



# COTONS, une nouvelle génération de modèles de simulation des cultures

**Le modèle COTONS reflète une nouvelle conception de la simulation agricole. Il associe à la fois le fonctionnement d'un peuplement végétal et une visualisation tridimensionnelle de chaque plante constituant la parcelle agricole. Il est suffisamment élaboré pour se substituer aux expérimentations réelles. Il peut accompagner l'agriculteur dans ses décisions stratégiques ou tactiques. Cet outil puissamment pédagogique est à la fois objet de recherches sur la simulation et créateur de résultats en matière d'études sur les végétaux : il montre que les cultures virtuelles seront bientôt aussi réalistes que les cultures au champ.**

E. JALLAS<sup>1</sup>, M. CRETENET<sup>1</sup>, R. SEQUEIRA<sup>2</sup>,  
S. TURNER<sup>2</sup>, E. GERARDEAUX<sup>1</sup>,  
P. MARTIN<sup>1</sup>, J. JEAN<sup>1</sup>, P. CLOUVEL<sup>1</sup>

1. Cirad-ca, programme Coton, bâtiment  
Orphelinat, avenue Agropolis,  
34398 Montpellier cedex 5, France

2. Usda-Ars-Crsu, PO Box 5367, MSU,  
MS 39762, Etats-Unis

#### Remerciements

Les auteurs remercient C. FOVET-RABOT  
(Cirad) pour sa participation active à la  
rédaction de cet article.





## COTONS, la synergie entre deux concepts de modélisation

COTONS est le résultat de la collaboration, commencée en 1991, entre le Cirad et l'Usda-ars. COTONS a aussi bénéficié de travaux conduits dans le cadre d'un projet européen réunissant le Cirad, l'Inra, l'université de Kasetsart (Thaïlande), le Csic (Espagne) et l'Ira<sup>1</sup> du Cameroun. Au total, on peut estimer que COTONS est le fruit de plus de 100 années chercheurs. Il intègre une grande partie des connaissances acquises sur le fonctionnement du cotonnier et parce qu'il est capable de simuler la compétition entre plants dans un peuplement, il peut permettre l'émergence de nouvelles connaissances. En termes mathématiques et informatiques, COTONS représente plus de 500 équations originales et plus de 60 000 lignes de code.

Le cotonnier a été l'une des premières cultures à être modélisée dans le but d'aider les agriculteurs à accroître leurs profits. De nombreux modèles ont été conçus : GOSSYM, COTTAM, SIMCOT, etc. Tous ces modèles reposent sur le concept du plant moyen et aucun n'inclut l'architecture des plants. Ces modèles, dits mécanistes ou physiologiques, décrivent le fonctionnement biologique d'une plante. Ils simulent de façon réaliste ce fonctionnement à partir de résultats sur le développement et la croissance des plants. Ainsi, leurs équations sont dérivées d'expériences.

1. Usda-ars : United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service ;

Inra : Institut national de la recherche agronomique (France) ;

Csic : Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Espagne) ;

Ira : Institut de la recherche agronomique (Cameroun).



Sarclage du cotonnier en culture attelée, Madagascar. Cirad

Quant aux modèles architecturaux classiques de plantes, ou modèles de visualisation, ils construisent et visualisent de façon réaliste des plantes en 3D ; la simulation est fondée sur des mesures au champ et sur l'application d'un algorithme permettant de recréer les descriptions tridimensionnelles des plants observés. Le Cirad et ses partenaires ont utilisé des fonctions et des concepts issus des approches mécanistes et architecturales pour développer un système intégrant ces deux principaux types de modélisation : c'est ainsi qu'est né le modèle COTONS. Il peut être assimilé au couplage d'un modèle plante en peuplement à un outil de visualisation en 3D des résultats de simulation. Un tel système améliore remarquablement l'interprétation des résultats des simulations : l'utilisation du modèle COTONS en substitution aux expérimentations est un atout important. COTONS intègre aussi dans un seul système les connaissances actuelles sur le fonctionnement végétal. COTONS produit des plantes réalistes : il préfigure la nouvelle génération des modèles de simulation des cultures.

## Modélisation et conduite de la culture : la mise à plat d'un système complexe

La conduite d'une culture repose sur des choix stratégiques et des décisions tactiques. L'agriculteur adapte sa stratégie année après année en fonction des évolutions des marchés de tel ou tel produit agricole, des incitations publiques, de son expérience et surtout de sa perception de l'avenir. La stratégie repose sur une combinaison des moyens de production réfléchi *a priori*. En revanche, la tactique s'affirme au cours du cycle de production. C'est, en règle générale, une ou des réponses à des situations visant à contrôler le milieu biophysique et à l'orienter vers un état souhaité. Les travaux de préparation du sol et d'installation de la culture, l'utilisation maîtrisée de l'irrigation, de la fertilisation azotée, des régulateurs de croissance, des produits favorisant la maturation, des défoliants, sont autant d'occasions d'arbitrer des choix tactiques.



La conduite de la culture consiste donc en une succession de prises de décision, en fonction des états du milieu et de la culture. Or, trop souvent, elle n'est évaluée qu'à partir du rendement obtenu à la fin de la saison : ce critère, trop intégratif, bien qu'important, masque la réalité de l'activité quotidienne de l'agriculteur. Aujourd'hui, il n'est plus question de projeter une aide à la décision de l'agriculteur en considérant des conditions agro-économiques stables : la modification progressive, menée pas à pas, d'un système de culture, n'est plus de mise. Les évolutions rapides du contexte économique associé à l'agriculture rendent plus que jamais nécessaire la mise au point d'outils d'aide à la décision.

## Les règles de décision des agriculteurs

Pour décider, l'agriculteur dispose de référentiels techniques et des recommandations des agronomes. Cependant, comme l'a montré SEBILLOTTE (1990), les pratiques de l'agriculteur sont différentes des techniques proposées par les experts, lesquelles sont des actions théoriques issues des dernières connaissances acquises et fondées sur les théories les plus récentes.

