivariate models including several MD with feature selection algorithms may be more relevant and accurate (Kuhn and Johnson 2013; Nøes and Kowalski 1989; Silva et al. 2013). Nonetheless image acquisition and processing may strongly benefit from both RGB and depth data sensors as proposed by Chéné et al. (2016). Indeed, coupled with color, depth information represent a valuable way to ease, at least, plant segmentation from the background, the turntable, the pot and the different organs, but also for testing depth-based descriptors giving access to the 3D of the plant facets. Even less important than flowers during growth, fruits are also decorative for numerous ornamental plants. To the best of our knowledge, plant part characterization with 2D image features at the organ-scale is well documented. This is especially true for flowers and leaves of numerous plant species, and for fruits and vegetables for which detection and characterization by remote sensing is also feasible with good accuracy (Gongal et al. 2015; Horgan 2001; Kawabata et al. 2009; Moreda et al. 2012; Ruiz-Altisent et al. 2010). However within entire ornamental plant products, fruit detection and characterization issues have not been addressed yet. Thus this need, not especially for the fruits but for all the organs at their own scale, represents another challenge

to be addressed for non-destructive plant multiscale image-based phenotyping tools (Rousseau et al. 2015).

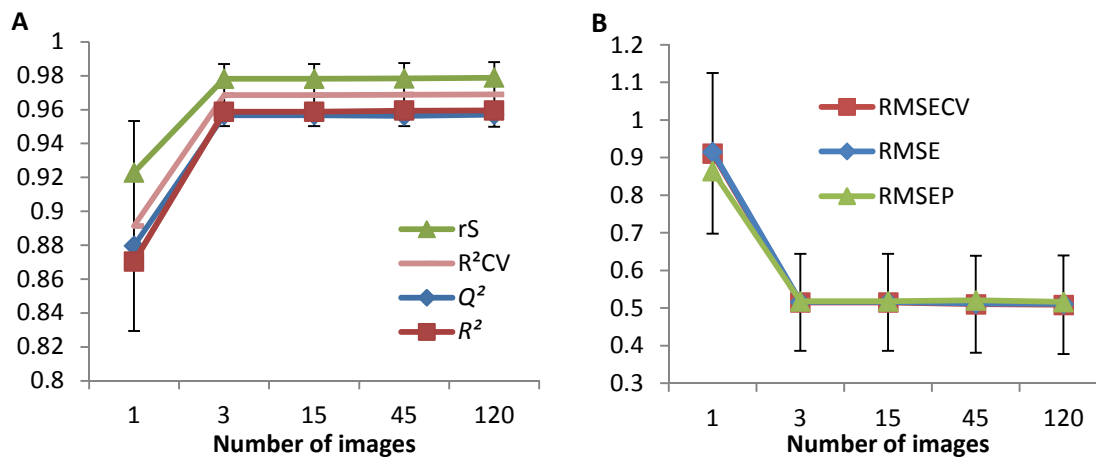


Figure 2. ‘Flower’ sensory attribute model performance for the morphometrical descriptor “mean of the cumulated area of the pixels assigned to flowers (square root transformation)” according to the number of images considered for its computing, tested for videos presenting leafy plants ($N = 114$ plant videos from stage 1 and 3): (A) Concordance indices, spearman correlation (r_s) and coefficient of determinations (R^2 for calibration with $n = 78$ plant videos, and Q^2 for validation with $n = 36$), (B) Root mean square error (RMSE) indices. Error bars indicate standard deviations computed from 10 repeats of 10-fold cross-validation (CV) on the calibration dataset.

Unsurprisingly, for ‘Flowers’ the MD computed from flower masks led to quite better models. Interestingly, whatever the number of images used, it was the same MD which provided the best model with the lower RMSEP (Figure 2). Indeed, the “mean of the cumulated area of the pixels assigned to flowers (linearized by square root transformation)” provided models with R^2 ranging from 0.87 to 0.96 and similar Q^2 . Nonetheless while model statistics were not much contrasted between the MD computed from 3 to 120 images, results highlighted that prediction for ‘Flowers’ is quite enhanced with more than only one image. Indeed models obtained with 3, 15, 45 and 120 images all presented a reduced error of prediction by near the half decreasing RMSEP normalized to the variable response range from 10.4% to 6.2%. Moreover with the largest facet only, both R^2_{CV} and $RMSE_{CV}$ presented the highest standard deviations strengthening that for precision and robustness, more than one images should be considered. As it is also mentioned by Harmsen et al. (2009) for developing multi-target tracking algorithm counting flowers, or for enhancing manual and automated plant grading (Kohsel 2001; Kohsel and Bennedsen 2001), taking into account several facets of the plants is especially recommended. At least, the present study demonstrated it robustly with an image analysis-based model for assessing the flower quantity perception through a sensory profile approach.

3.2. Effect of defoliation

Table 2

Visual characterization of rose bushes before and after plant defoliation for the sensory attributes not related to leaves. Bold values highlight attributes for which significant differences ($\alpha = 0.05$) were not detected.

Sensory attribute	Before ¹	After ¹	Variation ²	<i>P</i> -value ²
Fruits	2.3 ± 0.3	4.1 ± 0.3	2.1	5.9E-06
Density	5.6 ± 0.4	3.9 ± 0.3	-1.6	5.9E-06
Volume	7.3 ± 0.2	6.5 ± 0.2	-0.7	7.1E-12
Habit	4.9 ± 0.2	5.4 ± 0.2	0.5	8.7E-06
Width	7.3 ± 0.1	6.8 ± 0.2	-0.5	4.5E-11
Balance	5.4 ± 0.3	5.8 ± 0.3	0.4	7.2E-05
Branching	6.3 ± 0.3	6.0 ± 0.3	-0.4	4.6E-04
Carriers	5.9 ± 0.2	5.7 ± 0.3	-0.2	9.3E-03
Flowers	5.8 ± 0.4	5.7 ± 0.5	-0.2	2.6E-01
Height	6.8 ± 0.2	6.8 ± 0.2	0.0	9.2E-01

1: Values are mean ± standard error of $n = 27$ plants assessed in rotation on videos made 15 months after cutting through a sensory profile made with 20 trained subjects. Plants used came from three shading conditions (under nets with 55%, 75% of shading, and 0% as control without shading net).

2: *P*-values and variations are reported according to paired tests: Student's *t*-test (Welch's adaptation for unequal variances *t*-test); or Wilcoxon (continuity correction method) if the normality assumption was not satisfied (Shapiro-Wilk's test at the 0.05 threshold).

Except for “Flowers” and ‘Height’ sensory attributes, plant defoliation implied highly significant perception modifications (**Table 2**; *p*-values at least under 1%). Major impact was for the fruits which were more visible without leaves. Scores for density and volume as expected were also reduced. Also, without leaves, the panel perceived the plants as more balanced, maybe since leaves were not regularly distributed within the plants; and as less ramified (carriers and branching), maybe because panelists overestimated the quantity of axes when the plants presented leaves. Nonetheless, most critical impacts were for habit and width. Foliar mass removal reduced the bending of non-orthotropic axes and this was effectively perceived by the panel which characterized the defoliated plants as thinner, more erected, but not taller. Thus, for studies related to plant shape and growth habit, defoliation before architecture digitizing, whatever the methods used, should not be recommended. However, plant architecture models presented in Garbez et al. (M1) included for S3 plants the measurements obtained on defoliated plants stored in cold chamber up to two months. Therefore, in such studies, it is at least recommended to collect leaf data characteristics during or in parallel of stem digitizing, thus enabling deeper analysis including visual, metric, and mass leaf characteristics within plant virtual models as recently addressed for the rose bush (Demotes-Mainard et al. 2013; Gao et al. 2012)

4. Conclusion and perspectives

Even with real plants presenting rather larger phenotypic diversity, image analysis of several plant facets to compute the morphometrical descriptors proposed by Garbez et al. (2016) is an efficient way to establish rather good to acceptable predictive models for most of the visual traits considered. The various states of the plants throughout their development can be integrated implicitly and first investigations for the flower quantity perception modeling stressed that a limited number of images, here 3, each interspaced by 120° provided consistent results with those obtained from the processing of larger image sequences. Thus, such automation possibility represents an interesting approach for assessing ornamental plant visual appearance in relation to architecture plasticity. However, for the sake of precision, multivariate models may be necessary to obtain better predictive models. In contrast for both predictive and explicative modeling purposes, expert knowledge, feature selection algorithms as other regression methods assuming either linear and non-linear modeling with large predictor numbers is thus recommended for selecting the most explicative and relevant features in relation to the plant material studied, experimental conditions and objectives.

Finally, as hypothesized along related previous studies (Garbez et al. 2016; 2015), merging instrumental methods related to sensory analysis evaluation and virtual plant models implemented from architectural data, including leaf visual and physic characteristics, may thus result into a powerful integrated methodology to study consumer preferences of today and tomorrow with an innovative and scientific visual quality management approach.

References

- Barthélémy, D., & Caraglio, Y. (2007). Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99(3), 375-407.
- Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., & Guérin, V. (2009). Visual characterization of the esthetic quality of the rosebush. *Journal of Sensory Studies*, 24(5), 774-796.
- Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Demotes-Mainard, S., Le Coz, E. L., Nathalie, Pelleschi-Travier, S., Qannari, E. M., . . . Guérin, V. (2010). Sensory profiles and preference analysis in ornamental horticulture: The case of the rosebush. *Food Quality and Preference*, 21(8), 987-997.
- Chéné, Y., Rousseau, D., Belin, É., Garbez, M., Galopin, G., & Chapeau-Blondeau, F. (2016). Shape descriptors to characterize the shoot of entire plant from multiple side views of a motorized depth sensor. *Machine Vision and Applications*, 27(4), 447-461.
- Crespel, L., Le Bras, C., Relion, D., & Morel, P. (2014). Genotype × year interaction and broad-sense heritability of architectural characteristics in rose bush. *Plant Breeding*, 133(3), 412-418.
- Crespel, L., Sigogne, M., Donès, N., Relion, D., & Morel, P. (2013). Identification of relevant morphological, topological and geometrical variables to characterize the architecture of rose bushes in relation to plant shape. *Euphytica*, 191(1), 129-140.
- Demotes-Mainard, S., Bertheloot, J., Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Guéritaine, G., Guérin, V., & Andrieu, B. (2013). Rose bush leaf and internode expansion dynamics: analysis and development of a model capturing interplant variability. *Frontiers in Plant Science*, 4(418).
- Gao, M., Van der Heijden, G., Vos, J., Eveleens, B. A., & Marcelis, L. F. M. (2012). Estimation of leaf area for large scale phenotyping and modeling of rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 138, 227-234.
- Garbez, M., Chéné, Y., Belin, É., Sigogne, M., Labatte, J. M., Hunault, G., . . . Galopin, G. (2016). Predicting sensorial attribute scores of ornamental plants assessed in 3D through rotation on video by image analysis: a study on the morphology of virtual rose bushes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 331-346.

- Garbez, M., Galopin, G., Sigogne, M., Favre, P., Demotes-Mainard, S., & Symoneaux, R. (2015). Assessing the visual aspect of rotating virtual rose bushes by a labeled sorting task. *Food Quality and Preference*, 40(Part B), 287-295.
- Godin, C. (2000). Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science*, 57(5), 413-438.
- Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., & Lewis, K. (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 8-19.
- Harmsen, S. R., & Koenderink, N. J. J. P. (2009). Multi-target tracking for flower counting using adaptive motion models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(1), 7-18.
- Horgan, G. W. (2001). The statistical analysis of plant part appearance—a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(2), 169-190.
- Huché-Théliier, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., & Guérin, V. (2011). Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 325-334.
- Kawabata, S., Yokoo, M., & Nii, K. (2009). Quantitative analysis of corolla shapes and petal contours in single-flower cultivars of lisianthus. *Scientia Horticulturae*, 121(2), 206-212.
- Kohsel, L. (2001). New unsupervised approach for solving classification problems with computer vision. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 562, 361-375.
- Kohsel, L., & Bennedsen, B. S. (2001). Performance of human experts grading pot roses in a commercial environment. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 562, 273-283.
- Kuhn, M. (2008). Building predictive models in R using the caret package. *Journal of Statistical Software*, 28(5).
- Kuhn, M. (2016). caret: Classification and Regression Training (Version 6.0-68). Retrieved from <http://cran.r-project.org/package=caret>
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling*. New York, USA: Springer.
- Li-Marchetti, C., Le Bras, C., Relion, D., Citerne, S., Huché-Théliier, L., Sakr, S., . . . Crespel, L. (2015). Genotypic Differences in Architectural and Physiological Responses to Water Restriction in Rose Bush. *Frontiers in Plant Science*, 6(355).
- Moreda, G. P., Muñoz, M. A., Ruiz-Altisent, M., & Perdignes, A. (2012). Shape determination of horticultural produce using two-dimensional computer vision – A review. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 245-261.
- Næs, T., Brockhoff, P., & Tomic, O. (2011). *Statistics for sensory and consumer science*: John Wiley & Sons.
- Næs, T., & Kowalski, B. (1989). Predicting sensory profiles from external instrumental measurements. *Food Quality and Preference*, 1(4-5), 135-147.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from gray Level histogram. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 9, 62-66.
- R Development Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing (Version 3.2.3). Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org/>
- Rousseau, D., Chéné, Y., Belin, E., Semaan, G., Trigui, G., Boudehri, K., . . . Chapeau-Blondeau, F. (2015). Multiscale imaging of plants: current approaches and challenges. *Plant Methods*, 11(1), 6.
- Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Garcia, L., Moreda, G. P., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E. C., . . . García-Ramos, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 176-194.
- Santagostini, P., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliier, L., Leduc, N., Bertheloot, J., Guérin, V., . . . Boumaza, R. (2014). Assessment of the visual quality of ornamental plants: Comparison of three methodologies in the case of the rosebush. *Scientia Horticulturae*, 168, 17-26.
- Silva, L., Koga, M. L., Cugnasca, C. E., & Costa, A. H. R. (2013). Comparative assessment of feature selection and classification techniques for visual inspection of pot plant seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 47-55.
- Yeo, I. K., & Johnson, R. A. (2000). A new family of power transformations to improve normality or symmetry. *Biometrika*, 87(4), 954-959.

Conclusion

I. Caractérisation de l'apparence visuelle

Dans la continuité des travaux initiés par l'équipe Arch-E, cette thèse met en avant toute la pertinence que présentent les méthodes d'analyse sensorielle pour objectiver l'étude de la qualité visuelle des plantes d'ornement. Ces méthodes peuvent s'appliquer à différentes échelles d'observation, sous différentes conditions environnementales, et à différents stades de développement.

L'élément novateur et majeur apporté et défendu dans cette thèse pour cette partie, repose essentiellement sur l'utilisation d'un support pertinent et adéquat pour la caractérisation visuelle des plantes d'ornement, réelles ou générées par un modèle « plante virtuelle ». Pour la caractérisation visuelle par analyse sensorielle et sa substitution par l'analyse d'image, outre les avantages que permet l'utilisation des plantes virtuelles en termes d'expérimentation et de prospectives, les résultats mettent en relief tout l'intérêt de prendre en compte la configuration 3D de l'architecture des plantes, avec ses variations à l'intérieur et entre les lots.

En effet, les particuliers ne recherchent pas la qualité du lot duquel les plantes proviennent, mais la qualité d'une plante en elle-même. En revanche, les producteurs vont chercher à former des lots de plantes les plus uniformes possibles au regard de quelques critères ou standards (Boumaza et al. 2010, Brons et al. 1993, Demotes-Mainard et al. 2013a, Dijkstra et al. 1997, Timmermans & Hulzebosch 1996). Pour l'agrégage manuel ou automatisé, le tri des plantes est significativement améliorable si les opérateurs ou les capteurs d'images peuvent évaluer la plante sur plusieurs de ses facettes (Kohsel 2001, Kohsel & Bennedsen 2001, Timmermans 1998, Timmermans & Hulzebosch 1996). Dans notre cas, pour la caractérisation visuelle objective de plusieurs composantes par profil sensoriel, les résultats obtenus ici montrent qu'il est également pertinent de présenter les plantes en rotation à l'aide de la vidéo.

Le support vidéo, en plus d'obtenir une présentation standardisée des plantes pour tous les sujets, comme avec les photographies, semble permettre une meilleure représentation mentale des plantes et donc d'évaluer plus fidèlement leur configuration tridimensionnelle. Pour compléter ces résultats, la réalisation d'une expérience impliquant la caractérisation visuelle de plantes présentées via différents supports, sans exclure la plante réelle, manipulable à souhait par les sujets, constituerait une approche robuste pour mieux choisir la présentation la plus adaptée. Pour autant, au regard des objectifs visés, la comparaison de

profils sensoriels réalisés sur de mêmes plantes mais avec différents moyens de présentation reste encore inabordée.

En effet, pour évaluer visuellement la durée de vie des salades de fruits, en soulignant que la nourriture possède une structure tridimensionnelle, Manzocco et al. (2012) ont démontré que la caractérisation des consommateurs sur des images simples en 2D était bien moins précise qu'une évaluation directe. Ils supposent ainsi que l'utilisation de plusieurs images, ou d'une représentation 3D, est nécessaire pour obtenir des résultats plus conformes à la réalité. Néanmoins, en vue de simplifier et d'automatiser cette évaluation, ils ont montré que des mesures obtenues sur les images 2D permettaient de définir des indices de qualité suffisamment cohérents avec l'évaluation réalisée sans support intermédiaire.

Plus proche de notre problématique, pour l'agrégation automatisée des plantes d'ornement, la contrainte réside dans la mise au point de systèmes à très haute cadence. Ainsi, certaines études se sont focalisées sur l'obtention de mesures sur image peu variables en fonction de la rotation des plantes pour limiter la quantité d'information à traiter (Dijkstra & Meuleman 1998, Dijkstra et al. 1997, Meuleman & Dijkstra 1998). Dans cette thèse, l'approche novatrice mais simple permettant d'intégrer l'anisotropie des différentes facettes des plantes à partir de plusieurs statistiques descriptives des mesures réalisées sur les séquences d'images semble quant à elle tout à fait pertinente pour la prédiction de caractéristiques visuelles déterminées préalablement lors d'un profil sensoriel. En effet, parmi l'ensemble des variables générées grâce aux mesures sur les séquences d'images, l'étude des corrélations et les modèles prédictifs confirment l'intérêt de disposer de descripteurs reflétant à la fois la tendance et la dispersion de ces mesures au cours de la rotation. En effet, les résultats montrent notamment qu'en dessous de trois images traitées, les prédictions sont relativement plus erronées pour reproduire la perception de la quantité de fleurs.

Quoi qu'il en soit, cette approche semble particulièrement prometteuse et robuste, notamment pour la prédiction de caractéristiques sur la plante entière. Cependant, pour les caractérisations à l'échelle des organes, notamment pour les feuilles et les fruits, cela semble moins évident, mais pour deux raisons bien distinctes. Pour les feuilles, comme avec la présentation des plantes sur photographies (Boumaza et al. 2010, Huché-Thélier et al. 2011), il est difficile de discerner les bourgeons, la forme des pétales, les caractéristiques foliaires etc. Dans le profil sur photographies présenté par Huché-Thélier et al. (2011), les sujets ont atteint un consensus suffisant pour la taille des feuilles, mais insuffisant pour leur couleur, et le nombre de feuilles jaunies. Sur les vidéos, les résultats présentés confirment également qu'il est plus difficile pour les sujets d'évaluer les nuances de couleurs des feuilles et leur

taille. Différentes hypothèses non exclusives peuvent être proposées pour identifier la cause de cette moins bonne performance des sujets : du fait de la configuration de la scène, *i.e.* inchangée en fonction de l'évolution des plantes ; du nombre plus important de feuilles sur les plantes étudiées ; de l'hétérogénéité de l'intensité lumineuse au sein des plantes, variable entre elles selon leur architecture, mais aussi potentiellement tout au long de la rotation ; ou encore de la rotation de la plante qui impose aux sujets de suivre quelques organes en mouvement. Pour les fruits, aux couleurs et aux textures plus variables (vert, à orange, puis noir, et plus ou moins anhydres), bien que l'évaluation de leur quantité n'ait pas posé de problèmes pour les sujets et a montré sa cohérence avec les relevés architecturaux, aucun des traitements d'image testés pour le moment n'a permis de les segmenter spécifiquement du reste des autres organes. Pour de telles caractéristiques, à défaut d'arriver à un meilleur consensus entre les sujets par des entraînements plus poussés, on peut supposer qu'une présentation statique des organes plutôt que de la plante dans son ensemble serait peut-être plus appropriée.

Par conséquent, d'autres alternatives de présentation peuvent être testées en parallèle. Il est envisageable par exemple de réaliser une double caractérisation : **(i)** à l'échelle de la plante entière sur vidéo pour les dimensions (largeur, hauteur, volume), la forme (port, équilibre, symétries, aspect de compacité), la texture (intensité ou quantité de ramifications, nombre de feuilles, de fleurs, la densité des organes, leur regroupement, etc.) ; puis **(ii)** à l'échelle des organes, sur la base d'un échantillonnage des organes prélevés dans des conditions standardisées et présentés en images 2D sous forme de « planches » par exemple. Sur cet aspect, les méthodes développées pour l'analyse d'image des organes de végétaux (Brosnan & Sun 2002, 2004, Horgan 2001, Moreda et al. 2012) constitueraient une base intéressante pour mettre en relation les mesures sensorielles et les mesures sur image de ces organes. Par exemple l'analyse d'image de fleurs ou de feuilles pour les tests DUS chez le rosier et chez d'autres espèces est particulièrement adaptée à la caractérisation et à la distinction des cultivars sur les organes (Lootens et al. 2007, Zhang & Gandelin 2003). Encore récemment, chez l'azalée, De Keyser et al. (2013) ont réussi à détecter des *loci* intervenant dans le déterminisme de traits quantitatifs (QTL) de la couleur des feuilles et des fleurs, et la morphologie des feuilles évaluées à l'aide de mesures sur images. Ces méthodes doivent alors pouvoir s'appliquer à la prédiction de mesures sensorielles obtenues sur ces organes également.

Pour autant, on remarque que même pour l'étude des organes, l'utilisation d'une à plusieurs images 2D par des capteurs RGB, éventuellement couplés à de nouveaux types de

capteurs permettant d'obtenir des informations de profondeur et donc des mesures 3D directement, est aussi encouragée pour prendre en compte la structure tridimensionnelle des fruits, des légumes, et pour ce qui nous concernent plus, des fleurs (Hemming et al. 2010, Kawabata et al. 2009, Moreda et al. 2009, Wang & Li 2014).

L'apport que peuvent présenter les informations de profondeur, outre une précision plus accrue des dimensions et une intégration de la structure tridimensionnelle, repose sur la facilitation du traitement des images obtenues. En effet, dans notre situation, l'automatisation du traitement préalable des images, relativement simple sur les plantes virtuelles, reste une tâche non triviale et ardue sur les plantes réelles, qui peut être limitante quant à la caractérisation de certains organes, voire entraîner un plus ou moins grand taux d'erreur de détection, et donc un biais dans les mesures plus ou moins estimable selon les références considérées.

Ce besoin d'améliorer les systèmes de phénotypage reposant sur la vision informatisée est loin d'être spécifique à la caractérisation visuelle des plantes d'ornement comme l'atteste la recrudescence de capteurs et de méthodes en vue d'obtenir une reconstruction 3D des plantes, externe, voire interne (Chaivivatrakul et al. 2014, Cheng et al. 2007, Chéné et al. 2012, Delagrangé & Rochon 2011, Fourcaud et al. 2008, Gibbs et al. 2016, Lou et al. 2014a, 2014b, Phattaralerphong & Sinoquet 2005, Sozzani et al. 2014). En parallèle, la quantité de données à gérer et la puissance de calcul nécessaire représentent quant à elles un véritable défi pour ouvrir la voie du phénotypage haute-précision et haut-débit des végétaux à l'architecture complexe.

En ce sens et pour clore ce premier axe de discussion, certaines perspectives d'améliorations pour l'acquisition d'images et les mesures sont illustrées en **Annexe I** au travers de l'étude de Chéné et al. (2016) à laquelle j'ai participé en tant que co-auteur : « *Shape descriptors to characterize the shoot of entire plant from multiple side views of a motorized depth sensor* » parue dans la revue *Machine Vision and Applications*. Cette étude présente notamment une illustration concrète du potentiel que permet un système à « bas coût » composé d'un capteur de profondeur couplé à un capteur RGB et d'un plateau tournant motorisé, introduit par Chéné et al. (2012) sur tige non ramifiée de rosier, et présentement appliqué sur diverses plantes plus complexes.

II. Caractérisation de l'architecture

Le développement architectural et la plasticité phénotypique des buissons ligneux au cours de leur cycle de vie restent peu étudiés. Quelques études ont évalué la plasticité de différentes espèces arbustives à buissonnantes en conditions naturelles (Charles-Dominique 2012, Charles-Dominique et al. 2010, 2012, Kawamura & Takeda 2002). Par exemple, pour s'adapter aux gradients d'intensité lumineuse, le nerprun cathartique (*Rhamnus cathartica* L.) et le cornouiller soyeux (*Cornus sericea* L.) présentent en fonction de leur ontogénie des stratégies de développement architecturale différenciées, plus plastiques que les espèces arborescentes, conférant un avantage compétitif supérieur pour l'exploration et la colonisation de leur milieu.

Cette thèse au regard de son objectif principal, reste par conséquent limitée quant à l'étude approfondie de la construction architecturale au cours du cycle de vie du buisson ligneux, et des processus sous-jacents.

En revanche, les résultats confirment l'importance chez le rosier du facteur lumière dans les processus de ramification, qui conditionnent le nombre d'axes et par extension le niveau de floraison chez les rosiers remontants. En effet, chez le rosier, il a été montré que la lumière est nécessaire pour enclencher des voies de biosynthèse des hormones (en particulier les cytokinines comme cibles initiales de la lumière) et des oses (en particulier le sucrose comme molécule signal) impliqués dans le débourrement ; et son intensité module l'organogénèse et l'extension des feuilles embryonnaires (Barbier et al. 2015, Girault et al. 2010, 2008, Leduc et al. 2014, Roman et al. 2016, Zieslin & Mor 1990). Plus spécifiquement, l'ombrage, induisant non seulement une diminution de l'intensité lumineuse, diminue aussi le ratio de lumière rouge/rouge lointain, connue pour moduler la croissance des plantes et l'orientation de leurs axes pour la compétition de l'espace chez de nombreuses espèces (Ballaré et al. 1990). En ce sens, une analyse plus approfondie serait notamment intéressante pour compléter l'étude exposée et confirmer les résultats chez le rosier et d'autres plantes sur la modification des profils de débourrement le long des axes (Abidi et al. 2013, Demotes-Mainard et al. 2016, Girault et al. 2010, 2008, Rajapakse & Kelly 1994) en relation avec l'apparence visuelle.

Pour l'objectif visé, l'analyse architecturale a néanmoins permis d'identifier, chez un cultivar de rosier buisson, certaines composantes majeures et pertinentes pour résumer l'architecture et sa plasticité à différents stades de développement face à un gradient lumineux. En effet, les quatre classes de longueur déterminées selon une approche

exploratoire ont permis de mettre en évidence un profil d'organisation topologique de la longueur des axes dont le déterminisme environnemental ne semble pas avéré.

La classe des axes les plus longs a notamment permis de différencier les axes identifiés comme portant les unités structurales retardées. D'un point de vue morphométrique, ces axes peuvent donc bien être appelés « réitérations ». Néanmoins, après l'ensemble des observations réalisées, il est notamment remarquable qu'au sein d'une plante, ces unités structurales retardées ne présentent pas la même importance, ni la même fonction. Après lignification, certaines vont rapidement devenir plagiotropes et plus ou moins courbées sous le poids des ramifications d'ordres supérieurs. En effet, comme l'indiquent les résultats expérimentaux avec le profil sur les plantes défoliées manuellement, la charge foliaire semble particulièrement impacter ce phénomène. D'autres bien que déjà très lignifiées restent néanmoins très orthotropes et présentent visiblement des ramifications de type relais sur des axes plus courts suggérant l'expression de structures pseudomonopodiales.

La typologie des axes selon leur longueur, définie au cours de la thèse, est pertinente pour différencier les types architecturaux identifiés chez le rosier 'Radrazz'. Néanmoins, elle ne permet pas d'identifier directement les axes issus des ramifications différées ou immédiates alors que nous savons que le nombre potentiel de métamères écailleux à la base des axes conditionne fortement le potentiel de ramification futur de la plante. L'identification de ces deux modes de ramification reste complexe car il existe un continuum morphologique entre la présence d'un hypodium et d'une importante zone de métamères écailleux. Au cours de la thèse, ce sujet ayant été souvent abordé, un travail complémentaire a été spécifiquement engagé en associant notamment un étudiant de niveau M1, encadré au cours de cette thèse. Cette étude montre qu'il est possible d'identifier précisément au moins les deux expressions extrêmes à l'aide de deux variables discriminantes que sont le nombre total de métamères de l'axe et la longueur moyenne des entre-nœuds de la zone basale de l'axe. Ces variables ont été identifiées à l'aide d'une analyse discriminante basée sur la construction d'arbres binaires selon la méthode « CART, Classification and Regression Tree ». L'ensemble de ces résultats obtenus par Liu-Ji Harada sont présentés en **annexe II**.

En sus de ces observations, l'analyse plus fine des données architecturales obtenues, notamment avec des méthodes multivariées intégrant leur dimension hiérarchique et multi-échelle, devrait permettre d'approfondir et d'étendre la compréhension du développement architectural d'un buisson. Pour cette problématique plus spécifique, l'approche statistique « HMT » : Hidden Markov Tree model (Durand et al. 2005) reposant sur le partitionnement des axes en catégories et la modélisation de leur probabilité d'apparition structurée au travers

de chaînes de Markov « cachées », présente des résultats préliminaires encourageants (non présentés). Cette approche sera très pertinente au regard des bases de données acquises au cours de cette thèse. Elle devrait permettre de faire des avancées significatives sur la compréhension des processus de développement de l'architecture du rosier et par extrapolation du modèle buisson au cours du cycle de vie de la plante. En outre, elles sont d'une grande valeur pour implémenter différents outils pour la modélisation « Structure – Fonction » (FSPM) du rosier (Buck-Sorlin et al. 2011, Demotes-Mainard et al. 2013a).

III. Relations entre l'architecture et l'apparence visuelle

L'apparence visuelle est obligatoirement associée à l'architecture de la plante mais la relation entre les deux n'est pas forcément implicite et n'a jamais fait l'objet d'un travail scientifique de façon exhaustive sans a priori. Les caractéristiques botaniques habituellement étudiées par les agronomes ou les botanistes ne sont pas nécessairement ou exclusivement celles qui impactent l'apparence visuelle et la perception du consommateur qui mobilise un éveil émotionnel et sensoriel. C'est pourquoi aborder ce sujet par une description fine de l'architecture avec l'identification de descripteurs sensoriels associés, dont la caractérisation est reproductible instrumentalement avec l'aide de l'analyse d'image, était ambitieuse mais nécessaire pour l'émergence de nouvelles méthodes scientifiques utiles pour accompagner les programmes de recherche dans les entreprises et les laboratoires de la filière de l'horticulture ornementale. En effet, les résultats mettent en avant de nombreuses possibilités de modélisation permettant d'aboutir à des prédictions relativement fiables et ouvrant un champ d'exploration large sur le choix des descripteurs et des méthodes statistiques à employer. Dans un souci de généralité, les modèles utilisés ont été évalués sur leur pouvoir prédictif avec un nombre de variables limité. Néanmoins, les résultats ne se limitent pas aux modèles proposés, aussi complexes soient-ils, mais soulignent l'importance de la méthodologie adoptée pour les obtenir, et pour *in fine* appréhender objectivement les relations entre l'architecture et l'apparence visuelle des plantes.

En dehors des améliorations concernant le traitement des images, l'analyse complémentaire des résultats en perspectives directes de ces travaux, doit se tourner vers différents aspects précis de chaque discipline abordée afin d'éprouver tout le potentiel de cette approche intégrative.

