

GOSSYM-COMAX : simulation de la croissance du cotonnier et utilisation par l'agriculteur d'un système d'aide à la décision

Le cotonnier a été l'une des premières cultures à être modélisée avec pour objectif d'aider les agriculteurs à accroître leurs profits.

De nombreux modèles ont été conçus. Actuellement, le système GOSSYM-COMAX est utilisé par les agriculteurs américains, il correspond à un couplage d'un modèle « plante » à un système expert d'aide à la décision.

Une simulation de la parcelle peut ainsi être réalisée par GOSSYM et COMAX fournit les recommandations pour des interventions culturales correspondant aux objectifs de production et aux contraintes agroclimatiques.

R.A. SEQUEIRA
USDA-ARS-CSRU, Mississippi
State, MS, Etats-Unis

E. JALLAS
CIRAD-CA, BP 5035,
Montpellier Cedex 1, France

Cet article a été réalisé avec la collaboration de
S. TURNER (USDA, Etats-Unis), de P. CLOUVEL
et M. CRETENET (CIRAD, France)

Trop souvent la conduite d'une culture n'est évaluée qu'à partir du rendement obtenu à la fin de la saison. Ce critère, bien qu'important, masque la réalité de l'activité quotidienne de l'agriculteur. Cette conduite commence longtemps avant le semis, d'abord par les choix des moyens de production et de la variété, par la réalisation des travaux de préparation du sol, ensuite par l'installation de la culture, l'utilisation maîtrisée de l'irrigation, de la fertilisation azotée, des régulateurs de croissance mais aussi des produits favorisant la maturation et des défoliants. L'ensemble de ces travaux permet à l'agriculteur d'atteindre ses objectifs de production, de qualité et de calendrier cultural. La conduite de la culture consiste donc en une succession de prises de décision, en fonction des états du milieu et de la culture.

Les règles de décision des agriculteurs

Pour prendre ces décisions, 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 — actions théoriques — issues des dernières connaissances acquises et fondées sur les théories les plus récentes.

La prise en compte des référentiels techniques

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, etc. ; ses interventions sur l'exploitation sont ponctuelles, laissant l'agriculteur seul devant l'appréciation des effets de ces décisions. Ainsi, l'exploitant développe des pratiques agricoles qui tiennent compte à la fois des techniques recommandées mais aussi de ses contraintes économiques et sociales.

Les contraintes et l'expérience de l'agriculteur

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 différentes 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 et une relation directe entre le rendement et les techniques est erronée.

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 : « Et 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 sa 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 connaître toutes les possibilités d'évolution de ces états. Son champ décisionnel est donc particulièrement 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 au niveau de la parcelle. Ces outils intégrés sont, de plus, paramétrables selon les conditions de chaque exploitation.

Les modèles de conduite des cultures

Les modèles « plante » utilisés actuellement sont des logiciels de simulations mathématiques fondées sur une approche analytique des systèmes.

Les modèles qualitatifs

De nombreux modèles qualitatifs permettaient de décrire des processus et des interactions biologiques, avant l'apparition des modèles quantitatifs. Les modèles qualitatifs sont la première étape dans la théorisation de ces processus, ils en décrivent le fonctionnement sans pour autant quantifier les relations. Bien que la modélisation qualitative soit toujours une voie importante aujourd'hui, en particulier pour la modélisation des décisions des agriculteurs, nous ne présenterons par la suite qu'un modèle mécaniste quantitatif de simulation : le modèle GOSSYM-COMAX.

Les modèles quantitatifs

Les modèles quantitatifs quantifient les flux des schémas fonctionnels décrivant les processus établis sur la base des concepts de la systémique (CRETENET, 1995). L'objectif est la maîtrise des sorties du modèle à l'aide des données entrées. Les premières applications de modèles quantitatifs en biologie correspondent, par exemple, à la loi de croissance exponentielle proposée par MALTHUS, aux conceptions de LAMARCK et de DARWIN sur l'évolution des espèces et aux lois de MENDEL sur l'hérédité.

Dans l'analyse théorique et pratique des biosystèmes, la modélisation quantitative a une longue histoire. LOTKA en 1925 et VOLTERA en 1926 ont essayé d'exprimer la complexité d'un système dynamique prédateur-proie à deux espèces. En 1945, LESLIE — en utilisant l'analyse d'EIGEN qui permet de trouver les solutions d'un système d'équations différentielles du premier degré — a formalisé la résolution matricielle pour l'analyse dans le temps de populations à structure d'âge.

