

## Séminaire « Quels créneaux pour l'utilisation des modèles architecturés des plantes ? »

Le 30 juin et 1<sup>er</sup> juillet 2008, à l'ACTA à Paris

### Compte rendu

Organisation dans le cadre du RMT modélisation.

Animé par François Brun (ACTA) et Bruno Andrieu (INRA, EA).

L'ensemble des présentations est disponible sur [www.modelia.org](http://www.modelia.org) (avec son):

<http://www.modelia.org/moodle/course/view.php?id=9>

### Tour de table :

François Brun	ACTA	francois.brun@toulouse.inra.fr
Philippe Gate	ARVALIS	p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr
David Gouache	ARVALIS	d.gouache@arvalisinstitutduvegetal.fr
François Piraux	ARVALIS	f.piraux@arvalisinstitutduvegetal.fr
Francis Flénet	CETIOM	flenet@cetiom.fr
Thierry Fourcaud	CIRAD	thierry.fourcaud@cirad.fr
Paul-Henry Cournède	ECP	paul-henry.cournede@ecp.fr
Véronique Letort	ECP	veronique.letort@student.ecp.fr
Amélie Mathieu	ECP	mathieu@mas.ecp.fr
Bruno Andrieu	INRA,EA	Bruno.Andrieu@grignon.inra.fr
Rim Baccar	INRA,EA	rbaccar@grignon.inra.fr
Frédéric Baret	INRA,EA	baret@avignon.inra.fr
Jessica Bertheloot	INRA,EA	jberthel@bcgn.grignon.inra.fr
Philippe Burger	INRA,EA	pburger@toulouse.inra.fr
Tino Dornbush	INRA,EA	tino.dornbusch@landw.uni-halle.de
Abraham Escobar-Gutierrez	INRA,EA	abraham.escobar@lusignan.inra.fr
Christian Fournier	INRA,EA	Christian.Fournier@supagro.inra.fr
Nicolas Lapalu	INRA,EA	nicolas.lapalu@dijon.inra.fr
Nicolas Munier-Jolain	INRA,EA	nicolas.munier-jolain@dijon.inra.fr
Loïc Pages	INRA,EA	Loic.Pages@avignon.inra.fr
Corinne Robert	INRA,EA	corinne.robert@grignon.inra.fr
Marc Saudreau	INRA,EA	marc.saudreau@clermont.inra.fr
Daniel Wallach	INRA,EA	Daniel.Wallach@toulouse.inra.fr
Evelyne Costes	INRA,GAP	costes@supagro.inra.fr
Sébastien Lemaire	ITB	lemaire@itbfr.org
Fabienne Maupas	ITB	fabienne.maupas@itbfr.org