D'une part l'approfondissement des données sensorielles est primordial afin d'évaluer s'il est possible d'identifier plus précisément la cause des moindres performances en vue de dé-bruiter les descripteurs concernés. Dans un second temps, l'exploitation approfondie des

données architecturales, notamment via d'autres modules d'analyses proposés sous OpenAlea spécifiquement dédiés à l'analyse, la modélisation et la visualisation architecturale permettrait d'une part, vis-à-vis de l'objectif principal traité ici, de définir d'autres descripteurs architecturaux, par exemple basés sur la recherche d'enveloppes convexes 3D multiples selon la topologie des axes et leur métamères ; mais aussi de poursuivre l'identification plus précise des motifs architecturaux élémentaires et répétés, afin d'amender la réflexion concernant la transposition du cycle de vie d'un arbre selon les concepts d'unité architecturale et de sa répétition aux buissons. Parallèlement aux rosiers virtuels générés pour ces travaux, la base de données collectée ici représente quant à elle une excellente source pour implémenter de futurs modèles avec des objectifs similaires et bien d'autres.

L'étude des relations quant à elle peut d'une part s'orienter vers la recherche de modèles encore plus précis et les plus pertinents, puis vérifier leur transposition sous de multiples conditions, cela en vue de définir des méthodes automatisées de phénotypage. Néanmoins d'un point de vue académique et pratique, l'étude conjointe des données architecturales et des mesures obtenues par analyse d'images, en tenant compte ou non de leurs relations mutuelles avec les données sensorielles, serait avant tout bien plus pertinente vis-à-vis de la problématique.

En perspectives moins directes, il a été montré ici le potentiel de l'approche proposée sur un cultivar en fonction d'un gradient lumineux. Tester sa généralité sur des ensembles encore plus diversifiés reste néanmoins nécessaire pour conforter sa pertinence. En complément d'analyses génomiques et physiologiques, on peut notamment proposer son application sur différents cultivars, voire sur une population en ségrégation avec l'exposition ou non à un voire plusieurs gradients environnementaux. Pour autant, le phénotypage manuel de l'architecture bien que facilité d'un certain point de vue avec la digitalisation par contact en représente encore le frein majeur. C'est pourquoi les différentes études concernant l'architecture restent encore limitées par un ou plusieurs facteurs : la taille des échantillons, le niveau de développement des plantes étudiées, l'exhaustivité des mesures, et le nombre de conditions expérimentales. En ce sens, une attention particulière doit être accordée pour réduire le temps nécessaire à l'acquisition de données instrumentales fiables sur l'architecture des plantes soit par des méthodes automatisées, soit en proposant des simplifications des relevés effectués manuellement.

Une nouvelle approche dans les programmes de sélection

Avec les différentes approches proposées, la prise en compte des attentes des consommateurs devient désormais possible. La connaissance de l'espèce étudiée sur sa diversité génétique et des interactions génotype × environnement sont indispensables au regard des réponses contrastées, voire opposées entre les différents cultivars, notamment identifiées chez le rosier (Crespel et al. 2014, Li-Marchetti et al. 2015). Elle peut être complétée par la caractérisation visuelle des taxons pour disposer d'une évaluation complète du potentiel initial des ressources génétiques d'une collection d'accessions d'un genre avant d'engager un programme de sélection.

Dans cette perspective, et pour clore cette discussion, la partie qui suit expose l'intérêt des méthodologies proposées et leurs transpositions pour la proposition d'une démarche de management par la qualité des plantes, en particulier au travers d'un pool génétique large d'espèces, variétés, cultivars et hybrides expérimentaux du genre *Lagerstroemia* L., plus connu en particulier avec l'espèce souvent surnommée « lilas des Indes » : *L. indica* L..

Ce genre, rattaché également au modèle architectural de Champagnat (Hallé et al. 1978), illustre tout autant que les rosiers, si ce n'est plus, la large diversité qui peut résulter de ce modèle. Ainsi, d'un point de vue académique, la diversité et la plasticité architecturale observable au sein du taxon, des buissons rampants aux arbres à troncs multiples, constitue un matériel d'étude particulièrement intéressant pour comparer les stratégies buissonnantes ou arbustives et étudier le continuum qui les sépare. D'un point de vue appliqué, les lagerstroemias, plantes d'ornement relativement récentes en Europe, présentent de nombreux atouts qui justifient leur succès grandissant depuis plusieurs années en France. Sa diffusion initiale sur le territoire fut notamment possible grâce à un appui technologique et stratégique intense des Pépinières Desmartis au cours des années 70. Une brève rétrospective sur l'histoire des Pépinières Desmartis est nécessaire pour la compréhension de leur investissement actuel sur le genre *Lagerstroemia*.

Les Pépinières Desmartis trouvent leurs origines dans la seconde moitié du XIX^e siècle, au sein du jardin Perdoux, situées au centre-ville de Bergerac. M. André DESMARTIS a commencé des travaux de recherche, essentiellement tournés sur la sélection et l'édition de variétés ornementales du genre *Lagerstroemia*. Prolongés par son fils Jacques secondé par M. Hubert PUARD, et poursuivis par M. Christian CHAVENEAU jusque dans les années 1980,

ses travaux ont largement contribué à asseoir la renommée mondiale de l'entreprise concernant ses qualités de pionnière et d'experte dans la culture, l'obtention, et la distribution des plantes de ce genre.

L'entreprise PEPINIERES DESMARTIS SAS fut quant à elle créée en février 1994. Sa création fait suite au plan de cession total en 1993 de la SA DESMARTIS & Cie et de la SARL PERIGORD DESMARTIS au profit d'une nouvelle structure : le Groupe CONTE, devenu Groupe JARDILAND en 1997. En avril 2014, compte tenu de la situation économique de crise et des saisons climatiques difficiles vécues depuis 2012, le Groupe JARDILAND a choisi de se séparer de ses filières de production, dont les Pépinières Desmartis, les amenant à rechercher un éventuel repreneur pour assurer le maintien de ses activités.

En août 2014, le maintien de la société a été assuré grâce à sa reprise en interne par le directeur commercial M. Dominique AUDY, et le directeur d'exploitation M. Patrick CHASSAGNE. Pour relancer et dynamiser ses activités de recherche, la société, sous l'élan de Messieurs AUDY et CHASSAGNE, a entrepris dès 2012 de remettre à l'ordre du jour la perpétuation des travaux initiés par la famille Desmartis. Il s'agit donc pour la société de prolonger ces activités de sélection et de diversification sur le genre *Lagerstroemia*, et de les transposer, pourquoi pas, à d'autres taxons pour lesquels le savoir-faire des Pépinières Desmartis est reconnu.

Dans cette démarche, s'inscrit la volonté d'être toujours plus réactif face à l'évolution des attentes sociétales. Aussi, l'entreprise cherche à s'inspirer notamment d'autres grands secteurs de production comme l'industrie agroalimentaire ou automobile, pour qui la conception des produits ne saurait être dissociée de l'étude attentive des attentes et des comportements des consommateurs potentiels. Pour ces raisons, les Pépinières Desmartis se sont investies depuis septembre 2013 à nouer un partenariat avec un organisme public de recherche ayant abouti à la réalisation de cette thèse. Les activités qui en découlent ont pour ambition de bénéficier tant au développement de l'entreprise qu'à l'avancement des connaissances de la communauté scientifique.

Les Pépinières Desmartis ont à cœur de proposer une large palette de végétaux dont les qualités techniques, agronomiques, gustatives et esthétiques, correspondent aux attentes des consommateurs. Cette démarche intègre intimement sa préoccupation par les enjeux de développement durable sur lesquels repose la filière. A l'issue de ce travail de thèse, l'entreprise souhaite intensifier son programme de sélection du genre *Lagerstroemia* en introduisant sa caractérisation visuelle et les attentes des consommateurs. Cette perspective

visent l'amélioration de la qualité agronomique et esthétique des cultivars proposés au commerce, notamment en recherchant à obtenir des variétés dont le potentiel d'adaptation permet d'assurer un résultat esthétique appréciable indépendamment de la diversité des climats du territoire français. Cette recherche s'oriente donc sur l'amélioration de la rusticité (tolérance aux températures froides) et sur la baisse des besoins climatiques en termes de chaleur et de lumière nécessaires à l'expression florale. D'autre part, ces travaux visent également une plus grande diversification et une meilleure spécificité de la gamme en recherchant à obtenir de nouveaux coloris et motifs pour les pétales, ainsi que de nouveaux ports par la sélection ou par l'emploi de conduites culturales spécifiquement raisonnées. De manière plus générale, ces recherches sont accompagnées par la volonté d'améliorer la résistance aux phytopathogènes et aux ravageurs afin de garantir la qualité esthétique des plantes tout en réduisant toujours plus les recours aux produits phytosanitaires.

Cette activité nécessite la bonne conservation des ressources génétiques disponibles dans la collection et leur enrichissement par l'acquisition régulière de nouvelles variétés et spécimens. Avant d'engager un programme raisonné de sélection, intégrant pour la première fois les attentes des consommateurs comme critère de sélection, un regard historique sur la collection et sur le genre s'est avéré nécessaire. Cela a fait l'objet de ma part d'une intense recherche bibliographique ayant permis notamment la rédaction d'un article de synthèse publié dans la revue « Hommes & Plantes » (Garbez & Chassagne 2015), présenté ci-après et qui illustre comme chez le rosier, tout l'intérêt de regarder de plus près ce genre extrêmement diversifié et aux utilisations multiples.

Les lagerstroemias de la Chine à Bergerac

Souvent appelé à tort lilas des Indes, le lagerstroemia a mis du temps pour parvenir jusque dans nos jardins. Depuis près d'un siècle, Bergerac est sa capitale et le Sud-Ouest son fief. Gros plan sur ce genre et son évolution.

Par Morgan Garbez et Patrick Chassagne



MAGNUS LAGERSTRÖM
(1691-1759)

En Chine, son berceau, les plus anciennes traces de culture de lagerstroemia remontent à plus de 1 600 ans en arrière. D'anciens écrits relatent notamment les caractéristiques extraordinaires d'un certain «Bǎi-rì-hóng» qui signifie «Rouge de cent jours», largement planté par la volonté de l'empereur Huai de la dynastie Jin, au IV^e siècle de notre ère. Parmi une quinzaine d'autres espèces natives du sud-est de la Chine, le *Lagerstroemia indica* se détache du lot par son port élégant de grand arbuste

à plusieurs troncs et sa croissance modérée puisqu'il n'excède que rarement huit à dix mètres de haut. Cela permet d'admirer de plus près sa floraison estivale à la durée exceptionnelle : une centaine de jours voire davantage avec une taille adéquate, un record que peu d'arbres peuvent égaler. Ses bouquets de fleurs ou thyrses oscillent entre mauve et violet, une couleur associée là-bas à la sagesse et la puissance. Ses feuilles virent au rouge plus ou moins doré avant leur chute. En vieillissant, l'écorce fine et lisse aux tons gris pâle



et brun se desquame par petites plaques qui embellissent les rameaux de marbrures aux teintes variées encore sublimées quand tombe la pluie. La souplesse de ses rameaux permet de le conduire sous diverses formes, jusqu'aux véritables chefs-d'œuvre de sculpture que sont les « penjing », obtenus selon une méthode de culture chinoise ancêtre du bonsaï.

Plus qu'un simple arbre d'ornement, le *lagerstroemia* est associé dans la culture chinoise à l'astronomie et à l'astrologie : sa présence éloignerait même les maladies. Aussi, cette espèce inspira de célèbres poètes chinois et fut massivement plantée dès la dynastie Song, qui correspond à notre Moyen Age. Des nouvelles variétés émergent alors, aux fleurs plus grosses, avec des pétales plus crêpés, dans les tons mauves, rouge clair, puis roses et enfin blancs.

Aujourd'hui encore, on estime que plus d'un million de sujets, dont certains âgés de plusieurs siècles, ornent de nombreux boulevards et parcs chinois. On peut notamment y admirer des conduites ancestrales en « vase » ou en « mur », qui rappellent un peu les formes fruitières les plus extravagantes de nos jardins d'antan. Des chefs-d'œuvre de maîtrise trônent au parc Liudi à Dujiangyan, dans le Sichuan, comme « Le Vase » qui se-

rait âgé de 1 300 ans ou encore « Le Mur Géant », d'une rare beauté.

Parti de Chine, le *lagerstroemia* se répand en Corée, au Japon et en Inde, où des siècles plus tard, il fait toujours autant sensation. En Occident, il faut attendre le XVIII^e siècle avant de l'apercevoir ne serait-ce qu'en dessin. Son introduction est due au suédois Magnus Lagerström. Ce fervent naturaliste occupait le poste très important de directeur de la compagnie suédoise des Indes orientales. Sans quitter son pays, il en profite pour collecter une multitude de spécimens et de graines en provenance de toute l'Asie, qu'il lègue à la famille royale suédoise, à l'Académie royale des Sciences de Stockholm, à la Société royale et au jardin botanique d'Uppsala, créé par son illustre ami et compatriote Carl von Linné. Parmi les précieux spécimens d'herbiers se trouvaient des *Lagerstroemia indica*, alors uniquement référencés pour l'ornement de certains jardins en Inde. Linné y voit l'espèce type d'un nouveau genre qu'il décrit dans son *Species Plantarum* de 1759, et qu'il baptise *Lagerstroemia* en hommage à son ami Magnus, décédé la même année. Croyant à tort qu'il proviennent des Indes, Linné choisit le nom d'espèce *indica* pour ces spécimens. Peu de temps après, il en distingue d'autres spéci-

LE LAGERSTROEMIA EN CHINE

Dans son pays d'origine, le *lagerstroemia* atteint parfois des dimensions impressionnantes. Il est travaillé avec audace et fantaisie.

(Doc : DR).



LES AUTEURS

Morgan Garbez est doctorant CIFRE (convention industrielle de formation par la recherche, passée entre les pépinières Desmartis et l'Institut de Recherche en Horticulture et Semences d'Angers). Patrick Chassagne est le directeur des pépinières Desmartis.



GEORG EBERHARD RUMPHIUS
(1627-1702)

2- LAGERSTROEMIA SPECIOSA

Gravure de H. A. Van,
Hortus indicus malabaricus,
1683.

3 - LAGERSTROEMIA INDICA

Gravure tirée de
Curtis's Botanical Journal, 1798.
(Docs : Missouri Botanical Garden).



mens provenant de Chine et leur donne le nom d'espèce *chinensis*. La synonymie est largement reconnue au-jour d'hui, cependant *indica* prévaut et demeure par antériorité. En parlant d'antériorité, et pour mieux comprendre cette synonymie, bien que Linné y ait fait référence, on oublie très souvent les travaux de Georg Eberhard Rumphius (1627-1702), architecte et naturaliste à la compagnie néerlandaise des Indes orientales. Dans son ouvrage *Herborium Amboinensis Auctuarium* publié longtemps après sa mort, Rumphius décrit le *lagerstroemia* en mentionnant ses noms d'origine chinoise « Tsjinkin » ou « Tzu-Wei », en chinois 紫薇, comprenez « Zīwēi » en pinyin. Il précise leur rareté aux Indes mais leur abondance en Chine, dans les régions montagneuses et aux abords des temples. Pour l'anecdote, entre séisme, incendie, naufrage et glaucome, la publication des écrits de Rumphius fut considérablement retardée. La concurrence féroce sur le marché des épices ne l'a probablement pas aidé non plus, aussi le tome dont il est question ici fut seulement publié en 1755. Ce dernier constitue néanmoins la première publication officielle d'histoire naturelle traitant du genre en question ici.

Dès le milieu du XVIII^e siècle, le *lagerstroemia* est introduit en Angleterre dans les jardins botaniques royaux de Kew Gardens, à Londres, sans rencontrer le succès, par manque d'ensoleillement. Les pétales ondulés des fleurs lui valent d'être surnommé « crape myrtle », autrement dit le myrte à fleurs de crépon. Pour

la France, très peu de détails sont disponibles. On note toutefois un fait pour le moins surprenant : il est question d'un Jean Desmarts, ou plutôt Jean d'Esmarts-Laperche, un protestant ancien capitaine de navire et maire de Bergerac de 1792 à 1794. On attribue à cet illustre républicain l'introduction de différents spécimens en Dordogne, en particulier dans le domaine du château de Cavalerie, non loin de Bergerac.

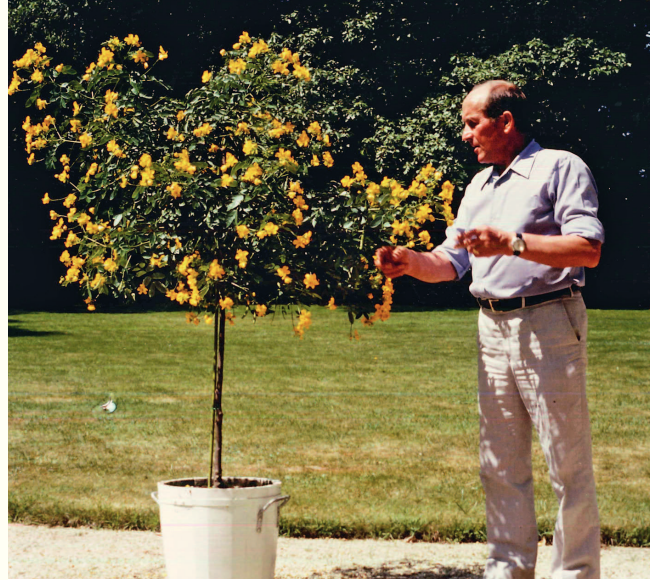
Entre-temps, le célèbre botaniste de Louis XVI, André Michaux, fait traverser l'Atlantique aux *lagerstroemias*. Il accoste les Etats-Unis en 1785, et introduit différents spécimens dans sa pépinière, à Charleston plus précisément. Sous ce climat rappelant celui du sud-est de la Chine, le *lagerstroemia* se porte à merveille. Il est vite diffusé jusque sur la côte Pacifique, où il devient même courant dans les jardins. Moins rustique, l'espèce *L. speciosa* réussit cependant en Floride, en Californie et à Hawaï. La vigueur de cet arbre lui permet d'atteindre sans problème une hauteur comprise entre dix et trente mètres. Ses feuilles plus grandes, tout comme ses imposantes inflorescences aux fleurs rose à lavande lui valent d'être surnommé par les anglophones « Giant crape myrtle » ou encore « Queen's crape myrtle ».

En Europe, les rares articles sur la culture des *lagerstroemias* laissent deviner une diffusion et une réussite relativement modestes jusqu'à la Grande Guerre. A Bergerac, un certain André Desmarts reprend à la suite de son père Eugène une petite pépinière de moins de deux hectares, fruit de l'héritage des pépi-



SCULPTURE VIVANTE

Le *lagerstroemia* a été utilisé il y a déjà très longtemps pour concevoir des penjing et des bonsaï.
(Doc : DR).



DES MAÎTRES ÈS LAGERSTROEMIAS

Installés à Bergerac,
André puis Jacques Desmartis
ont beaucoup fait pour
la diffusion des lagerstroemias.
(Docs : famille Desmartis)

nières Perdoux, installées à Bergerac depuis six générations. André Desmartis avait déjà remarqué le fort potentiel de quelques spécimens plantés par Jean, l'ancêtre à la particule. Il repère en particulier des *L. indica* bien acclimatés, à la généreuse floraison estivale rose. Dès 1919, lui et son épouse Jeanne entreprennent un patient travail de vulgarisation et de promotion en soulignant la beauté de cet arbre en toute saison. Avec réussite : le lagerstroemia gagne progressivement le cœur de Bergerac puis celui du Sud-Ouest. Il fait merveille sous ce climat et sous celui de la Méditerranée, prenant au passage les jolis surnoms de fleur de mousseline ou de lagerose... et de lilas des Indes, appellation encore fréquente dans les jardineries, malgré la confusion possible avec le margousier (*Melia azedarach*). Entre pépiniéristes, on entend aussi parler des « lager's ».

S'adaptant à de multiples types de sols hormis les plus salins, ces « lilas » exotiques supportent très bien la pollution atmosphérique des villes mais nettement moins bien la sécheresse. Plus au nord, ils sont perçus, non sans raison, comme des plantes frileuses et trop gourmandes en chaleur pour assurer une floraison digne de ce nom en pleine terre. Pour étendre le domaine du lagerstroemia, André Desmartis travaille à son amélioration pendant près de cinquante ans. Précurseur dans l'établissement de réels programmes de sélection exigeants, on lui doit la création de lignées ayant servi de base à l'obtention

Peu à peu les lagerstroemias montent vers le nord

de fleurs à la gamme chromatique diverse et nuancée, et d'individus adaptés à une culture sur l'ensemble du territoire, en pot et en bac dans les régions aux hivers les plus rigoureux. Il n'est pas le seul, et de nombreuses autres démarches autour des lagerstroemias voient le jour en Australie, aux États-Unis, en Chine, au Japon ou en Inde, sans oublier l'Italie. Outre-Atlantique, les sélectionneurs Al Eineirt, Otto Spring ou encore David Chopin sont à l'origine de lignées naines particulièrement intéressantes. De nombreux croisements interspécifiques sont réalisés avec une petite dizaine d'autres espèces comme *L. amabilis*, *L. caudata*, *L. fauriei*, *L. limii*, *L. ovalifolia*, *L. reginea*, *L. subcostata*, *L. speciosa*...

Commencés dès la fin des années 1950, les plus fameux croisements sont initiés par Donald R. Egolf, à l'US National Arboretum de Washington, et font intervenir principalement *L. indica* et *L. fauriei*. Ces hybridations associent des caractéristiques ornementales proches de *L. indica* avec un surcroît de rusticité — jusque -20 °C et plus —, et moins de sensibilité à l'oïdium, à la tache noire et aux ravageurs. Ils intègrent aussi la couleur rouge brun exceptionnelle de l'écorce de *L. fauriei* lorsqu'elle se desquame. Cette période féconde marque une nouvelle ère pour les lagerstroemias, accompagnée d'un regain d'intérêt scientifique pour la richesse botanique du genre. Ainsi paraît en 1969 une précieuse révision de sa systématique traitée par deux botanistes

la fin des années 1950, les plus fameux croisements sont initiés par Donald R. Egolf, à l'US National Arboretum de Washington, et font intervenir principalement *L. indica* et *L. fauriei*. Ces hybridations associent des caractéristiques ornementales proches de *L. indica* avec un surcroît de rusticité — jusque -20 °C et plus —, et moins de sensibilité à l'oïdium, à la tache noire et aux ravageurs. Ils intègrent aussi la couleur rouge brun exceptionnelle de l'écorce de *L. fauriei* lorsqu'elle se desquame. Cette période féconde marque une nouvelle ère pour les lagerstroemias, accompagnée d'un regain d'intérêt scientifique pour la richesse botanique du genre. Ainsi paraît en 1969 une précieuse révision de sa systématique traitée par deux botanistes



'JACQUELINE DESMARTIS'

Encore aujourd'hui,
l'une des meilleures variétés
sur le marché.

(Photo : Jean-Paul Collaert)



1 - 'MARGAUX'

Des bouquets de fleurs d'un rouge cerise très lumineux.

2 - 'PETIT' CANAILLE BLANC'

Ses rameaux souples ploient sous les énormes bouquets de fleurs blanches.

3 - LES ROIS DU SUD-OUEST

Le lagerstroemia se plaît tout spécialement en Aquitaine, comme on peut s'en apercevoir dans le village landais de Mugron.

4 - 'LA MOUSSON'

Une floraison rose vif très abondante et une belle écorce marbrée.

5 - 'RED IMPERATOR'

Les reflets pourpres du feuillage sont un atout de choix.

(photos : pép. Desmartis)



DR DONALD EGOLF

Ce chercheur (à gauche) de l'US National Arboretum de Washington a renforcé la résistance au mildiou. (Doc. DR).

de Singapour : Caetano Xavier Furtado et Montien Srisuko. Cette même année, les pépinières Desmartis mettent en place un atelier exclusivement dédié à la recherche et à la sélection sur *Lagerstroemia indica*. L'objectif visé est l'obtention de lignées vigoureuses et précoces, qui soient florifères voire remontantes, avec des couleurs pures et fixées, et possédant un haut niveau de résistance à l'oïdium, le tout sans perdre en rusticité. Dans cet atelier mené par Jacques Desmartis, assisté par Hubert Puard puis Christian Chaveneau jusqu'aux années 1980, il s'agit de répertorier les accessions antérieures, d'échanger avec des confrères, d'observer et d'expérimenter diverses méthodes de sélection, de diversification et de multiplication. Au fil des années, malgré une baisse notable des activités de recherche, les pépinières Desmartis ont toujours eu à cœur de préserver les nombreuses accessions et obtentions qui ont transité sur leurs terres. Cette démarche est récompensée en 1999 par le label « collection nationale » octroyé par le CCVS. C'est au lieu-dit Caudou, à Bergerac que se trouve actuellement ce véritable trésor de recherche et d'échanges avec les plus grands obtenteurs mondiaux. Entretien et renouvelée avec un soin tout particulier, la collection occupe un hectare et compte environ 240 accessions distinctes avec en moyenne quatre à cinq sujets pour chacune d'entre elles.

Côté botanique, on remarque notamment quelques spécimens de *Lagerstroemia limii* issus de semis. D'origine chinoise, *L. limii* (ancien-

nement *L. chekiangensis*) se présente sous la forme d'un buisson très érigé ou d'un petit arbre à plusieurs troncs d'environ quatre mètres de haut, qui est naturellement très ramifié. A Bergerac, sa floribondité n'est pas des plus impressionnantes, mais sa précocité, ses fleurs pubescentes aux pétales pourpre rosé et la desquamation importante de son écorce sont des caractères vraiment intéressants. Ses longues feuilles elliptiques à oblongues de couleur vert clair se teintent de nuances bleu sombre à violet métallisé particulièrement originales. Cultivée dans certaines régions des Etats-Unis, et ayant déjà servi dans quelques programmes d'hybridation, cette espèce commence à peine sa carrière en France.

On trouve également des spécimens de *Lagerstroemia subcostata* issus de semis et des clones de sa variété *fauriei* (souvent nommée *L. fauriei*). Cette variété reçue d'un échange avec le National Arboretum de Washington est endémique de l'île Yakushima au Japon. Rapportée aux Etats-Unis en 1956 par John Creech, puis hybridée par Donald R. Egolf avec différentes lignées de *L. indica*, elle est notamment à l'origine de cultivars regroupés sous l'appellation *Lagerstroemia x egolfii*, dont une petite vingtaine est présente dans la collection. On y trouve des buissons moyens ou demi-nains, n'excédant pas quatre mètres comme 'Acoma', aux pétales blanc pur ; 'Zuni', mauve lavande ; 'Caddo' et 'Pecos' dans les tons roses ; 'Tonto' rouge foncé brillant. Ou encore des gros buissons culminant à six mètres comme 'Lipan', à la floraison pourpre violacé, avec une

écorce lisse de couleur beige crème entrelacée de grosses marbrures blanc cru particulièrement saisissantes ; ‘Yuma’, aux pétales nuancés de mauve, qui a également reçu quelques gènes de *L. amabilis*, originaire du Japon également. Parmi les petits arbres très érigés pouvant atteindre une dizaine de mètres, on note ‘Natchez’, aux pétales d’un blanc pur et à l’écorce marron cannelle qui se desquame fortement ; ou encore ‘Tuscarora’ qui est légèrement moins vigoureux que ‘Natchez’, avec des pétales rose corail sombre ; et ‘Tuskegee’, aux pétales rose sombre à presque rouge, et à l’écorce beige crème.

Ces derniers hybrides ont été essentiellement sélectionnés pour leur résistance à l’oïdium, leur rusticité légèrement supérieure à celle de la plupart des *L. indica*, et surtout la beauté de leur écorce. Néanmoins, à la mi-juillet 2015, certains ne présentaient encore aucun bouton floral à Bergerac. On décelait aussi de nombreuses jeunes pousses noircies et séchées, le signe d’une moindre tolérance aux fortes chaleurs et à la sécheresse, qui aboutit même à la mort des sujets comme chez le cultivar nain ‘Pocomoke’... mais peut-être repartiront-ils des souches. Il y a quelques exceptions, par exemple ‘Caddo’, ‘Pecos’, ‘Tonto’ qui se portent bien et fleurissent régulièrement. Le dernier fait partie des cultivars que nous proposons à la vente, comme ‘Acoma’, plus connu aussi sous l’appellation ‘Petit’ Canaille Blanc’. Ce cultivar semi-nain, compact et retombant, est bien adapté aux potées ou pour une conduite sur mini-tige.



3



4



5



1 - 'SAINT EMILION'

Les grands vins de la région donnent logiquement leur nom aux créations Desmartis.

2 - AUSSI EN BAC

Les variétés de *Lagerstroemia* les plus trapues sont parfaitement à leur aise dans des bacs d'orangerie, comme à Paray-le-Monial.

(Photos : Jean-Paul Collaert).

Une hybridation entre une de nos accessions de *L. indica* et 'Tuscarora' a conduit à l'obtention de 'Grand cru', à la floraison tardive rouge corail foncé unique dans notre gamme. Grâce à sa vigueur exceptionnelle, il convient parfaitement à une utilisation en porte-greffe, en tige ou demi-tige, et fait merveille en touffe fortement charpentée, d'autant qu'il s'avère très résistant à l'oïdium. Il se contente d'une taille hivernale très légère. Côté *Lagerstroemia indica* pur, les accessions sont d'origines diverses et forment une palette très complète de silhouettes et de coloris variés. On y remarque les pieds-mères travaillés par André Desmartis, plutôt vigoureux et précoces, avec une floraison rose pâle ou rose vif rougissant. On trouve aussi de nombreux cultivars d'origine américaine, par exemple les variétés très compactes — entre 30 cm et 1,2 m — obtenues par David Chopin dans les années 1980, comme 'Lafayette', 'Cordon bleu' ou encore 'Bicolor' qui a la particularité de présenter des pétales roses marginés de blanc, tout comme 'Berlingot menthe' ; mais aussi 'World's Fair', 'Houston' et 'Orlando', au port étalé voire pleureur si on les conduit sur tige. D'autres obtentions plus récentes du très actif créateur américain Carl Whitcomb ont également enrichi la collection depuis peu. On note par exemple 'Whit VIII' (= 'Rhapsody in pink') l'un des premiers cultivars ne développant pas de graines et permettant ainsi de favoriser une remontée de floraison exceptionnelle sur les thyrses déflouris. Ses pétales sont d'un rose clair et

lumineux. On trouve également 'Whit VI' (= 'Burgundy cotton'), aux pétales blanc pur. En conduite libre et une fois adultes, tous deux sont des moyens à gros buissons au port érigé. Leurs jeunes feuilles sont pourpre grisé et leurs thyrses d'un bordeaux profond, un ensemble qui évoque pour certains le chocolat fondant.

Une bonne partie des accessions portent des noms plus ou moins parlants comme « HY 57 », « SR 73 », « Mixed 74.108 », « Semis 1971 » ou encore « 77 RF * Seminole 65 ». Ils proviennent de semis chanceux ou de croisements réalisés au sein des pépinières Desmartis mais non commercialisés. Ces accessions sont pleinement ou en partie issues de lignées — ou de leurs descendances — ayant montré une rusticité remarquable puisqu'elles ont survécu aux vagues de froid records des hivers 1956 et 1985. Ainsi, au cours de nombreuses années d'observation, une vingtaine d'entre elles ont été rigoureusement sélectionnées pour n'en retenir que les meilleures sur les plans esthétique et agronomique, et sont l'une de nos principales fiertés. On peut citer celles issues des travaux réalisés par André puis Jacques Desmartis avec Hubert Puard puis avec Christian Chaveneau jusqu'au début des années 1980. Les plus connues portent les patronymes des personnalités qui ont le plus influencé les pépinières et la sélection des *Lagerstroemia* : la variété 'Jeanne Desmartis' reste un grand classique, moyennement vigoureuse mais compacte, à la floraison abondante de la mi-juillet à fin

août et à la couleur rose Bengale, remontante lors des étés très chauds. Dès septembre, son feuillage vert soutenu prend de belles teintes automnales. Ce cultivar se plaît bien en touffe et convient parfaitement pour la réalisation de grands massifs en ville. Vigoureux et d'un port régulier, 'Souvenir d'André Desmarts' est le premier cultivar obtenu en France dans les tons rouges. Sa floraison est plus tardive mais bien homogène et d'un rouge pourpre Solférino. Ses feuilles turbinées et rosées en face inférieure prennent en automne des tons orangés à pourpres. Principalement conduit en touffe, il est aussi adapté pour des utilisations en tige et demi-tige, en sujet isolé comme en alignement. Compact et vigoureux, 'Souvenir d'Hubert Puard' fleurit dès les premières chaleurs avec d'abondants bouquets mauve lilas. Il se plaît autant en touffe qu'en tige et demi-tige. Introduite en 1980, 'Jacqueline Desmarts' est l'une des dernières sélections provenant des travaux de Jacques Desmarts. Ce cultivar vigoureux aux rameaux souples se prête à toutes les conduites. Sa floraison exceptionnellement dense en bouquets parfaits d'un rose camélia lumineux s'étale de fin juillet à septembre. Encore aujourd'hui, il fait partie de nos meilleures obtentions. Parmi les autres créations Desmarts, on remarque les très connus 'Terre chinoise', à la floraison violet bordeaux ; 'Mon panache', pourpre magenta ; ou encore 'Kimono', blanc pur. On peut également souligner 'Yang Tsé', une valeur sûre à la floraison rouge cramoisi ; 'Monbazillac', rose clair ; 'Soir d'été', rose dragée. Tous ces cultivars



sont adaptés au climat du nord de la Loire. Toujours pour cette zone géographique, on ne peut se permettre d'oublier 'Pécharmant', mauve à reflets bleutés originaux, et 'Périgord Pourpre', rouge intense lumineux, deux de nos meilleurs cultivars obtenus dans les années 1990 grâce à la persévérance de Daniel Lecourt qui consacra beaucoup de son temps à trouver les « perles » parmi ses divers semis chanceux. On lui doit également la mise en relief de la série des « Petit' canaille », déclinée dans les coloris rouge, rose et mauve, en massif ou en potée fleurie : ces lagerstroemias nains sont parfaits pour décorer les petits jardins tout comme les patios. Depuis cette époque, plusieurs crises éco-

3 ET 4 - 'YANG TSÉ'

Cette variété au port érigé porte haut ses bouquets de fleurs rose vif.