L'expert ne peut répondre qu'à des questions précises, circonscrites à son domaine. Par exemple, il ne prendra pas en compte l'ordre d'urgence des travaux à mener sur l'exploitation, ni l'interaction entre une protection phytosanitaire et un niveau de fertilisation. Ses interventions sur l'exploitation sont ponctuelles, laissant l'agriculteur seul devant l'appréciation des effets de ses décisions. L'exploitant développe des pratiques agricoles qui tiennent compte à la fois des techniques recommandées et de ses contraintes économiques et sociales. Dans ses décisions, il intègre des modèles, non formalisés, fondés sur sa propre expérience, qui modifient sa perception des effets des techniques proposées. La conduite d'une culture est le résultat d'un compromis entre diffé-

rentes sources d'information compte tenu des contraintes de production. Ce processus est par nature unique puisqu'il appartient à chaque agriculteur. Or, il n'existe pas de solution unique pour l'ensemble des exploitations. Les techniques, issues de connaissances théoriques, sont insuffisantes pour déterminer des pratiques agricoles ; établir une relation directe entre le rendement et les techniques est erroné.

Enfin, que l'agriculteur prenne ses décisions à partir des recommandations de l'expert ou seulement à partir de ses connaissances, la conduite de sa culture reste un pilotage à vue et sans retour en arrière possible. Il ne pourra jamais répondre à la question : « que se serait-il passé si j'avais choisi l'autre terme de l'alternative ? » De la même façon, dans sa décision, il associe à sa perception de l'état de la culture au moment présent les états virtuels de la culture tels qu'il les projette s'il n'intervenait pas. Il ne dispose que de son expérience pour valider ces états virtuels sans d'ailleurs en connaître toutes les possibilités d'évolution. Son champ décisionnel est donc réduit en comparaison de l'ensemble des décisions possibles.

Dans ce contexte, la complexité des scénarios de production dépasse largement les possibilités analytiques humaines. Les modèles de simulation semblent être l'une des solutions d'avenir pour l'aide à la conduite des cultures. Ils permettent d'étudier, avec un outil unique, les principaux facteurs qui influencent la production à l'échelle de la parcelle. Ces outils intégrés sont, de plus, paramétrables selon les conditions de chaque exploitation.

## Qu'en est-il en culture cotonnière tropicale ?

### Un conseil normatif

L'exemple de l'Afrique de l'Ouest et du Centre est quasiment un cas d'école, où des recommandations standardisées ont été élaborées. La



Photos a et b : Carence du cotonnier en potassium, Tchad. M. Braud

construction d'une fiche culturelle standardisée pour une zone d'enclavement de la culture cotonnière correspond à la recherche des effets moyens optimaux pour chacun des éléments de l'itinéraire technique. Les effets moyens d'une technique sont généralement évalués sur un ensemble de sites expérimentaux et validés par des tests sur des parcelles d'agriculteurs. Ont été déterminés de cette manière et indépendamment les variétés, les dates et les densités de semis, les formules et les





Séchage de la récolte de coton graine, Vietnam.  
B. Hau



Buttage des cotonniers, Laos (Ban Nahai).  
G. Trébuil

doses d'engrais, les programmes de protection sur calendrier, etc.

Dans cette partie de l'Afrique, on observe localement une très grande variabilité des rendements en coton graine. Cette variabilité, enregistrée en quelque sorte en réponse à une même fiche de recommandations techniques, résulte à la fois de la diversité des conditions de milieu (sols, pluviométrie, pression des adventices et des insectes...) et des écarts, ou dérives, des pratiques par rapport à ces recommandations. Le non respect des indications fournies par l'encadrement peut être le fruit soit d'une certaine expertise acquise par l'agriculteur, grâce à une expérience ancienne de la culture cotonnière sur des sols qu'il connaît bien, soit de contraintes liées à la gestion de son exploitation (calendrier culturel, main-d'œuvre, trésorerie...).

Adapter le conseil à la diversité des situations

La contribution de la recherche à l'amélioration de la productivité de la culture cotonnière peut être de deux ordres : l'aide à la décision de type stratégique (assolement, objectifs de production par parcelle et prévision des besoins en moyen de production correspondant) et l'aide à la décision de type tactique (pilotage de la culture en cours de campagne). Dans un premier temps, des grilles de recommandations (vulgarisation à la carte) proposées en substitution à la fiche technique normative (vulgarisation de masse) ont été établies par voie expérimentale. A partir d'un réseau multilocal de points d'expérimentation, représentant la diversité des conditions de l'ensemble d'une zone donnée, les interactions entre les éléments de l'itinéraire technique

ont été étudiées au sein de dispositifs de type factoriel. Les principaux éléments pris en compte sont la variété, la date et la densité de semis, l'entretien de la culture, la fertilisation minérale et la protection phytosanitaire. L'objectif est de rechercher les combinaisons optimales des facteurs qui ne constituent pas une contrainte. Par exemple, il s'agit de déterminer la combinaison entre la fumure minérale et la protection phytosanitaire qui maximise la marge de l'agriculteur pour une date de semis et un niveau d'entretien quasi optimaux dans une situation pédoclimatique type. Sont associés à ces propositions d'itinéraires techniques une espérance de rendement, le coût des charges variables et le bilan minéral estimé. Ces grilles de décision couvrent de ce fait une large gamme de situations.

Cependant, la construction de telles grilles impose des moyens humains et financiers importants (fonctionnement d'un réseau multilocal dense de sites expérimentaux). Aussi, la simulation des processus de croissance et développement du cotonnier en fonction du milieu est devenu un important axe de recherche. Les études ont d'abord porté sur la « tropicalisation » du modèle américain GOSSYM, c'est-à-dire la prise en compte de spécificités des conditions de culture sous les tropiques : culture pluviale, sols hétérogènes présentant des contraintes mécaniques à l'enracinement, couverts végétaux hétérogènes. Ces travaux ont conduit ensuite à la création du modèle COTONS.

