

Modélisation

Les modèles « plante virtuelle »

Pour mieux comprendre le développement d'une maladie foliaire ou les conditions de croissance d'un blé, les chercheurs ont désormais recours à des plantes virtuelles. Ces modèles sophistiqués font interagir le fonctionnement d'une plante avec les variations de son milieu.



© N. Cornec

▲ En mesurant la géométrie des cultures annuelles, on voit que l'arrêt de l'émission des talles est lié à la perception de la lumière réfléchiée par les autres plantes.

Bruno Andrieu
Bruno.Andrieu@grignon.inra.fr

INRA

David Gouache
d.gouache@arvalisinstitutduvegetal.fr

ARVALIS – Institut du végétal

Fabienne Maupas
fabienne.maupas@itbfr.org

ITB

Avec la participation de :
Christian Fournier (Christian.Fournier@montpellier.inra.fr); Corinne Robert (Corinne.Robert@grignon.inra.fr); William Lee (William.Lee@grignon.inra.fr); Tino Dornbush (Tino.Dornbush@grignon.inra.fr); Michael Chelle (Michael.Chelle@grignon.inra.fr); Bertrand Ney (Bertrand.Ney@grignon.inra.fr); Sébastien Saint-Jean (Sebastien.Saint-Jean@grignon.inra.fr); Jessica Bertheloot (jberthel@bcgn.grignon.inra.fr); Laurent Huber (huber@grignon.inra.fr); Philippe Gate (p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr).

Cet article fait suite à un séminaire organisé en juin dernier dans le cadre du Réseau Mixte Technologique « Modélisation ».
http://www.modelia.org/plante_virtuelle

Les modèles de culture permettent de comprendre et de simuler la croissance des plantes cultivées. Ils donnent lieu à de nombreuses applications : prévisions de stade, pilotage des cultures, explication *a posteriori* d'un accident cultural. Mais ces outils présentent un certain nombre de limites. Par exemple, ils sont établis pour des milieux homogènes et continus (figure 1) et représentent donc de façon très simplifiée les échanges avec l'environnement. Ils ne prennent pas en compte la morphologie des

plantes ni les différences entre plantes au sein de la culture.

Simuler les boucles de rétroaction

Pourtant, l'environnement et les ressources disponibles pour une plante varient selon la façon dont ses voisines modifient le milieu physique, notamment en prélevant les ressources disponibles.

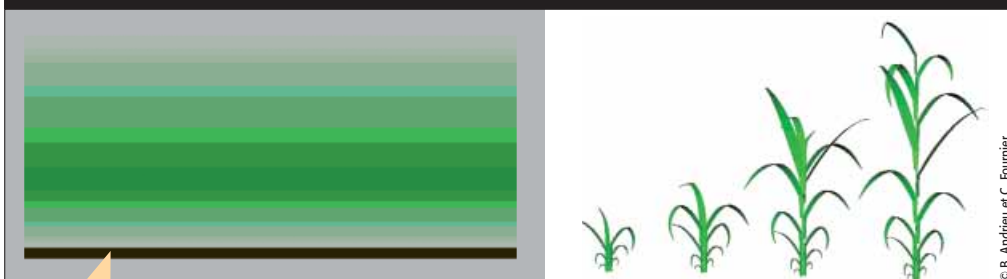
Pour dépasser ces limites, des approches dites « plante virtuelle » se développent, qui permettent de mieux comprendre le fonctionnement d'une plante.

Avec cette approche, le peuplement végétal est vu comme un ensemble de plantes dont chacune interagit avec l'environnement qu'elle perçoit.

▶ Avec ces approches, il devient possible de représenter le peuplement comme une population de plantes individuelles qui se développent en parallèle.

Ces approches complexes associent des modèles qui simulent le fonctionnement de la plante et les échanges physiques au sein d'un couvert,

Différence visuelle entre un modèle de culture et un modèle plante virtuelle (fig. 1)



© B. Andrieu et C. Fournier

Quand un modèle de culture reste généraliste et centré sur le couvert (à gauche), l'approche plante virtuelle est spécifique à la plante (à droite, ici simulée avec le modèle Adel-maïs). Un modèle de culture restitue un milieu continu (en strates) alors que la technologie 3D permet de prendre en compte le phytoclimat à l'échelle des organes.

et permettent de simuler l'environnement (rayonnement, température, humidité du sol) perçu par chacun des organes des plantes.