UN GENRE ESSENTIELLEMENT INTERTROPICAL

Le genre *Lagerstroemia* fait partie de la famille des Lythracées, comme la salicaire (*Lythrum salicaria*), le henné (*Lawsonia inermis*), le grenadier (*Punica granatum*) ou encore la plante cigarette (*Cuphea ignea*). Ses plus vieux fossiles, datés de la transition entre le Paléocène et le Miocène – il y a environ 56 millions d'années – ont été retrouvés dans des sédiments d'une mine du district de Kutch, en Inde. Le genre se diversifie ensuite et se diffuse à travers l'ensemble du globe. A la

suite de modifications drastiques du climat, son aire de distribution régresse pour se cantonner aux climats favorables et plus ensoleillés des zones tropicales et subtropicales de l'Asie et de l'Océanie. Actuellement, on dénombre une soixantaine d'espèces, sous la forme d'arbustes et d'arbres que l'on retrouve dans les marécages de plaines, les montagnes et les forêts secondaires, sur une aire qui s'étend de l'Inde au Japon, et de la Corée jusqu'au nord de l'Australie.

Certaines espèces sont exploitées et cultivées pour leur bois aux caractéristiques proches de celles du teck, notamment pour la construction d'édifices et de bateaux ou pour l'artisanat. Par ailleurs, les fleurs, les feuilles, les graines et l'écorce de *L. indica* et *L. speciosa* servent à la réalisation de remèdes et de produits pharmaceutiques. Diverses études soulignent notamment leurs extraits riches en antioxydants et en multiples composés aux diverses actions

: détoxifiante, vermifuge, diurétique, laxative, anti-diarrhéique, anti-inflammatoire, anti-diabétique, antiasthmatique, anti-hyperlipidémique, hémostatique, antibiotique, antivirale, et même anti-tumorale. On recense aussi l'utilisation de ces deux espèces et de *L. parviflora* comme plantes-hôtes pour l'élevage du ver à soie, ou encore pour leurs graines comme nourriture pour l'élevage de volailles, même si l'on connaît aussi leurs effets narcotiques pour certaines d'entre elles.

nomiques ont menacé la pérennité de la pépinière, et près d'une vingtaine d'années se sont passées sans grande activité du côté de la sélection. Au niveau mondial, la recherche s'est en revanche intensifiée considérablement. De nouvelles espèces comme *L. anhuiensis* ou *L. huamotensis* ont été découvertes. Les expérimentations sont de plus en plus nombreuses et des marqueurs génétiques d'aide à la sélection commencent à être développés. Désormais, pour réaffirmer notre position sur ce type de culture, et avec l'ambition de reprendre notre place légitime de créateur, nous entamons depuis peu un travail conséquent de veille technologique et commerciale pour mieux nous orienter. En 2015, nous avons lancé une nouvelle gamme de sélection Desmartis, les « Lager's Terrasse », déclinée en rouge, rose et blanc. Rustiques, compactes et offrant une floraison étalée de juillet à octobre, ces variétés sont parfaitement adaptées pour une culture en pot ou en bac pour les balcons et terrasses, un marché

très demandeur aujourd'hui, mais aussi en massifs pour les petits jardins. La récolte et le semis de graines issues de croisements libres ont également repris depuis 2014, et les premières plantules sont déjà en observation. Notre but : assurer un résultat esthétique quel que soit le climat de la région. Nos futurs travaux s'orienteront donc sur la baisse des besoins climatiques en termes de chaleur et de lumière nécessaires à l'entrée en floraison. L'idéal serait de combiner cet atout avec une belle écorce, un critère insuffisamment pris en compte jusque là. Par ailleurs, il est toujours question d'élargir la palette en recherchant de nouveaux coloris et motifs pour les pétales. Nous recherchons également les accessions les plus résistantes aux maladies et aux ravageurs, et pour cela nous avons arrêté les traitements phytosanitaires systématiques sur la collection. Originalité, beauté, résistance et respect de l'environnement, telle est désormais notre devise en matière de recherche...



DES ATOUTS POUR LE FUTUR

Les feuilles des lagerstroemias prennent souvent des couleurs magnifiques en automne, et en vieillissant leur écorce se desquame, un peu comme certains érables.

Une collection permet de mieux comparer les variétés entre elles et d'associer ces qualités dans les prochains hybrides.

(Photo : pép. Desmartis).



LES LAGERSTROEMIAS



1



2



3



4



5



6

(Photos : pép. Desmartis)

Quelques lagerstroemias issus des collections des pépinières Desmartis : 1 - 'Montbazillac' ; 2 - 'Périgord pourpre' ; 3 - 'SR 181', un de ces croisements intermédiaires n'ayant pas été baptisé ; 4 - 'Pécharmant' ; 5 - 'Petit' Canaille Mauve' ; 6 - 'Soir d'été'.

Références

L'abréviation n.d. (non datée) désigne une référence web pour laquelle aucune date d'édition n'est fournie.

- Abidi, F., Girault, T., Douillet, O., Guillemain, G., Sintès, G., Laffaire, M., . . . Leduc, N. (2013). Blue light effects on rose photosynthesis and photomorphogenesis. *Plant Biology*, *15*(1), 67-74.
- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, *11*(7), 36-42.
- Aldous, D. E. (2013). Extrinsic and intrinsic attributes used in the selection and quality control of ornamental crops. *Acta Horticulturae (ISHS)*, *970*, 59-67.
- Allen, M. T., Prusinkiewicz, P., & DeJong, T. M. (2005). Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: The L-PEACH model. *New phytologist*, *166*(3), 869-880.
- American Rose Society. (n.d.). Old garden roses & shrubs. Retrieved from <http://www.rose.org/old-garden-roses-shrubs/>
- Azadi, P., Bagheri, H., Nalouisi, A. M., Nazari, F., & Chandler, S. F. (2016). Current status and biotechnological advances in genetic engineering of ornamental plants. *Biotechnology Advances*, *34*(6), 1073-1090.
- Ballaré, C. L., Scopel, A. L., & Sánchez, R. A. (1990). Far-red radiation reflected from adjacent leaves: an early signal of competition in plant canopies. *Science*, *247*(4940), 329-332.
- Barbier, F., Péron, T., Lecerf, M., Perez-Garcia, M.-D., Barrière, Q., Rolčík, J., . . . Porcheron, B. (2015). Sucrose is an early modulator of the key hormonal mechanisms controlling bud outgrowth in *Rosa hybrida*. *Journal of Experimental Botany*, *66*(9), 2569-2582
- Barthélémy, D. (1991). Levels of organization and repetition phenomena in seed plants. *Acta Biotheoretica*, *39*(3-4), 309-323.
- Barthélémy, D., & Caraglio, Y. (2007). Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, *99*(3), 375-407.
- Bavay, C., Brockhoff, P. B., Kuznetsova, A., Maître, I., Mehinagic, E., & Symoneaux, R. (2014). Consideration of sample heterogeneity and in-depth analysis of individual differences in sensory analysis. *Food Quality and Preference*, *32*, 126-131.
- Bavay, C., Symoneaux, R., Maître, I., Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Mehinagic, E. (2013). Importance of fruit variability in the assessment of apple quality by sensory evaluation. *Postharvest Biology and Technology*, *77*, 67-74.
- Bell, A. D. (1991). *Plant form: an illustrated guide to flowering plant morphology* (A. D. Bell & A. Bryan Eds.). New York: Oxford University Press.
- Bendahmane, M., Dubois, A., Raymond, O., & Bris, M. L. (2013). Genetics and genomics of flower initiation and development in roses. *Journal of Experimental Botany*, *64*(4): 847-857.
- Bennedsen, B. S. (1992). *Plant monitoring by machine vision*. Paper presented at the First International Workshop on Sensors in Horticulture, Noordwijkerhout, Netherlands.
http://www.actahort.org/books/304/304_19.htm
- Bhattacharyya, B., & Johri, B. M. (1998). *Rosaceae Flowering plants: Taxonomy and phylogeny* (pp. 242-246). Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Bijmolt, T. H. A., & Wedel, M. (1995). The effects of alternative methods of collecting similarity data for Multidimensional Scaling. *International Journal of Research in Marketing*, *12*(4), 363-371.
- Blom-Zandstra, M., Pot, C. S., Maas, F. M., & Schapendonk, A. H. C. M. (1995). Effects of different light treatments on the nocturnal transpiration and dynamics of stomatal closure of two rose cultivars. *Scientia Horticulturae*, *61*(3), 251-262.
- Borra, S., & Di Ciaccio, A. (2010). Measuring the prediction error. A comparison of cross-validation, bootstrap and covariance penalty methods. *Computational Statistics & Data Analysis*, *54*(12), 2976-2989.
- 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*(3), 149-163.
- Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., & Guérin, V. (2009). Visual characterization of the esthetic quality of the rosebush. *Journal of Sensory Studies*, *24*(5), 774-796.
- Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Demotes-Mainard, S., Le Coz, E. L., Nathalie, Pelleschi-Travier, S., Qannari, E. M., . . . Guérin, V. (2010). Sensory profiles and preference analysis in ornamental horticulture: The case of the rosebush. *Food Quality and Preference*, *21*(8), 987-997.
- Brascamp, W. (2005). A quantitative approach to human issues in horticulture: conjoint analysis. *HortTechnology*, *15*(3), 546-550.

- Bredmose, N., & Hansen, J. (1995). Regeneration, growth and flowering of cut rose cultivars as affected by propagation material and method. *Scientia Horticulturae*, 64(1), 103-111.
- Bredmose, N. B. (1998). Growth, flowering, and postharvest performance of single-stemmed rose (*Rosa hybrida* L.) plants in response to light quantum integral and plant population density. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(4), 569-576.
- Brons, A., Rabatel, G., Ros, F., Sevila, F., & Touzet, C. (1993). Plant grading by vision using neural networks and statistics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 9(1), 25-39.
- Brosnan, T., & Sun, D.-W. (2002). Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems—a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 193-213.
- Brosnan, T., & Sun, D.-W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 3-16.
- Buck-Sorlin, G., De Visser, P. H. B., Henke, M., Sarlikioti, V., Van Der Heijden, G. W. A. M., Marcelis, L. F. M., & Vos, J. (2011). Towards a functional-structural plant model of cut-rose: simulation of light environment, light absorption, photosynthesis and interference with the plant structure. *Annals of Botany*, 108(6), 1121-1134.
- Cerny, T. A., Faust, J. E., Layne, D. R., & Rajapakse, N. C. (2003). Influence of photoselective films and growing season on stem growth and flowering of six plant species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(4), 486-491.
- Chaivivatrakul, S., Tang, L., Dailey, M. N., & Nakarmi, A. D. (2014). Automatic morphological trait characterization for corn plants via 3D holographic reconstruction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 109, 109-123.
- Chambelland, J.-C., Dassot, M., Adam, B., Donès, N., Balandier, P., Marquier, A., . . . Sinoquet, H. (2008). A double-digitising method for building 3D virtual trees with non-planar leaves: application to the morphology and light-capture properties of young beech trees (*Fagus sylvatica*). *Functional Plant Biology*, 35(10), 1059-1069.
- Charles-Dominique, T. (2012). *Analyse des relations entre plasticité architecturale des buissons et prolifération de leurs populations*. (PhD.), Université de Montréal - Université Montpellier II.
- Charles-Dominique, T., Edelin, C., & Bouchard, A. (2010). Architectural strategies of *Cornus sericea*, a native but invasive shrub of Southern Quebec, Canada, under an open or a closed canopy. *Annals of Botany*, 105(2), 205-220.
- Charles-Dominique, T., Edelin, C., Brisson, J., & Bouchard, A. (2012). Architectural strategies of *Rhamnus cathartica* (Rhamnaceae) in relation to canopy openness. *Botany*, 90(10), 976-989.
- Charles-Dominique, T., Edelin, C., Bouchard, A., Legendre, P., & Brisson, J. (2015). Using intra-individual variation in shrub architecture to explain population cover. *Oikos*, 124(6), 707-716.
- Cheng, Z.-L., Zhang, X.-P., & Chen, B.-Q. (2007). Simple reconstruction of tree branches from a single range image. *Journal of Computer Science and Technology*, 22(6), 846-858.
- Chollet, S., Lelièvre, M., Abdi, H., & Valentin, D. (2011). Sort and beer: Everything you wanted to know about the sorting task but did not dare to ask. *Food Quality and Preference*, 22(6), 507-520.
- Chéné, Y., Rousseau, D., Belin, É., Garbez, M., Galopin, G., & Chapeau-Blondeau, F. (2016). Shape descriptors to characterize the shoot of entire plant from multiple side views of a motorized depth sensor. *Machine Vision and Applications*, 27(4), 447-461.
- Chéné, Y., Rousseau, D., Lucidarme, P., Bertheloot, J., Caffier, V., Morel, P., . . . Chapeau-Blondeau, F. (2012). On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Computers and Electronics in Agriculture*, 82, 122-127.
- Civille, G. V., & Lawless, H. T. (1986). THE IMPORTANCE OF LANGUAGE IN DESCRIBING PERCEPTIONS. *Journal of Sensory Studies*, 1(3-4), 203-215.
- Costes, E., Crespel, L., Denoyes, B., Morel, P., Demene, M.-N., Lauri, P.-E., & Wenden, B. (2014). Bud structure, position and fate generate various branching patterns along shoots of closely related Rosaceae species: a review. *Frontiers in Plant Science*, 5(666).
- Costes, E., Lauri, P.-E., Simon, S., & Andrieu, B. (2013). Plant architecture, its diversity and manipulation in agronomic conditions, in relation with pest and pathogen attacks. *European Journal of Plant Pathology*, 135(3), 455-470.
- Costes, E., Lauri, P. É., & Regnard, J. L. (2006). Analyzing Fruit Tree Architecture: Implications for Tree Management and Fruit Production. *Horticultural Reviews* (pp. 1-61): John Wiley & Sons, Inc.
- Costes, E., Sinoquet, H., Godin, C., & Kelner, J. J. (1999). 3D digitizing based on tree topology: application to study the variability of apple quality within the canopy. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 499, 271-280.
- 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. *Functional Plant Biology*, 35(10), 936-950.

- Crespel, L., Chirollet, M., Durel, C., Zhang, D., Meynet, J., & Gudín, S. (2002). Mapping of qualitative and quantitative phenotypic traits in *Rosa* using AFLP markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 105(8), 1207-1214.
- Crespel, L., Le Bras, C., Relion, D., & Morel, P. (2014). Genotype \times year interaction and broad-sense heritability of architectural characteristics in rose bush. *Plant Breeding*, 133(3), 412-418.
- Crespel, L., Morel, P., & Galopin, G. (2012). Architectural and genetic characterization of *Hydrangea aspera* subsp. *aspera* Kawakami group, *H. aspera* subsp. *sargentiana* and their hybrids. *Euphytica*, 184(3), 289-299.
- Crespel, L., Sigogne, M., Donès, N., Relion, D., & Morel, P. (2013). Identification of relevant morphological, topological and geometrical variables to characterize the architecture of rose bushes in relation to plant shape. *Euphytica*, 191(1), 129-140.
- Creusen, M. E. H., & Schoormans, J. P. L. (2005). The different roles of product appearance in consumer choice. *Journal of Product Innovation Management*, 22(1), 63-81.
- Danzart, M. (2009). Liaisons entre plusieurs variables : La régression. In F. Depledt & SSHA (Eds.), *Évaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 421-429). Paris: Lavoisier.
- Darlington, A. B., Dixon, M. A., & Tsujita, M. J. (1992). The influence of humidity control on the production of greenhouse roses (*Rosa hybrida*). *Scientia Horticulturae*, 49(3), 291-303.
- De Keyser, E., Lootens, P., Van Bockstaele, E., & De Riek, J. (2013). Image analysis for QTL mapping of flower colour and leaf characteristics in pot azalea (*Rhododendron simsii* hybrids). *Euphytica*, 189(3), 445-460.
- De Visser, P. H. B., Buck-Sorlin, G. H., & Van Der Heijden, G. W. A. M. (2014). Optimizing illumination in the greenhouse using a 3D model of tomato and a ray tracer. *Frontiers in Plant Science*, 5(48).
- Debener, T. (1999). Genetic analysis of horticulturally important morphological and physiological characters in diploid roses. *Gartenbauwissenschaft*, 64(1), 14-20.
- Debener, T., & Mattiesch, L. (1999). Construction of a genetic linkage map for roses using RAPD and AFLP markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 99(5), 891-899.
- Delagrange, S., & Rochon, P. (2011). Reconstruction and analysis of a deciduous sapling using digital photographs or terrestrial-LiDAR technology. *Annals of Botany*, 108(6), 991-1000.
- Demotes-Mainard, S., Bertheloot, J., Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Guéritaine, G., Guérin, V., & Andrieu, B. (2013). Rose bush leaf and internode expansion dynamics: analysis and development of a model capturing interplant variability. *Frontiers in Plant Science*, 4(418).
- Demotes-Mainard, S., Guéritaine, G., Boumaza, R., Favre, P., Guérin, V., Huché-Théliér, L., & Andrieu, B. (2009, 2009). *Coordinated development of the architecture of the primary shoot in bush rose*. Paper presented at the Third symposium on plant growth modeling, simulation, visualization and applications, Beijing, China.
- Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., Morel, P., Boumaza, R., Guérin, V., & Sakr, S. (2013). Temporary water restriction or light intensity limitation promotes branching in rose bush. *Scientia Horticulturae*, 150, 432-440.
- Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Le Gourrierec, J., Pelleschi-Travier, S., . . . Boumaza, R. (2016). Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 4-21.
- Depledt, F., & SSHA. (2009). *Évaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (F. Depledt & SSHA Eds. 3 ed.). Paris: Lavoisier.
- DeWitt, T. J., & Scheiner, S. M. (2004). *Phenotypic plasticity: functional and conceptual approaches* (T. J. DeWitt & S. M. Scheiner Eds.): Oxford University Press.
- Dijkshoorn-Dekker, M. W. C. (1996). The influence of light and temperature on the dynamic behaviour of *Ficus benjamina* 'Exotica'. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 417, 65-68.
- Dijkstra, J., & Meuleman, J. (1998). Grading *Dieffenbachia* plants at different growth stages using digital image processing. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 421, 99-110.
- Dijkstra, J., Pompe, J., Meuleman, J., & Speelman, L. (1997). The application of digital image processing in grading of begonia pot plants. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 45(1), 143-161.
- Donès, N., Adam, B., & Sinoquet, H. (2006). PiafDigit—software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser and for the acquisition of plant architecture. Clermont-Ferrand, France: UMR PIAF INRA-UBP.
- Drake, M. A., Gerard, P. D., Truong, V. D., & Daubert, C. R. (1999). Relationship between instrumental and sensory measurements of cheese texture. *Journal of Texture Studies*, 30(4), 451-476.
- Du, C.-J., & Sun, D.-W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 39-55.
- Dufour-Etienne, F. (2009). Apport de l'analyse sensorielle en préconception : Innovation et qualité. In F. Depledt & SSHA (Eds.), *Evaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 327-344). Paris: Lavoisier.
- Durand, J. B., Guédon, Y., Caraglio, Y., & Costes, E. (2005). Analysis of the plant architecture via tree-structured statistical models: the hidden Markov tree models. *New Phytologist*, 166(3), 813-825.

- ENA. (2010). European technical & quality standards for nurserystock. Retrieved from <http://www.enaplants.com/quality-standards>, http://media.wix.com/ugd/71c698_8a33d7b877964b9dba4904dba2df8328.pdf
- Excellence végétale. (n.d.). L'association Excellence Végétale. Retrieved from <http://www.qualite-plantes.org/L-association-excellence-vegetale/>
- Fahlgren, N., Gehan, M. A., & Baxter, I. (2015). Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current Opinion in Plant Biology*, 24, 93-99.
- Favre, P., Guéritaine, G., Andrieu, B., Boumaza, R., Demotes, S., Fournier, C., . . . Guérin, V. (2007). Modelling the architectural growth and development of rosebush using L-systems. *Poster presented at the Workshop «Growth Phenotyping and Imaging in Plants»*. Montpellier, France.
- Fay, N. (2002). Environmental arboriculture, tree ecology and veteran tree management. *Arboricultural Journal*, 26(3), 213-238.
- Ferrante, A., Trivellini, A., Scuderi, D., Romano, D., & Vernieri, P. (2015). Post-production physiology and handling of ornamental potted plants. *Postharvest Biology and Technology*, 100, 99-108.
- Fiorani, F., & Schurr, U. (2013). Future scenarios for plant phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 267-291.
- Font-i-Furnols, M., Brun, A., Tous, N., & Gispert, M. (2013). Use of linear regression and partial least square regression to predict intramuscular fat of pig loin computed tomography images. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 122, 58-64.
- 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. *Annals of Botany*, 101(8), 1053-1063.
- FranceAgriMer. (2015a). Bilan annuel 2014 : Commerce extérieur des produits de l'horticulture (pp. 14).
- FranceAgriMer. (2015b). Végétaux d'ornement : achats des ménages en 2014 (pp. 68).
- Gabriel, W. (2005). How stress selects for reversible phenotypic plasticity. *Journal of Evolutionary Biology*, 18(4), 873-883.
- Galopin, G. (2012). *Analyse et exploitation de la plasticité phénotypique chez le buisson ligneux d'ornement Hydrangea macrophylla et Rosa hybrida*. (Mémoire d' Habilitation à Diriger des Recherches - HDR), Agrocampus Ouest, Angers.
- Galopin, G., Crespel, L., & Robert, F. (2010). Euro-Trials : pour mieux gérer l'offre en arbustes ligneux d'ornement. *Le lien horticole*(772), 16.
- Galopin, G., Mauget, J.-C., & Morel, P. (2010). Morphogenetic analysis of the phenotypic variability of the architectural unit of *Hydrangea macrophylla*. *Annals of Forest Science*, 67(3).
- Garbez, M., & Chassagne, P. (2015). Les lagerstroemias de la Chine à Bergerac. *Hommes & Plantes*(95), 18-27.
- Garbez, M., Galopin, G., Sigogne, M., Favre, P., Demotes-Mainard, S., & Symoneaux, R. (2013). *The challenge: grouping and characterizing virtual rose bushes presented in videos. Use of perceptive free sorting and verbalization*. Paper presented at the Pangborn 2013: 10th Pangborn Sensory Science Symposium, Rio de Janeiro, Brazil.
- https://www.researchgate.net/publication/266737855_The_Challenge_Grouping_and_characterizing_fourty_virtual_rose_bushes_presented_in_videos_Use_of_perceptive_free_sorting_and_verbalization?channel=doi&,amp,linkId=543a34240cf24a6ddb95e75b&,amp,showFulltext=true
- Garbez, M., Symoneaux, R., Chéné, Y., Belin, E., Sigogne, M., Labatte, J. M., . . . Galopin, G. (2015). *Could image analysis predict sensory visual characteristics of rotating virtual rose bushes ?* Paper presented at the Pangborn 2015: 11th Pangborn Sensory Science Symposium, Gothenburg, Sweden. <https://elsevier.conference-services.net/viewsecurePDF.asp?conferenceID=3801&abstractID=864317>, http://www.pangborn2015.com/resources/downloads/PANG2015_Oral%20Programme.pdf
- Gause, G. F. (1947). Problems of evolution. *Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 37, 17-68.
- Gibbs, J. A., Pound, M., French, A. P., Wells, D. M., Murchie, E., & Pridmore, T. (2016). Approaches to three-dimensional reconstruction of plant shoot topology and geometry. *Functional Plant Biology*.
- Girault, T., Abidi, F., Sigogne, M., Pelleschi-Travier, S., Boumaza, R., Sakr, S., & Leduc, N. (2010). Sugars are under light control during bud burst in *Rosa* sp.. *Plant, Cell & Environment*, 33(8), 1339-1350.
- Girault, T., Bergougnoux, V., Combes, D., Viémont, J.-D., & Leduc, N. (2008). Light controls shoot meristem organogenic activity and leaf primordia growth during bud burst in *Rosa* sp.. *Plant, Cell & Environment*, 31(11), 1534-1544.
- Godin, C. (2000). Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science*, 57(5), 413-438.
- Godin, C., & Caraglio, Y. (1998). A multiscale model of plant topological structures. *Journal of Theoretical Biology*, 191(1), 1-46.
- Godin, C., Costes, E., & Sinoquet, H. (1999). A method for describing plant architecture which integrates topology and geometry. *Annals of Botany*, 84(3), 343-357.

- Godin, C., Guédon, Y., Costes, E., & Caraglio, Y. (1997). Measuring and analyzing plants with the AMAPmod software. *Advances in Computational Life Sciences*, 1, 63-94.
- Gongal, A., Amatya, S., Karkee, M., Zhang, Q., & Lewis, K. (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 8-19.
- Granier, C., Aguirrezabal, L., Chenu, K., Cookson, S. J., Dauzat, M., Hamard, P., . . . Lebaudy, A. (2006). PHENOPSIS, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in *Arabidopsis thaliana* permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. *New Phytologist*, 169(3), 623-635.
- Grotewold, E. (2006). The genetics and biochemistry of floral pigments. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 57, 761-780.
- Gudin, S. (2000). Rose: Genetics and Breeding. In J. Janick & S. Gudin (Eds.), *Plant Breeding Reviews* (Vol. 17, pp. 159-189). Oxford: John Wiley & Sons, Inc.
- Guterman, I., Shalit, M., Menda, N., Piestun, D., Dafny-Yelin, M., Shalev, G., . . . Emanuel, M. (2002). Rose Scent Genomics Approach to Discovering Novel Floral Fragrance-Related Genes. *The Plant Cell*, 14(10), 2325-2338.
- Guzmán, Q. J. A., & Cordero, R. A. (2016). Neighbourhood structure and light availability influence the variations in plant design of shrubs in two cloud forests of different successional status. *Annals of Botany*, 118(1), 23-34.
- Günes, M., & Dölek, Ü. (2010). Fruit characteristics of promising native rose hip genotypes grown in Mid-North Anatolia Region of Turkey. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 8(2), 460-463.
- Hack, G. R. (1992). *Application of computer vision systems in horticulture*. Paper presented at the First International Workshop on Sensors in Horticulture, Noordwijkerhout, Netherlands. http://www.actahort.org/books/304/304_4.htm
- Hallé, F. (2004). *Architecture de Plantes* (JPC Edition Ed.).
- Hallé, F., Oldeman, R. A. A., & Tomlinson, P. B. (1978). *Tropical trees and forests: an architectural analysis*. Berlin: Springer-Verlag.
- Harmsen, S. R., & Koenderink, N. J. J. P. (2009). Multi-target tracking for flower counting using adaptive motion models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(1), 7-18.
- Hemming, J., Pekkeriet, E. J., & Van Der Schoor, R. (2010). *Automatic grading of anthurium cut flowers using 3d computer vision*. Paper presented at the XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), Québec city, Canada. <http://www.csbe-scgab.ca/docs/meetings/2010/CSBE100934.pdf>
- Heuret, P., Nicolini, É., Edelin, C., & Roggy, J.-C. (2003). Approche architecturale pour l'étude des arbres de forêt tropicale humide guyanaise. *Revue Forestière Française*, 55, 158-178.
- Heuvelink, E., Tijsskens, P., & Kang, M. Z. (2004). Modelling product quality in horticulture: an overview. *Proceedings of the International Workshop on Models for Plant Growth and Control of Product Quality in Horticultural Production* (pp. 19-30). Postdam, Germany: Acta Horticulturae (ISHS).
- Hibrand-Saint Oyant, L., Crespel, L., Rajapakse, S., Zhang, L., & Foucher, F. (2008). Genetic linkage maps of rose constructed with new microsatellite markers and locating QTL controlling flowering traits. *Tree Genetics & Genomes*, 4(1), 11-23.
- Hines, R. L., Sistler, F. E., & Wright, M. E. (1986). A vision system for grading container-grown plants. *American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 86-3043*, 8.
- Hines, R. L., Sistler, F. E., Wright, M. E., & Brown, L. (1987). Establishing grading standards for container-grown plants. *American Society of Agricultural Engineers, Paper No. 87-6053*, 11.
- Horgan, G. W. (2001). The statistical analysis of plant part appearance—a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(2), 169-190.
- Huché-Thélier, L., Boumaza, R., Demotes-Mainard, S., Canet, A., Symoneaux, R., Douillet, O., & Guérin, V. (2011). Nitrogen deficiency increases basal branching and modifies visual quality of the rose bushes. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 325-334.
- Ishii, H. T., Ford, E. D., & Kennedy, M. C. (2007). Physiological and ecological implications of adaptive reiteration as a mechanism for crown maintenance and longevity. *Tree Physiology*, 27(3), 455-462.
- Iwata, H., Gaston, A., Remay, A., Thouroude, T., Jeauffre, J., Kawamura, K., . . . Foucher, F. (2012). The TFL1 homologue KSN is a regulator of continuous flowering in rose and strawberry. *The Plant Journal*, 69(1), 116-125.
- Jenks, M. A., Andersen, L., Teusink, R. S., & Williams, M. H. (2001). Leaf cuticular waxes of potted rose cultivars as affected by plant development, drought and paclobutrazol treatments. *Physiologia Plantarum*, 112(1), 62-70.
- Kader, A. A. (2000). Quality of horticultural products. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 517, 17-20.
- Kader, A. A. (2002). *Postharvest technology for horticultural crops* (Vol. 3311): UCANR Publications.
- Kang, M., Heuvelink, E., Carvalho, S. M. P., & De Reffye, P. (2012). A virtual plant that responds to the environment like a real one: the case for chrysanthemum. *New Phytologist*, 195(2), 384-395.