## Les grands concepts de COTONS

Le modèle COTONS est dynamique. Il simule la croissance et le développement quotidiens d'une culture de cotonnier. Des descriptions des fondements théoriques et mathématiques du modèle ont été publiées par JALLAS (1998), JALLAS *et al.* (1998, 1999, 2000). Le système a été





Cotonnier en semis direct dans des résidus de sorgho de l'année précédente.  
Andranovory, Madagascar.  
D. Rollin



Démarrage du cotonnier, Laos (Na Phok).  
G. Trébuil

créé avec l'ambition de maximiser le nombre de relations causales et de minimiser l'empirisme. Pour atteindre cet objectif, le modèle a été subdivisé en trois systèmes principaux : la production d'hydrates de carbone, la demande potentielle en hydrates de carbone et le processus de répartition des hydrates de carbone. Cette répartition relie le mécanisme de production d'hydrates de carbone et la demande en assimilats.

Le modèle associe une modélisation mécaniste et la représentation spatiale tridimensionnelle de l'architecture du cotonnier. Les processus de croissance et de développement du cotonnier sont évalués et simulés à un pas de temps journalier. Aux processus physiologiques correspondent des expressions mathématiques des interactions entre les parties de la plante. Le produit de ces calculs s'exprime par la visualisation, à l'écran de l'ordinateur, de la croissance et du développement de l'appareil aérien avec, notamment, le développement des différents types de branches, végétatives et fructifères, l'apparition et la croissance des feuilles et des capsules et la visualisation du système racinaire dans sa progression au cours du cycle.

La partie mécaniste est pour partie dérivée du modèle américain GOSSYM. Chaque jour du cycle de culture, le modèle évalue une offre et une demande en assimilats à l'échelle de la plante. Ces estimations prennent en compte les conditions environnementales instantanées (température, rayonnement, pluviométrie ; texture, teneurs en carbone et azote et caractéristiques hydrodynamiques du sol), l'état du peuplement végétal (*Leaf Area Index*, sites fructifères en place, entre-nœuds en croissance) et des techniques culturales (variété, date et densité de semis, fumure, irrigation, régulateur de croissance). Les éventuels déficits de l'offre en hydrates de carbone par rapport à la demande potentielle des organes en présence sont traduits en niveaux de stress carbonés. Les stress en eau, en azote et en carbone sont appliqués de façon différenciée entre les organes et se traduisent soit par





une moindre croissance soit par l'abscission d'organes fructifères. Les priorités dans la répartition des assimilats évoluent au cours du cycle. La croissance s'arrête lorsque la production photosynthétique est entièrement consacrée à la croissance des capsules en place.

La simulation peut être effectuée soit en mode plant moyen, la parcelle en culture est alors représentée par un cotonnier moyen, soit en mode peuplement. Dans ce dernier cas, la simulation prend en compte, dans le sous-modèle d'interception de la lumière, les phénomènes de compétition entre plants dont l'architecture est différente. Cette modélisation de la variabilité au sein du peuplement végétal repose sur l'introduction de processus stochastiques dans la modélisation de la levée, dans l'allongement des entre-nœuds et



Sarclouse locale, sud du Vietnam. G. Trébuil

Carence en bore sur cotonnier.  
M. Berger



dans l'abscission des organes fructifères. Ainsi, en mode peuplement, le modèle simule simultanément la croissance et le développement de plants types représentatifs de la variabilité des plants dans la parcelle de cotonniers.

Pour optimiser la simulation du comportement d'une variété dans une situation culturale donnée, le calcul des valeurs des paramètres de calibrage du modèle utilise les algorithmes génétiques qui appartiennent au domaine de l'intelligence artificielle. L'ajustement de la simulation à une réalité de terrain peut faire intervenir un ensemble de 30 variables de nature différente à plusieurs moments du cycle de la culture. L'utilisateur est libre du choix des variables observées qu'il souhaite voir simulées au mieux par le modèle.

## Les utilisateurs de COTONS

Le modèle COTONS est avant tout un outil de recherche pour l'ensemble des champs disciplinaires par l'aide qu'il apporte dans la

construction et l'interprétation d'expérimentations : comportement variétal, construction de seuils d'intervention phytosanitaire, diagnostic agronomique... Il est aussi un outil pédagogique puissant pour la formation d'agents techniques et pour les sociétés cotonnières. Il permet enfin à l'agriculteur de « piloter » sa culture.

## Un outil pour les chercheurs

COTONS peut être utilisé par les généticiens pour évaluer l'adaptabilité d'une variété à des conditions de milieu particulières, ou pour caractériser un génotype à travers les valeurs des paramètres variétaux du modèle (sensibilité à l'abscission, potentiel photosynthétique...). De la même façon, COTONS peut être employé par les entomologistes pour évaluer la réponse du cotonnier à des dégâts de ravageurs portant sur l'appareil foliaire ou sur des capsules en formation. Il contribue à la détermination de seuils de dégâts justifiant l'intérêt économique d'une intervention phytosanitaire. Les





Enherbement d'un champ de cotonnier, ouest de la Thaïlande (Tha Sao, district de Saiyok, province de Kanjanaburi). G. Trébuil



Dégât d'herbicide (2,4 D) mal pulvérisé. M. Berger

agronomes s'en servent de trois manières : en tant qu'outil de diagnostic pour identifier les facteurs limitant la production (déficiences minérales, alimentation hydrique, densité...), comme moyen de tester des itinéraires techniques permettant de lever les contraintes identifiées, comme outil de pronostic de la production dans l'hypothèse d'un scénario climatique donné. COTONS est aussi objet de recherche lorsque l'on souhaite prendre en compte la modélisation des caractéristiques de la fibre produite, ou si l'on veut tenir compte des contraintes mécaniques à l'enracinement de la plante.

Pour les chercheurs, il est également possible de tester des hypothèses liées à des effets de dégâts divers. COTONS prend en compte la simulation des dégâts architecturaux produits par l'environnement (insectes, accidents climatiques...) : selon les conditions de culture et d'environnement, la perte d'organes peut entraîner la diminution ou l'accroissement du rendement. Cette opportunité de COTONS a été réalisée et validée expérimentalement au Cameroun.