**Programme des journées :**

<b>Partie 1 : Etat de l'art de la modélisation 3D « plantes virtuelles ». Incluant un panorama des équipes de recherche qui comptent dans ce domaine, avec leurs activités et leurs motivations.</b>
François Brun (ACTA) & Bruno Andrieu (INRA). Introduction du séminaire.
François Brun (ACTA). Compte rendu des journées INRA « plantes et peuplements virtuels » qui ont lieu le 27-28 mars.
Bruno Andrieu (INRA). Motivations et état de l'art de l'approche plante virtuelle pour la modélisation des cultures.
Evelyne Costes (INRA). Etat de l'art de la modélisation 3D des plantes : Applications aux espèces fruitières et à la vigne.
Christian Fournier (INRA) Méthodes et outils pour la modélisation 3D des plantes.
Tino Dornbush (INRA) & Andrieu Bruno (INRA). Digitization techniques to measure the architecture of crop plants
<i>Discussion.</i>
<b>Partie 2 : Travaux sur les grandes cultures - Blé</b>
Philippe Gates (Arvalis). Atouts et contraintes des modèles architecturés pour Arvalis: domaines thématiques d'intérêt, projets en cours et réflexions dans le cadre d'une application au blé.
Christian Fournier (INRA) & Bruno Andrieu (INRA). Le modèle Adel-blé. Etat actuel et travaux en cours.
Corinne Robert (INRA). Couplage d'un modèle 3D de blé à un modèle de développement épidémique pour mieux comprendre les effets du couvert sur les épidémies.
Frédéric Baret (INRA). Modèles de structure de couvert et caractérisation du couvert par télédétection.
<i>Questions et discussion relatives (i) aux travaux et projets présentés et (ii) au potentiel des modèles architecturés pour le phénotypage et l'optimisation des protocoles expérimentaux.</i>
<b>Partie 3 : Travaux sur les grandes cultures – autres cultures</b>
Fabienne Maupas (ITB). Le modèle Greenlab : présentation des résultats et des attentes pour l'ITB.
Francis Flénet (CETIOM). Le programme colza et architecture.
Nicolas Munier-Jolain (INRA) & Nicolas Lapulu (INRA). FlorSys-compétition - Modélisation individu-centrée de la compétition pour la lumière dans un couvert hétérogène plurispécifique culture-adventices.
<i>Discussion relatives aux travaux présentés et abordant en particulier l'intérêt potentiel de l'aspect « individu centré » des modèles architecturaux : Est ce que la description du peuplement comme un ensemble d'individus plutôt que comme une plante moyenne apporte un « plus » dans le cas des cultures annuelles : Hétérogénéité entre plantes cultivées/ Compétition plante –adventices.</i>
<b>Partie 4 : Arboriculture / cultures légumières</b>
Marc Saudreau (INRA). Exemples de recherches au sein de l'UMR PIAF sur l'utilisation des plantes architecturées en arboriculture fruitière.
Thierry Fourcaud (CIRAD-INRA). Vingt ans d'expérience en modélisation de la croissance et de l'architecture des plantes : synthèse des recherches et développements menés à l'UMR AMAP.
Loïc Pages (INRA). MiniRoot: un modèle simple de l'architecture racinaire en lien avec le système aérien.
Evelyne Costes (INRA). Activités de recherche de l'équipe Architecture et Fonctionnement des Espèces Fruitières.
<i>Discussion orientée arboriculture</i>
<b>Discussion générale / conclusions des journées</b>

## **Discussion**

### **Ce qu'on peut attendre de ces modèles.**

*Ces modèles sont-ils construits pour l'aide à la décision ou pour d'autres utilisations ?*

Aujourd'hui la motivation principale est largement l'agrégation de connaissances : La réalisation et le test de ces modèles permet d'évaluer si les connaissances sont suffisantes pour représenter tel ou tel aspect du comportement des plantes, et d'orienter les recherches en identifiant les lacunes. Par contre ces modèles ne constituent pas des outils d'aides à la décision, pour de multiples raisons, et ne serait ce que parce qu'ils ont généralement besoin d'être alimentés par des données non disponibles en situation de décision.

*Quelle utilité dans le cadre des missions d'un institut technique ?*

- La première question à se poser est la « plus value » que l'on a à utiliser ces modèles pour un problème donné. Il faut distinguer entre les qualités potentielles liées à l'approche et les qualités spécifiques effectivement existantes dans tel ou tel modèle. En général un modèle – architectural ou pas – est développé dans une certaine perspective, qui définit le domaine où ce modèle est utile.
- Sur les aspects pour lesquels ils sont correctement validés, ces modèles peuvent être utilisés pour répondre à des questions formulées par les ingénieurs des instituts. Par exemple une utilisation prévisible importante est l'aide à la hiérarchisation des processus en vue d'améliorer le conseil pour une problématique donnée. Ceci vaut bien sur surtout pour les aspects où l'architecture joue un rôle important.
- Ces modèles peuvent aussi servir à construire des relations simplifiées qui peuvent être mises à la disposition des utilisateurs. Par exemple des modèles 3D peuvent être utilisés pour améliorer les relations « classiques » entre indice foliaire et interception du rayonnement.
- Cette approche de modélisation est aussi vue comme l'occasion d'acquérir des connaissances spécifiques : parfois les connaissances et bases de données acquises pour mettre au point le modèle ont autant de valeur que le modèle lui-même. Ces acquis peuvent servir à améliorer les autres types de modèles. Par exemple des améliorations sont en cours sur le modèle Sirius en se fondant – entre autres – sur les résultats acquis lors du développement de Adel-blé.

*Quelles sont ces qualités et limites liées à l'approche ?*

Les modèles architecturés sont (ou peuvent être) « individus centrés » L'approche peut ainsi permettre de simuler la variabilité entre individus au sein du peuplement. Cette variabilité peut être d'origine génétique (ex : des semences de betterave), lié à la compétition (ex : adventices), à une variabilité des conditions initiales (ex : temps de levé). Cette variabilité peut être un critère plus ou moins important de la qualité de la culture (ex : variabilité des betteraves et problématique de l'arrachage). A noter, une variabilité intra-plante (ex maturité des siliques du colza) peut être aussi un véritable problème et les modèles architecturés peuvent répondre à ce genre de problématique.