- Karkee, M., Adhikari, B., Amatya, S., & Zhang, Q. (2014). Identification of pruning branches in tall spindle apple trees for automated pruning. *Computers and Electronics in Agriculture*, *103*, 127-135.
- Karwowski, R., & Prusinkiewicz, P. (2004). *The L-system-based plant-modeling environment L-studio 4.0*. Paper presented at the Proceedings of the 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models, Montpellier, France. <http://algorithmicbotany.org/papers/lstudio.fsmp2004.pdf>
- Kawabata, S., Yokoo, M., & Nii, K. (2009). Quantitative analysis of corolla shapes and petal contours in single-flower cultivars of lisianthus. *Scientia Horticulturae*, *121*(2), 206-212.
- Kawamura, K., Hibrand-Saint Oyant, L., Crespel, L., Thouroude, T., Lalanne, D., & Foucher, F. (2011). Quantitative trait loci for flowering time and inflorescence architecture in rose. *Theoretical and Applied Genetics*, *122*(4), 661-675.
- Kawamura, K., Hibrand-Saint Oyant, L., Foucher, F., Thouroude, T., & Loustau, S. (2014). Kernel methods for phenotyping complex plant architecture. *Journal of Theoretical Biology*, *342*, 83-92.
- Kawamura, K., Hibrand-Saint Oyant, L., Thouroude, T., Jeauffre, J., & Foucher, F. (2015). Inheritance of garden rose architecture and its association with flowering behaviour. *Tree Genetics & Genomes*, *11*(2), 1-12.
- Kawamura, K., & Takeda, H. (2002). Light environment and crown architecture of two temperate *Vaccinium* species: inherent growth rules versus degree of plasticity in light response. *Canadian Journal of Botany*, *80*(10), 1063-1077.
- Kawamura, K., & Takeda, H. (2004). Rules of crown development in the clonal shrub *Vaccinium hirtum* in a low-light understory: a quantitative analysis of architecture. *Canadian Journal of Botany*, *82*(3), 329-339.
- Kendal, D., Williams, K. J. H., & Williams, N. S. G. (2012). Plant traits link people's plant preferences to the composition of their gardens. *Landscape and Urban Planning*, *105*(1), 34-42.
- Kohsel, L. (2001). New unsupervised approach for solving classification problems with computer vision. *Acta Horticulturae (ISHS)*, *562*, 361-375.
- Kohsel, L., & Bennedsen, B. S. (2001). Performance of human experts grading pot roses in a commercial environment. *Acta Horticulturae (ISHS)*, *562*, 273-283.
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling*. New York, USA: Springer.
- Köster, E. P. (2009). L'organisation des épreuves hédoniques. In F. Depledte & SSHA (Eds.), *Evaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 201-203). Paris: Lavoisier.
- Labbe, D., Rytz, A., & Hugi, A. (2004). Training is a critical step to obtain reliable product profiles in a real food industry context. *Food Quality and Preference*, *15*(4), 341-348.
- Larson, K. C., & Whitham, T. G. (1997). Competition between gall aphids and natural plant sinks: plant architecture affects resistance to galling. *Oecologia*, *109*(4), 575-582.
- Le Bris, M. (1999). *Etude des potentialités physiologiques des bourgeons axillaires le long de la tige de Rosa hybrida L. Rôle d'un inhibiteur, l'acide abscissique*. (PhD.), Université de Nice-Sophia Antipolis.
- Le Bris, M., Champeroux, A., Bearez, P., & Le Page-Degivry, M. T. (1998). Basipetal gradient of axillary bud inhibition along a rose (*Rosa hybrida* L.) stem: growth potential of primary buds and their two most basal secondary buds as affected by position and age. *Annals of Botany*, *81*(2), 301-309.
- Leduc, N., Roman, H., Barbier, F., Péron, T., L, H.-T., Lothier, J., . . . Sakr, S. (2014). Light Signaling in Bud Outgrowth and Branching in Plants. *Plants*, *3*(2), 223-250.
- Li-Marchetti, C., Le Bras, C., Relion, D., Citerne, S., Huché-Thélier, L., Sakr, S., . . . Crespel, L. (2015). Genotypic differences in architectural and physiological responses to water restriction in rose bush. *Frontiers in Plant Science*, *6*(355).
- Liorzou, M., Pernet, A., Li, S., Chastellier, A., Thouroude, T., Michel, G., . . . Grapin, A. (2016). Nineteenth century French rose (*Rosa* sp.) germplasm shows a shift over time from a European to an Asian genetic background. *Journal of Experimental Botany*, *67*(15), 4711-4725.
- Lootens, P., Van Waes, J., & Carlier, L. (2007). Evaluation of the tepal colour of *Begonia x tuberhybrida* Voss. for DUS testing using image analysis. *Euphytica*, *155*(1-2), 135-142.
- Lootens, P., Vandecasteele, P., & Heursel, J. (2000). Evaluation of the flowering quality of *Rhododendron simsii* cultivars through image analysis. *Acta Horticulturae (ISHS)*, *517*, 329-334.
- Lou, L., Liu, Y., Han, J., & Doonan, J. H. (2014a). *Accurate multi-view stereo 3D reconstruction for cost-effective plant Pphenotyping*. Paper presented at the 11th International Conference on Image Analysis and Recognition, Vilamoura, Portugal.
- Lou, L., Liu, Y., Sheng, M., Han, J., & Doonan, J. H. (2014b). *A cost-effective automatic 3D reconstruction pipeline for plants using multi-view images*. Paper presented at the 15th Towards Autonomous Robotic Systems, Birmingham, UK.
- 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, *166*, 98-112.
- Maas, F. M., & Bax, E. J. (1995). Effects of light on growth and flowering of *rosa hybrida*" Mercedes". *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *120*, 571-576.

- MacLeod, P., Sauvageot, F., & Köster, E. P. (2009). Les caractéristiques d'une réponse sensorielle. In F. Depledge & SSHA (Eds.), *Evaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 7-33). Paris: Lavoisier.
- MacFie, H. J. H., & Hedderley, D. (1993). Current practice in relating sensory perception to instrumental measurements. *Food Quality and Preference*, 4(1), 41-49.
- Magwaza, L. S., & Opara, U. L. (2015). Analytical methods for determination of sugars and sweetness of horticultural products—A review. *Scientia Horticulturae*, 184, 179-192.
- Manzocco, L., Rumignani, A., & Lagazio, C. (2012). Use of images in shelf life assessment of fruit salad. *Journal of Food Science*, 77(7), S258-S262.
- Marcelis-van Acker, C. A. M. (1993). Morphological study of the formation and development of basal shoots in roses. *Scientia Horticulturae*, 54(2), 143-152.
- Marcelis-van Acker, C. A. M. (1995). Effect of temperature on development and growth potential of axillary buds in roses. *Scientia Horticulturae*, 63(3), 241-250.
- Mason, S. C., Starman, T. W., Lineberger, R. D., & Behe, B. K. (2008). Consumer preferences for price, color harmony, and care information of container gardens. *HortScience*, 43(2), 380-384.
- Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., Bertrand, D., & Jourjon, F. (2004). Prediction of the sensory quality of apples by physical measurements. *Postharvest Biology and Technology*, 34(3), 257-269.
- Mehinagic, E., Royer, G., Symoneaux, R., & Jourjon, F. (2006). Relationship between apple sensory attributes and instrumental parameters of texture. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 14, 25.
- Meijón, M., Rodríguez, R., Jesús Cañal, M., & Feito, I. (2009). Improvement of compactness and floral quality in azalea by means of application of plant growth regulators. *Scientia Horticulturae*, 119(2), 169-176.
- Meilgaard, M. C., Carr, B. T., & Civille, G. V. (2006). *Sensory evaluation techniques* (4 ed.): CRC press.
- Meuleman, J., & Dijkstra, J. (1998). *Neural network for the classification of pot plants*. Paper presented at the Second International Symposium On Sensors in Horticulture, Greve, Denmark.
http://www.actahort.org/books/421/421_2.htm
- Meynet, J. (2001). Les rosiers cultivés, une très longue histoire d'exploitation de la biodiversité seulement pour le plaisir et l'art de vivre. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*(21), 113-118.
- Mor, Y., & Zieslin, N. (1992). Phyllody malformation in flowers of *Rosa* × *hybrida* cv. Motrea: effects of rootstocks, flower position, growth regulators and season. *Journal of experimental botany*, 43(1), 89-93.
- Moreda, G. P., Muñoz, M. A., Ruiz-Altisent, M., & Perdignes, A. (2012). Shape determination of horticultural produce using two-dimensional computer vision – A review. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 245-261.
- Moreda, G. P., Ortiz-Cañavate, J., García-Ramos, F. J., & Ruiz-Altisent, M. (2009). Non-destructive technologies for fruit and vegetable size determination—a review. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 119-136.
- Morel, P., Crespel, L., Galopin, G., & Mouliat, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching of garden rose. *Scientia Horticulturae*, 135, 59-64.
- Morel, P., Galopin, G., & Donès, N. (2009). Using architectural analysis to compare the shape of two hybrid tea rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 120(3), 391-398.
- Mosher, J. M., & Turner, D. W. (2000). Productivity of three rose cultivars *Rosa hybrida* trained in a 'vase-shaped' form and grown in a commercial glasshouse in a Mediterranean environment. *Scientia Horticulturae*, 83(3), 311-324.
- Murray, J. M., Delahunty, C. M., & Baxter, I. A. (2001). Descriptive sensory analysis: past, present and future. *Food Research International*, 34(6), 461-471.
- Ménard, C., & Dansereau, B. (1995). Differential responses of rose cultivars to light source and nitrogen fertilization. *Scientia Horticulturae*, 64(1), 117-132.
- Müller, R., Andersen, A. S., & Serek, M. (1998). Differences in display life of miniature potted roses (*Rosa hybrida* L.). *Scientia Horticulturae*, 76(1), 59-71.
- Nadžpal, J. D., Lesjak, M. M., Šibul, F. S., Anačkov, G. T., Četojević-Simin, D. D., Mimica-Dukić, N. M., & Beara, I. N. (2016). Comparative study of biological activities and phytochemical composition of two rose hips and their preserves: *Rosa canina* L. and *Rosa arvensis* Huds. *Food Chemistry*, 192, 907-914.
- Nicod, H., Clément, J. F., Sauvageot, F., & Strigler, F. (2009). L'organisation pratique de la mesure sensorielle. In F. Depledge & SSHA (Eds.), *Evaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 49-97). Paris: Lavoisier.
- Næs, T., Brockhoff, P., & Tomic, O. (2011). *Statistics for sensory and consumer science*: John Wiley & Sons.
- Næs, T., & Kowalski, B. (1989). Predicting sensory profiles from external instrumental measurements. *Food Quality and Preference*, 1(4-5), 135-147.
- Ogata, J., Kanno, Y., Itoh, Y., Tsugawa, H., & Suzuki, M. (2005). Plant biochemistry: anthocyanin biosynthesis in roses. *Nature*, 435(7043), 757-758.
- Oldeman, R. A. A. (1974). *L'architecture de la forêt guyanaise*. Mémoires ORSTOM, (73). ORSTOM, Paris.


- Olsson, Å., Nybom, H., & Prentice, H. C. (2000). Relationships between Nordic dogroses (*Rosa* L. sect. *Caninae*, Rosaceae) assessed by RAPDs and elliptic Fourier analysis of leaflet shape. *Systematic Botany*, *25*(3), 511-521.
- Omasa, K., Hosoi, F., & Konishi, A. (2007). 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of Experimental Botany*, *58*(4), 881-898.
- Pagola, M., Ortiz, R., Irigoyen, I., Bustince, H., Barrenechea, E., Aparicio-Tejo, P., . . . Lasa, B. (2009). New method to assess barley nitrogen nutrition status based on image colour analysis: comparison with SPAD-502. *Computers and Electronics in Agriculture*, *65*(2), 213-218.
- Pallas, B., Da Silva, D., Valsesia, P., Yang, W., Guillaume, O., Lauri, P.-E., . . . Costes, E. (2016). Simulation of carbon allocation and organ growth variability in apple tree by connecting architectural and source-sink models. *Annals of Botany*, *118*(2), 317-330.
- Patel, S. (2013). Rose hips as complementary and alternative medicine: overview of the present status and prospects. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, *6*(2), 89-97.
- Paulus, S., Schumann, H., Kuhlmann, H., & Léon, J. (2014). High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants. *Biosystems Engineering*, *121*, 1-11.
- Pearcy, R. W., Muraoka, H., & Valladares, F. (2005). Crown architecture in sun and shade environments: assessing function and trade-offs with a three-dimensional simulation model. *New phytologist*, *166*(3), 791-800.
- Phattaralerphong, J., & Sinoquet, H. (2005). A method for 3D reconstruction of tree crown volume from photographs: assessment with 3D-digitized plants. *Tree Physiology*, *25*(10), 1229-1242.
- Plataniotis, K., & Venetsanopoulos, A. N. (2013). *Color image processing and applications*. Berlin: Springer.
- Pradal, C., Dufour-Kowalski, S., Boudon, F., Fournier, C., & Godin, C. (2008). OpenAlea: a visual programming and component-based software platform for plant modelling. *Functional Plant Biology*, *35*(10), 751-760.
- Prusinkiewicz, P. (1998). Modeling of spatial structure and development of plants: a review. *Scientia Horticulturae*, *74*(1-2), 113-149.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., . . . Gurvich, D. E. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, *61*(3), 167-234.
- Raimbault, P., & Tanguy, M. (1993). La gestion des arbres d'ornement. Ire partie: une méthode d'analyse et de diagnostic de la partie aérienne. *Revue Forestière Française*, *XLV*(2), 97-117.
- Rajapakse, N. C., & Kelly, J. W. (1994). Influence of spectral filters on growth and postharvest quality of potted miniature roses. *Scientia Horticulturae*, *56*(3), 245-255.
- Rameau, C., Bertheloot, J., Leduc, N., Andrieu, B., Foucher, F., & Sakr, S. (2015). Multiple pathways regulate shoot branching. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 741.
- Rehder, A. (1940). *Manual of cultivated trees and shrubs hardy in North America, exclusive of the subtropical and warmer temperate regions* (2 ed.). New York: Macmillan.
- Ricofe-Viala, C., & Sánchez-Salmerón, A.-J. (2010). Robust metric calibration of non-linear camera lens distortion. *Pattern Recognition*, *43*(4), 1688-1699.
- Roberts, A., Debener, T., & Gudín, S. (2003). *Encyclopedia of Rose Science* (A. Roberts, T. Debener, & S. Gudín Eds.): Academic Press.
- Roman, H., Girault, T., Barbier, F., Péron, T., Brouard, N., Pěňčík, A., . . . Lothier, J. (2016). Cytokinins are initial targets of light in the control of bud outgrowth. *Plant Physiology*, *172*(1), 489-509.
- Roman, H., Rapicault, M., Miclot, A. S., Larenaudie, M., Kawamura, K., Thouroude, T., . . . Foucher, F. (2015). Genetic analysis of the flowering date and number of petals in rose. *Tree Genetics & Genomes*, *11*(4), 1-13.
- Rorie, R. L., Purcell, L. C., Karcher, D. E., & King, C. A. (2011). The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images. *Crop Science*, *51*(5), 2174-2180.
- Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, *81*(0), 124-141.
- Royal Horticultural Society. (n.d.). RHS plant trials and awards. Retrieved from www.rhs.org.uk/plants/trials-awards
- Ruiz-Altisent, M., Ruiz-García, L., Moreda, G. P., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E. C., . . . García-Ramos, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, *74*(2), 176-194.
- Sachs, T., & Novoplansky, A. (1995). Tree form: architectural models do not suffice. *Israel Journal of Plant Sciences*, *43*(3), 203-212.
- Santagostini, P., Demotes-Mainard, S., Huché-Théliér, L., Leduc, N., Bertheloot, J., Guérin, V., . . . Boumaza, R. (2014). Assessment of the visual quality of ornamental plants: Comparison of three methodologies in the case of the rosebush. *Scientia Horticulturae*, *168*, 17-26.

- Saudreau, M., Marquier, A., Adam, B., Monney, P., & Sinoquet, H. (2009). Experimental study of fruit temperature dynamics within apple tree crowns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(2), 362-372.
- Sauvageot, F. (1998). L'évaluation sensorielle: Une technique qui mobilise l'activité cognitive des sujets tout autant que leur activité sensorielle. *Industries Alimentaires et Agricoles*, 115(3), 33-40.
- Sauvageot, F. (2001). Les caractéristiques d'une réponse sensorielle. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 5(3), 171-179.
- Scheiner, S. M. (1993). Genetics and evolution of phenotypic plasticity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 24, 35-68.
- Schlichting, C. D. (1986). The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17, 667-693.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671.
- Schreiner, M., Korn, M., Stenger, M., Holzgreve, L., & Altmann, M. (2013). Current understanding and use of quality characteristics of horticulture products. *Scientia Horticulturae*, 163, 63-69.
- Scuderi, D., Giuffrida, F., Toscano, S., & Romano, D. (2012). Growth, physiological response, and quality characteristics of weeping fig in response to shading levels and climatic conditions. *HortScience*, 47(11), 1586-1592.
- Seisonen, S., Vene, K., & Koppel, K. (2016). The current practice in the application of chemometrics for correlation of sensory and gas chromatographic data. *Food Chemistry*, 210, 530-540.
- Shlyakhter, I., Rozenoer, M., Dorsey, J., & Teller, S. (2001). Reconstructing 3D tree models from instrumented photographs. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(3), 53-61.
- Silva, L., Koga, M. L., Cugnasca, C. E., & Costa, A. H. R. (2013). Comparative assessment of feature selection and classification techniques for visual inspection of pot plant seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 47-55.
- Simon, S., Lauri, P. E., Brun, L., Defrance, H., & Sauphanor, B. (2006). Does manipulation of fruit-tree architecture affect the development of pests and pathogens? A case study in an organic apple orchard. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81(4), 765-773.
- Simon, S., Sauphanor, B., & Lauri, P.-E. (2007). Control of fruit tree pests through manipulation of tree architecture. *Pest Technology*, 1(1), 33-37.
- Sinoquet, H., Rivet, P., Godin, C. (1997). Assessment of the three-dimensional architecture of walnut trees using digitising. *Silva Fennica*, 31(3), 265-273.
- Sinoquet, H., Rivet, P. (1997). Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. *Trees*, 11(5), 265-270
- Sinoquet, H., Stephan, J., Sonohat, G., Lauri, P. E., & Monney, P. (2007). Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features: Assessment with three-dimensional digitized apple trees. *New Phytologist*, 175(1), 94-106.
- Société Française des Roses. (n.d.). Classification des roses nouvelles. Retrieved from http://societefrancaisedesroses.asso.fr/fr/rosiers_et_roses/classification_roses.htm
- Société Française des Roses. (n.d.1). Choisir son rosier. Retrieved from http://societefrancaisedesroses.asso.fr/fr/rosiers_et_roses/choisir_rosier.htm
- Sonalier, T. (2014) *Les projets du Liechtenstein pour faire reflleurir Jardiland/Interviewer: A. Huijgen*. Le Figaro.
- Sozzani, R., Busch, W., Spalding, E. P., & Benfey, P. N. (2014). Advanced imaging techniques for the study of plant growth and development. *Trends in Plant Science*, 19(5), 304-310.
- Sterck, F. J., Duursma, R. A., Percy, R. W., Valladares, F., Cieslak, M., & Weemstra, M. (2013). Plasticity influencing the light compensation point offsets the specialization for light niches across shrub species in a tropical forest understorey. *Journal of Ecology*, 101(4), 971-980.
- Stone, H., Sidel, J., Oliver, S., Woolsey, A., & Singleton, R. C. (1974). Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis. *Food Technology*, 28(11), 24-34.
- Strigler, F. (2009). Introduction. In F. Depledt & SSHA (Eds.), *Évaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 1-3). Paris: Lavoisier.
- Strigler, F., Touraille, C., Sauvageot, F., Barthélémy, J., & Issanchou, S. (2009). Les épreuves discriminatives et descriptives. In F. Depledt & SSHA (Eds.), *Évaluation sensorielle : Manuel méthodologique* (3 ed., pp. 99-197). Paris: Lavoisier.
- Surový, P., Ribeiro, N., & Pereira, J. S. (2011). Observations on 3-dimensional crown growth of Stone pine. *Agroforestry Systems*, 82(2), 105-110.
- Symoneaux, R., Galmarini, M. V., & Mehinagic, E. (2012). Comment analysis of consumer's likes and dislikes as an alternative tool to preference mapping. A case study on apples. *Food Quality and Preference*, 24(1), 59-66.

- Tamasi, E., Stokes, A., Lasserre, B., Danjon, F., Berthier, S., Fourcaud, T., & Chiatante, D. (2005). Influence of wind loading on root system development and architecture in oak (*Quercus robur* L.) seedlings. *Trees*, 19(4), 374-384.
- Tarbouriech, M.-F. (2001). Des églantiers et des roses. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA*(21), 119-124.
- The Plant List. (2013). Version 1.1. Retrieved from <http://www.theplantlist.org/>
- Timmermans, A. J. M. (1998). *Computer vision system for on-line sorting of pot plants based on learning techniques*. Paper presented at the Second International Symposium On Sensors in Horticulture, Greve, Denmark. http://www.actahort.org/books/421/421_8.htm
- Timmermans, A. J. M., & Hulzebosch, A. A. (1996). Computer vision system for on-line sorting of pot plants using an artificial neural network classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*, 15(1), 41-55.
- Townsley-Brascamp, W., & Marr, N. E. (1994). Evaluation and analysis of consumer preferences for outdoor ornamental plants. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 391, 199-208.
- Turnbull, C. G. N. (2005). *Plant Architecture and its Manipulation* (C. G. N. Turnbull Ed. Vol. 17). Oxford: Blackwell Publishing.
- UPOV. (2002). Introduction générale à l'examen de la distinction, de l'homogénéité et de la stabilité et à l'harmonisation des descriptions des obtentions végétales. Retrieved from http://www.upov.int/export/sites/upov/publications/fr/tg_rom/pdf/tg_1_3.pdf
- UPOV. (2004). Rose. *Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability*. Retrieved from http://www.upov.int/edocs/mdocs/upov/en/tg/2004/tg_11_8_proj_2.pdf
- UPOV. (2010). Rose. *Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability*. Retrieved from <http://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg011.pdf>
- Urdapilleta, I. (2001). *Traité d'évaluation sensorielle: Aspects cognitifs et métrologiques des perceptions*: Dunod.
- Usha, K., & Singh, B. (2013). Potential applications of remote sensing in horticulture—A review. *Scientia Horticulturae*, 153, 71-83.
- Valladares, F. (1999). Architecture, ecology, and evolution of plant crowns. *Handbook of Functional Plant Ecology*, 121-194.
- Valladares, F., Wright, S. J., Lasso, E., Kitajima, K., & Pearcy, R. W. (2000). Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a Panamanian rainforest. *Ecology*, 81(7), 1925-1936.
- Varela, P., & Ares, G. (2012). Sensory profiling, the blurred line between sensory and consumer science. A review of novel methods for product characterization. *Food Research International*, 48(2), 893-908.
- Via, S., & Lande, R. (1985). Genotype-environment interaction and the evolution of phenotypic plasticity. *Evolution*, 39(3), 505-522.
- Vos, J., Evers, J. B., Buck-Sorlin, G. H., Andrieu, B., Chelle, M., & de Visser, P. H. B. (2010). Functional-structural plant modelling: a new versatile tool in crop science. *Journal of experimental botany*, 61(8), 2101-2115.
- Vosman, B., Visser, D., van der Voort, J. R., Smulders, M. J. M., & van Eeuwijk, F. (2004). The establishment of 'essential derivation' among rose varieties, using AFLP. *Theoretical and Applied Genetics*, 109(8), 1718-1725.
- Wang, Q., Chen, J., Stamps, R. H., & Li, Y. (2005). Correlation of visual quality grading and SPAD reading of green-leaved foliage plants. *Journal of Plant Nutrition*, 28(7), 1215-1225.
- Wang, W., & Li, C. (2014). Size estimation of sweet onions using consumer-grade RGB-depth sensor. *Journal of Food Engineering*, 142, 153-162.
- White, R. J., Prentice, H. C., & Verwijst, T. (1988). Automated image acquisition and morphometric description. *Canadian Journal of Botany*, 66(3), 450-459.
- Wissemann, V. (2003). Conventional taxonomy of wild roses. In A. Roberts, T. Debener, & S. Gudin (Eds.), *Encyclopedia of Rose Science* (Vol. 1, pp. 111-117). London: Elsevier, Academic Press.
- Wissemann, V. (2006). Beauty and the bastards. *BIF Futura*, 21, 158-163.
- Wissemann, V., & Ritz, C. M. (2005). The genus *Rosa* (Rosoidae, Rosaceae) revisited: molecular analysis of nrITS-1 and atpB-rbcL intergenic spacer (IGS) versus conventional taxonomy. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 147(3), 275-290.
- Wolters, C. J., & Allchurch, E. M. (1994). Effect of training procedure on the performance of descriptive panels. *Food Quality and Preference*, 5(3), 203-214.
- Wright, S. (1921). Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20(7), 557-585.
- Xu, W., Su, Z., Feng, Z., Xu, H., Jiao, Y., & Yan, F. (2013). Comparison of conventional measurement and LiDAR-based measurement for crown structures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98(0), 242-251.
- Yamul, D. K., Galmarini, M. V., Lupano, C. E., & Zamora, M. C. (2013). Whey protein concentrate gels with different sucrose content: Instrumental texture measurements and sensory perception. *International Dairy Journal*, 28(1), 24-31.

- Yan, Z., Denneboom, C., Hattendorf, A., Dolstra, O., Debener, T., Stam, P., & Visser, P. B. (2005). Construction of an integrated map of rose with AFLP, SSR, PK, RGA, RFLP, SCAR and morphological markers. *Theoretical and Applied Genetics*, *110*(4), 766-777.
- Zhang, D., & Gandelin, M. H. (2003). Cultivar identification by image analysis. In A. Roberts, T. Debener, & S. Gudin (Eds.), *Encyclopedia of Rose Science* (Vol. 1, pp. 124-127). Oxford: Elsevier.
- Zieslin, N., & Halevy, A. H. (1975a). Flower bud atrophy in 'Baccara' roses. I. Description of the phenomenon and its seasonal frequency. *Scientia Horticulturae*, *3*(3), 209-216.
- Zieslin, N., & Halevy, A. H. (1975b). Flower bud atrophy in 'Baccara' roses. II. The effect of environmental factors. *Scientia Horticulturae*, *3*(4), 383-391.
- Zieslin, N., & Mor, Y. (1981a). Plant management of greenhouse roses. Formation of renewal canes. *Scientia Horticulturae*, *15*(1), 67-75.
- Zieslin, N., & Mor, Y. (1981b). Plant management of greenhouse roses. Lateral bud removal. *Scientia Horticulturae*, *14*(4), 387-393.
- Zieslin, N., & Mor, Y. (1981c). Plant management of greenhouse roses. The pruning. *Scientia Horticulturae*, *14*(3), 285-293.
- Zieslin, N., & Mor, Y. (1990). Light on roses. A review. *Scientia Horticulturae*, *43*(1), 1-14.
- Zieslin, N., & Tsujita, M. J. (1990). Response of miniature roses to supplementary illumination. 1. Light intensity. *Scientia Horticulturae*, *42*(1-2), 113-121.
- Zucchini, W. (2000). An Introduction to model selection. *Journal of Mathematical Psychology*, *44*(1), 41-61.

Shape descriptors to characterize the shoot of entire plant from multiple side views of a motorized depth sensor

Yann Chéné¹  · David Rousseau² · Étienne Belin¹ · Morgan Garbez³ · Gilles Galopin³ · François Chapeau-Blondeau¹

Received: 19 September 2013 / Revised: 22 March 2016 / Accepted: 23 March 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract A low-cost depth camera recently introduced is synchronized with a specially devised low-cost motorized turntable. This results in a low-cost motorized depth sensor, able to provide a large number of registered side views, which is exploited here for the quantitative characterization of the shoots of entire plants. A set of four new shape descriptors of the shoots, constructed from the depth images on multiple side views of the shoots of plants, is proposed. The four descriptors quantify effective volume, multiscale organization, spatial symmetries and lacunarity of the plants. The four descriptors are here defined, validated on synthetic scenes with known properties, and then applied on nine different-looking real plants to illustrate their abilities for quantitative characterization and comparison. The resulting motorized depth sensor and associated image processing open new perspectives to various plant science applications including plant growth and architecture monitoring, plant response to stresses or the assessment of aesthetic parameters for ornamental plants.

Keywords Kinect · Depth image · Shape descriptor · Fractal · Plant shoots · Phenotyping

✉ Étienne Belin
etienne.belin@univ-angers.fr

- ¹ Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes (LARIS), Université d'Angers, 62 avenue Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France
- ² Université de Lyon, CREATIS, CNRS UMR 5220, INSERM U1044, Université Lyon 1, INSA-Lyon, 69621 Villeurbanne, France
- ³ Agrocampus Ouest, Centre d'Angers-Institut National d'Horticulture et du Paysage, UMR 1345 IRHS (Agrocampus Ouest, INRA, Université d'Angers), 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France

1 Introduction

At different observation scales, plants (seedling, roots, entire plant) are formed of complex spatial structures. The non-destructive and noninvasive analysis of these structures and monitoring of their spatio-temporal evolutions is a topic of current interest for computer vision specially when applied to the domain of high-throughput phenotyping (see [1] for a recent review and see [2–4], for recent issues in this journal) where large populations of plants are to be characterized in relation to their environment and genotype. The shape analysis of the structures in the shoots of plants (leaflets, leaves, branches together with other organs) is challenging from conventional RGB imaging since in most cases the shoots of plants are globally homogenous in color. However, gazing at plants with other imaging sensors can help to overcome this challenge. Because of the discrete location of the leaves along the branching structure of the plants, contrast between leaves is likely to exist in their distinct relative distances to a camera. Following this idea, it has recently been shown that depth sensors, providing distance maps between the forefront of a scene and the imaging sensor, can be useful to the characterization of the structure of the shoots of entire plants [1, 5–17]. Various observation scales, including small plants [1], more structured shoots of entire plants [6, 7, 11–14] and canopy [5, 8–10, 15], have been analysed with depth cameras. Different technologies of depth sensors have been used: a laser scanner in [9, 10], time of flight cameras in [5, 11, 12], the stereovision in [6, 8, 16] or the structured lighting in [7, 13–15, 17]. Similarly to what has been undertaken in other fields of engineering [18], a comparison of some of these three-dimensional (3D) imaging technologies has recently been undertaken on the same plants [14]. Interestingly, it appears that the sensor used in [7, 13], the Microsoft Kinect sensor, although of very low cost is competitively applicable for the characterization

of a large variety of shoots of plants. In [13, 14], the segmentation of each individual leaf was performed with the Microsoft Kinect from indoor single top views of rosebushes or apple trees. In [7], such single top views of outdoor acquisitions with the same low-cost sensor were shown also valuable for the characterization of the ensemble of the shoots of artichoke and rubber trees. Although a top view already carries relevant information on the shoot structure, there are much more to be gained for a full characterization of the structure of the shoots if additional views can be acquired. In this article, we propose to extend the work of [7, 13, 14] in the direction of the characterization of the ensemble of the shoots from multiple acquisitions with a low-cost depth sensor coupled with a motorized turntable. As 3D full reconstruction of the shoots is sometimes a hard task owing to complexity of shoot spatial structures, we propose using depth images around the plant to characterize depth of the shoots of the plant.

The article is organized as follows: We first describe the acquisition system. Then, we propose shape descriptors devised to quantify traits of the shoots of entire plants from depth images. Such traits are specifically used by botanists to describe plants by sensorial attribute scores of ornamental plants assessed in 3D as recently published in [19]. For calibration purposes, we test our descriptors on synthetic scenes. We finally illustrate our new sensor on nine different-looking plants and discuss its relevance for different plant science applications.

2 Motorized depth sensor

The depth sensor of the Microsoft Kinect uses active triangulation to compute the depth of the forefront objects in a scene. This sensor measures $27.9 \text{ cm} \times 6.3 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm}$, weighs 1.36 kg and includes a motor to control its position. It is composed of an infrared (IR) light source and a CMOS sensor equipped with a bandpass IR filter. The IR light source is projected through a diffraction grid resulting in a pseudo-random speckle pattern of binary light dots. The neighbourhood of each light dot is unique. The depth image is then computed from differences between a reference speckle pattern obtained at a given distance and the speckle pattern viewed by the IR sensor. Each light dot is retrieved in the reference speckle pattern by an image correlation of a 9×9 window around the point due to its unique neighbourhood. Finally, the depth in each pixel is computed with a triangulation method. Use of the active triangulation results in a very low-cost depth sensor. Depth images are delivered with a resolution of 640×480 pixels at 30 frames per second with a field of view of $57^\circ \times 43^\circ$. Depth is coded on 11 bits with a precision of 1 cm at a distance of 2 m. The precision decreases quadratically with depth [20]. From our practical use of this depth sensor, the range of depth is 0.5–6 m. The

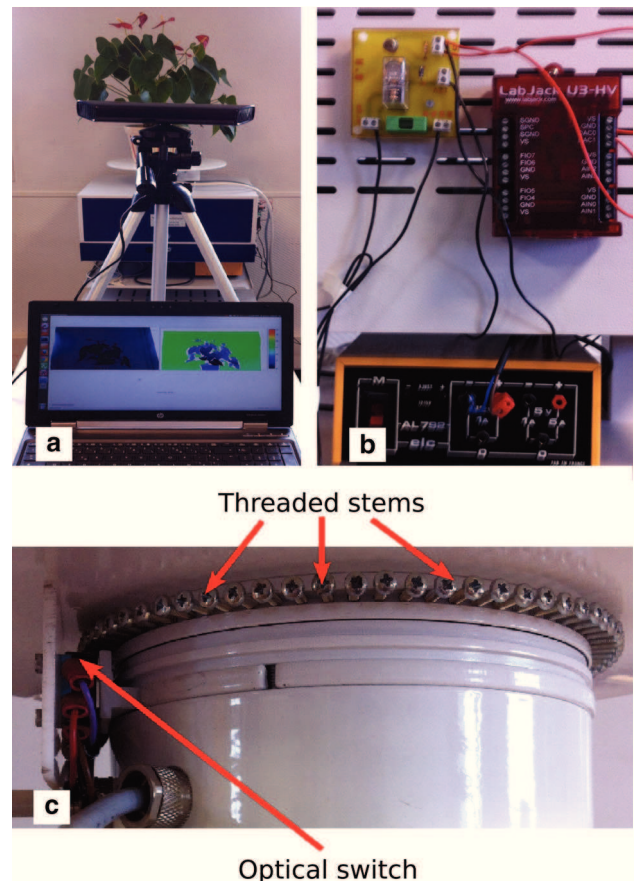


Fig. 1 A motorized depth sensor to characterize the depth of the shoots of entire plants. **a** Global view of the motorized depth sensor. **b** A LabJack system triggers the rotation by sending an electrical impulse to the rotating plate. **c** An optical switch detects the passing of the threaded stems and stops the rotation

synchronization of the Microsoft Kinect depth sensor with the rotation of a motorized turntable results in a motorized depth sensor displayed by Fig. 1a.