### Un outil pédagogique

COTONS est un outil pédagogique puissant et convivial par la représentation qu'il offre à l'écran des plants en croissance, dans la formation d'agents techniques qui encadrent la production cotonnière. Cet outil de formation peut tout aussi bien s'adresser à l'enseignement dispensé dans les écoles agronomiques.

Il constitue un outil privilégié pour les sociétés cotonnières. Il permet la construction de grilles de recommandations ciblées en fonction des contraintes de milieu et des objectifs de production. Il est un support idéal pour le conseil technique individualisé aussi bien pour établir un plan de campagne que pour l'aide aux choix techniques en cours de campagne. Il ouvre des perspectives intéressantes dans la prévision de production. COTONS peut constituer enfin un support promotionnel pour les firmes privées (phytosanitaires,





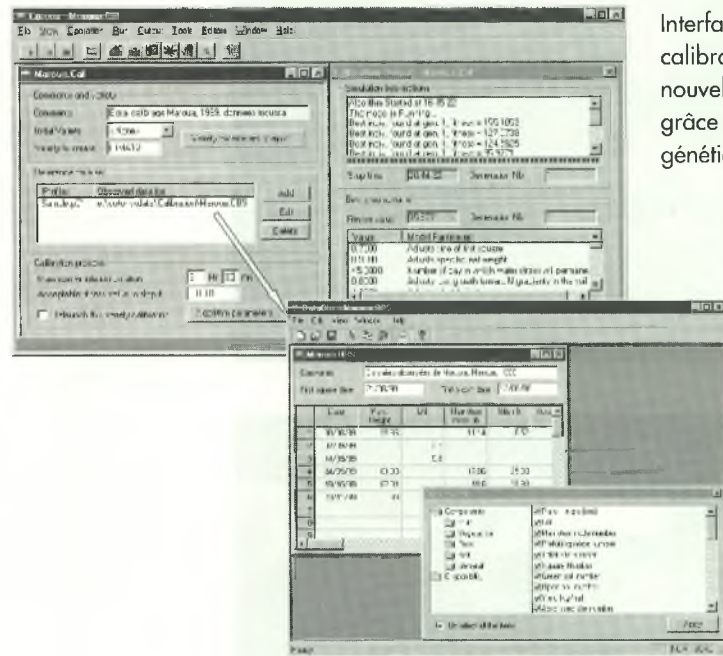
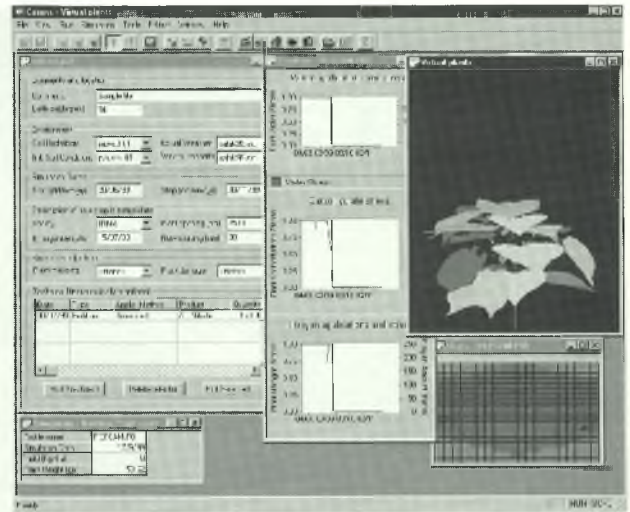
engrais, semences...) qui souhaitent illustrer les effets attendus des produits proposés en culture cotonnière.

## COTONS permet le pilotage de la culture par les agriculteurs

Les agriculteurs peuvent employer COTONS soit en mode tactique pour déterminer la décision à prendre dans les jours qui viennent au cours de la période de culture, soit en mode stratégique pour définir la meilleure stratégie pour la saison à venir.

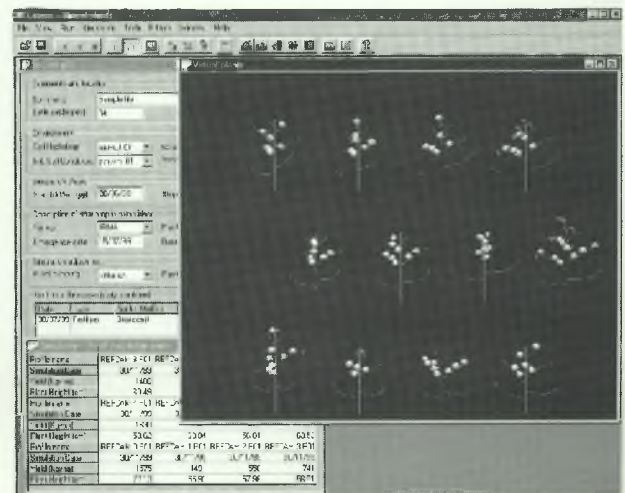
En mode tactique, COTONS est généralement utilisé de manière journalière. La simulation est réalisée à partir du climat réel, vécu par la culture depuis sa mise en place. Les données climatiques sont obtenues grâce à une station météorologique proche du champ (dans un rayon de 10 km) ; elles sont accessibles par un modem et une ligne téléphonique. L'introduction du climat réel rend les résultats de la simulation très précis. L'ajustement quotidien du modèle permet un suivi très fiable des états nutritionnel et physiologique de la culture. Cet aspect est important car, même si le diagnostic au champ de la culture peut être effectué visuellement ou à partir de prélèvements et d'analyses, ces méthodes manuelles restent accaparantes et coûteuses. En comparaison, l'utilisation du modèle permet d'obtenir facilement et rapidement, à différents niveaux de précision, des évaluations pertinentes de cet état de la culture. De plus, il est possible de faire des pronostics à l'aide des scénarios climatiques. L'agriculteur a ainsi une idée relativement précise de l'état de sa parcelle dans les semaines à venir si les événements qu'il prévoit se réalisent. La capacité de COTONS à prendre en compte les dégâts architecturaux issus d'accidents ou d'attaques divers permet à l'agriculteur de tester l'intérêt de tel ou tel apport d'intrant (pesticide, engrais...).