La capacité du modèle à répondre à des effets de l'environnement a aussi été discutée. Le problème est que les réponses prises en compte dans les modèles de culture ne sont pas suffisantes pour renseigner les modèles de plantes : un stress qui réduit l'indice foliaire le fait-il via une réduction de la dimension des feuilles ? du nombre de talles ? de la durée de vie des feuilles ? etc. Pour la température, on est assez avancé. Pour le rayonnement, on est déjà « un peu plus limite », en particulier les réponses à la qualité de la lumière. Quand aux contraintes en eau... On a plus de mal à intégrer des effets environnementaux rétroactifs sur la morphogenèse, que les effets sur la croissance. Il existe déjà de telles boucles dans plusieurs modèles actuels (model Adel-maïs ; thèse en cours sur le sujet, DIGIPLANT, équipe P. De Cournède), mais des effets importants comme les réponses à la qualité de la lumière ne sont pas pris en compte car ils sont insuffisamment connus.

L'utilisation des modèles architecturés pour le phénotypage ou la recherche d'idéotype peut être envisagée, mais il convient de prendre quelques précautions, comme c'est le cas également avec les autres modèles

- Dans la recherche d'idéotype par simulation, on fait souvent varier les caractères de manière indépendante. Or en général il y a des corrélations entre caractères (un nombre de feuilles plus élevé par tige est par exemple fréquemment associé à une moindre densité de talles et/ou une durée de vie plus courte des feuilles).
- D'autre part l'ensemble des variables biologiques d'intérêt est important. Soit on les choisit a priori, mais cela comporte un certain risque d'omission. Soit on en considère initialement un grand nombre, et on cherche ensuite identifier celles qui ont une importance. Cette étape du choix des variables est primordiale et il faut s'assurer que le modèle utilisé permet de faire varier de façon réaliste les variables importantes.

*Y-a-t-il aujourd'hui des exemples d'utilisation concrète de ces modèles dans les Instituts?*

Pour l'instant, ce n'est pas le cas. Les utilisations actuelles sont dans le cadre de travaux de recherches. Des projets d'application existent mais ils sont encore à leurs débuts. ces projets appliqués sont généralement fondés sur l'utilisation conjointe de mesure et de modèles. En effet compte tenu des limites des connaissances le modèle n'est pas envisagé comme quelque chose permettant de se passer de l'expérimentation: il est considéré comme un moyen de tirer plus d'information des mesures réalisées, et d'optimiser les plans d'expérience. On peut noter une application pour l'enseignement de la taille des arbres fruitiers et réaction à la taille, dans le cadre d'une thèse CIFRE financée par le FAPCA (UMR DAP, équipe E. Costes).

### **Modèle architecturé des plantes VS modèles de culture classique**

Pendant l'ensemble des discussions, les modèles de cultures « classiques » ont servi de point de référence aux participants. Pour les espèces pérennes (fruitiers et vigne), il y a moins de choix (ou de concurrences) d'approches, étant donné qu'il n'y a pas l'équivalent des modèles de culture. Les cultures pérennes présentent des particularités notamment au niveau des objectifs de conduite qui incluent la gestion d'un pool de bourgeon et correspond à un investissement sur le long terme, avec un effet mémoire... Les arbres fruitiers pour lesquels il existe ce type de modélisation (en France ou dans le monde) : pommier, pêcher, noyer, kiwi.

Certains effets importants ne sont pas pris en compte dans les modèles de culture. Par exemple, ceux qui sont liés à l'extension en hauteur des plantes. Le programme de modélisation architecturé d'Arvalis a commencé sur un constat d'échec de modèle de culture pour répondre à certains problèmes. D'autre part, les modèles architecturés ont un potentiel pour représenter des conditions de croissance peu accessibles aux modèles « classique » (plante isolée, mélange d'espèces, plantes en chambre de culture, effet de la taille ou de la fauche, etc).