Avec le développement des méthodes statistiques et plus particulièrement des surfaces de réponse, les modèles ont été essentiellement utilisés au début comme outil de prévision.

Les modèles analytiques et les modèles statistiques

Les modèles analytiques et les modèles statistiques sont aussi des modèles quantitatifs. Cependant, les modèles analytiques s'adressent à des systèmes simples et les modèles statistiques font appel à des corrélations pour la quantification des flux. Avant l'avènement des ordinateurs, la plupart des bio-modélisateurs utilisaient soit des modèles analytiques, comme par exemple la relation $dN/dt = r \times N$ où N est une population et r son taux d'accroissement, soit des modèles statistiques aisé à développer. Les modèles analytiques sont mathématiquement élégants, facilement manipulables et sont l'expression exacte des processus. Cependant, ces modèles apportent peu d'aide dans la compréhension de processus complexes. C'est le cas de la dynamique des populations dans l'exemple précédent, ou encore des processus de développement comme la réponse à des changements d'état d'une plante sous l'effet des pratiques culturales ou d'un groupe de processus en interaction. De plus, ces modèles analytiques ont des champs d'application restreints, les systèmes doivent être différentiables en continu et les limites vers lesquelles tend l'intégration doivent être connues. Les modèles statistiques ne permettent pas, quant à eux, de traiter les relations de cause à effet et sont contraignants à cause de l'hypothèse d'indépendance des observations.

Les modèles « plante »

Les systèmes complexes qui nécessitent des entrées variables, dynamiques et non prédéterminées ne peuvent pas être étudiés avec des modèles analytiques. Les systèmes de culture et la conduite des cultures sont des exemples de ces systèmes complexes.

Les processus quantitatifs dans les modèles « plantes » sont dépendants de facteurs biotiques et abiotiques. A cause de ces facteurs, les modèles de simulation mécanistes sont mieux adaptés que les modèles analytiques et statistiques, pour simuler le fonctionnement d'une parcelle d'une culture. En effet, les modèles mécanistes tentent d'inclure, comme partie intégrante d'eux-mêmes, les

causes des comportements observés dans les systèmes qu'ils modélisent. Les modèles de simulation des cultures sont nés à la fin des années 60 et au début des années 70 avec l'utilisation en biologie de méthodes issues des sciences physiques. Les premiers travaux de modélisation et de simulation en biologie ont été conduits à l'*Imperial College* en Grande-Bretagne (SOUTHWOOD, 1968), à Wageningen aux Pays-Bas (DE WITT, 1970), et aux Etats-Unis (ODUM, 1983 ; FORESTER, 1961 ; MAY, 1976).

Historique des nombreuses tentatives de modèles « cotonnier »

Plusieurs modèles ont été proposés aux agriculteurs et plus de 15 modèles « cotonnier » ont été développés et publiés : STONE *et al.*, 1987 ; STERLING *et al.*, 1992 ; SEQUEIRA *et al.*, 1991 ; OLSON *et al.*, *in press*. Le premier de ces modèles, SIMCOT (DUNCAN, 1972), créé par les universités du Kentucky et de Floride (Etats-Unis), était déjà un modèle de répartition des assimilats. Son successeur direct, SIMCOT II (McKINION *et al.*, 1975), intégrait en plus un sous-modèle d'architecture de la production ainsi qu'un sous-modèle de répartition de l'azote.

SIMCOT II a donné naissance à de nombreux nouveaux modèles « cotonnier ». Ainsi, au Mississippi (Etats-Unis), deux équipes différentes ont mis au point deux nouveaux modèles dérivés : COTCROP modélise le fonctionnement d'une unité de surface plantée en cotonnier (BROWN *et al.*, 1979 ; JONES *et al.*, 1980) et GOSSYM travaille sur la base d'un plant moyen (BAKER *et al.*, 1983). Simultanément en Californie, toujours en partie fondé sur SIMCOT II, un groupe développait son propre modèle SIMCOT-UC, devenu depuis COTSIM (GUTIERREZ *et al.*, 1975 ; WANG *et al.*, 1977).

Parallèlement en Australie, HEARN et ROOM (1979) ont conçu le modèle SIRATAC, modèle de gestion du parasitisme du cotonnier incluant un modèle « plante » relativement simple. Au Texas, JACKSON et ARKINS (1982), considérant que les modèles disponibles étaient soit trop complexes et difficiles à comprendre et à calibrer (SIMCOT, GOSSYM et COTCROP), soit trop simples et nécessitant des données observées (SIRATAC) ou enfin trop mathématiques et difficiles à valider (COTSIM), décidèrent de développer COTTAM.