Visualisation à l'écran des sorties d'une simulation en « plant moyen ».



Interface pour le calibrage d'une nouvelle variété grâce à l'algorithme génétique.

Visualisation à l'écran d'une simulation en « peuplement ».



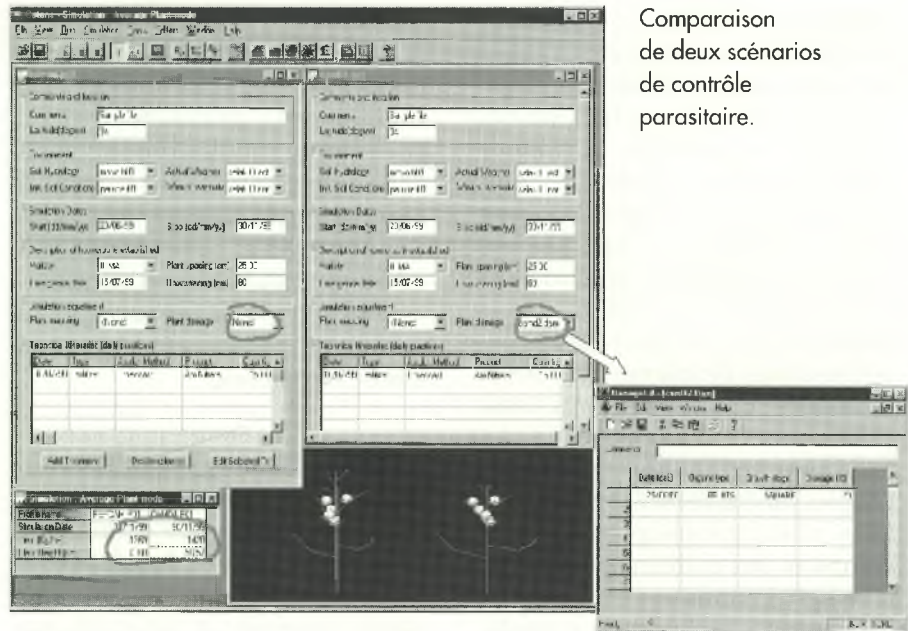


En mode stratégique, les données climatiques réelles n'interviennent pas. Toutes les simulations sont faites à partir de scénarios climatiques, soit générés, soit extraits d'une base de données des climats antérieurs. Une utilisation typique de COTONS en mode stratégique est la détermination du potentiel de production d'un assolement à partir des caractéristiques hydrodynamiques et minérales de chacune des parcelles et des techniques culturales. Une fois les potentiels déterminés, l'agriculteur peut tester plusieurs stratégies de densité de plantation, de fertilisation azotée, d'application de régulateurs de croissance ou de pilotage de l'irrigation... En fonction du résultat, il opte soit pour une maximisation de la productivité, soit pour une limitation des risques.

Les objectifs des agriculteurs utilisant COTONS ne sont pas les mêmes suivant les régions de production : maximisation du rendement ou du bénéfice, réduction des risques de stress hydriques ou azotés, optimisation des irrigations et de la fertilisation, raccourcissement de la durée du cycle, gestion des régulateurs de croissance. Bien évidemment, ces objectifs coïncident souvent indirectement avec l'optimisation du bénéfice de l'exploitation.

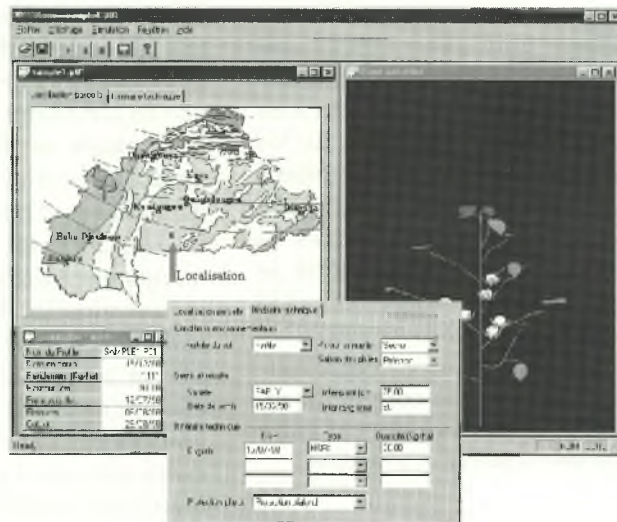
## COTONS ou l'intérêt à venir des cultures virtuelles

Une des caractéristiques essentielles des systèmes biologiques végétaux est le fait qu'ils sont variables, en raison des expressions génétiques et phénotypiques ainsi que des compétitions. Cette variabilité est importante en agriculture pour prendre les décisions tactiques de conduite de la culture. Avec les parcelles virtuelles, comme COTONS est capable de créer, on peut évaluer, comparer et comprendre la nature de cette variabilité pour mieux contrôler le système. ROOM *et al.* (1994, 1996)



Comparaison de deux scénarios de contrôle parasite.

Intégration du modèle avec un Sig.



en Australie, a développé une approche simple de la représentation virtuelle des plants de cotonnier. DE REFFYE *et al.* (1988, 1993), en France, a développé une représentation virtuelle intégrant la variabilité *via* des distributions observées. Ces chercheurs ont proposé, entre autres, l'utilisation des cultures virtuelles dans l'étude de la dynamique de population et la définition d'architectures de plante optimales. En dépit de l'existence et de l'utilisation de ces travaux dans plusieurs pays, ceux-ci ne sont pas encore à la disposition d'un public élargi (professionnels agricoles, chercheurs, étudiants).

Les plantes virtuelles peuvent être manipulées et examinées sous n'importe quel angle et toutes les observations possibles sur une plante réelle le sont aussi sur les plantes virtuelles. Comme proposé par ROOM et DE REFFYE sus-cités, on peut les utiliser pour des études sur la topologie des plantes, la dynamique de population et la détermination d'architectures de plante optimales. Elles peuvent aussi servir à l'étude des phénomènes radiatifs au sein de la canopée, de l'évapotranspiration, des implications de la variabilité intra-parcellaire, etc.