Aujourd'hui toutefois les modèles architecturés intègrent moins d'aspects fonctionnels que les modèles de cultures, en premier lieu tout simplement parce que ces fonctions ne sont pas suffisamment connues. Par exemple, on peut au moyen de fonctions paramétriser l'effet d'un stress en terme de réduction de l'indice foliaire, et ceci peut être suffisant pour des modèles de cultures. Par contre pour simuler de façon réaliste une plante, la surface foliaire ne suffit pas: il faut savoir comment le stress joue sur la croissance des feuilles, le nombre de ramifications, la durée de vie des feuilles, etc. Si on considère une période de stress définie dans le temps, des phytomères d'âge différent, atteints donc à un moment différent de leur croissance, seront affectés différemment. On voit donc à la fois un plus grand potentiel des modèles architecturés pour rendre compte des interactions Génotype \* Environnement, et aussi des directions de recherches à faire avancer avant de pouvoir valoriser ce potentiel.

Il y a un potentiel certain d'enrichissement mutuel entre ces deux types de modèles. Une piste est l'intégration d'éléments architecturés dans les modèles de culture utilisés actuellement. Par exemple des améliorations sont en cours (INRA Clermont Ferrand) sur le modèle Sirius en se fondant – entre autres- sur les résultats acquis lors du développement de Adel-blé.

### **La modélisation des plantes avec explicitation de l'architecture.**

Les modèles explicitant l'architecture ont en commun le caractère très visuel des simulations produites. Toutefois ceci cache une grande diversité des méthodes et des hypothèses sur le fonctionnement des plantes sous jacentes à la modélisation. Il est intéressant de noter que sauf pour un très petit nombre d'exceptions, les représentations géométriques du port des plantes, qui rendent ces modèles « visuellement réalistes », résultent de lois empiriques, plutôt que d'une réelle compréhension des déterminants biomécaniques du port des plantes. Des approches statistiques, fondées sur des lois de distributions empiriques sont utilisées pour de nombreux autres aspects pour lesquels n'a pas de modèle de connaissance (ex. du devenir des bourgeons dans une culture pérenne). Il faut se poser la question, en fonction de l'objectif du modèle et des connaissances, des parties que l'on va rendre empirique et de la gamme de situations que les mesures disponibles permettent de représenter. L'utilisation de fonctions stochastiques présente un intérêt vis à vis des applications, car on peut être plus intéressé par un intervalle de confiance qu'une simple moyenne en sortie des modèles. Une première étape est déjà de mieux quantifier la variabilité (travaux en cours, DIGIPLANT, équipe P. De Cournède). Ces approches peuvent paraître assez génériques, mais parfois cela couvre un manque de connaissance des spécificités de la culture étudiée.

Des exemples de représentation des plantes ont été présentés avec des niveaux de détails variés: de la représentation détaillée de l'architecture, avec la courbure et le positionnement des organes dans l'espace, jusqu'à des représentations plus simplifiées comme la plante représentée par un cylindre occupant l'espace. Un bon modèle peut-être être quelque chose d'assez simple, mais qui permet de bien comprendre certains aspects du comportement d'un système. Les connaissances les plus avancées sur la façon de représenter de façon simplifiée l'architecture tout en préservant au maximum la précision des calculs concernent l'interception de la lumière.

La question de « l'inflation du nombre de paramètres » est soulevée. Il s'agit d'une réalité, mais c'est un problème rencontré également dans les modèles de culture. Il y a aussi des paramétrisations qui se simplifient dans la représentation architecturée, puisque la plante est vue comme une répétition de phytomères qui partagent beaucoup de propriétés. Les questions posées ne sont pas uniquement le nombre de paramètres, mais également le sens biologique qu'on peut leur donner et les capacités qu'on a les mesurer expérimentalement. Il faut voir ce qui est nécessaire en entrée et ce qu'on veut en sortie. Finalement, les modèles architecturés posent les problèmes de paramétrisation, d'identifiabilité et d'interprétation des paramètres en des termes assez différents de ce qui était le cas avec les modèles de cultures. Il est exact qu'on bénéficie de beaucoup moins de recul dans le cas des modèles architecturés et surtout que les temps de calculs beaucoup plus long des modèles architecturés limitent l'applicabilité de méthodes (par ex bootstrap) nécessitant des simulations intensives.