À défaut de mobilité, les plantes s'adaptent à leur environnement par une forte plasticité, conférée par leur organisation modulaire. Dans une certaine mesure, les végétaux peuvent être vus comme un ensemble d'organes fonctionnant en parallèle. Chacun évolue en fonction de l'environnement dans lequel il se trouve. L'environnement d'une plante est caractérisé par des variables globales (durée du jour, gravité) et par des variables locales, distribuées sur l'architecture de chaque plante, (lumière, température, humidité, concentrations en nutriments, etc.). Ces variables évoluent

constamment au cours du temps, notamment en fonction du développement des plantes avoisinantes, de leur ombrage et de celui de la plante elle-même (auto ombrage, phototropisme). Chaque plante perçoit, répond, et à son tour modifie l'environnement physique qui l'entoure et environne ses voisines. Par exemple, la teneur en azote foliaire s'ajuste au rayonnement perçu par la feuille, et les feuilles les plus éclairées sont les plus aptes à la photosynthèse. L'orientation et la croissance des feuilles, des tiges et des racines varient également en fonction de la température, de la pluviométrie ou de la luminosité. La plante peut adapter ses stratégies de recherche de ressources en fonction de son environnement local.

▶ Les modèles « plante virtuelle » simulent les conséquences pour le fonctionnement de la plante des variations de son environnement.

L'approche « plante virtuelle » permettra à un apport majeur: simuler explicitement ces « boucles de rétroaction ».

Calculer la lumière perçue

Ces approches nécessitent de connaître et décrire quatre éléments: la mise en place de l'architecture du couvert, les relations entre organes, l'environnement physique et la géométrie des organes. Par exemple, pour le blé tendre, le rythme de mise en place du couvert peut être décrit simplement avec une variable appelée phyllochrone qui correspond à la somme de température nécessaire entre l'apparition successive de deux feuilles sur le maître-brin de la plante. Or, l'émission des talles, la mise en place des racines et l'apparition des feuilles des talles suivent également le même rythme. Autre exemple sur blé: les rapports (de longueur par exemple) d'une feuille à l'autre sont stables, il suffit de connaître la dimension de certaines feuilles pour toutes les connaître, ce qui permet de décrire simplement les dimensions des feuilles d'une même tige ou des talles successives à partir d'un petit

nombre de mesures (figure 2). Les chercheurs de l'INRA ont ainsi mis au point les modèles Adel-maïs et Adel-blé.

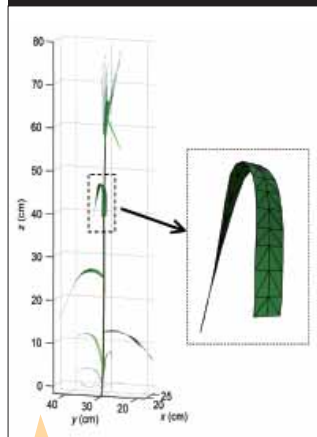
Les applications potentielles de ces approches sont nombreuses. Récemment, sur blé, elles ont permis de montrer que l'arrêt de l'émission des talles est notamment lié à la perception de la lumière réfléchie par les autres plantes: cette perception permet à la plante d'anticiper la compétition avec ses voisines, avant même que la compétition ne commence: elle évite d'émettre un grand nombre de talles qui ensuite ne pourraient survivre. De même, les approches plante virtuelle, de par leur capacité à décrire la mise en place de l'architecture, pourraient permettre d'extrapoler l'évolution journalière de l'indice foliaire à partir de quelques mesures bien ciblées (quelques dimensions de feuilles à des stades clés par exemple). Une collaboration entre l'INRA et ARVALIS-Institut du végétal sur ce thème démarre actuellement. Sur betterave, l'ITB travaille depuis 3 ans sur le modèle d'architecture Greenlab, développé par les équipes de l'Ecole Centrale

L'architecture d'un blé se met en place dès l'émission des talles et diffère d'une variété à l'autre, pouvant influencer sur le développement des maladies. ▼

© Ph. Gate, ARVALIS-Institut du végétal



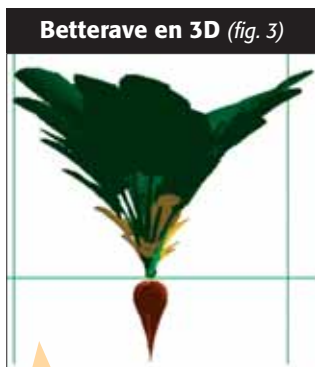
Digitalisation d'une talle d'orge en 3D - les organes de la plante sont figurés par un ensemble de points interconnectés par des triangles (fig. 2)



Ici une tige d'orge est simulée avec le modèle développé par T. Dornbusch à l'Université de Halle (Allemagne).