L'utilisation des modèles de simulation des cultures virtuelles devrait





rapidement s'élargir. Le développement de systèmes interactifs d'aide à la décision pourrait être une extension forte des possibilités de ces modèles. Par exemple, une plante virtuelle peut être « étiquetée » avec des capteurs de lumière et l'on peut ainsi « mesurer » la lumière qui serait interceptée en fonction des conditions de simulation. De la même façon, on peut tester des architectures de plante, des formes de feuille, des écartements entre plants, des concurrences avec les mauvaises herbes, des densités, des couples variété/densité, etc. On peut aussi aller beaucoup plus loin et comparer des combinaisons multifactorielles, comme « efficacité de conversion x architecture x régulateurs de croissance ». Avant de réaliser une expérimentation réelle, un chercheur peut aussi lancer une simulation puis, en cours de croissance, soumettre le peuplement à un stress et en mesurer les effets sur les mécanismes biologiques : la lumière interceptée, la photosynthèse, la transpiration, les caractéristiques de croissance, etc. Un autre intérêt de taille des cultures virtuelles est la correspondance directe entre les résultats des simulations et les observations réelles : cette correspondance permet le passage direct entre phénomène observé et modélisé.

En plus de la substitution aux expérimentations, les modèles de simulation des cultures virtuelles

permettent l'élaboration d'une connaissance *a priori*. Cela pourra faciliter la pluridisciplinarité en favorisant, à partir de l'étude des comportements simulés, les échanges entre chercheurs avant la mise en place d'expérimentations réelles. Ces échanges et cette pluridisciplinarité se traduiraient ainsi par une amélioration de la productivité des moyens de fonctionnement des instituts de recherches.

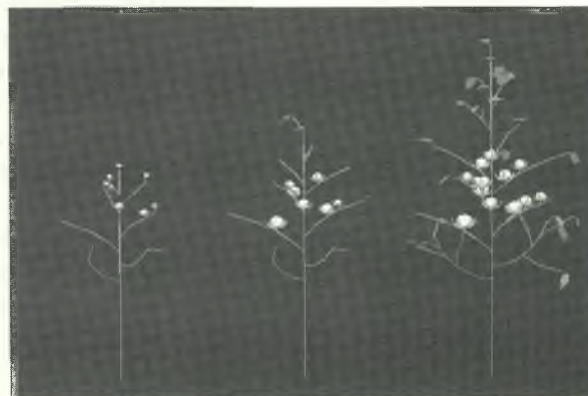
D'autres utilisations potentielles résident dans le domaine de l'échantillonnage et de la description topologique des plantes. La simulation d'une parcelle virtuelle de cotonniers soumise à une attaque d'insectes selon des caractéristiques définies par l'utilisateur permettra de tester des procédures et des règles d'échantillonnage avant leur validation en conditions réelles. Le suivi de la topologie des plantes est à la fois un outil essentiel pour l'ajustement des modèles et pour l'observation de la croissance des plantes. Les *plant mapping* (cartographie des plantes) seront plus facilement réalisés à partir de représentations virtuelles en 3D qu'à partir d'abstractions bidimensionnelles. De même, la visualisation des effets de techniques culturales sur la distribution des fruits, par exemple, sera utile dans le choix de celles qui réduiront le plus possible les effets nuisibles sur la fructification tout en démontrant

clairement et d'une façon convaincante leur intérêt.

Les cultures virtuelles peuvent également être un outil d'aide à la décision pour les producteurs. Les champs virtuels de cotonniers permettront de simuler les comportements des zones hétérogènes des parcelles ; l'agriculteur peut alors tenir compte de façon optimale de l'expression des caractéristiques génotypiques et phénotypiques des variétés.

Enfin, les plantes virtuelles constitueront un outil primordial de formation. Parmi les obstacles à surmonter lors de la présentation de résultats de systèmes d'aide à la décision à des agriculteurs, il y a le passage d'un monde 3D à un monde 2D et la courbe d'apprentissage associée à la complexité du système d'aide à la décision. L'utilisation des plantes virtuelles, la possibilité de traverser une parcelle virtuelle de cotonniers à tout moment en réalisant des observations, atténuent fortement ces deux obstacles et font des modèles de cultures virtuelles un outil inégalé pour enseigner les pratiques culturales optimales, les techniques de prélèvement et de suivi... Ainsi, sans grand risque de se tromper, on peut imaginer que dans les écoles d'agriculture, les étudiants verront bientôt, en mode interactif, les effets au champ des pratiques culturales.

Comparaison de trois itinéraires techniques : résultat de la simulation à deux dates du cycle.





## Les développements futurs de COTONS

Les créateurs du modèle COTONS approfondissent et élargissent encore ses capacités. Actuellement, ils achèvent le développement d'un système d'aide à la décision intégrant le modèle COTONS, un algorithme génétique, un système expert, un réseau de neurones et des systèmes d'analyse de risques.

L'association avec un système d'information géographique est en cours de réalisation pour une version davantage tournée vers la formation et la prédiction régionale : les décideurs, les développeurs et les politiques devraient y trouver un outil

adapté à leur questionnement. Le Sig est lui-même couplé avec des bases de données pédologiques, climatiques et phytosanitaires propres au lieu étudié. Cette nouvelle formule vient d'être expérimentée pour le Burkina Faso.

A l'intérieur du modèle COTONS, le compartiment sol nécessite l'évolution du sous-modèle RHIZOS bidimensionnel en tridimensionnel et la prise en compte des nutriments minéraux potassique et phosphorique. Le compartiment fructification devra intégrer des composantes de qualité dans la répartition des assimilats au niveau de la capsule. Sur un plan global, il sera utile de définir, à partir de l'expérience acquise, une archi-

tecture générique pour des modèles de plantes cultivées annuellement : autrement dit, ne pas rester cantonné à la culture cotonnière mais constituer un COTONS capable de simuler toute culture annuelle. La technologie développée pour le modèle COTONS pourra aussi servir à développer un modèle de mauvaise herbe. Ce modèle sera associé à COTONS afin d'obtenir un système de simulation de la compétition entre la culture et les plantes adventives. De la même façon, le développement de modèles mécanistes de populations d'insectes, puis leur intégration à COTONS, permettront d'obtenir un système de simulation de la compétition entre la culture et ses parasites.