The turntable has been specifically devised and assembled with constraints of low cost and transportability. Synchronized with the depth sensor, it results in a motorized depth sensor which can acquire depth images of plants weighting up to 15 kg. Depth images are acquired every 5° for a total of 72 poses all around the plant. The rotation system has been realized so as to transform a continuous mode into a step-by-step mode every 5° at a low cost. A LabJack system [21], connected to a computer, triggers the rotation by sending an electrical impulse to the rotative system (see Fig. 1b). Threaded stems are placed at periodic intervals along the border of the rotating plate (see Fig. 1c). At each rotation, an optical switch detects the passing of a threaded stem and stops the rotation, the depth image acquisition is performed after a delay to avoid perturbing the image acquisition with movements from the shoots of the plant that would be induced by rotation. The motorized depth sensor is managed with an homemade Qt

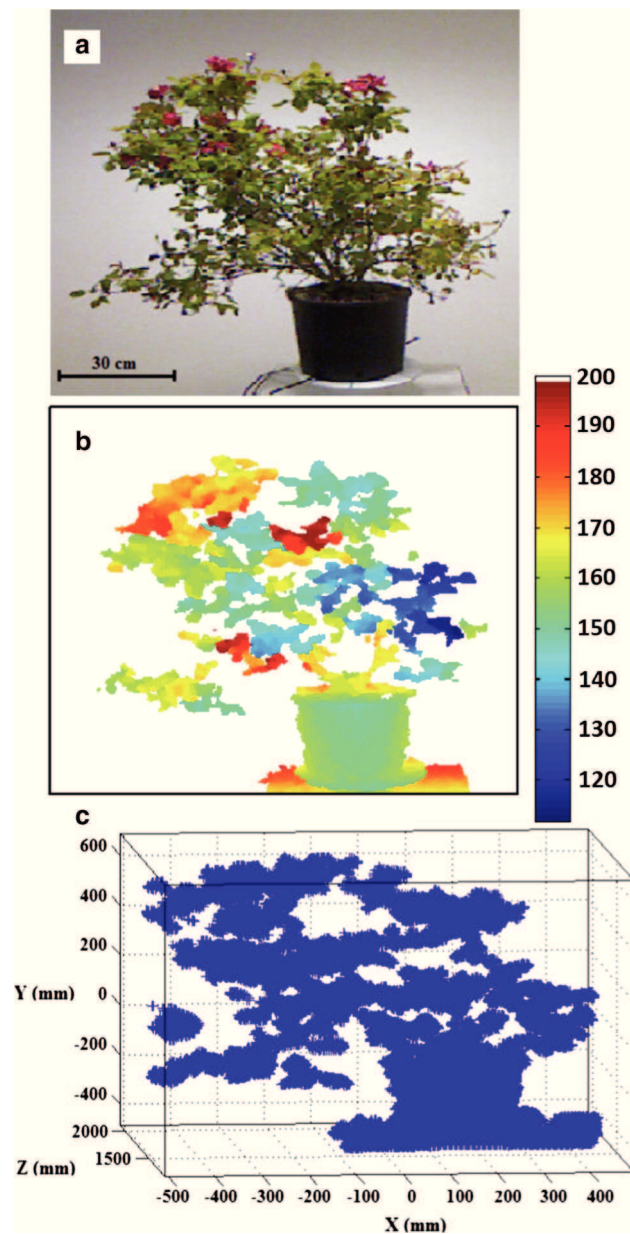


Fig. 2 Example of a plant characterized in its depth from acquisitions with the motorized depth sensor. **a** The RGB image of the plant (the given *scale bar* corresponds to the spatial resolution in the median plane of the pot). **b** Corresponding depth image (depth values are in cm). **c** Corresponding point cloud

[22] interface written in C++ language and based on OpenNI [23] drivers to acquire depth images of the Kinect Microsoft depth sensor. Figure 2 gives an example of a plant characterized in its depth with our motorized depth sensor.

3 Shape descriptors

A depth image provides in each pixel the depth of forefront points of the shoots of the plant (see Fig. 2b). From a known

formula [20], each pixel can be converted to a point, with 3D coordinates (X, Y, Z) expressed in metres, in a given 3D reference. The conversion of all points of the shoots of the plant results in a 2.5D representation of the shoots of the plant, called the point cloud (see Fig. 2c). Limits of this point cloud are the rectangular box with faces orthogonal to the coordinate axes (X, Y, Z) and passing through the two extreme coordinates found for the points in the cloud along each of the three axes (X, Y, Z) . In practice, the pot was withdrawn by a threshold on height because the plant tested was elongated enough so that extremely few pixels of the plant were found to be located at an altitude below the pot height. It would be possible to improve this procedure by detecting the conical shape of the pot in the point cloud for example using the RANSAC algorithm for conical shape present in the PCL library of C++ [24].

In this article, we introduce four new descriptors specially built for depth characterization of the shoots of the plant: the effective volume, the multiscale analysis (box counting and number of neighbours methods), the 3D symmetry (longitudinal, transverse and parallel symmetries) and the hole ratios. Independently extracted from each view of the plant, these descriptors are computed either from the depth map (hole ratios), from the point cloud (multiscale analysis and 3D symmetry), or from both representations (effective volume). In the sequel, we first describe the computation of the four new shape descriptors, and then we use synthetic scene with a known depth image and point cloud to validate the computation of each descriptor.

3.1 Effective volume

The real volume of a plant is the sum of volumes of all its single elements (stem and organs) and it can only be computed from the total 3D reconstruction of the plant. In this study, we do not reconstruct the plant. So we propose a new descriptor describing the space filled by the plant: the effective volume. In physics, an effective surface is the visible surface from a certain point of view. By analogy, the effective volume is the volume viewed from the depth sensor point of view.

This effective volume could be estimated, as in [7], from the volume of the convex hull that contains all the point cloud. However, this measurement is only based on coordinates of the convex hull vertices, so it is a global estimation of the effective volume. Here, to improve the effective volume measurement, we propose a new algorithm which compute the effective volume as the sum of local effective volumes. For each point i of the point cloud, the distance D_i is the difference between the maximum depth value in the point cloud and the depth value Z_i of the point i . So, we define the local effective volume of each point i of the point cloud as the product between the area of a local polygon around the point i with D_i . Figure 3 depicts the steps followed to find the local

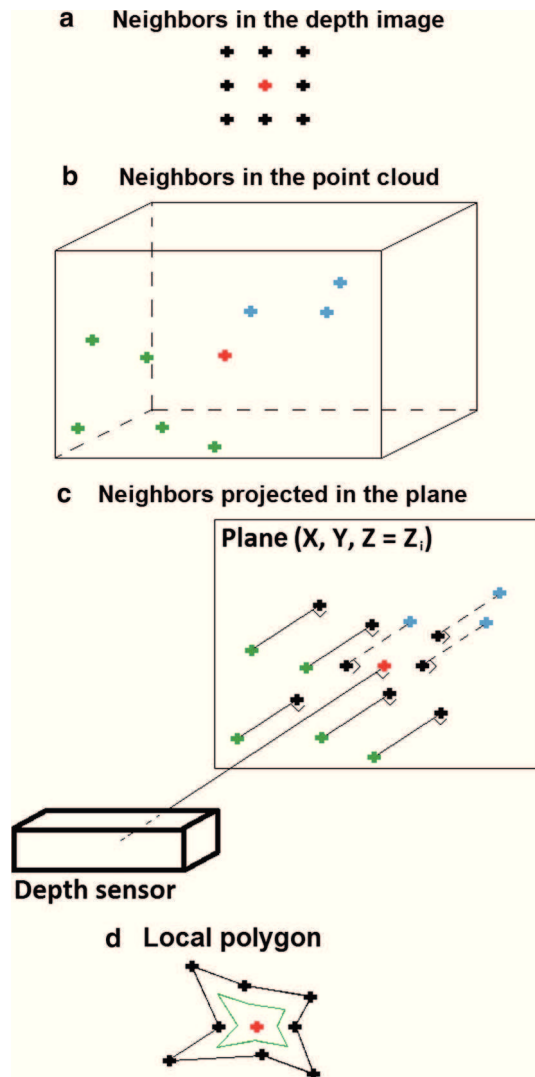


Fig. 3 Main steps used to compute the local effective volume. **a** A local depth image. The red cross is the current point i and black crosses are its neighbours. **b** The corresponding local point cloud. The red cross is the current point i with a depth value Z_i , green crosses are its neighbours with Z less than Z_i and blue crosses are its neighbours with Z more than Z_i . **c** Neighbours of the current point i are projected in the plane (X, Y, Z_i) . **d** Vertices of the local polygon are fixed at mid-distance between the current point and projections of its neighbours (green line)

polygon around a point. First, the local depth image is used to determine neighbours of the point i (see Fig. 3a). Then, in the local point cloud (see Fig. 3b), neighbours of the point i are projected onto the plane (X, Y, Z_i) (see Fig. 3c). To avoid redundancy, local polygon vertices are fixed at mid-distance between point i and the projections of its neighbours (see Fig. 3d). Knowing the local polygon vertices, the area of the local polygon can be computed and then the local effective volume. The global effective volume of the point cloud is the sum of all local effective volumes of the point cloud.

For methodological purposes, we test our algorithm of effective volume on a calibrated object composed of differ-

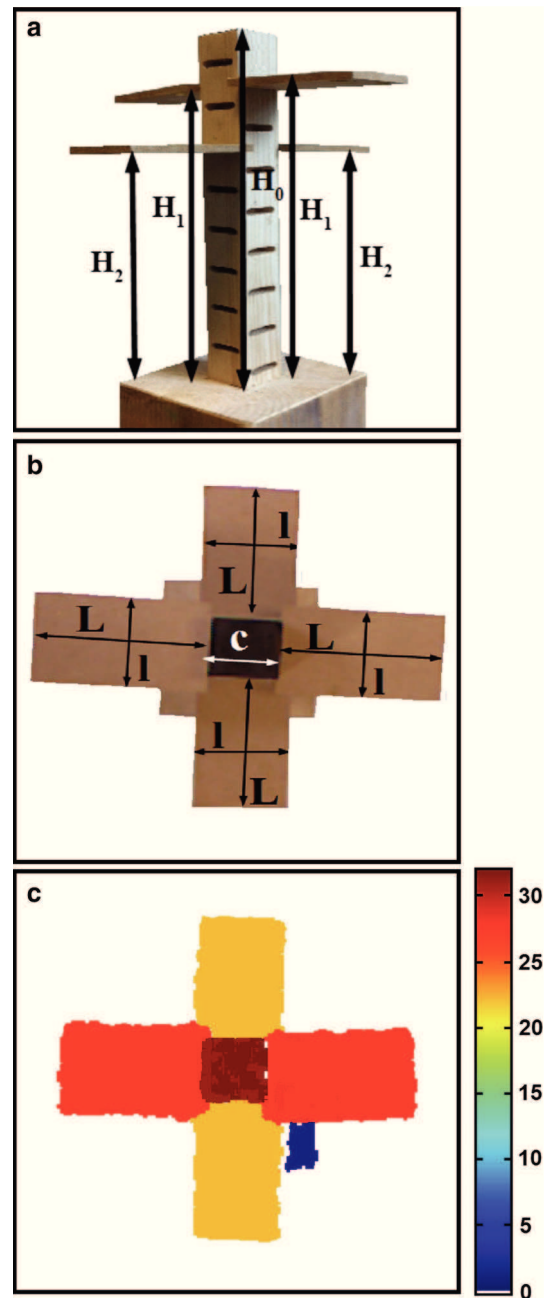


Fig. 4 The calibration object with a known effective volume. **a** RGB image of a lateral view ($H_0 = 31$ cm, $H_1 = 27$ cm and $H_2 = 21.5$ cm). **b** RGB image from a top view ($L = 10$ cm, $l = 6$ cm et $c = 4$ cm). **c** Depth image from a top view. Colorbar values gives the difference between the maximum depth and the local depth (values are in cm). The theoretical effective volume is $H_0 \times c \times c + 2 \times L \times l \times (H_1 + H_2) - 4 \times H_2 \times l \times l = 6230$ cm³. The theoretical real volume is $4 \times L \times l \times e + c \times c \times H_0 = 640$ cm³ with $e = 0.6$ cm, the thickness of all planes. The convex hull volume, computed on the point cloud of the calibrated object [7], is 11,247 cm³

ent planes as visible in Fig. 4. To estimate its theoretical effective volume, we have considered a top view (90° from planes) and we have measured its dimensions with a millimetre precision ruler. Then, we applied the geometric formula

given in Fig. 4. We obtained an effective volume equal to 6230 cm^3 which is, given the uncertainty of both methods (manual and computed), in agreement with the effective volume 6847 cm^3 computed from the depth image of Fig. 4c. For this calibrated object, the effective volume is larger than the real volume but smaller than the convex hull volume (see Fig. 4).

3.2 Multiscale analysis

In recent publications, [25–27] performed multiscale analyses on the colour images from natural scenes. Reference [15] extended these studies to depth images from natural wood scenes. Multiscale analysis can be done using several statistical tools. In this article, we propose to apply the number of neighbours method [25] and the box counting method [27] for depth characterization of the shoots of plants through 3D spatial scales.

In a point cloud, for each point i , the number of neighbours $N_i(r)$ lying within a spherical neighbourhood with radius r is calculated. For each radius r , the average $N(r)$ of the $N_i(r)$ is computed over all points i of the point cloud serving as a centre of sphere of radius r . Only spheres that are completely in the point cloud limits are considered [25].

We also compute another multiscale analysis tool, the box counting. In a point cloud, the box counting $NB(r)$ is found in terms of r with r the side length of given boxes. For each side length, $NB(r)$ is the number of boxes with side length r which are needed to cover all the point cloud [27].

For methodological purposes, we propose to perform the multiscale analyses of a uniformly distributed random 3D point cloud shown in Fig. 5a. Its multiscale analysis by the number of neighbours method is given in Fig. 5b, where a power law with a slope of +3 in a log–log scale is found as predicted by theory: since the points are uniformly distributed in 3D, the average number $N(r)$ of neighbours in a sphere of radius r grows as the volume $\sim r^3$ of the sphere. The multiscale analysis by the box counting method is given in Fig. 5c, where a power law with a slope of –3 in a log–log scale is found as predicted by theory: since the points are uniformly distributed in 3D, the average number $NB(r)$ of boxes of side r needed to cover the point cloud decreases as the volume r^3 of each box increases.

3.3 3D symmetry

To quantify 3D symmetry, we define three planes along each of the three axes (X, Y, Z) of the point cloud (see Fig. 6). These three planes can be used to compute three different symmetries : longitudinal, transversal and parallel. For each of these symmetries, we count the number of points with a symmetric matching. To remain insensitive to the observation

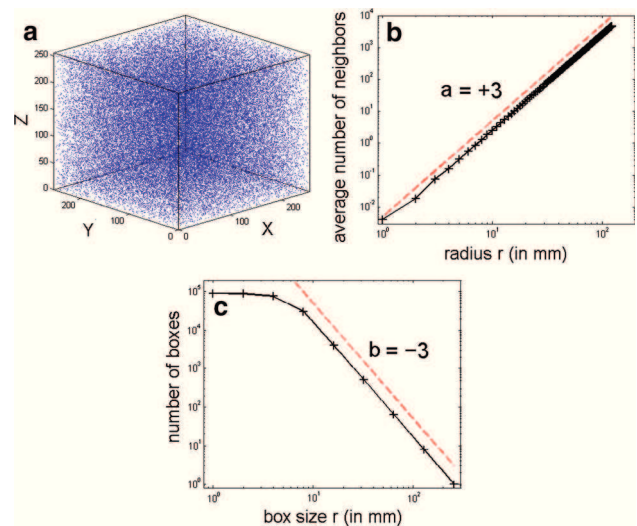


Fig. 5 Multiscale analyses of a uniformly distributed random point cloud . **a** The 3D point cloud . **b** The corresponding average number of neighbours $N(r)$ following a power law with a slope of +3 in a log–log scale. **c** The corresponding average number of covering boxes $NB(r)$ following a power law with a slope of –3 in a log–log scale. In **b** and **c** the dashed line materializes respectively the slope +3 and –3.

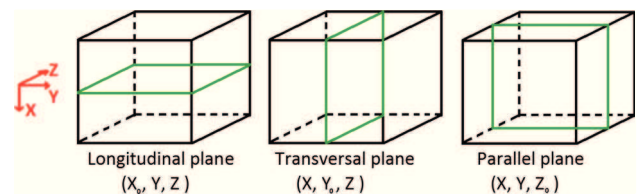


Fig. 6 Three planes defined in three different space directions. The plane (X_0, Y, Z), with X_0 a constant, defines the longitudinal plane, the plane (X, Y_0, Z), with Y_0 a constant, defines the transversal plane and the plane (X, Y, Z_0), with Z_0 a constant, defines the parallel plane

scale of the plant, we always use a ratio between this number of points and the total number of points in the current point cloud. Finally, the 3D symmetry is defined by the mean of the three defined ratios of symmetry.

Computations of longitudinal and transversal symmetries are computed on the point cloud follow the same principle and can be done from only one point cloud provided by a depth sensor. In this part of the article, we focus the explanations on the algorithm of longitudinal symmetry, the symmetry in terms of the plane (X_0, Y, Z) (see Fig. 6). For a given point cloud, we fix X_0 as the middle value between minimum and maximum values of the X coordinate. In this point cloud, a point (X_i, Y_i, Z_i) with $X_i < X_0$ has a symmetric matching if there exists a point (X_j, Y_j, Z_j) with $X_j = -X_i$ (relative to X_0), $Y_j = Y_i$ and $Z_j = Z_i$. The value range of the longitudinal symmetry ratio is $\{0 \dots 0.5\}$. For methodological purposes, we propose to check the computation of longitudinal symmetry on the synthetic point cloud associated with the depth image of Fig. 7. Its theoretic-

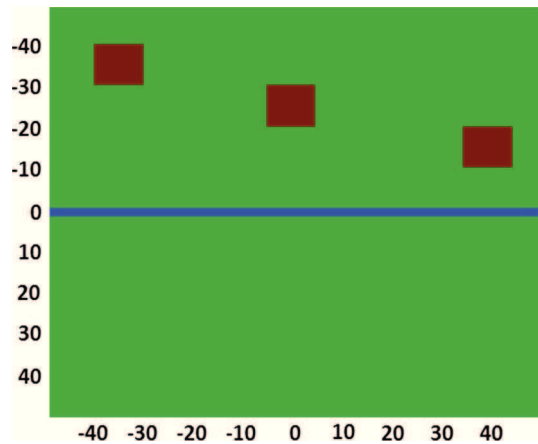


Fig. 7 The depth image of a synthetic point cloud with a known longitudinal symmetry. *Left values* indicate the evolution of X coordinates in the point cloud and *bottom values* the evolution of Y coordinates. *Red* and *green* pixels have different depth values and blue pixels have a zero value. The size of the depth image is 100×100 pixels. Due to pixels with a zero value (2 lines around X_0 to show the symmetry axis), the associated point cloud contains 9800 points. X_0 is equal to zero. Three *squares* of size 10×10 pixels have nonsymmetric matching. So, there are $4900 - 3 \times 10 \times 10 = 4600$ pixels belonging to the *top* part of the point cloud ($X < X_0$) with a symmetric matching in the *bottom* part. So, the longitudinal symmetry ratio of this synthetic point cloud is $\frac{4600}{9800} = 0.47$

cal longitudinal symmetry ratio is known and equal to 0.47. The application of the longitudinal symmetry algorithm on this point cloud gives a result in accordance with theoretical expectations.

In a point cloud provided by the depth sensor, two points cannot have the same X and Y coordinates. So, the computation of the parallel symmetry, the symmetry in terms of the plane (X, Y, Z_0) (see Fig. 6), cannot be done, like previously, with only one point cloud. To solve this constraint, we compute the parallel symmetry from two point clouds of the shoots of plants: the point cloud of the current view (view 1 in Fig. 8a) and the point cloud of the view acquired after a rotation of 180° (from the current position) by the motorized depth sensor (view 2 in Fig. 8a). In this case, the number of symmetric matchings for the parallel symmetry is the number of points with the same coordinates (X, Y, Z) in the two point clouds. The value range of the parallel symmetry ratio is $\{0 \dots 1\}$. For methodological purposes, we set a synthetic point cloud (associated with the depth image of Fig. 8b), corresponding to view 1 in Fig. 8a, and also a synthetic opposite point cloud (associated to the depth image of Fig. 8c), corresponding to view 2 in Fig. 8a. The parallel symmetry ratio between these two synthetic point clouds is known and equal to 0.89. The computation of the parallel symmetry algorithm on these point clouds gives a parallel symmetry ratio equal to the theoretical prediction.

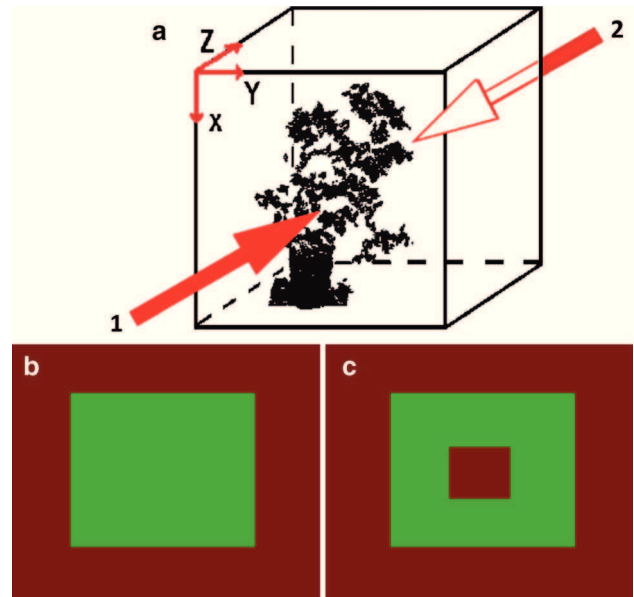


Fig. 8 Two different point clouds are used to compute the parallel symmetry. **a** The parallel symmetry is computed from two point clouds: the current point cloud (view 1 in this picture) and the opposite point cloud acquired after a rotation of 180° of the motorized depth sensor (view 2 in this picture). **b** The depth image of a synthetic point cloud. *Green* pixels correspond to nonzero depth while *red* pixels to zero depth. The size of the depth image is 100×100 pixels and the size of the nonzero depth square is 60×60 pixels (3600 points in the point cloud). **c** The depth image of the corresponding opposite point cloud. It is the clone of the previous depth image except that there is a square of size 20×20 pixels (400 points in the point cloud) with depth equal to zero inside the square of nonzero depth. So, the expected parallel symmetry ratio is $\frac{3600-400}{3600} = 0.89$

To illustrate the 3D symmetry, we compute it on the point cloud of the three objects of Fig. 9. The first one is a sphere (see Fig. 9a), an object perfectly symmetric in terms of each symmetry plane of this study. So, its longitudinal and transversal ratios are 0.5 and its parallel ratio is 1. The second one is a pyramid with a square base, an object perfectly symmetric in terms of transversal and parallel planes but totally asymmetric in the longitudinal direction. Thus, its transversal ratio is 0.5, its parallel ratio is 1 and its longitudinal ratio is 0. The last one is a well-known Venus head whose point cloud can be found in [28]. This object is not totally symmetric or asymmetric in each direction, so its longitudinal ratio is 0.3, its transversal ratio is 0.2 and its parallel ratio is 0.1.

In this study, we use three particular planes but the symmetry can be computed from an infinite number of others planes. In addition, principal component analysis approaches (encompassing ellipsoid, fractional anisotropy, ...) could be used to extract a global information of the point cloud symmetry. All these symmetry methods are complementary to the proposed 3D symmetry and they could be useful for the depth characterization of the shoots.

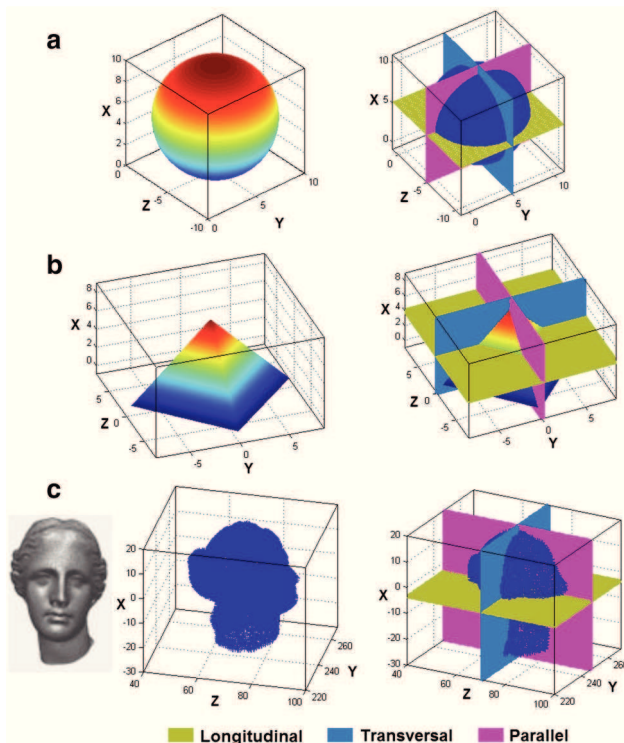


Fig. 9 Three different objects with three different 3D symmetries: **a** Sphere with longitudinal ratio = 0.5, transversal ratio = 0.5 and parallel ratio = 1. **b** Pyramid with longitudinal ratio = 0, transversal ratio = 0.5 and parallel ratio = 1. **c** Venus head with longitudinal ratio = 0.3, transversal ratio = 0.2 and parallel ratio = 0.1 (the right image is extract from [28])

3.4 Hole ratios

Multiple reflections of light in the shoots, diffusions, absorptions and shading result in the creation of zones of non-defined depth (depth set to zero) in the depth image. These zones can be considered as lacunarity holes and indicate that light has been trapped in the plant. In addition, light may also pass through the shoots resulting in transmission holes in the depth image (nonzero pixels not belonging to the plant). We propose to use lacunarity and transmission surfaces for the depth characterization of the shoots of plants.

Practically, to find lacunarity and transmission surfaces, the depth image must be acquired in a closed room, whose dimensions belong to the depth interval accessible with the depth sensor. In these conditions, as shown in Fig. 10, depth images were always composed of three distinct populations: the plant, the background and the non-defined zones. With such high contrast, the well-known automatic thresholding method of Otsu [29] efficiently segments the plant in the depth images. Then, to remain insensitive to the observation scale of the plant, we always use a ratio between the surface area (lacunarity or transmission) and the total surface of the plant. Only surfaces in the convex hull of the plant are taken into account.

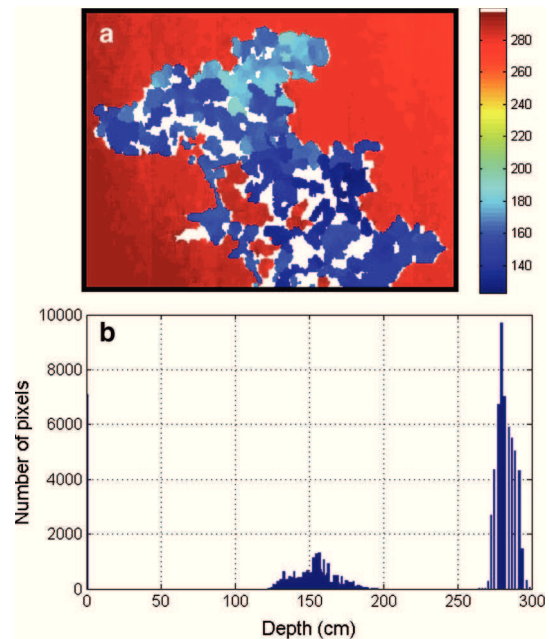


Fig. 10 An example of depth image composed of three different populations: the plant (depth around 150 cm), the background (depth around 280 cm) and the non-defined zones (depth equal to zero). **a** The depth image. **b** The corresponding histogram of depth

For methodological purposes, we illustrate the computation of the hole ratios on a synthetic depth image. Figure 11 shows this depth image (a) and different binary images (b, c, d) used to find hole surfaces. Background and lacunarity holes are studied into the convex hull of the plant (see Fig. 11b). Background holes correspond to pixels with a background value in this convex hull (see Fig. 11c), while lacunarity holes are pixels with a zero value (see Fig. 11d). The computation of our algorithm on this synthetic depth image gives hole ratios equal to the theoretical prediction : 0.54 for the transmission ratio and 0.17 for the lacunarity ratio.

4 Application to plants

We are now ready to use the motorized depth sensor of Sect. 1 to compute the four new shape descriptors of the previous section all around real plants. We acquired with the motorized depth sensor 72 depth images all around two real plants shown in Fig. 12. The plant A is a rosebush (*Rosa hybrida*) and the plant B is a snake plant (*Sansevieria trifasciata*). These plants are specially chosen to present very different shoots. The shoots of plant A occupy a larger range of space than plant B and it is composed of leaves (assembling of small leaflets) with different orientations. By contrast to plant A, the shoots of plant B are composed of large, flat and regular leaves. In the sequel, we compare the application of our four

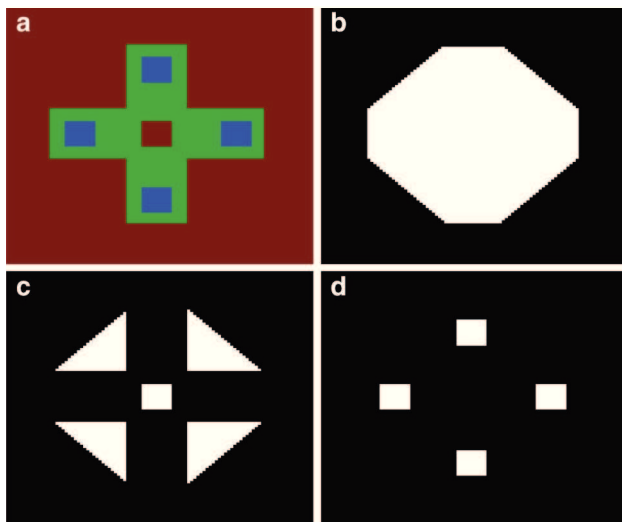


Fig. 11 The hole ratio computation based on three binary images obtained from the depth image. **a** A synthetic depth image. *Green* pixels correspond to plant, *red* pixels to background and *blue* pixels to lacunarity. **b** The corresponding binary image of the convex hull. **c** The corresponding binary image of background holes in the convex hull. **d** The corresponding binary image of lacunarity holes in the convex hull. The plant is composed of two *rectangles* of size 80×20 pixels which cover themselves on 20×20 pixels. There are four transmission *triangles* (*rectangle* and *isoscele*) with side length equals to 24 pixels and a transmission *square* of size 10×10 pixels. There are four lacunarity *squares* of size 10×10 pixels. The transmission ratio is $\frac{10 \times 10 + 4 \times \frac{24 \times 24}{2}}{2 \times 80 \times 20 - 20 \times 20 - 5 \times 10 \times 10} = 0.54$ and the lacunarity ratio is $\frac{4 \times 10 \times 10}{2 \times 80 \times 20 - 20 \times 20 - 5 \times 10 \times 10} = 0.17$

new shape descriptors on the 72 depth images acquired all around these two different plants.