Selon la variété et la densité de semis, les parcelles sont plus ou moins touchées par la septoriose.

© D. Caron, ARVALIS-Institut du végétal



Betterave en 3D (fig. 3)

Le modèle Greenlab-betterave est utilisé pour « tracer » les transferts de sucres au sein de la plante.

Paris, de l'INRIA et du CIRAD. Dans Greenlab-betterave, la plante est vue comme un ensemble d'organes: un organe racinaire constitué du pivot et des organes foliaires dont le développement et la croissance sont décalés dans le temps (figure 3). Contrairement aux modèles de culture classiques, la réponse à un stress n'affecte pas tout le compartiment foliaire, mais uniquement les organes qui ont subi ce stress et c'est là tout l'intérêt de l'approche architecturale. Le modèle est utilisé pour « tracer » les transferts de sucre au sein de la plante et pour comprendre comment sont modifiés ces transferts sous stress.

interagissent fortement avec le couvert végétal. C'est notamment le cas de la septoriose sur blé tendre: les feuilles supérieures de la plante sont contaminées suite au transport des spores présentes sur les feuilles basses par les éclaboussures des gouttes de pluies. La pénétration des gouttes de pluie vers le bas du couvert - où se trouvent les symptômes - et la proportion d'éclaboussures atteignant les feuilles hautes dépendent de l'architecture du couvert. À terme, on espère comprendre pourquoi, dans certaines conditions, des pratiques comme le choix d'une densité de semis entraînent une réduction de la maladie. Cette approche pourrait également permettre d'identifier certaines architectures des variétés qui défavorisent la maladie. Ainsi, l'INRA a mis au point le modèle Septo3D en couplant un modèle de simulation de la septoriose avec le modèle Adel-blé. Les premiers travaux sur ce modèle montrent un potentiel intéressant pour identifier les traits architecturaux qui jouent le plus sur la maladie. Ils se poursuivent dans le cadre d'une collaboration entre ARVALIS-Institut du végétal et l'INRA pour valider le mo-

dèle (figure 4), financée au travers du projet Casdar n° 6128 dans le cadre de l'Unité Mixte Technologique PIVERT.

En prenant en compte des processus complexes et en retenant les contraintes environnementales, l'approche plante virtuelle élargit les domaines d'application des modèles. Les travaux engagés laissent entre-

voir de nombreuses applications, pour mieux comprendre le tallage, et donc l'élaboration du rendement et la sensibilité à la verse, cerner les facteurs de développement d'une maladie, ou étudier l'effet des stress.

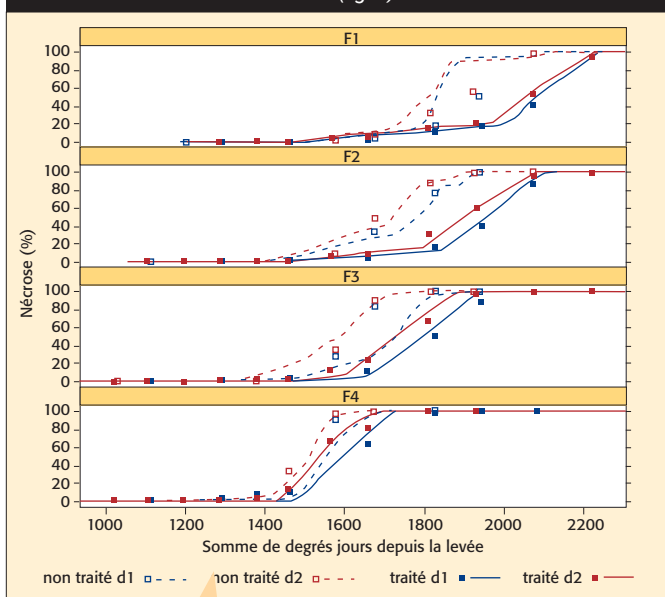
En savoir plus: <http://www-egc.grignon.inra.fr/pages-fr/ressources/texte-web-andrieu.pdf> ■

Une meilleure connaissance de l'interaction entre un couvert végétal et son environnement permet d'affiner les modèles de développement de maladies ou d'insectes.

Interactions avec les maladies

Un autre domaine d'application concerne les maladies des cultures. En effet, certaines de ces maladies ont des cycles qui

Comparaison des données simulées avec Septo3D et observées sur un essai conduit à La Minière (78) en 2005-2006 (fig. 4)



Les courbes correspondent aux données simulées. Les points aux données observées.