## Principales références

BAKER D.N., MCKINION J.M., LAMBERT J.R., 1983. GOSSYM: a simulator of cotton crop growth and yield. South Carolina Agric. Exp. Stn. Tech. Bull. 1089, 134 p.

BROWN L.G., McCLENDON R., JONES J., 1979. Computer simulation of the interaction between the cotton crop and insect pests. Transactions American Soc. Agric. Engin. 22: 771-774.

DE REFFYE P., 1979. Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *Coffea robusta*, Paris-Sud, Orsay, France.

DE REFFYE P., EDELIN C., FRANÇON J., JAEGER M., PUECH C., 1988. Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development. Comput. Graphics 22: 151-158.

DE REFFYE P., BLAISE F., GUÉDON Y., 1993. Modélisation et simulation de l'architecture et de la croissance des plantes. Revue du Palais de la Découverte 209 : 23-48.

DE WITT C.T., BROUWER R., 1968. A Dynamic Model of the Vegetative Growth of Crops. Das Zietschrift Fur Angewandte Botanik.

DE WITT C.R., BROUWER R., PENNING DE VRIES F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systems. In Prediction and measurement of photosynthetic activity. PUDOC, Wageningen, Pays-Bas, p. 47-70.

DUNCAN W.G., 1972. SIMCOT: a simulator of cotton growth and yield. In Murphy C.M. (editor). Proceedings Workshop for Modeling Tree Growth, 11-12 octobre 1972, Duke University, Etats-Unis. Duke University, Etats-Unis, p. 115-118.

DUNCAN W.G., LOOMIS R.S., WILLIAMS W.A., HANAU R., 1967. A model for Simulating Photosynthesis in Plant Communities. Hilgardia, Journal of agriculture and Science 38: 181-205.

FORESTER J.W., 1961. Industrial Dynamics. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Etats-Unis, 406 p.

FOSNER R., 1997. OpenGL. Programming for Windows 95 and Windows NT. 1/Ed. Addison-Wesley Developers Press.

GUTIERREZ A.P., FALCON L.A., LOEW W., LEIPZIG P., VAN DEN BOSCH R., 1975. An analysis of cotton production in California: a model for Acala cotton and the effects of defoliators on its yields. Environ. Entomol. 4: 125-136.

HEARN A.B., ROOM P., 1979. Analysis of crop development for cotton pest management. Prot. Ecol. 1: 265-277.

JALLAS E., 1991. Modélisation du développement et de la croissance du cotonnier. Le modèle GOSSYM. Ina-pg, Paris, France, 101 p.

JALLAS E., 1998. Improved Model-Based Decision Support by Modeling Cotton Variability and Using Evolutionary Algorithms. PhD Dissertation, MSU, Mississipi.

JALLAS E., SEQUEIRA R.A., MARTIN P., TURNER S., CRETENET M., 1998. COTONS, a Cotton Simulation Model for the Next Century. Second World Cotton Research Conference, Athens, September 1998.

JACKSON B., ARKINS G.F., 1982. Fruit growth in a cotton simulation model. Proceedings of Beltwide Cotton Production Research Conference. National Cotton Council, Memphis, TN, Etats-Unis, p. G1-64.

JONES J., BROWN L., HESKETH J., 1980. COTCROP: a computer model for cotton growth and yield. In JONES J., HESKETH J. (Eds), Predicting Photosynthesis for ecosystems Models, CRC Press. Boca Raton Florida, Etats-Unis, p. 209-241.

LADEWIG H., TAYLOR-POWELL E., 1989. An assessment of GOSSYM/COMAX as a decision support system in the US cotton industry. Texas Agriculture Extension Service. College Station, Texas, Etats-Unis, 51 p.

LADEWIG A.M., THOMAS J.K., 1992. A follow-up evaluation of the GOSSYM/COMAX cotton program. Texas Agriculture Extension Service. College Station, Texas, Etats-Unis, 47 p.

LANDIVAR J.A., EDELMAN B., BENEDICT J., LAWLOR D.J., RING D., GARDINER D.T., 1991. ICEMM, an integrated crop ecosystem management model. Proceedings of Beltwide Cotton Production Research Conference, 1991. National Cotton Council, Memphis, Etats-Unis, TN, p. 1 016.

LEMMON H., 1986. COMAX: an expert system for cotton crop management. Science 233: 29-33.

LESLIE P.H., 1945. On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrika 33: 182-212.

LOTKA A.J., 1925. Elements of Physical Biology. WILLIAMS and WILKINS Pub. Baltimore, MD, Etats-Unis, 303 p.

MAY R., 1976. Theoretical Ecology. W.B. Saunders Co, Philadelphia, Etats-Unis, 317 p.





McKINION J.M., JONES J.W., HESKETH J.D., LANE H.C., THOMPSON A.C., 1975. Simulation of plant growth : morphogenetic control of leaf area expansion. Proceedings of Beltwide Cotton Production Research Conference, 1975, Memphis, Tennessee, Etats-Unis. National Cotton Council, Etats-Unis, p. 56-61.

McKINION J.M., BAKER D.N., WHISLER F., LAMBERT J., 1989. Application of the GOSSYM/COMAX system to cotton crop management. *Agric. Systems* 31: 55-65.

MILLIKEN G.A., JOHNSON D.E., 1989. Analysis of mess data. Van Nostrand Reinhold, New York, Etats-Unis, 299 p.

MUTSAERS H.J.W., 1984. A morphogenetic model for cotton. *Agric. Systems* 14: 229-257.

ODUM H.T., 1983. *Systems Ecology, an Introduction*.

PLANT R.E., 1989. An integrated decision support system for agricultural management. *Agric. Systems*. 29: 49-66.

PRUSINKIEWICZ P., HAMMEL M., 1994. Visual models of morphogenesis. WWW URL <http://www.cpsc.ucalgary.ca/projects/bmv/vm/animations.html>.