4.1 Effective volume

The computation of the effective volume on the point cloud of the shoots of plants gives access to the metric volume, in m^3 , of its visible part from the depth sensor point of view. In this study, the shoots of plant *A* occupy a larger range of space than plant *B*, but the depth images of these two plants have been acquired with two different observation scales. Following these setting up changes, the shoots of plants *A* and *B* have roughly the same number of pixels (i.e. the same apparent surface) in the depth images of the Fig. 13a, b. So, from these images, the two plants cannot be distinguished from the computation of their apparent surface. However, the shoots of plant *A* show a larger range of depth than plant *B* (70 cm for plant *A* versus 30 cm for plant *B*). This difference in the range of depth results in a larger computed effective volume for the shoots of plant *A*. Thus, beyond the apparent surface, the effective volume computed from the shoot point clouds allows obtaining a relative difference between plants *A* and *B* in terms of space filled by the shoots.

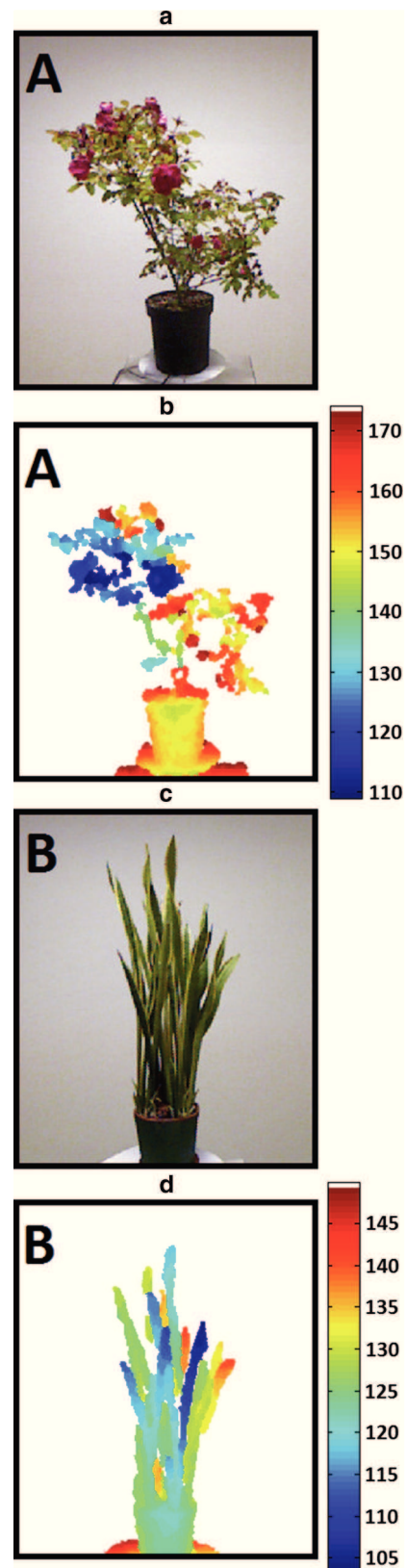


Fig. 12 **a, c** RGB view of the plants *A* and *B*. **b, d** Corresponding depth images (depth values are in cm)

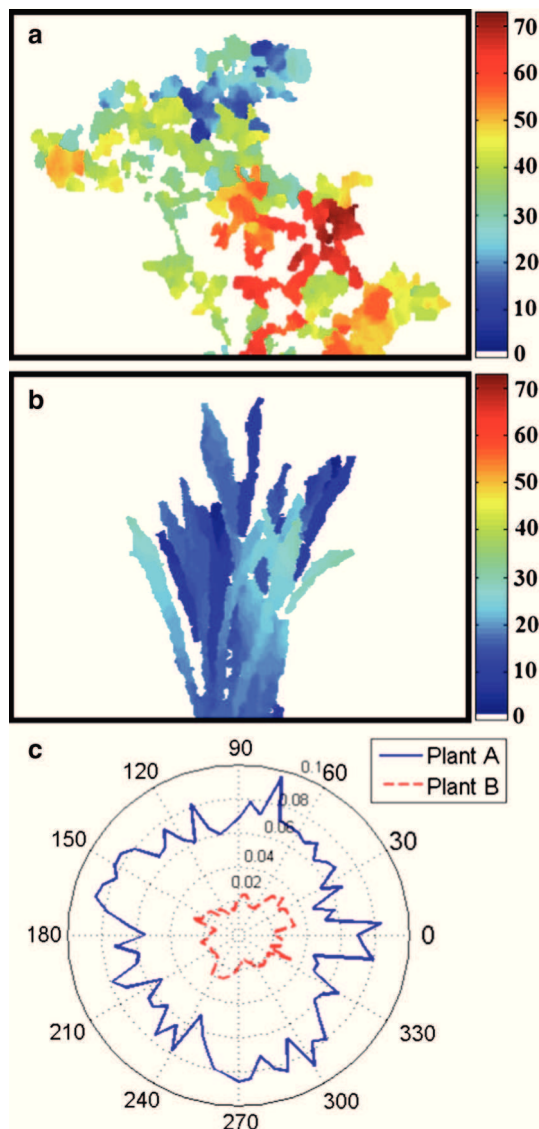


Fig. 13 The computation of the effective volume all around real plants. **a, b** Depth images of the shoots of plants *A* and *B* from Fig. 12 at an observation angle of 75° . *Colorbar* values give the difference between the maximum depth and local depth values (values are in cm). **c** Polar plot of the effective volume in m^3 as a function of the angle of observation. *Solid line* is for plant *A*, *dotted line* for plant *B*

In this study, for all the point clouds at all angles of view acquired with the motorized depth sensor, the range of depth of plant *A* is always larger than that of plant *B*. So, as shown by Fig. 13c, the effective volume of the shoots of plant *A* computed all around the rotation stays larger than that of plant *B*. For both plants in the used setting up, this effective volume is relatively constant all around the plant. For other settings or other plants, larger variations may occur in the range of depth around the plant according to the angle of view. A single evaluation of the effective volume, from a single angle of view, could, therefore, lead to misinterpretation of the actual 3D space filled by the plant. By contrast, the computation of

the effective volume from data acquired from multiple angles of view with the motorized depth sensor allows to accurately describe the space filled by the shoots.

4.2 Multiscale analysis

The multiscale analysis of the point cloud of the shoots of plants is realized by means of the number of neighbours method and of the box counting method. We especially want to test for the average number of neighbours $N(r)$ and for the average number of covering boxes $NB(r)$, the possibility of power laws of the forms $N(r) \sim r^a$ and $NB(r) \sim r^{-b}$. The presence of such power-law evolutions identifies regularity or self-similarity across scales for the spatial organization of the point cloud. They can be interpreted in relation to the following references [25–27]: When the points in the cloud distribute in a volume with three-dimensional organization, then one has the evolutions $N(r) \sim r^3$ and $NB(r) \sim r^{-3}$, as in the example of Fig. 5. When the points distribute in a surface-like organization with two dimensions, one has $N(r) \sim r^2$ and $NB(r) \sim r^{-2}$. When the points distribute with a curvilinear organization with one dimension, one has $N(r) \sim r^1$ and $NB(r) \sim r^{-1}$. Power laws of the form $N(r) \sim r^a$ and $NB(r) \sim r^{-b}$ with noninteger exponents a and b , identify fractal organizations that interpolate between these regular shapes.

Figure 14a, b gives the average number of neighbours $N(r)$ computed on one point cloud, respectively, for plants *A* and *B* from Fig. 12. Both numbers of neighbours evolutions follow power laws $N(r) \sim r^a$ with exponent $a \neq 0$. Slopes in

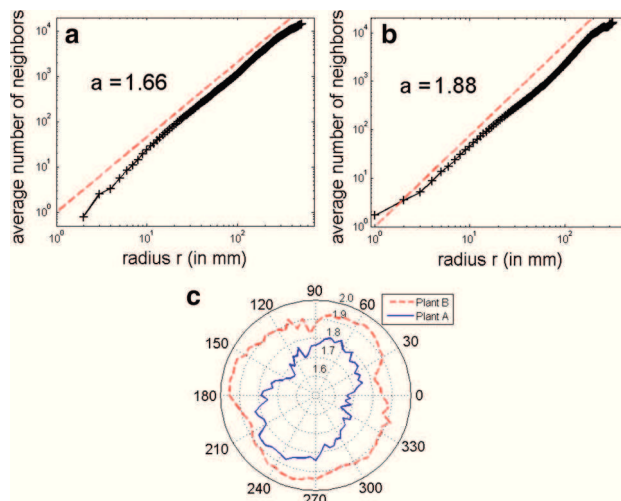


Fig. 14 Multiscale analysis by the number of neighbours method. **a, b** Number of neighbours $N(r)$ of plants *A* and *B* from Fig. 12 at the observation angle of 355° . The *dashed line* materializes the slope of the followed power law in the log–log scale. **c** Polar plot of the exponent a of the power law followed by the number of neighbours $N(r)$ as a function of the angle of observation. *Solid line* is for plant *A*, *dotted line* for plant *B*

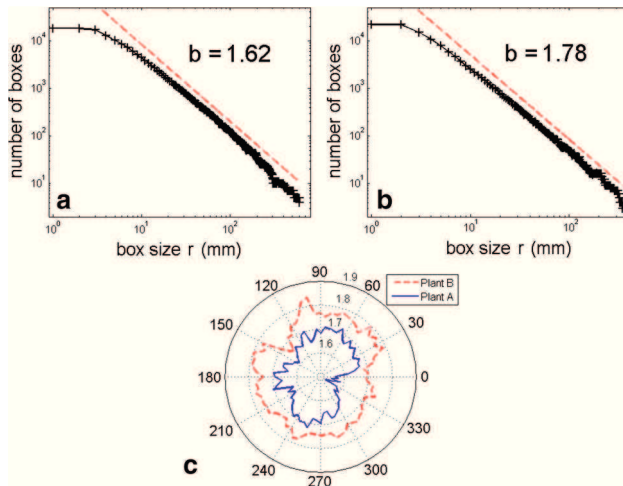


Fig. 15 Multiscale analysis by the box counting method. **a, b** Number of neighbours evolutions of plants *A* and *B* from Fig. 12 at the observation angle of 150° . The *dashed line* materializes the slope of the followed power law in the log–log scale. **c** Polar plot of the exponent b of the power law followed by the box counting $NB(r)$ as a function of the angle of observation. *Solid line* is for plant *A*, *dotted line* for plant *B*

a log–log scale of these power laws are different ($a = +1.66$ for plant *A* and $a = +1.88$ for plant *B*). As shown in Fig. 15a, b, the box counting evolutions for the same two plants follow power laws $NB(r) \sim r^{-b}$ with exponent $b \neq 0$ over a large range of box sizes. Like number of neighbour evolutions, slopes in a log–log scale of these power laws are different ($b = 1.62$ for plant *A* and $b = 1.78$ for plant *B*). Exponents a and b of power laws followed during multiscale analyses depend on the complexity of the shoots of the observed plant. For all point clouds around a plant, multiscale analyses follow power laws. So, we use evolutions of exponents a and b during the rotation of the motorized depth sensor to characterize the depth of the shoots all around the plant. Figures 14c, and 15c, respectively, give evolutions of exponents a and b obtained by computing the number of neighbours and box counting on point clouds all around plants *A* and *B*. Shoots of these two plants keep their structure unchanged for all rotation steps of the motorized depth sensor. So, exponents a and b of multiscale analyses stay globally constant during the rotation. The multiscale analysis (number of neighbours and box counting) characterizes the complexity of the shoots of the observed plant. Its computation all around the plant characterizes changes in this complexity. Moreover, regular power laws with non-integers exponents a and b , as consistently observed for the plants tested here, suggest a fractal organization of the shoots of plants, exhibiting self-similarity across scales in their spatial structure.

The non-integer exponents a and b observed between 1 and 2 identify the plant foliage as irregular fractal shapes with a space-filling geometry which is less dense than a uniform surface, but more dense than a regular line. At a

qualitative level, this global structural property is consistently observed for the two plants *A* and *B* here; yet at a finer quantitative level, differences are measured in the specific values of the fractal exponents a and b providing a differential characterization of the foliage of the two plants *A* and *B*. Larger exponents a , b closer to 2 are consistent for plant *B* with relatively flat and more regular leaves coming closer to a flat surface. Meanwhile, smaller exponents a , b are consistent for plant *A* with higher lacunarity and irregular leaves further away from a flat surface. Fractal organizations have been reported for plants from various quantitative measurements [30]. They are confirmed here from the new measurement derived from depth images as presented here.

4.3 3D symmetry

The 3D symmetry of the shoots of plants is computed from three different symmetries: longitudinal, transversal and parallel. Generally, the shoots have a non regular architecture and the probability to have any exact symmetric matchings is very low. So ratios of symmetry with depth in millimetre, as provided by the depth sensor, would be close to zero. In this study, to compare the symmetry of plants, plant 3D coordinates (X, Y, Z) are rounded in decimetre. Figure 16 gives

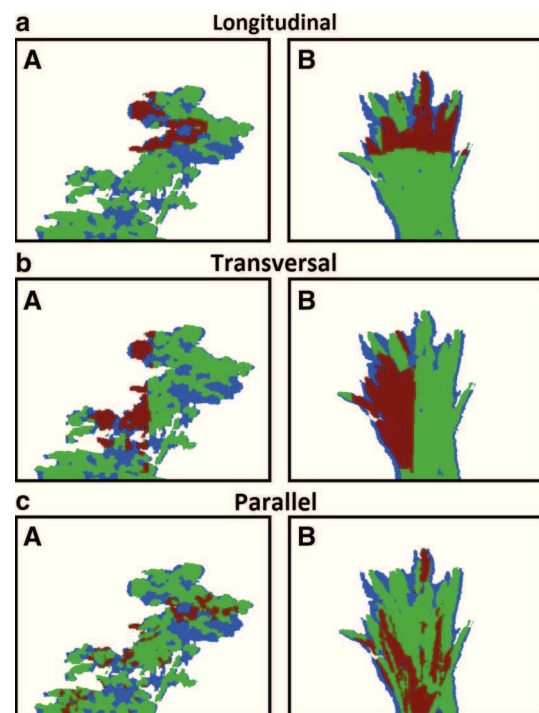


Fig. 16 Illustrations of the computation of 3D symmetry on the point clouds of plants *A* and *B* from Fig. 12. **a** Longitudinal symmetry. **b** Transversal symmetry. **c** Parallel symmetry. The observation angle is 210° . *Red* pixels correspond to points with a symmetric matching, *green* pixels to points of plant without symmetric matching and *blue* pixels to lacunarity pixels

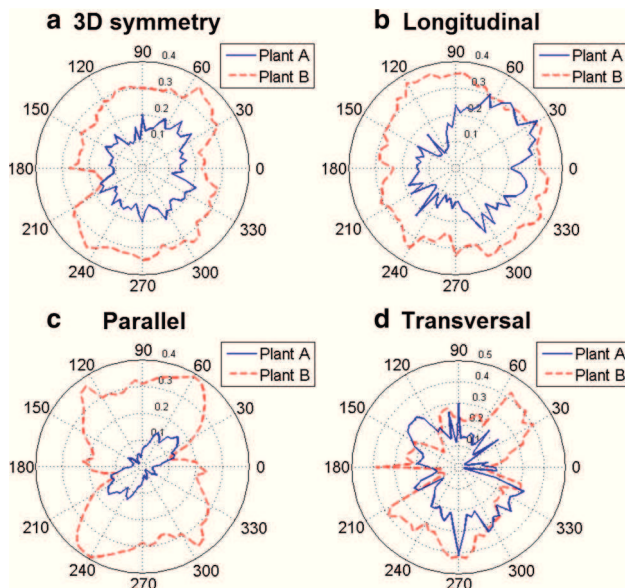


Fig. 17 The computation of the 3D symmetry all around real plants. **a–d** Polar plot of the considered symmetry as a function of the angle of observation. *Solid line* is for plant A and *dotted line* for plant B

illustrations of longitudinal, transversal and parallel symmetry computations on point clouds of plants A and B from Fig. 12. In these illustrations, for all types of computed symmetry, plant B has more symmetric matchings and relatively the same number of points in the point cloud than plant A, resulting in a larger computed 3D symmetry for plant B (mean of the longitudinal, transversal and parallel symmetries). This result is in accordance with both shapes of studied plants. Indeed, the large and vertical leaves positioned following a circle of plant B give a shape globally symmetric, while the complex structure with different axes of plant A results in a less symmetric shape.

As shown in Fig. 17a, the computed 3D symmetry evolves with the rotation of the motorized depth sensor thus expressing the anisotropy of the global symmetry of the shoots of plants. The computed 3D symmetry around both plants is not constant but it globally follows the expected evolutions: 3D symmetry of plant B stays larger than plant A. So, the proposed 3D symmetry coupled with the motorized depth sensor provides a good descriptor of the real shape of the plant, allowing to describe the symmetry anisotropy of the shoots. The same behaviour is globally obtained for longitudinal and parallel symmetries (see Fig. 17b, c). However, the transversal symmetry of both plants is different and some observation angles give plant A a more symmetrical appearance than plant B. It is in accordance with the shape of plant B because this plant has few leaves tilted on side which shift the centre of symmetry and decrease the value of transversal symmetry. So, while the 3D symmetry provides a global information of symmetry, each individual symmetry (longitudinal, transversal

or parallel) gives a finer information about the shape of the plant because it is focused in only one direction of space.

4.4 Hole ratios

The transmission and lacunarity ratios are, respectively, based on the surface of background and lacunarity holes inside the convex hull of the shoots of the observed plant. Figure 18a, b gives illustrations of the hole ratios computations on depth images, respectively, for plants A and B of Fig. 12. In these illustrations, the computed hole ratios are smaller for plant A than for plant B. In a depth image, the computed transmission ratio quantifies the proportion of leafless zones in the shoots (red pixels in Fig. 18a, b). Since the

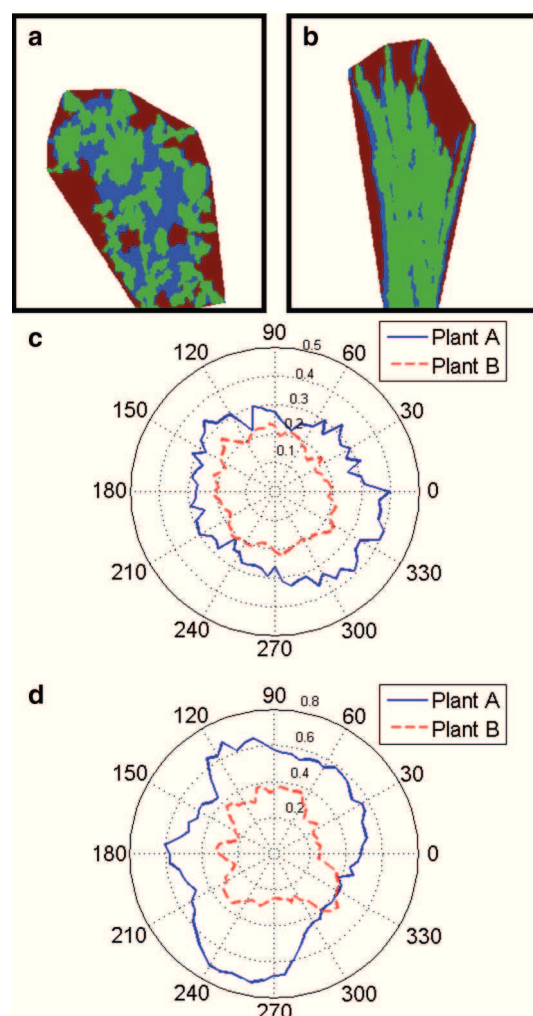


Fig. 18 The computation of the hole ratios all around real plants. **a, b** Illustrations of computations of the hole ratios on depth images at the observation angle of 355° for plants A and B from Fig. 12. *Red* pixels correspond to background, *green* pixels to plant and *blue* pixels to lacunarity. **c, d** Polar plot of the lacunarity and transmission ratios as a function of the angle of observation. *Solid line* is for plant A, *dotted line* for plant B

shoots of plant *A* are less concentrated and more scattered than those of plant *B*, its depth image has a larger proportion of background in its convex hull, around and in the shoots. This results in a computed transmission ratio larger for plant *A* than for plant *B*. So, the transmission ratio quantifies the shape of the shoots such as the higher transmission ratio, the higher the shape complexity of the plant. The computed lacunarity ratio estimates the proportion of zones where the sensor is unable to return a depth measurement because of shading and constitution of the shoots (blue pixels in Fig. 18a, b). Since the shape of plant *A* is less regular, shading is accentuated. In addition, contrary to vertical and large leaves of plant *B*, the small leaves with different orientations of plant *A* lead to a high probability of light trapping. Consequently, the computed lacunarity ratio is larger for plant *A* than for plant *B*. Summarizing, the lacunarity ratio estimates the global constitution, association of the number, the size, the shape, the orientation and the spatial organisation of leaves, of the shoots such as the higher lacunarity ratio, the higher the constitution complexity of the plant.

As shown by Fig. 18c, d, the hole ratios computed on the depth images of the motorized depth sensor stay globally larger for plant *A* than for plant *B*. This result is in accordance with the global complexities of shape and constitution of both plants. However, for few angles of view, values of plant *B* are equal or larger than that of plant *A*. So, to accurately describe the global complexity (shape or constitution) of shoots of plants, hole ratios must be computed on different angles of view as proposed in this study.

For a complementary appreciation of the behaviours and capabilities of the new descriptors, we have also applied the approach systematically on a set of nine more plants, chosen to cover a wider range of possible shapes, as presented in Fig. 19. The computation of the four proposed shape descriptors has been carried out, and the complete results for the nine plants of Fig. 19 are made accessible in [34]. For illustration, we show in Fig. 20, one among those descriptors, the transmission ratio of the shoots, computed for the nine plants of Fig. 19, and displayed as a function of the angle of rotation around each plant. As defined in Sect. 4.4, the transmission ratio quantifies the proportion of leafless or open zones in the convex hull of the shoots. On the illustration of Fig. 20, it is notable that the isotropic aspect of transmission ratio and the average value of the transmission ratio display capabilities for discrimination between plants. Considering two plants of different species (for instance Plant1 and Plant2 in Fig. 19), having different shape, size and spatial organization of leaves and shoots, the average ratio differs by a factor of 2 between them. Average transmission ratio is of 0.25 for Plant1 and of 0.5 for Plant2. This is in good agreement with a visual appreciation as Plant1 has big leaves with different orientations with a high probability of light interception leading to a smaller transmission ratio than Plant2, which owns

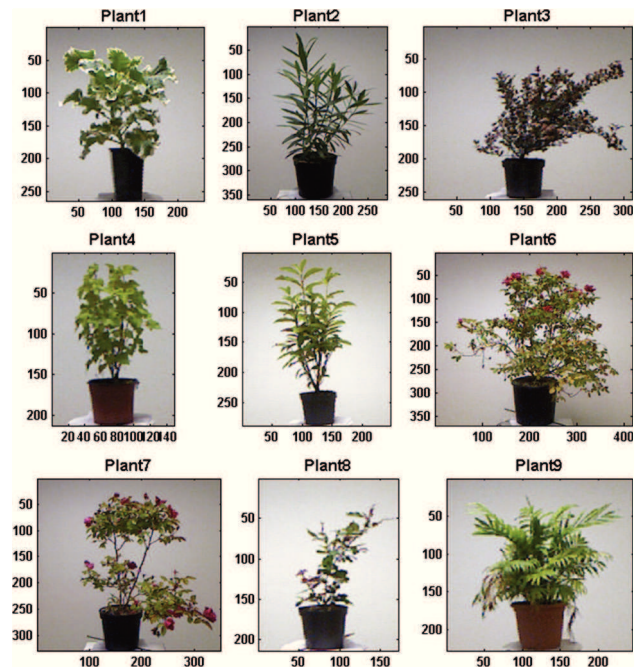


Fig. 19 Panel of RGB views of nine other plants

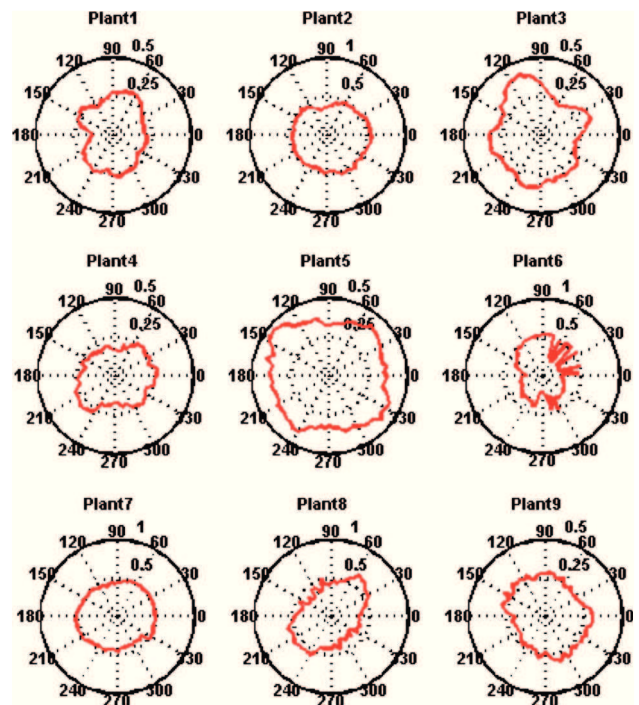


Fig. 20 Polar plot of the transmission ratio as a function of the angle of observation computed for the nine plants of Fig. 19

smaller leaves with orientation in extension of shoots. Considering two plants of the same species (for instance rosebush as Plant6 and Plant7 in Fig. 19), having different spatial organization of shoots, the average transmission ratio is of 0.5 for both but the isotropic aspect is clearly not equal according to

angle of observation. This is again in a relatively good agreement with a visual appreciation of both plants as Plant6 is bushy according to some specific direction, whereas Plant7 is relatively sparse in its central part.

Further analysis could be developed by confronting the whole set of descriptors given in [34], especially to question what would be the best descriptors and the tolerated error. The answer would depend on the plant science question raised. For instance, in the study [19] on rosebushes, we demonstrated that all the ten incorporated botanistic descriptors were important to discriminate the ornamental value of the different phenotypes of plants tested. For breeders, who are seeking the highest production, the descriptors attached to the volume would take a greater importance with a higher sensitivity on errors. Also more systematic studies could be undertaken on more instances and plants, especially for an appreciation of the robustness and sensitivity of the proposed descriptors in relation to the variability in the plants involved in the analysis. Such extensive studies, however, lie beyond the scope of the present paper, which concentrates on the definition of a new methodology for plant shape characterization from depth data with some illustrations.

5 Conclusion

Depth data are becoming more and more widely accessible by means of new low-cost sensors as reported in the paper. We have described here an integrated solution using a depth sensor coupled to a motorized turntable devised for a quantitative characterization of the spatial 3D structure of plants. We have introduced four new shape descriptors to characterize the shoot of an entire plant from multiple side views acquired from the depth camera: the effective volume (volume in m^3 seen by the depth sensor point of view) characterizes plants in terms of their size. Multiscale analysis tools (number of neighbours and the box counting methods) determine the complexity and possible fractality of the shoots of the observed plant. The 3D symmetry (longitudinal, transversal and parallel symmetries) quantifies the anisotropy of the shoots of plants. The hole ratio composed with the transmission ratio and the lacunarity ratio, respectively, capture the fragmented aspect of the shoot and the lacunarity of the shoots in its depth. We have systematically validated these shape descriptors on numerical ground truth and have then tested them on nine real plants contrasted in terms of size, scales, symmetry and lacunarity. To this purpose, we have specially coupled the low-cost depth sensor of the Microsoft Kinect with a low-cost turntable. With such a multiple view depth sensor, a full 3D reconstruction of the shoot of the plant is possible for simple shoot as recently demonstrated [31–33]. However, for more complex shoots, like the ones tested in the report, a full 3D reconstruction from multiple

side views with depth cameras is expected to be a difficult task and only an appreciation of the overall shape of the plant is accessible. This is now possible quantitatively in depth with the shape descriptors introduced in this work.

We believe the evolutions of these shape descriptors all around the plants can be exploited to quantitatively characterize and discriminate a large number of plants. To go further, although the scope of study is more the definition of a new methodology for plant shape characterization from depth data, we have extended the application of our shape descriptors to nine other plants. These nine plants have been chosen to cover a wide range of shapes that may describe, in some extent, the variability of plants in terms of their varieties, ages or visual aspect. The computation of the four proposed shape descriptors has been done and results are accessible online [34]. Considering a reproducible science approach, the dataset of the associated depth images is also downloadable [34]. With such dataset, further studies could focus on classification problems to better appreciate robustness and sensitivity of the proposed descriptors. New shape descriptors could also be introduced and validated on this dataset.

Also, the depth characterization could be interestingly complemented with more classical descriptors based on colour or grey level images. This is easily feasible again with the Microsoft Kinect since the depth sensor is associated with a spatially coregistered RGB camera. Therefore, acquisition coupled with a turntable to produce multiple side views and analysis of the anisotropy of the plant shoots in RGB and depth is another interesting perspective accessible with the motorized depth sensor presented here. The sensor used in this study could itself receive attention for improvement. In this study we used 72 images around the plants because our motorized depth sensor provides this number. With this resulting 5° step redundancies are often present between different successive images. The good-enough number of images, although depending on the shoot shape, is probably less than 72, and further investigation to define it quantitatively would be an interesting perspective.

A domain of specific interest for the characterization of the ensemble of shoots from depth imaging as proposed in this manuscript is for the aesthetic rating of ornamental plants. In this context, recent studies [19, 35, 36] have demonstrated the possibility to classify rosebushes from sensory profiles preference based on visual inspection. In these works, the description is qualitative, performed on RGB images of real [19, 35] or virtual [36] rosebushes. This establishes the importance of subjective descriptors such as symmetry, compactness and shape, in the aesthetic assessment of ornamental rosebush. By contrast here, we used a depth camera and the 3D descriptors introduced in this manuscript include such traits and, therefore, naturally appear as good candidates for automatic quantitative and objective classification of orna-

mental rosebushes based on depth imaging. Confronting our automated 3D shape descriptors with a sensorial rating by human experts would correspond to a further investigation.

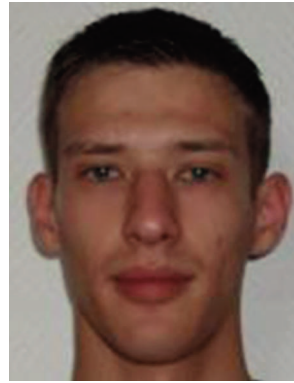
Acknowledgments Yann Chéné acknowledges support from Région Pays de la Loire, France, for the funding of his Ph.D.