Plus tard, COTTAM sera inclus dans COTFLEX, un système d'aide à la conduite de la culture réalisé par STONE *et al.* (1987). De même, GOSSYM et TEXCIM (STERLING *et al.*, 1992), modèle « cotonnier » simplifié prenant en compte le parasitisme, ont été inclus dans ICEMM, un système d'aide à la gestion du système de production (LANDIVAR *et al.*, 1991). Parallèlement à ces efforts, d'autres équipes développaient leur propre approche. C'est le cas des modèles COTTON (STAPLETON *et al.*, 1973), SIMPLECOT (WILSON *et al.*, 1972) puis CALTAC (WILSON *et al.*, 1987), développé pour une intégration avec CALEX (PLANT, 1989). En Afrique, MUTSAERS (1984) développait KUTUN, un modèle caractérisé par une répartition des assimilats prenant en compte les proximités des puits avec les sources. Enfin, les travaux de WALLACH sur la modélisation de la fructification du cotonnier (1980) et ceux de WANJURA et NEWTON (1981) sur le développement des capsules ont aussi contribué aux efforts de modélisation.

Modélisation du fonctionnement du cotonnier

Compte tenu de son importance économique (c'est la 5^e culture de rente au monde) et des nombreuses données disponibles, le cotonnier a été l'une des premières cultures à être modélisée avec pour objectif d'aider les agriculteurs à accroître leurs profits.

Aujourd'hui, commercialement, seul le système GOSSYM-COMAX est utilisé par des agriculteurs (BAKER *et al.*, 1983 ; McKINION *et al.*, 1989).

Le modèle de croissance et de développement du cotonnier GOSSYM

Le modèle GOSSYM est dynamique. Il simule la croissance et le développement quotidiens d'une culture de cotonnier. Des descriptions des fondements théoriques et mathématiques

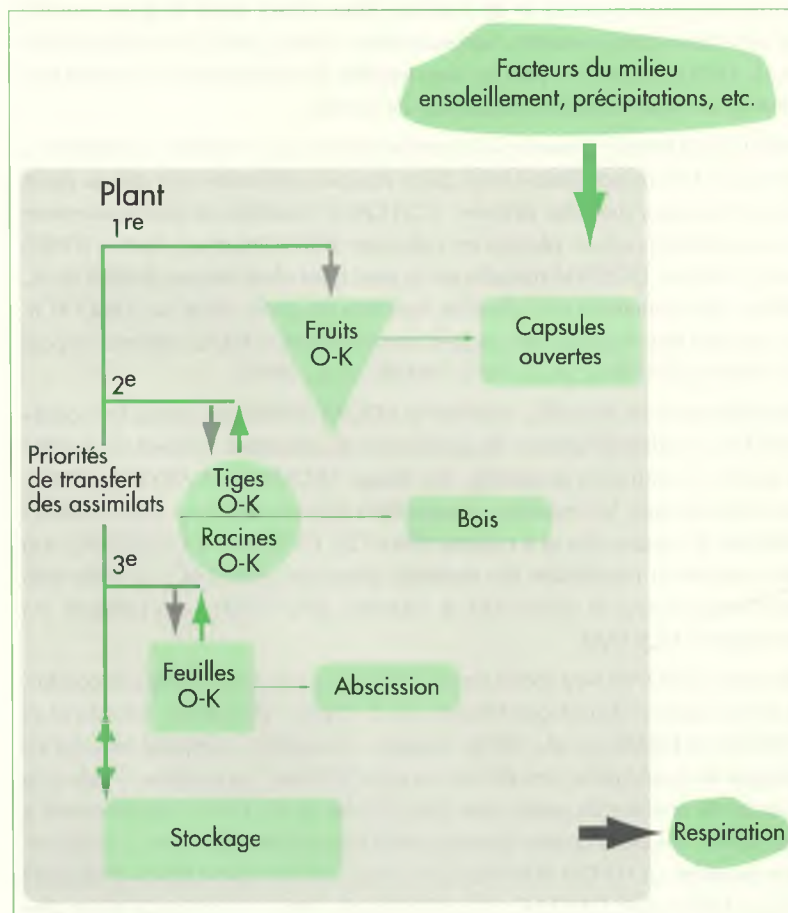


Figure 1. Modélisation dans GOSSYM, durant la phase de fructification, des flux d'offre et de demande en assimilats et des règles de respiration. L'offre figure en flèche verte, la demande en flèche grise. L'index O-K indique tous les stades possibles de chaque organe (feuille, tige, racine et fruit). Les priorités de transfert des assimilats vont d'abord vers les fruits, en deuxième lieu vers les tiges et les racines et en troisième lieu vers les feuilles.