ROOM P.M., MAILLETTE L., HANAN J.S., 1994. Module and metamer dynamics and virtual plants. *Adv. Ecol. Res.*, 105-157.

ROOM P.M., HANAN J.S., PRUSINKIEWICZ P., 1996. Virtual plants: New Perspectives for Ecologists, Pathologists and Agricultural Scientists. *Trends in Plant Science* 1: 33-38.

SEQUEIRA R.A., SHARPE P.J.H., STONE

N.D., EL-ZIK K.M., MAKELA M.E., 1991. Object-oriented Simulation: Plant Growth and Discrete Organ to Organ Interactions. *Ecological Modelling* 58: 55-89.

SEQUEIRA R.A., STONE N.D., MAKELA M.E., EL-ZIK K.M., SHARPE P.J.H., 1993. Generation of Mechanistic Variability in a Process-based Object-oriented Plant Model. *Ecological Modelling* 67: 285-306.

SEQUEIRA R.A., JALLAS E., 1995. GOSSYM-COMAX : simulation de la croissance du cotonnier et utilisation par l'agriculteur d'un système d'aide à la décision. *Agriculture et développement* 8 : 25-34.

THANISAWANYANGKURA S., SINOQUET H., RIVET P., CRÉTENET M., JALLAS E., 1997. Leaf Orientation and Sunlit Leaf Area Distribution in Cotton. *Agricultural and Forest Meteorology* 86: 1-15.

## Résumé... Abstract... Resumen

E. JALLAS, M. CRETENET, R. SEQUEIRA, S. TURNER, E. GERARDEUX, P. MARTIN, J. JEAN, P. CLOUVEL —  
**COTONS, une nouvelle génération de modèles de simulation des cultures.**

Le modèle COTONS simule la croissance et le développement quotidien d'une culture de cotonnier. Il prend en compte les conditions de climat et de sol, les états du peuplement végétal et les techniques culturales. Il associe les fonctions et les concepts issus d'un modèle du type plantes en peuplement et d'un outil de visualisation tridimensionnelle de l'architecture des plantes. L'ajustement à une réalité de terrain fait intervenir jusqu'à 29 variables. COTONS intègre dans un seul système l'ensemble des connaissances actuelles sur le fonctionnement du cotonnier. COTONS ouvre la voie vers une nouvelle génération de modèles de simulation ; il montre que les cultures virtuelles peuvent être si proches de la réalité qu'elles peuvent remplacer de nombreuses manipulations et observations longues ou coûteuses. Il constitue un outil performant substituable aux expérimentations agronomiques : il évite la réalisation de dispositifs complexes destinés à établir des grilles de recommandations adaptées à une grande diversité de situations agricoles. Il est aussi un outil pédagogique puissant et convivial. Enfin, il permet à l'agriculteur de piloter sa conduite de culture en testant plusieurs scénarios tactiques en fonction des conditions environnementales instantanées et en fonction d'objectifs stratégiques de son exploitation. Des améliorations de COTONS sont prévues, associant, entre autres, des systèmes d'information géographique, des modèles de croissance d'adventices, d'attaques parasitaires.

Mots-clés : modélisation, peuplement végétal, culture virtuelle, aide à la décision, cotonnier.

E. JALLAS, M. CRETENET, R. SEQUEIRA, S. TURNER, E. GERARDEUX, P. MARTIN, J. JEAN, P. CLOUVEL —  
**COTONS, a new generation of crop simulation models.**

The COTONS model simulates the growth and daily development of cotton crops. It takes account of the climate and soils, plant stand condition and crop techniques, and combines the functions and concepts of a cultivated plant type model and a 3-D plant architecture visualization tool. Adjustment to field reality involves up to 29 variables. COTONS integrates into a single system all current knowledge on cotton plant functioning. It opens the way for a new generation of simulation models, and proves that virtual crops can be so realistic that they can be substituted for many long or costly operations and observations. COTONS is an effective tool that can replace agronomy trials: it removes the need for complex experimental designs geared towards establishing sets of recommendations covering a wide range of agricultural situations. It is also a powerful, user-friendly teaching tool. Lastly, it allows farmers to manage their operations by testing several tactical scenarios depending on varying environmental conditions and on their strategic objectives. Improvements to COTONS are planned, amongst other things to link it with weed growth and parasite attack models.

Keywords: modelling, plant stand, virtual crop, decision-making tool, cotton.

E. JALLAS, M. CRETENET, R. SEQUEIRA, S. TURNER, E. GERARDEUX, P. MARTIN, J. JEAN, P. CLOUVEL —  
**COTONS, una nueva generación de modelos de simulación de cultivos.**

El modelo COTONS simula el crecimiento y desarrollo cotidiano de un cultivo algodonero. Tiene en cuenta las condiciones de clima y suelo, estado de la masa vegetal y técnicas de cultivo. Asocia las funciones y conceptos procedentes de un modelo de tipo plantas en rodal con los de un instrumento para la visualización tridimensional de la arquitectura de las plantas. El ajuste a una realidad de campo hace que intervengan hasta 29 variables. COTONS integra en un único sistema el conjunto de conocimientos actuales sobre el funcionamiento del algodonero. COTONS es el representante de una nueva generación de modelos de simulación; muestra que los cultivos virtuales pueden estar tan próximos de la realidad que permiten reemplazar numerosas manipulaciones y observaciones largas o costosas. Es un instrumento eficaz que puede sustituir experimentos agrónomos: evita la realización de dispositivos complejos destinados al establecimiento de tablas de recomendaciones adaptadas a una gran diversidad de situaciones agrícolas. Es, asimismo, un instrumento pedagógico potente y de fácil manejo. También permite al agricultor pilotar la dirección de su cultivo probando varios escenarios tácticos en función de las condiciones medioambientales instantáneas y de los objetivos estratégicos y su explotación. Se han previsto mejoras para COTONS, que asocian, entre otras cosas, modelos de crecimiento de malezas y ataques de parásitos.

Palabras clave: Modelización, masa vegetal, cultivo virtual, ayuda a la decisión, algodonero.