References

- Fiorani, F., Rascher, U., Jahnke, S.: Imaging plants dynamics in heterogenic environments. *Curr. Opin. Biotechnol.* **23**, 227–235 (2012)
- Subramanian, R., Spalding, E.P., Ferrier, N.J.: A high throughput robot system for machine vision based plant phenotype studies. *Mach. Vis. Appl.* **24**, 619–636 (2013)
- Hiremath, S., Tolpekin, V.A., van der Heijden, G., Stein, A.: Segmentation of *Rumex obtusifolius* using Gaussian Markov random fields. *Mach. Vis. Appl.* **24**, 845–845 (2013)
- Zeng, G., Birchfield, S.T., Wells, C.E.: Rapid automated detection of roots in minirhizotron images. *Mach. Vis. Appl.* **21**, 309–317 (2013)
- van der Heijden, G., Song, Y., Horgan, G., Polder, G., Dieleman, A., Bink, M., Palloix, A., van Eeuwijk, F., Glasbey, C.: SPICY: towards automated phenotyping of large pepper plants in the greenhouse. *Funct. Plant Biol.* **39**, 870–877 (2012)
- Bellasio, C., Olejníčková, J., Tesař, R., Šebela, D., Nedbal, L.: Computer reconstruction of plant growth and chlorophyll fluorescence emission in three spatial dimensions. *Sensors* **12**, 1052–1071 (2012)
- Azzary, G., Goulden, M.L., Rusu, R.B.: Rapid characterization of vegetation structure with a Microsoft Kinect sensor. *Sensors* **13**, 2384–2398 (2013)
- Biskup, B., Scharr, H., Schurr, U., Rascher, U.: A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies. *Plant Cell Environ.* **10**, 1299–1308 (2007)
- Omasa, K., Hosoi, F., Konishi, A.: 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.* **158**, 881–898 (2007)
- Bucksch, A., Fleck, S.: Automated detection of branch dimensions in woody skeletons of fruit tree canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **77**, 229–240 (2011)
- Klose, R., Penlington, J., Ruckelshausen, A.: Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping. *Bornimer Agrartechnische Berichte* **69**, 93–105 (2009)
- Kraft, M., Saloma De Freitag, N., Munack, A.: Test of a 3D time of flight camera for shape measurements of plants. In: *CIGR Workshop on Image Analysis in Agriculture*, Budapest, Hungary, 26–27 Aug 2010 (2010)
- Chéné, Y., Rousseau, D., Lucidarme, P., Bertheloot, J., Caffier, V., Morel, P., Belin, E., Chapeau-Blondeau, F.: On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants. *Comput. Electron. Agric.* **82**, 122–127 (2012)
- Chéné, Y., Belin, E., Chapeau-Blondeau, F., Boureau, T., Caffier, V., Rousseau, D.: Anatomic-functional bimodality imaging for plant phenotyping: An insight through depth imaging coupled to thermal imaging. Chap. 9, in Dutta Gupta, S., Ibaraki, Y., (eds.) *Plant Image Analysis: Fundamentals and Applications*. CRC Press, Boca Raton (2015)
- Chéné, Y., Belin, E., Rousseau, D., Chapeau-Blondeau, F.: Multi-scale analysis of depth images from natural scenes: scaling in the depth of the woods. *Chaos Solitons Fractals* **54**, 135–149 (2013)
- Golbach, F., Kootstra, G., Damjanovic, S., Otten, G., van de Zedde, R.: Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping. *Mach. Vis. Appl.* 1–18 (2015)
- Nguyen, T.T., Slaughter, D.C., Max, N., Maloof, J.N., Sinha, N.: Structured light-based 3D reconstruction system for plants. *Sensors* **15**(8), 18587–18612 (2015)
- Sansoni, G., Trebeschi, M., Docchio, F.: State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. *Sensors* **9**, 568–601 (2009)
- Garbez, M., Chéné, Y., Belin, É., Sigogne, M., Labatte, J.L., Hunault, G., Rousseau, D., Galopin, G.: Predicting sensorial attribute scores of ornamental plants assessed in 3D through rotation on video by image analysis: a study on the morphology of virtual rose bushes. *Comput. Electron. Agric.* **121**, 331–346 (2016)
- Khoshelham, K., Elberink, S.O.: Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. *Sensors* **12**, 1437–1454 (2012)
- <http://labjack.com/u3>
- <http://qt.digia.com/>
- <http://www.openni.org/>
- Schnabel, R., Wahl, R., Klein, R.: Efficient RANSAC for point cloud shape detection. *Comput. Graph. Forum* **26**, 214–226 (2007). (Blackwell Publishing Ltd)
- Chauveau, J., Rousseau, D., Richard, P., Chapeau-Blondeau, F.: Fractal structure in the color distribution of natural images. *Chaos Solitons Fractals* **42**, 472–482 (2009)
- Chauveau, J., Rousseau, D., Richard, P., Chapeau-Blondeau, F.: Multifractal analysis of three-dimensional histogram from color images. *Chaos Solitons Fractals* **43**, 57–67 (2010)
- Chauveau, J., Rousseau, D., Chapeau-Blondeau, F.: Fractal capacity dimension of three-dimensional histogram from color images. *Multidimens. Syst. Signal Process.* **21**, 197–211 (2010)
- Venus head point cloud. <http://www.dirdim.com> (2014)
- Otsu, N.: A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica* **11**, 23–27 (1975)
- Da Silva, D., Boudon, F., Godin, C., Sinoquet, H.: Multiscale framework for modeling and analyzing light interception by trees. *Multiscale Model. Simul.* **7**, 910–933 (2008)
- Paulus, S., Dupuis, J., Mahlein, A.K., Kuhlmann, H.: Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping. *BMC Bioinform.* **14**, 238–249 (2013)
- Paulus, S., Schumann, H., Kuhlmann, H., Léon, J.: High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants. *Biosyst. Eng.* **121**, 1–11 (2014)
- Paulus, S., Dupuis, J., Riedel, S., Kuhlmann, H.: Automated analysis of barley organs using 3D laser scanning: an approach for high throughput phenotyping. *Sensors* **14**, 12670–12686 (2014)
- http://lisabiblio.univ-angers.fr/PHENOTIC/Shape_descriptors.zip
- Boumaza, R., Huché-Théliér, L., Demotes-Mainard, S., Coz, E.L., Leduc, N., Pelleschi-Travier, S., Qannari, E.M., Sakr, S., Santagostini, P., Symoneaux, R., Gurin, V.: Sensory profiles and preference analysis in ornamental horticulture: the case of the rosebush. *Food Qual. Prefer.* **21**, 987–997 (2010)
- Garbez, M., Galopin, G., Sigogne, M., Favre, P., Demotes-Mainard, S., Symoneaux, R.: Assessing the visual aspect of rotating virtual rose bushes by a labeled sorting task. *Food Qual. Prefer.* **40**, 287–295 (2015)



Yann Chéné is a research engineer working on vision systems for agriculture at IMAG PRECISION, Angers, France. He contributed to this work during his Ph.D. research on 3D imaging in plant sciences at Université d'Angers (2011–2014).



Morgan Garbez is a Ph.D. student in biology and agronomy at Agrocampus Ouest, Angers, France. His thesis aims to assess visual characterization tools for ornamental plants with sensory and image analysis methods, together with plant 3D architecture construction over time using the rosebush as model.



David Rousseau is a Professor at Université Lyon 1, France, since 2011, with broad interest and skills in imaging and image processing with applications to life sciences including biology and plant sciences. He headed from 2008 to 2012 the PHENOTIC platform project with Université d'Angers.



Gilles Galopin is an Assistant Professor at Agrocampus Ouest in Angers, France. His research activity is about ornamental horticulture and mainly focuses on the analysis and exploitation of phenotypic plasticity in woody shrubs with ornamental rosebush model.



Étienne Belin is an Assistant Professor at Université d'Angers, France. His research activities are at the interface between information (signal and images) processing and physics, with applications in instrumentation and imaging for plant sciences, via the platform PHENOTIC.



François Chapeau-Blondeau received a Ph.D. in electrical engineering from the University Pierre et Marie Curie, Paris 6, France. He is currently a professor of electronic and information sciences at the University of Angers, France. His research interests include signal processing and imaging, and the interactions between physics and information sciences.

Caractérisation des ramifications sylleptiques, proleptiques et intermédiaires chez le rosier : recherche de variables architecturales quantitatives discriminantes

Liu-Ji Harada · Morgan Garbez^a · Monique Sigogne^b · Nicolas Donès^c · Gilles Galopin^a

^a Agrocampus Ouest, Centre d'Angers, UMR 1345 IRHS (Agrocampus Ouest, INRA, Université d'Angers), SFR QUASAV 4207, 2 rue Le Nôtre, 49045 Angers Cedex 01, France

^b INRA, UMR 1345 IRHS (Agrocampus Ouest, INRA, Université d'Angers), SFR QUASAV 4207, 42 rue Georges Morel, 49071 Beaucozè, France

^c INRA, UMR 547 PIAF (INRA, Université Blaise Pascal), 5 chemin de Beaulieu, 63039 Clermont-Ferrand Cedex 02, France

Résumé L'architecture des plantes est intimement liée à leur aspect visuel. En horticulture ornementale, cet aspect compose un élément clé de la qualité esthétique du produit et permet, par interaction avec les préférences des consommateurs, le déclenchement de l'acte d'achat. Décrire et comprendre les modèles architecturaux des végétaux représente alors une démarche censée, mais encore novatrice, pour cerner les éventuels leviers permettant d'agir sur le contrôle, la modification, et la diversification des produits horticoles d'ornement. L'étude présentée ici s'est focalisée sur les ramifications du rosier *Rosa hybrida* L. 'Radrazz', et plus spécifiquement sur le caractère immédiat ou différé du développement de ces ramifications. Sur le terrain, trois états ont été distingués sur la présence, le nombre et l'espacement entre les métamères écailleux basaux des axes : sylleptique, intermédiaire, et proleptique. A partir variables quantitatives obtenues par digitalisation de 2512 ramifications, 60 autres variables ont été créées pour voir s'il est possible de discriminer ces trois modes de ramification. Deux outils d'analyse discriminante ont ensuite été utilisés pour déterminer quelles variables étaient les plus pertinentes pour différencier ces trois modes de ramification. Deux variables permettent de distinguer les ramifications sylleptiques des non-sylleptiques avec moins de 5% d'erreur, alors qu'il faut sept variables pour différencier les trois différents types d'axes avec 15% d'erreur. Parmi ces variables, on compte le nombre et la longueur moyenne des métamères portés par les axe, le nombre et la proportion de métamères qui forment les 50%, 25% et 5% de la longueur de l'axe, et la longueur moyenne des métamères contenus dans la demi-longueur de l'axe.

Mots-clés: Rosier · Analyse architecturale · Arbre de décision · Analyse linéaire discriminante

Abstract Plant architecture is closely related to their visual aspect. In ornamental horticulture, this aspect represents a key element of the esthetical quality of the product, and allows the purchasing act by interacting with consumers' preferences. Describing and understanding plants architectural models become a logical but still innovative way to identify some eventual points which can be used in order to control, modify, and diversify ornamental products. This study was focused on the ramifications of *Rosa hybrida* L. 'Radrazz', especially on the distinction between immediate and delayed branching. On the ground, three states were distinguished with the presence, number, and space between proximal bud scale scars. With three quantitative variables obtained by digitalization of 2512 ramifications, 60 other variables were created in order to try to distinguish those three modes of ramification. Then, two discriminant analysis tools were used in order to find which variables were the most relevant to distinguish those types from each other. Only two variables were necessary to make difference between the sylleptic ramifications and the non-sylleptic ones with less than 5% failure whereas seven variables were needed to distinguish the three modes of ramification with 15% failure. Among those variables, there are the numbers and the mean length of the whole metamers of the axis, the number and proportion of metamers included in 50%, 25% and 5% of the axis' length, and the mean length of the metamers included in half of the axis.

Keywords: Rose · Architectural analysis · Decision tree · Linear discriminant analysis

1. Introduction

Le buisson ligneux est l'un des modèles végétaux les plus importants en horticulture ornementale. Son importance est accrue par la végétalisation des espaces urbains tels que les parcs, jardins, balcons, et terrasses. La qualité des buissons d'ornement relève de différentes composantes qui incluent, entre autres, leur aspect visuel. Cette composante peut se résumer par les dimensions, la surface, la forme, la ou les couleurs, et les différentes parties et organes (tiges, feuilles, fleur, fruit) du produit horticole d'ornement (Kader, 2000). Cependant, ces différents paramètres ne sont que la résultante d'un assemblage complexe de sous-unités botaniques élémentaires (Barthélémy & Caraglio, 2007). L'analyse architecturale des plantes s'intéresse à ces différents assemblages, à différentes échelles, et à différents stades de développement. C'est un domaine de recherche qui a grandement contribué à la compréhension des observations faites sur les systèmes aériens (Barthélémy & Caraglio, 2007) et racinaires (Bodner et al., 2013) des plantes. A ce jour, une série de modèles architecturaux ont été établis pour les plantes ligneuses arborescentes et arbustives (Hallé, 2004), mais très peu de modèles existent pour les plantes buissonnantes (Charles-Dominique, 2012). Le rosier, par son importance économique, est une plante arbustive qui a été très étudiée sur le plan physiologique et agronomique pour sa croissance et sa floraison (Roberts, Debener, & Gudin, 2003), mais son développement architectural reste peu étudié (Morel, Galopin, & Donès, 2009 ; Costes et al., 2014). Dans le cadre d'un projet de thèse axé sur la construction de l'architecture et des composantes visuelles des buissons d'ornement, une attention particulière a été portée sur le caractère différencié ou immédiat des ramifications du rosier *Rosa hybrida* L. 'Radrazz' Knock Out®. En effet, les ramifications sont des axes, succession de métamères résultant de l'organogénèse d'un unique méristème (Barthélémy & Caraglio, 2007) qui, chez le rosier, ont lieu à partir des bourgeons axillaires ou collatéraux (Le Bris, 1999). Ces ramifications peuvent avoir lieu immédiatement après la formation des méristèmes latéraux, et sont qualifiées de sylleptiques ou immédiates, ou après une phase d'inactivité de quelques semaines à plusieurs années pendant laquelle le méristème est souvent renfermé dans un bourgeon, et sont qualifiées de proleptiques ou différées (Champagnat, 1954; Halle, Oldeman, & Tomlinson, 1978). Le plus souvent, et chez le rosier en particulier, les caractéristiques morphologiques de ces deux types de ramifications se situent principalement à leur base ou partie proximale. La base des axes proleptiques porte des cicatrices d'écaillies originaires du bourgeon qui contenait le méristème, tandis que celle des sylleptiques n'en possède aucune (Barthélémy & Caraglio, 2007). L'objectif de cette étude consiste à créer et déterminer des variables architecturales quantitatives pouvant permettre de discriminer les axes en fonction de ces deux modes de ramification ainsi qu'un autre mode qualifié d'« intermédiaire » à partir des observations faites sur des rameaux de rosiers buissons, et l'utilisation de deux méthodes statistiques d'analyse discriminante.

2. Matériel et méthodes

Matériel végétal

Dans un premier temps, 60 boutures de rosier *Rosa hybrida* L. Radrazz Knock-Out® divisées en trois lots de 20 individus ont été effectuées en Février 2014. Chaque lot a été soumis à différentes conditions de lumière dont un cultivé à 75% d'ombrage, un à 55% d'ombrage, et le dernier cultivé en extérieur. En Mai 2015, les rosiers ont été effeuillés puis mis en chambre froide à 1.9°C avant le début du relevé de données architectural.

Digitalisation

L'objectif était d'obtenir des données architecturales en utilisant une méthode de relevé adaptée au rosier (Morel et al, 2012, Crespel et al, 2013). Pour effectuer ce relevé, les rosiers ont été digitalisés un par un avec un digitaliseur 3D et le logiciel PiafDigit (Donès et al, 2006) à l'échelle de l'axe et du métamère (Ph Morel, Galopin, & Donès, 2009). Pour l'identification des différents types d'axe, sept rosiers ont été choisis aléatoirement parmi les trois conditions d'éclairage : deux en extérieur, un seul avec 75% d'ombrage et les quatre

autres avec 55% d'ombrage. Le critère de distinction entre les axes sylleptiques et non-sylleptiques était, respectivement, l'absence ou la présence d'écaillles regroupées à leur base (Barthélémy & Caraglio, 2007). Les axes portant des écaillles à leur base ont été séparés en deux catégories. L'une a été identifiée comme celle qui regroupait les axes dont les écaillles basales étaient très resserrées entre elles, intitulée « proleptique ». Quant à l'autre, elle regroupait les axes dont les écaillles basales étaient réparties de façon plus espacées entre elles (Figure 1, Annexe 1). Cette catégorie a été intitulée « intermédiaire ». Au cours de l'acquisition des données, la distinction de ces types d'axes a été effectuée par une seule et même personne : le manipulateur du pointeur du digitaliseur. Au total, 2532 axes digitalisés ont été identifiés dans les trois catégories d'axe.

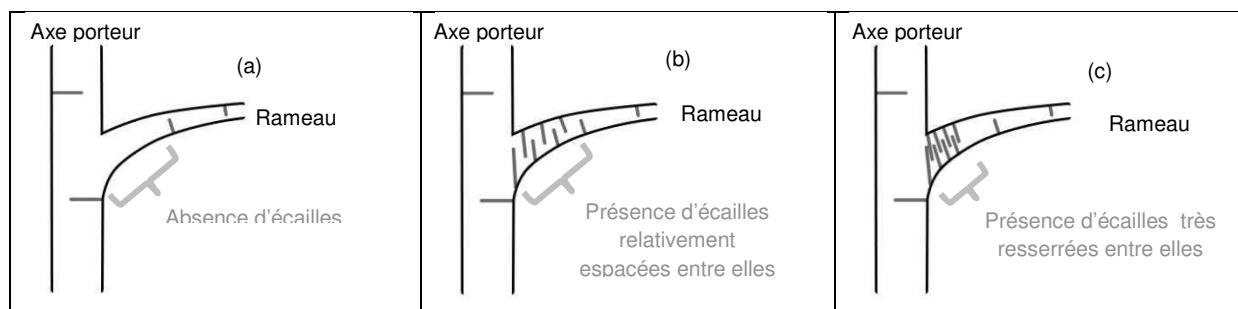


Figure 1 : Schéma des trois catégories d'axes identifiées chez le rosier : sylleptique (a) ; intermédiaire (b) ; proleptique (c). Les traits gris indiquent les cicatrices d'écaillles ou les cicatrices foliaires qui délimitent les métamères.

Tableau 1 : Distribution et caractéristiques des axes digitalisés

Distribution					
	Nombre de plantes digitalisées	Nombre d'axes digitalisés			
		Sylleptiques	Intermédiaires	Proleptiques	Total
Extérieur	2	426	424	398	1248
55% Ombrage	4	352	412	240	1004
75% Ombrage	1	91	71	98	260
Total	7	869	907	736	2512
Caractéristiques					
		Longueur totale de l'axe (cm)	Nombre de métamères	Longueur moyenne des métamères (cm)	
Sylleptiques	Moyenne	3.79	3.28	0.87	
	Ecart-type	6.23	2.20	0.68	
	Coefficient de variation	1.64	0.67	0.78	
Intermédiaires	Moyenne	7.81	9.55	0.69	
	Ecart-type	8.32	2.21	0.54	
	Coefficient de variation	1.07	0.36	0.78	
Proleptiques	Moyenne	7.90	13.25	0.62	
	Ecart-type	6.21	3.59	0.41	
	Coefficient de variation	1.04	0.27	0.78	

Base de données

Chaque axe était caractérisé par une variable qualitative intitulée « ProSyl » et par une autre variable « Cond. » qui renseignait sur les conditions de lumière. La base de données formée par le logiciel au cours de la digitalisation contenait les coordonnées spatiales des points digitalisés. A partir de ces données, trois variables architecturales quantitatives ont été extraites : la longueur des axes ; le nombre de leurs métamères ; et la longueur de chaque métamère pour un axe donné.

Création de nouvelles variables

Ici, l'objectif était de créer d'autres variables architecturales susceptibles de différencier les trois catégories d'axe à partir des trois variables extraites. Les données ont

été rassemblées sur un tableur Microsoft Excel 2010, puis la totalité des axes a été examinée de façon à éliminer les individus aberrants par constructions de tables et de graphiques sur R. Au total, 2512 axes ont constitué notre population d'étude, et les proportions des axes sylleptiques, intermédiaires et proleptiques occupaient équitablement près de 1/3 de cette population (Tableau 1, Annexe 2). 60 variables ont été créées avec différents scripts VBA pour tenter soit de mettre en évidence la présence ou non d'écaillés à la base des axes, soit de quantifier le nombre et la longueur des métamères situés à la base des axes (Tableau 2). Une nouvelle variable qualitative a été créée avec un algorithme VBA à partir de la variable *ProSyl* afin de distinguer les axes sylleptiques des axes intermédiaires et proleptiques (« non-sylleptiques »), elle a été intitulée *ProSyl_2*.

Tableau 2 : Liste des 60 variables créées

Description du type de variable	Nom attribué aux variables concernées
Nombre de métamères formant X% de la longueur totale de l'axe en partant de la base	« <i>NbMéta_ds_X%LTot/axe</i> » X = {5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 100/N}
Pourcentage de métamères formant X% de la longueur totale de l'axe en partant de la base	« <i>%Méta_ds_X%LTot/axe</i> » X = {5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 100/N}
Longueur contenue dans X% des premiers métamères de l'axe en partant de la base	« <i>Long_ds_X%Méta</i> » X = {20 ; 30 ; 40 ; 50}
Pourcentage de la longueur totale contenue dans X% des premiers métamères de l'axe en partant de la base	« <i>%LTot_ds_X%Méta</i> » X = {20 ; 30 ; 40 ; 50}
Moyenne de la longueur des métamères contenus dans X% de la longueur totale de l'axe en partant de la base, <u>ou</u> dans la longueur contenue dans X% des premiers métamères de l'axe en partant de la base	« <i>MoyLMéta_ds_X%LTot/axe</i> » X = {5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50 ; 100 ; 100/N} <u>ou</u> « <i>MoyLMéta_ds_X%Méta</i> » X = {20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70}
Moyenne du carré des écarts (MCE) par rapport à la moyenne de la longueur des métamères contenus dans X% de la longueur totale de l'axe en partant de la base, <u>ou</u> dans la longueur contenue dans X% des premiers métamères de l'axe en partant de la base	« <i>MCELMéta_ds_X%LTot/axe</i> » X = {5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50 ; 100 ; 100/N} <u>ou</u> « <i>MCELMéta_ds_X%Méta</i> » X = {20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70}

Construction des arbres de décision

La détermination des variables discriminantes a été effectuée avec le logiciel SPAD8 et la méthode de segmentation CART (Classification And Regression Trees). Pour une population donnée, cette méthode permet de décrire ou d'expliquer les différentes valeurs ou modalités prises par une variable à partir d'un certain nombre de variables explicatives grâce à un système de divisions successives (Nakache et Confais, 2003). Lorsque la variable expliquée est qualitative, il en résulte la construction d'un arbre de décision dont les segments sont divisés par les variables explicatives, et dont les extrémités (appelées « sommets ») correspondent à des sous-populations d'individus majoritairement caractérisés par l'une des modalités prise par la variable expliquée. L'arbre obtenu correspond alors à l'arbre le plus fiable comprenant le moins de découpages possibles. D'autre part, le logiciel SPAD8 construit également un modèle de prédiction permettant de classer les individus d'une population donnée en fonction des variables de segmentation de l'arbre.

Ici, deux arbres de décision ont été construits avec la totalité des 2512 axes. Un pour séparer les axes sylleptiques des non-sylleptiques avec « *ProSyl_2* » pour variable à expliquer. Un autre pour séparer les axes sylleptiques, intermédiaires et proleptiques avec *ProSyl* pour variable expliquée. Les 60 variables quantitatives créées ainsi que les variables *nbMetameres*, *longueurAxe* et *Cond.* ont toutes été sélectionnées en tant que variables explicatives. La segmentation avec les variables explicatives a été effectuée sur 60% de la population totale (échantillon d'apprentissage), 20% ont servi à l'élagage de l'arbre

(échantillon d'élagage), et les 20% restants ont servi à tester et à valider sa fiabilité (échantillon test). La distribution des axes selon la modalité qui leur a été affectée par le modèle prédictif a pu être visualisée dans des tables de résultats associées à chaque arbre de décision, et comparée à la distribution observée sur le terrain.

Utilisation de l'analyse linéaire discriminante

L'analyse linéaire discriminante est la méthode la plus classique pour différencier les groupes affectés aux différentes modalités d'une variable qualitative avec un certain nombre de variables quantitatives (Gnanadesikan, 1988 ; Nakache et Confais, 2003). Son approche est complètement différente de la méthode CART et elle ne permet pas de sélectionner les variables les plus discriminantes. Ici, nous utilisons cette méthode afin de tester la capacité des variables sélectionnées avec la méthode CART à différencier nos différents types d'axes. Pour cela, la fonction *lda* (issue du package MASS) du logiciel R a été utilisée. Cette fonction permet de construire un modèle linéaire discriminant à partir de variables explicatives quantitatives. Ce modèle est constitué d'une ou plusieurs fonctions linéaires discriminantes. Le modèle considéré comme le plus fiable est celui qui permet de catégoriser au mieux les différentes modalités de la variable étudiée après test par Cross-Validation.

Sur la moitié du nombre total d'axes, deux analyses discriminantes ont été effectuées avec les variables sélectionnées par la méthode CART à partir de cette même variable (variables explicatives) pour ProSyl_2 et ProSyl (variables à expliquer). Avec la fonction *predict* du logiciel R, deux fonctions de prédiction ont été créées chacune associée à l'un des deux modèles afin de visualiser la distribution sur l'autre moitié des axes et de la comparer à celle observée sur le terrain.

3. Résultats et interprétation

Lecture des arbres de décision

En distinguant les axes sylleptiques et les axes non-sylleptiques, on obtient un arbre à deux niveaux, deux variables de découpage et trois sommets (Figure 2).

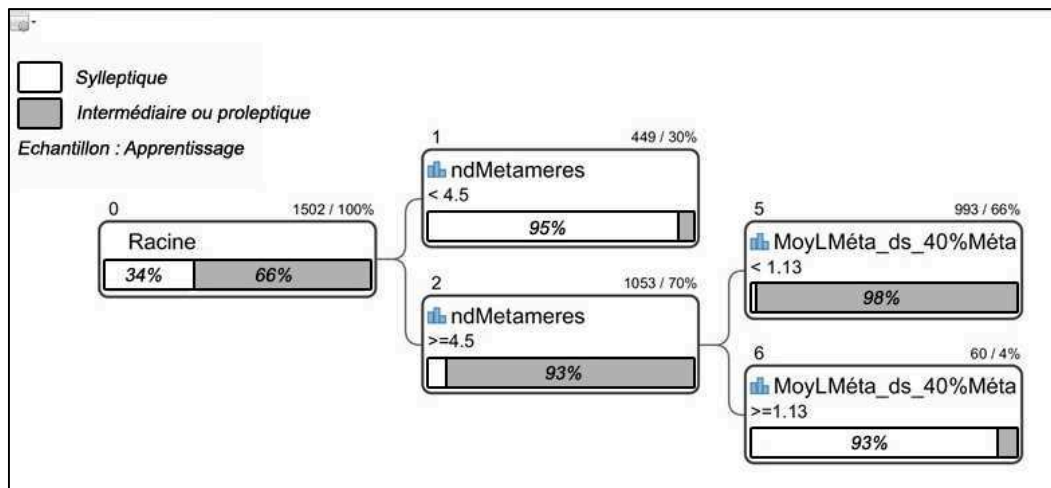


Figure 2 : Arbre de décision obtenu par la méthode CART avec la variable ProSyl_2 sur l'échantillon d'apprentissage

Tableau 3 : Liste des variables de découpage issues de l'arbre montré en Figure 4

Variables de découpage	Nombre d'apparitions	N° niveau de découpage	Valeur(s) de tri
<i>nbMetameres</i>	1	1	4.5
<i>MoyLMéta_ds_40%Méta</i>	1	2	1.13 cm

Avec seulement deux variables et deux niveaux de découpage, on parvient à trier la quasi-totalité des axes sylleptiques et des axes non-sylleptiques (Figure 2, Tableau 3). En effet, les extrémités de l'arbre nous montrent des sous-populations caractérisées par plus de 90% de l'une de ces deux catégories d'axe (Figure 2).

En distinguant les axes sylleptiques, intermédiaires et proleptiques, on obtient un arbre à cinq niveaux, sept variables de découpage et neufs sommets (cf. Figure 5).

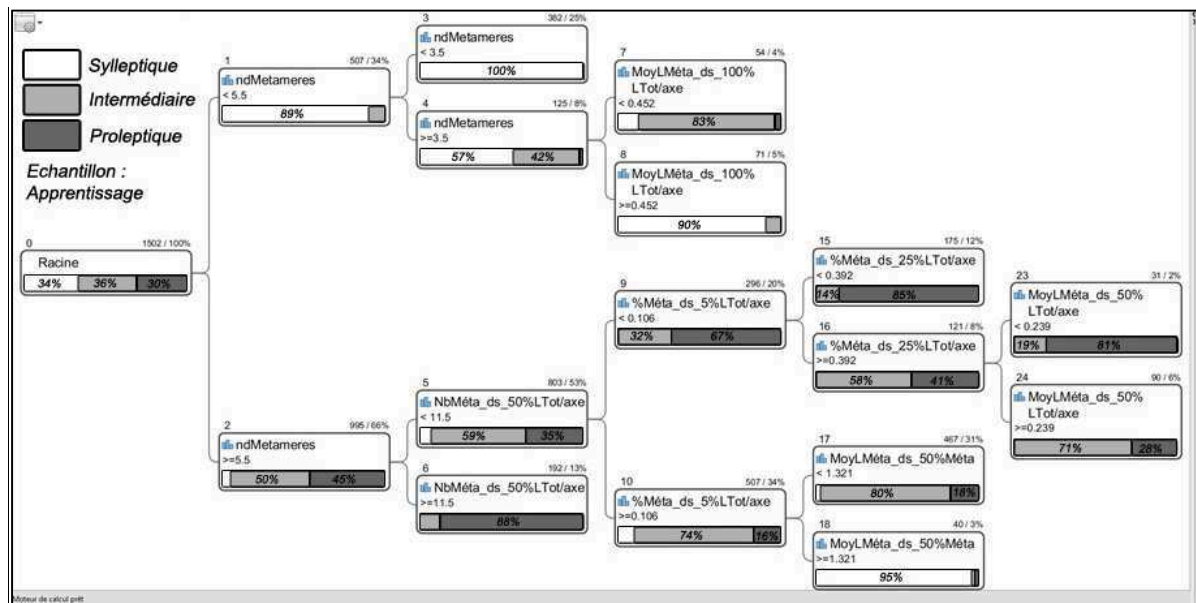


Figure 3 : Arbre de décision obtenu par la méthode CART avec la variable ProSyl sur l'échantillon d'apprentissage

Tableau 4 : Liste des variables de découpage issues de l'arbre montré en Figure 3

Variables de découpage	Nombre d'apparitions	N° niveau de découpage	Valeur(s) de tri	Classes triées
<i>nbMetameres</i>	2	1	5.5	Sylleptique, intermédiaire et proleptique
		2	3.5	Sylleptique et intermédiaire
<i>NbMéta_ds_50%LTot/axe</i>	1	2	11.5	Sylleptique, intermédiaire et proleptique
<i>MoyLMéta_ds_100%LTot/axe</i>	1	3	0.452 cm	Sylleptique et intermédiaire
<i>%Méta_ds_5%LTot/axe</i>	1	3	10.6 %	Sylleptique, intermédiaire et proleptique
<i>%Méta_ds_25%LTot/axe</i>	1	4	39.2 %	Intermédiaire et proleptique
<i>MoyLMéta_ds_50%Méta</i>	1	4	1.321 cm	Sylleptique, intermédiaire et proleptique
<i>MoyLMéta_ds_50%LTot/axe</i>	1	5	0.239 cm	Intermédiaire et proleptique

Avec les cinq variables *nbMetameres*, *NbMéta_ds_50%LTot/axe*, *MoyLMéta_ds_100%LTot/axe*, *%Méta_ds_5%LTot/axe* et *MoyLMéta_ds_50%Méta*, et cinq niveaux de découpage, on parvient à séparer un grand nombre d'axes sylleptiques des non-sylleptiques (Tableau 4). Trois extrémités de l'arbre nous montrent des sous-populations caractérisées par plus de 90% d'axes sylleptiques. En revanche, il faut les deux autres variables *%Méta_ds_25%LTot/axe* et *MoyLMéta_ds_50%LTot/axe*, et un niveau de découpage supplémentaire pour distinguer plus spécifiquement les axes proleptiques des axes intermédiaires. On obtient des extrémités dont les sous-populations sont caractérisées par 70 à 85% d'axes intermédiaires ou proleptiques (Figure 3).

Lecture des résultats des prédictions effectuées par le modèle de tri avec les variables de découpage

Avec la variable *ProSyl_2* :

On retrouve quasiment les mêmes distributions des individus dans l'échantillon d'apprentissage et dans l'échantillon test. Le modèle de tri de l'arbre de décision reflète donc bien les phénomènes observés dans l'ensemble des 2512 axes. De plus, on parvient à déterminer le caractère différencié ou non d'un axe avec moins de 5% d'erreur (Tableau 5).