du modèle ont été publiées par BAKER *et al.* (1983) et JALLAS (1991). Le système a été 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 deux systèmes principaux reliés entre eux par le processus de répartition des assimilats (figure 1). Le premier système calcule la production d'assimilats et le second système la demande potentielle en assimilats. Sur un pas de temps journalier, l'algorithme de répartition des assimilats, qui détermine les niveaux des composantes du rendement et le stockage des assimilats en surplus, équilibre l'ensemble du système. Il fait donc partie des modèles dits *material balance* (équilibre de la matière) : il répartit les hydrates de carbone produits dans la plante. Comme l'indique la figure 1, le processus de répartition des assimilats équilibre la relation sources-puits.

Le couplage au système COMAX

En 1986, LEMMON a couplé le modèle de simulation GOSSYM avec un système d'aide à la décision (le système expert COMAX) qui a été amélioré en 1991 par BRIDGES (comm. pers.). Depuis, l'ensemble du système GOSSYM-COMAX fournit à l'agriculteur, en plus des informations sur l'état de la culture, des recommandations pour son itinéraire technique. Le diagramme de la figure 2 montre comment le modèle et le système expert interagissent. GOSSYM simule le comportement journalier de la culture en fonction des entrées fournies. L'utilisateur obtient des prévisions de croissance (allongement des entre-nœuds par exemple), une estimation de rendement et les états physiologiques de la plante pendant la saison simulée. S'il le souhaite, il peut obtenir des conseils sur la conduite de l'irrigation, sur la fertilisation azotée ou sur l'application de régulateurs de croissance, en couplant la simulation au système expert COMAX. COMAX détermine les recommandations optimales à partir de scénarios climatiques. Lorsque COMAX est « appelé », il pilote GOSSYM de manière à minimiser les risques de stress. Si COMAX détecte un stress, il va proposer plusieurs techniques (par exemple des doses et des dates d'application) afin de stopper le stress. Ainsi, à partir de l'état du peuplement ajusté jour par jour, COMAX est capable d'alerter l'agriculteur pour qu'un stress hydrique ou azoté puisse être corrigé le jour suivant. A la fin de la période de croissance végétative, le système expert