L'évaluation de ce type de modélisation est également une question. La difficulté n'est donc pas seulement d'écrire le modèle, mais bien d'analyser son comportement et de le comparer à l'expérimentation. Ceci pose des problèmes méthodologiques et peut représenter un travail long en terme de mesures et de calculs. Le nombre de paramètres et surtout le très grand nombre de variables simulées constituent des obstacles, voir des pièges. Et il est précieux de progresser sur les critères d'évaluation et de définir les outils pour cela. Il est assez difficile d'évaluer en général un modèle architecturé et il est en général plus simple de la valider sur des aspects précis, sur des applications. Nous pourrions collectivement formaliser une grille de critère pour la validation, cela aiderait à avoir une idée des performances comparées des différents modèles.

Les méthodes et technologies de simulation informatique ont fortement progressé ces dernières années et sont encore en évolution rapide. Des avancées importantes sont en cours pour aller vers plus de simplicité pour les utilisateurs de ce type de modélisation. Avant, pour répondre à une problématique concrète (ex : étude du micro climat dans un couvert), il fallait faire le tour des laboratoires, récupérer les programmes, comprendre comment les faire fonctionner ensemble. Désormais, il y a des « boîtes » déjà disponibles (ex : bilan radiatif, développement de la plante,...). Le couplage informatique est facilité avec les plateformes en cours de développement comme OPENALEA. Ces plateformes commencent à être mises à disposition de non informaticiens, et des formations sont organisées. Bientôt ceci permettra de se focaliser sur l'effort de recherche et d'acquisition des données spécifiques à la question.

Il reste le problème du travail important que représente l'acquisition et la préparation des données. Il serait utile de définir des normes pour la mise en forme et l'archivage de ces bases de données, de façon à permettre l'échange des données entre différentes équipes.

### **Conclusions et perspectives**

- Les participants ont exprimé leur satisfaction par rapport à la qualité du dialogue entre recherche et institut technique au cours de ces deux jours.

- Ce type de modélisation intéresse un certain nombre d'ITA des grandes cultures, notamment Arvalis, le CETIOM et l'ITB qui se sont engagés concrètement (financement de travaux de recherches, projets en collaborations avec la recherche). L'utilisation visée est pour l'aide au diagnostic et comme outil de recherche appliquée, éventuellement comme outil pédagogique, mais pas – aujourd'hui du moins- comme outil d'aide à la décision.

- Concernant les arbres fruitiers et la vigne, la réunion n'a pas permis de confirmer l'intérêt initialement manifesté par le CTIFL et de l'IFV, puis que ceux-ci n'ont finalement pas envoyé de représentants à ces journées. A notre connaissance, ces instituts n'ont pas de collaboration en cours sur le sujet avec les chercheurs présents travaillant sur les plantes pérennes.

- Le RMT pourrait contribuer à faciliter cette communication entre ITA et INRA/CIRAD sur ce sujet, un besoin réciproque de meilleure information (connaissance de l'offre du côté recherche et de la demande du côté des instituts) s'étant clairement exprimé.

- **Les présentations** seront mises à disposition sur le site [www.modelia.org](http://www.modelia.org), en format PDF et avec enregistrement du son, suite à l'accord de l'ensemble des participants.
- Nous demandons à tous les participants de nous envoyer quelques **références bibliographiques** de leur travaux ou d'autres travaux (au maximum 5) qu'ils jugent les plus intéressante pour le public visé, accompagnés d'une phrase ou plus d'accompagnement.
- **La rédaction du document de synthèse** (délivrable) sera coordonnée par Bruno Andrieu et François Brun qui solliciteront à nouveau les participants pour des précisions et la validation du document. Il consistera en une analyse des utilisations actuelles ou prochaines pour les ITA de ce type de modélisation et les apports par rapport aux modèles de culture.
- **D'autres thèmes du RMT** peuvent intéresser les participants, notamment les aspects paramétrage, validation des modèles.

Des collaborations entre participants sont envisagées. Voici, de manière non exhaustive, quelques points d'accroche potentiels apparus lors des discussions.

- **Besoin d'améliorer le conseil de risque de verse sur le blé.** Une piste est l'utilisation des modèles architecturés. Or il un travail en cours sur la verse du riz avec Greenlab. (P. Gates, T. Fourcaud, B. Andrieu).
- **Variabilité génétique des systèmes racinaires des porte-greffe.** Utilisation du modèle MiniRoot pour étudier cette variabilité (L. Pagès, E. Coste).
- **Besoin d'un partage des outils informatiques pour l'analyse d'image**, notamment à partir des photos numériques, a aussi été exprimé (D. Gouache).