Tableau 5 : Distribution des axes par le modèle tri de l'arbre de décision construit avec ProSyl_2 et ProSyl

Avec ProSyl_2					
Echantillon d'apprentissage			Echantillon test		
Classe	% bien classés	% mal classés	Classe	% bien classés	% mal classés
Sylleptique	95.63	4.37	Sylleptique	95.08	4.92
Non-sylleptique	97.29	2.71	Non-sylleptique	97.80	2.20
Total	96.74	3.26	Total	96.81	3.19

Avec ProSyl					
Echantillon d'apprentissage			Echantillon test		
Classe	% bien classés	% mal classés	Classe	% bien classés	% mal classés
Sylleptique	96.03	3.97	Sylleptique	94.54	5.46
Intermédiaire	88.62	11.38	Intermédiaire	89.71	10.29
Proleptique	75.72	24.28	Proleptique	62.94	37.06
Total	87.22	12.78	Total	83.83	16.17

Avec la variable ProSyl :

Tableau 6 : Répartition des axes proleptiques par le modèle de tri de l'arbre de décision construit avec ProSyl

Echantillon d'origine	Effectif classé sylleptique	Effectif classé intermédiaire	Effectif classé proleptique	Total d'axes proleptiques
Apprentissage	1	109	343	453
Test	0	53	90	143

De même, on retrouve à peu près les mêmes distributions des individus dans l'échantillon d'apprentissage et dans l'échantillon test. On parvient également à prédire la nature sylleptique, intermédiaire ou proleptique d'un axe avec moins de 15% d'erreur (Tableau 5). Cependant, le modèle de tri a plus de chance de se tromper de classe en prédisant la nature proleptique des axes avec plus de 25% d'erreur, alors qu'il est respectivement près de 5% et 10% d'erreur pour les axes sylleptiques et intermédiaires.

En observant plus en détail la distribution des axes proleptiques (Tableau 6), on remarque qu'un nombre et un pourcentage importants de ces axes ont été classés « intermédiaires » par le modèle de prédiction. C'est ce qui explique le pourcentage plus élevé d'axes « mal classés » et les erreurs de classification plus importantes chez les proleptiques. Ainsi, le modèle prédictif issu du découpage avec la méthode CART distingue plus difficilement les axes proleptiques des axes intermédiaires.

Visualisation des tris effectué par la/les fonction(s) discriminante(s), et lecture des résultats des prédictions.

Avec la variable ProSyl_2 :

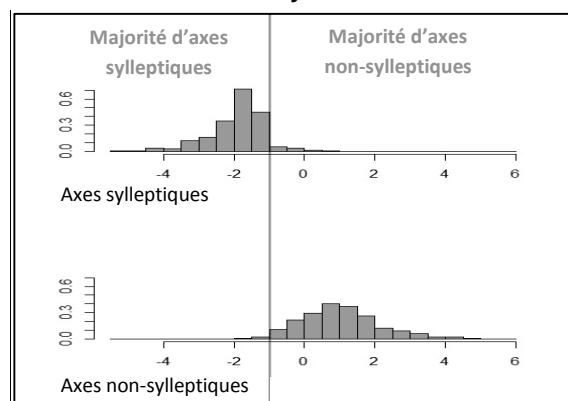


Figure 4 : Histogrammes de répartition des individus en fonction de la valeur donnée par la fonction LD1

Avec l'utilisation de l'analyse linéaire discriminante avec la variable ProSyl_2 et les deux variables sélectionnées par la méthode CART, on obtient un modèle construit avec une fonction linéaire discriminante LD1. On remarque que les axes sylleptiques et non-sylleptiques sont aisément distinguables selon la valeur prise par cette fonction. Une grande majorité d'axes sylleptiques prennent des valeurs inférieures à -1 tandis que les autres prennent des valeurs supérieures à -1 (Figure 4).

Tableau 7 : Distribution des axes par le modèle prédictif construit avec ProSyl_2

Classes	% bien classés	% mal classés
Sylleptique	96,36	3,64
Non-sylleptique	96,56	3,44
Total	96,46	3,54

Le modèle prédictif associé à LD1 parvient à distinguer les axes sylleptiques et les axes non-sylleptiques avec moins de 5% d'erreur, comme avec le modèle de distribution issu de l'arbre de décision (Tableau 7).

Avec la variable ProSyl :

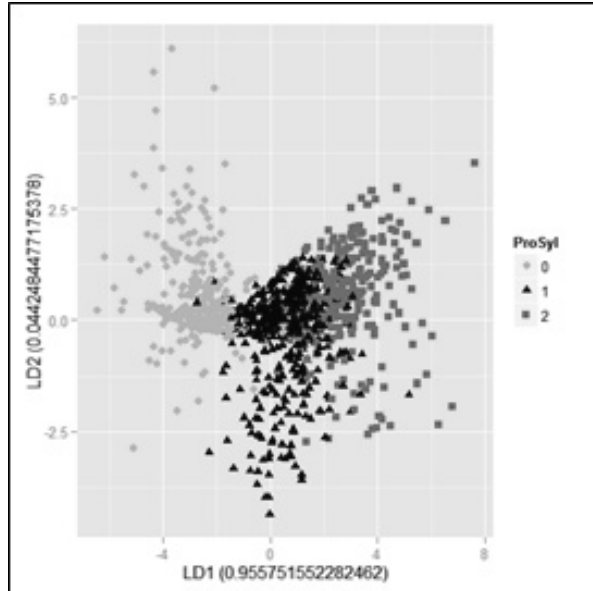


Figure 5 : Graphique des individus selon LD1 et LD2
0 = Sylleptique ; 1 = Intermédiaire ; 2 = Proleptique

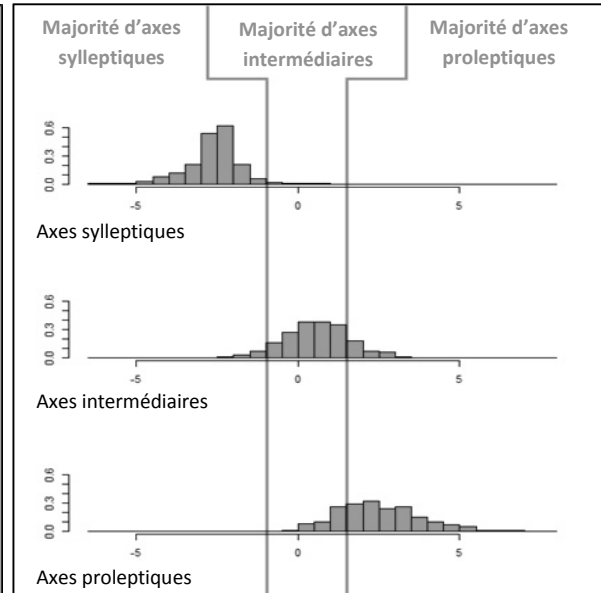


Figure 6 : Histogrammes de répartition des individus en fonction de la valeur donnée par la fonction LD1

Après utilisation de l'analyse linéaire discriminante avec la variable ProSyl et les sept variables sélectionnées par la méthode CART, on obtient un modèle construit avec deux fonctions linéaires discriminantes : LD1 et LD2. La fonction LD1 est celle qui décrit le mieux la valeur discriminante du modèle, près de 96% cette valeur (Figure 5). Ceci s'explique par les valeurs prises par la fonction LD1 car elles nous permettent de bien distinguer les trois catégories d'axe. La majorité des sylleptiques prennent des valeurs inférieures ou égales à -1, entre -1 et 1.5 pour les intermédiaires, et supérieures à 1.5 pour les proleptiques (Figure 6). Pour la fonction LD2, cette distinction n'était quasiment pas visible.

Tableau 8 : Distribution des axes par le modèle linéaire prédictif construit avec ProSyl

Classes	% bien classés	% mal classés
Sylleptique	96,14	3,86
Intermédiaire	72,55	27,45
Proleptique	84,06	15,94
Total	84,25	15,75

Le modèle prédictif associé à LD1 et LD2 parvient à distinguer les axes sylleptiques, intermédiaires, et proleptiques avec moins de 16% d'erreur (Tableau 8). Cette fois-ci, on remarque que les erreurs de classification des axes intermédiaires sont plus importantes que celles du modèle issu de l'arbre de décision avec environ 28% d'erreur.

Tableau 9 : Répartition des axes intermédiaires par le modèle linéaire prédictif construit avec ProSyl

Effectif classé sylleptique	Effectif classé intermédiaire	Effectif classé proleptique	Total d'axes intermédiaires
24	341	105	470

Or, les erreurs de classification pour la prédiction des axes sylleptiques est toujours à moins de 5% d'erreur (Tableau 8). Ainsi, l'analyse linéaire discriminante a permis de construire un modèle prédictif qui catégorise mieux les axes proleptiques au détriment des axes intermédiaires (Tableau 9), contrairement au modèle de distribution issu de l'arbre de décision.

4. Discussion et conclusion

Les valeurs de X choisies pour les variables créées (Tableau 2) ont été choisies de manière totalement empirique. Compte tenu des grandes différences de longueur d'axe, de nombres de métamères et de longueur moyenne de métamères (Tableau 1), il a fallu sélectionner une gamme de pourcentage de longueur et de pourcentage de métamères suffisamment étendue pour tenter de quantifier la portion proximale des axes susceptible de porter (ou pas) des écailles. Les variables mesurant la moyenne de la longueur ou la MCE des métamères contenus dans la X% de la longueur de l'axe, ou la longueur formée par X% des premiers métamères de l'axe en partant de la base ont des valeurs de X plus nombreuses car elles devaient essayer de quantifier la longueur des métamères situés à la base des axes, et en particulier pour tenter de distinguer les axes intermédiaires et proleptiques. Etant donné que ces deux catégories d'axe possèdent des gammes de nombres de métamères et des longueurs relativement proches (Tableau 1), il a semblé plus judicieux de ne pas se cantonner uniquement qu'à la portion proximale des axes pour le calcul de ces moyennes et MCE, et d'étendre X à des valeurs plus élevées (Tableau 2) pour éventuellement détecter des différences à l'échelle de l'axe entier et pas uniquement à l'échelle de sa partie proximale.

Les rosiers sélectionnés pour la digitalisation ont été cultivés dans différentes conditions de lumière, or il a été montré que ce facteur avait une influence sur l'architecture des plantes (Bartlett & Remphrey, 1998 ; Girault et al., 2008). Toutefois, cette variable (*Cond.*) n'apparaît pas dans les arbres de décision. Ceci nous montre que nos observations faites sur la base des axes proleptiques, sylleptiques et intermédiaires sont indépendantes des conditions de lumière des plantes, et donc adaptables à une large diversité phénotypique.

Qu'il s'agisse de la distinction entre les axes sylleptiques et les axes non-sylleptiques ou de la distinction entre les axes proleptiques, sylleptiques et intermédiaires, l'utilisation de la méthode de segmentation CART nous a permis d'obtenir un nombre de variables discriminantes relativement faible. Les modèles de segmentation issus de cette méthode, et les fonctions discriminantes obtenues en utilisant ces variables nous permettent de distinguer les axes sylleptiques et non-sylleptiques avec moins de 5% d'erreur, et les axes sylleptiques, intermédiaires et proleptiques avec environ de 15% d'erreur. Toutefois, on constate que les erreurs de classification des axes ne sont pas les mêmes entre ces deux méthodes pour les proleptiques et intermédiaires. Ceci est principalement dû aux différences de fonctionnement entre les deux méthodes, ce qui nous conduit à deux modèles prédictifs différents, et donc deux distributions d'individus différentes. En effet, la méthode CART est basée sur un système de divisions successives dont chacune est caractérisée par une variable discriminante, on a donc un modèle de tri où les variables interviennent l'une après l'autre. A contrario, l'analyse linéaire discriminante est basée sur la construction d'un modèle linéaire discriminant qui prend en compte toutes les variables d'un seul coup. Malgré cela, ces deux approches nous assurent que les variables trouvées ont une forte valeur discriminante pour distinguer les trois catégories d'axes étudiées.

La méthode de segmentation CART a également renseigné sur les caractéristiques des différents types d'axes grâce aux valeurs de découpage des variables discriminantes (Tableaux 2 et 3). Ainsi, d'après le premier arbre de décision, les axes sylleptiques possèdent moins de métamères que les non-sylleptiques, et les métamères situés à leur base sont plus longs que ceux des axes non-sylleptiques. De même, sur le deuxième arbre, on retrouve les mêmes caractéristiques que précédemment pour les axes sylleptiques :

moins de métamères, et des métamères plus longs. Grâce aux variables mesurant la moyenne de la longueur des métamères contenus dans la longueur formée par 40 et 50% des premiers métamères de l'axe en partant de la base on retrouve l'aspect présence ou absence d'écaillés à la base des axes. La variable mesurant la longueur moyenne des métamères semblerait aussi pouvoir détecter cet aspect, mais uniquement pour les axes ayant 5 métamères ou moins (Figure 2). En revanche le nombre de métamères, variable qui constitue le premier niveau de découpage des deux arbres, nous révèle une caractéristique qui ne se réfère pas directement à la présence ou l'absence d'écaillés basales. Or, les écaillés sont analogues à des organes foliaires et proviennent d'une même phase de croissance (Barthélémy & Caraglio, 2007). A l'échelle d'un axe non-sylleptique, on aurait donc au moins deux phases de croissances : une pour les écaillés et au moins une pour le reste des métamères, alors qu'on aurait seulement une seule phase de croissance pour les axes sylleptiques. C'est ce qui pourrait expliquer que les axes sylleptiques ont généralement moins de métamères que les non-sylleptiques.

D'autre part, le nombre de métamères est plus important à la base des axes proleptiques et leur longueur est plus faible que celle des axes intermédiaires, ce qui est cohérent avec le resserrement d'écaillés plus important qu'on observe chez les axes proleptiques. Cependant, on remarque que les proportions de métamères qui occupent 5% et 25% de la longueur des axes proleptiques sont plus faibles que celles des intermédiaires. A l'origine ces deux variables devaient montrer le résultat inverse car les écaillés basales sont beaucoup plus resserrées chez les axes proleptiques, et on se serait donc attendu à une proportion de métamères plus importante. Toutefois cette affirmation n'est vraie que si tous les axes ont le même nombre de métamères et la même longueur, ce qui n'est pas le cas. L'analyse de ces variables sur R (Annexes 2) nous a montré que les axes proleptiques et intermédiaires ont approximativement la même longueur et le même nombre de métamères dans les 5 ou 25% de la longueur totale, mais que les axes intermédiaires possèdent globalement moins de métamères que les axes proleptiques. C'est ce qui explique le tri effectué par ces deux variables, mais il est difficile de le mettre en relation avec les observations qui nous ont permis de distinguer les axes proleptiques et intermédiaires. Jusqu'à présent, nos critères de distinction pour les différents types d'axe ont été uniquement basés sur des observations faites à la base des axes. Du fait de la présence d'écaillés à leur base, les axes intermédiaires proviennent d'un processus de débourrement similaire à celui des axes proleptiques. Même si le critère de distinction entre proleptique et intermédiaire s'est avéré purement subjectif et sans quantification précise, les sept variables trouvées précédemment nous donnent de bonnes raisons de penser qu'on a des axes à caractère différencié issus de deux modes de ramification différents.

Toutefois, Lauri et al. (ND) ont affirmé que les marqueurs morphologiques de la prolepsie ou de la syllepsie ne sont pas constants et qu'il existerait un gradient dont les extrêmes correspondraient aux caractéristiques morphologiques de la prolepsie et de la syllepsie. Les axes dits état « intermédiaires » pourraient donc effectivement correspondre à un intermédiaire entre prolepsie et syllepsie. D'autre part, Negrón et al. (2014) ont constaté que chez l'amandier, les axes sylleptiques et proleptiques pouvaient être distingués respectivement par cinq et sept zones à caractères morphologiques différents. Ces caractères faisaient références aux fleurs, rameaux, et types de bourgeons portés par les axes, et à leur position sur les axes. Or, ces caractéristiques n'ont pas été étudiées ici, mais elles semblent appuyer l'existence d'une relation entre la floraison et la syllepsie (Lauri et al., ND). De même, la position des rameaux et la longueur de l'axe porteur influencerait également le caractère différencié ou immédiat des rameaux (Barthélémy & Caraglio, 2007 ; Powell, 1991). Il serait donc intéressant de prendre en compte la totalité de ces aspects pour des études plus poussées sur l'architecture des plantes afin de mieux comprendre comment se développent de tels rameaux. Cependant, la recherche de variables architecturales quantitatives basées sur les caractéristiques morphologiques des axes sylleptiques, proleptiques ou intermédiaires étudiés ici devient une méthode intéressante en termes de discrimination et classification, notamment dans le cadre de la modélisation architecturale.

5. Bibliographie

- Barthélémy, D., & Caraglio, Y. (2007). Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of botany*, 99(3), 375-407.
- Bartlett, G. A., & Remphrey, W. R. (1998). The effect of reduced quantities of photosynthetically active radiation on *Fraxinus pennsylvanica* growth and architecture. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, 76(8), 1359-1365.
- Bodner, G., Leitner, D., Nakhforoosh, A., Sobotik, M., Moder, K., & Kaul, H.-P. (2013). A statistical approach to root system classification. *Frontiers in Plant Science*, 4, 292.
- Champagnat, P. (1954). Recherches sur les rameaux anticipés des végétaux ligneux. *Revue de Cytologie et de Biologie Végétales*, 15(1), 1-51.
- Charles-Dominique, T. (2012). *Analyse des relations entre plasticité architecturale des buissons et prolifération de leurs populations*. Thèse de doctorat. Université de Montréal - Université Montpellier II, 105.
- Costes, E., Crespel, L., Denoyes, B., Morel, P., Demene, M.-N., Lauri, P.-E., et al. (2014). Bud structure, position and fate generate various branching patterns along shoots of closely related Rosaceae species: a review. *Frontiers in Plant Science*, 5, 666.
- Crespel, L., Sigogne, M., Donès, N., Relion, D., & Morel, P. (2013). Identification of relevant morphological, topological and geometrical variables to characterize the architecture of rose bushes in relation to plant shape. *Euphytica*, 191(1), 129-140.
- Donès, N., Adam, B., & Sinoquet, H. (2006). PiafDigit—software to drive a Polhemus Fastrak 3 SPACE 3D digitiser and for the acquisition of plant architecture. In. Clermont-Ferrand, France: UMR PIAF INRA-UBP.
- Girault, T., Bergougnoux, V., Combes, D., Viémont, J.-D., & Leduc, N. (2008). Light controls shoot meristem organogenic activity and leaf primordia growth during bud burst in *Rosa* sp.. *Plant, Cell & Environment*, 31(11), 1534-1544.
- Gnanadesikan (1988), *Discriminant analysis and clustering*, Washington D.C., National Academies, 105p.
- Gordon, D., Rosati, A., Damiano, C., & Dejong, T. M. (2006). Seasonal effects of light exposure, temperature, trunk growth and plant carbohydrate status on the initiation and growth of epicormic shoots in *Prunus persica*. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 81(3), 421-428.
- Halle, F., Oldeman, R. A. A., & Tomlinson, P. B. (1978). Tropical trees and forests: an architectural analysis. *Tropical trees and forests: an architectural analysis.*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, xvii + 441 pp.-xvii + 441 pp.
- Hallé, F. (2004). *Architecture de Plantes*, JPC Editions, 162.
- Kader, A. A. (2000). Quality of horticultural products. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 517, 17-20.

Lauri, P.E., Edelin, C., Mauget, J.C. (ND). Prolepsie, Syllepsie. *Document disponible en ligne sur le site du GEA (Groupe d'étude de l'arbre)*, lien :

www.groupedetudedelarbre.org/userfiles/PROLEPSIE.rtf

Le Bris, M. (1999). *Etude des potentialités physiologiques des bourgeons axillaires le long de la tige de Rosa hybrida L. Rôle d'un inhibiteur, l'acide abscissique*. Thèse de doctorat. Nice.

Morel, P., Crespel, L., Galopin, G., & Moulia, B. (2012). Effect of mechanical stimulation on the growth and branching of garden rose. *Scientia Horticulturae*, 135, 59-64.

Morel, P., Galopin, G., & Donès, N. (2009). Using architectural analysis to compare the shape of two hybrid tea rose genotypes. *Scientia Horticulturae*, 120(3), 391-398.

Nakache, Confais (2003), *Statistique explicative appliquée*, Paris Cedex 15, Editions TECHNIP, 282 p.

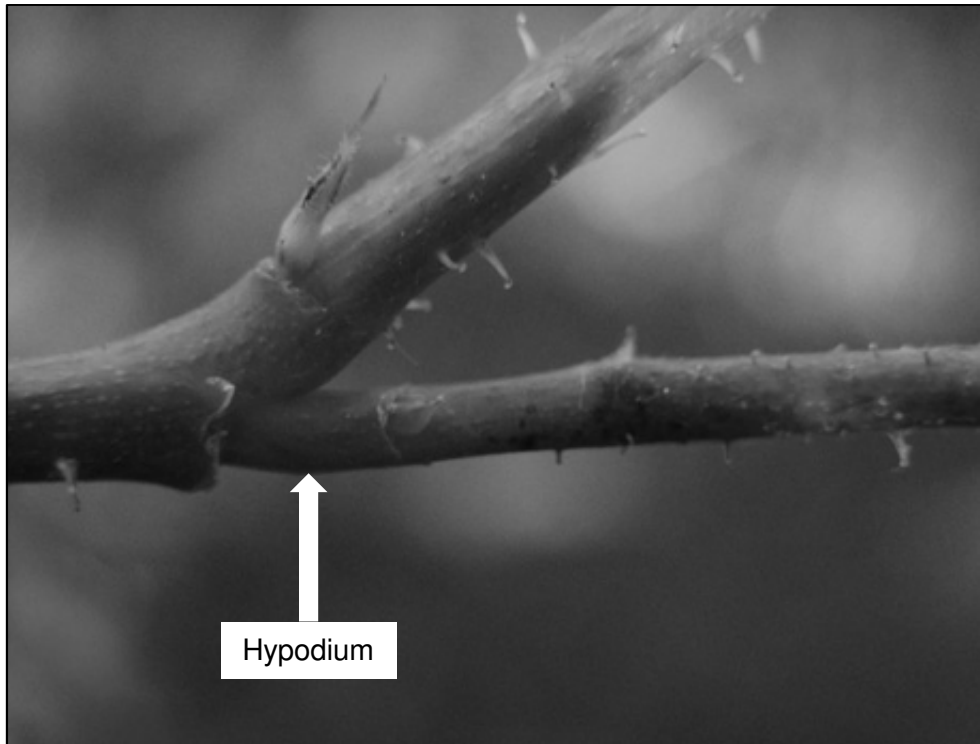
Negron, C., Contador, L., Lampinen, B. D., Metcalf, S. G., Guedon, Y., Costes, E., et al. (2014). Differences in proleptic and epicormic shoot structures in relation to water deficit and growth rate in almond trees (*Prunus dulcis*). *Annals of Botany*, 113(3), 545-554.

Powell, G. R. (1991). preformed and neoformed extension of shoots and sylleptic branching in relation to shoot length in *tsuga-canadensis*. *Trees-Structure and Function*, 5(2), 107-116.

Roberts, A., Debener, T., & Gudin, S. (2003). *Encyclopedia of Rose Science, Three-Volume Set*: Academic Press, 1200.

6. Annexes

Annexe 1 : Photographies (Harada, Septembre 2015)



Axe sylleptique de Rosa hybrida L. 'Radrazz'

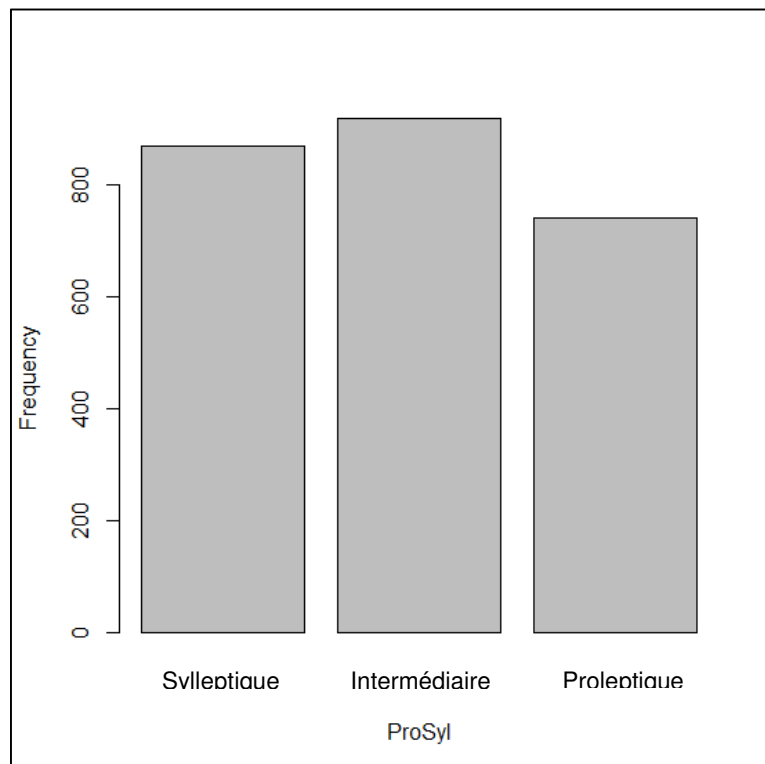


Axe proleptique de Rosa hybrida L. 'Radrazz'

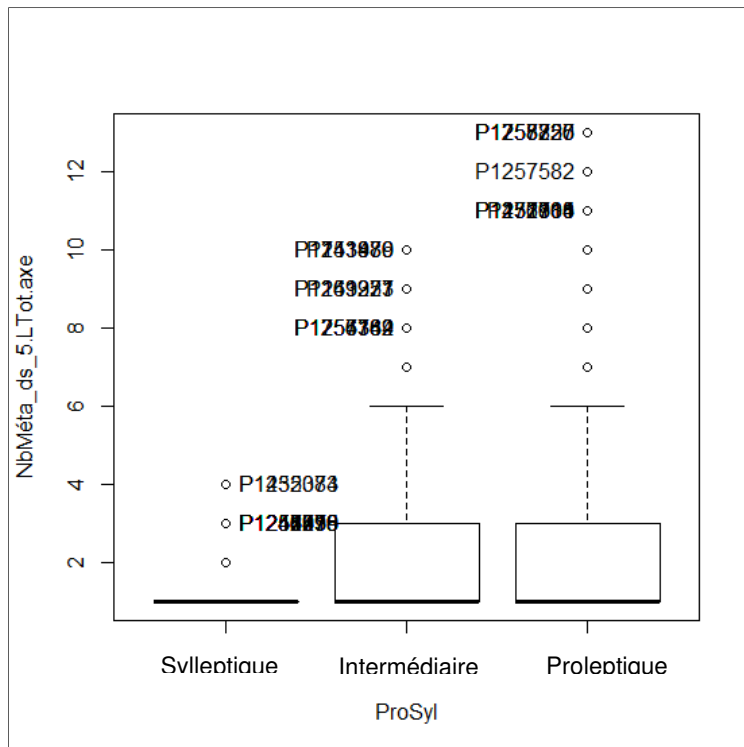


Axe intermédiaire de Rosa hybrida L. 'Radrazz'

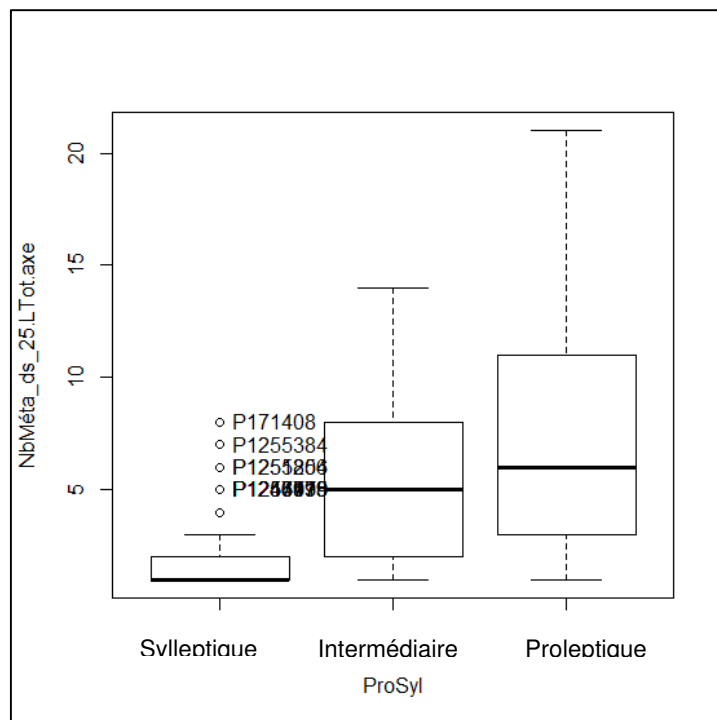
Annexe 2 : Analyses graphiques complémentaires sur R



Effectif différents types d'axes



Nombre de métamères contenus dans 5% de la longueur totale des axes en partant de la base



Nombre de métamères contenus dans 25% de la longueur totale des axes en partant de la base

RÉSUMÉ

Les buissons ligneux forment un modèle végétal clé pour répondre aux préoccupations sociales et environnementales. Usuellement transposé sur le modèle arborescent, leur développement architectural reste encore peu compris et peu étudié au regard de leur qualité visuelle. Pour cerner et anticiper ces attentes, une méthodologie pluridisciplinaire visant le management de la qualité visuelle des plantes d'ornement est proposée. Elle intègre l'architecture des plantes avec sa plasticité phénotypique et la perception de leur apparence visuelle. Sur un rosier buisson : *Rosa hybrida* L. 'Radrazz', l'étude montre comment l'analyse architecturale avec ses outils de modélisation, l'analyse sensorielle et d'image peuvent former un cadre scientifique cohérent visant cet objectif, et transposable à d'autres taxons. Sur rosiers virtuels, et réels exposés à un gradient lumineux, l'apparence visuelle peut être caractérisée objectivement au moyen d'épreuves sensorielles sur vidéo de plante en rotation à différents stades. La vidéo permet aux sujets une meilleure représentation mentale de la plante en 3D, et ainsi une description plus complète et fiable de l'apparence visuelle ; puis de prédire cette description en intégrant statistiquement l'analyse d'image de plusieurs facettes de la plante. Certaines variables architecturales pertinentes, et de nombreuses équivalentes, potentiellement intéressantes pour étudier le développement des buissons au cours de leur cycle de vie, permettent de prédire voire d'expliquer l'élaboration des composantes visuelles d'un cultivar. Pour plus de réactivité au marché, cette étude pose les bases pour concevoir des outils interactifs d'aide à la décision et à l'innovation afin de dynamiser les filières de l'horticulture ornementale, tant au niveau des sélectionneurs, des expérimentateurs, des producteurs que des distributeurs.

Mots-clés : rosier, plante d'ornement, qualité visuelle, architecture, analyse sensorielle, analyse d'image, modélisation

ABSTRACT

*Shrubs form a key plant model to meet social and environmental concerns. Usually transposed on the tree model, their architectural development is still ill-known and understudied to address visual quality. To identify and anticipate such expectations, the visual quality management of ornamental plants through a multidisciplinary methodology is proposed. It includes architecture of the plants with its phenotypic plasticity and their visual appearance perception. On a rose bush: *Rosa hybrida* L. 'Radrazz', this work shows how architectural analysis with its modeling tools, sensory evaluation and image analysis can form a coherent scientific framework to face up to such a purpose, and be transposed for other taxa. On virtual rose bushes, and real ones exposed to a light gradient, the visual appearance can be characterized objectively by means of sensory tests using rotating plant video at different stages. The video stand enables a better mental representation of the plant 3D by the subjects, leading to a more complete and reliable description of the plant visual appearance; then to predict this description through statistically integrated image analysis of multiple plant facets. Some relevant architectural variables, with numerous equivalents, potentially interesting to study the architectural development of bushes during their life cycle, enabled to predict even explain how visual components were built for a cultivar. For a better market responsiveness, this work lays the foundation for drafting interactive decision and innovation support tools for boosting ornamental horticulture sector, by engaging scientists, breeders, growers, and dispensers.*

Keywords: Rose bush, ornamental plant, visual quality, architecture, sensory analysis, image analysis, modeling



AGROCAMPUS OUEST • Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
65 rue de Saint-Brieuc – CS84215 – F-35042 Rennes Cedex
Tél. : 02 23 48 50 00
www.agrocampus-ouest.fr



Avec le soutien de
Jardiland
l'institut