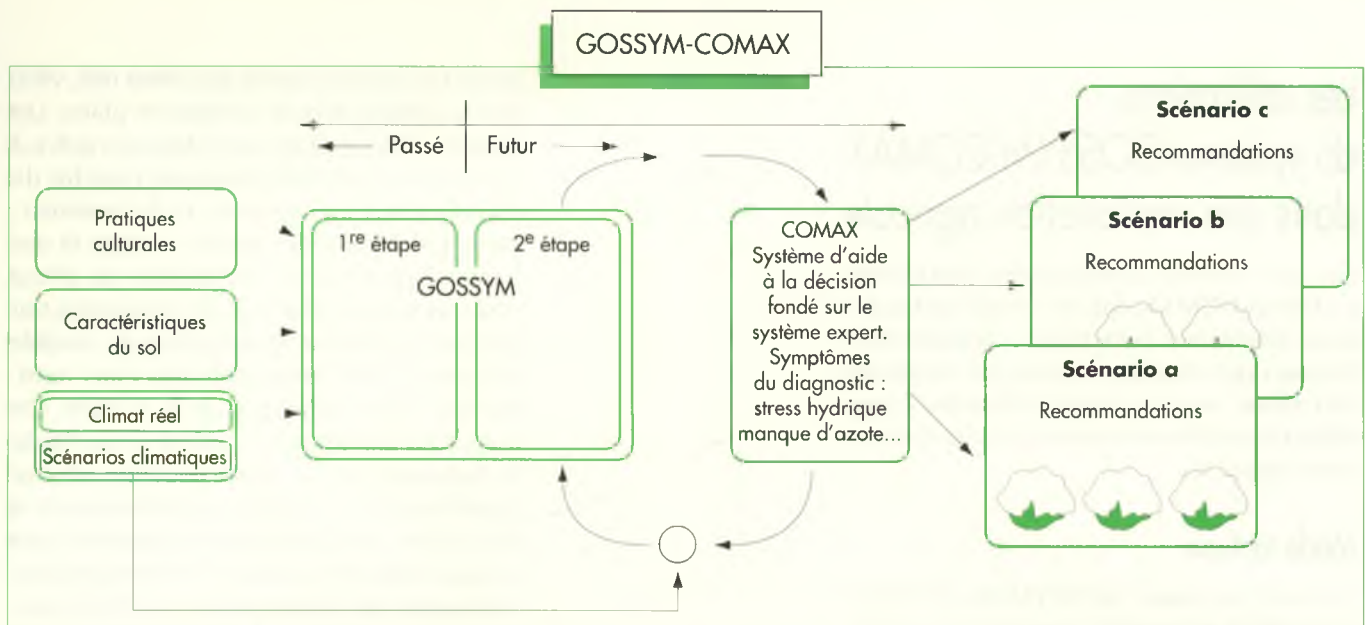


Figure 2. Interaction entre le modèle de simulation GOSSYM et le système expert COMAX.

Un exemple d'utilisation de GOSSYM-COMAX

Dans cet exemple, trois objectifs sont traités.

Premier objectif

Le premier objectif est la détermination de la meilleure variété en fonction du site de culture.

Une vingtaine de variétés parmi les plus couramment cultivées aux Etats-Unis sont répertoriées dans le système en fonction de la durée de leur cycle cultural. Par simulations successives, l'agriculteur peut identifier la variété s'adaptant le mieux aux caractéristiques climatiques et édaphiques de sa parcelle. Les résultats types apparaissent en figure 4 ; l'information sur le choix des cultivars les mieux adaptés est complétée par une simulation des rendements potentiels.

Deuxième objectif

le deuxième objectif est l'optimisation de la date de semis.

Cette opération est particulièrement importante pour la conduite de la culture. Semer trop tôt ou trop tard risque d'exposer la culture à des contraintes climatiques graves dans les zones tempérées, comme le froid, la grêle et les problèmes de portance des outils de récolte sur des sols détremés. En conditions tropicales, c'est la répartition des pluies qui est le facteur sensible. Quel que soit le climat, le modèle renseigne l'agriculteur sur les périodes climatiques offrant la meilleure probabilité d'un rendement économiquement intéressant selon les variétés. La simulation donne à la fois des périodes de culture et les rendements simulés associés.

Troisième objectif

Le troisième objectif est l'optimisation de la date de récolte.

Le système GOSSYM gère l'application de régulateurs de croissance et de défoliants. Ces produits modifient le développement de la plante et permettent de raccourcir et d'arrêter artificiellement le cycle. Certains régulateurs de croissance (l'éthéphon par exemple) accélèrent la maturation des capsules ; toutefois cet effet dépend de l'état hydrique et minéral de la culture. Le modèle devient alors intéressant pour estimer l'effet des produits en fonction de leur date d'application et des conditions climatiques. La décision d'application du défoliant est également importante puisqu'en provoquant la fin de cycle, la date de ce traitement détermine le rendement et la qualité de la fibre. Les résultats de COMAX sur le type de produit, les dates d'application et les doses sont montrés en figure 4.

donne un diagnostic sur l'état du peuplement. Si un problème est identifié, COMAX exécute une série de simulations complémentaires au cours desquelles il teste des solutions techniques destinées à corriger les facteurs déficients. Les solutions testées se rapprochant le mieux de l'optimum sont retenues et traduites à l'agriculteur en termes de conseils d'irrigation, de fertilisation azotée et de traitements avec des régulateurs de croissance.

Les informations traduites par GOSSYM

Les sorties de GOSSYM contiennent des graphiques, des listes de données et des cartographies d'un plant moyen. Les graphiques concernent essentiellement les évolutions du nombre d'organes fructifères produits, pour chacun des états, du nombre de nœuds de la tige principale, de la taille et de l'accumulation de la production de fibre. Les listes donnent les états de la biomasse produite, la surface foliaire, la photosynthèse, et aussi les états hydrique et azoté du sol, de la plante, etc.

Actuellement, le système GOSSYM-COMAX représente, sans prendre en compte l'interface, plus de 10 000 lignes de langage informatique (code C) et fonctionne sous l'environnement graphique Windows. Il existe aussi une version Fortran qui fonctionne sous DOS.

Les utilisations du système GOSSYM-COMAX dans une exploitation agricole

Les agriculteurs américains emploient GOSSYM-COMAX, soit en « mode tactique » pour déterminer la tactique à adopter 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 (figure 3).

Mode tactique

En mode tactique, GOSSYM est généralement utilisé de manière journalière. La simu-

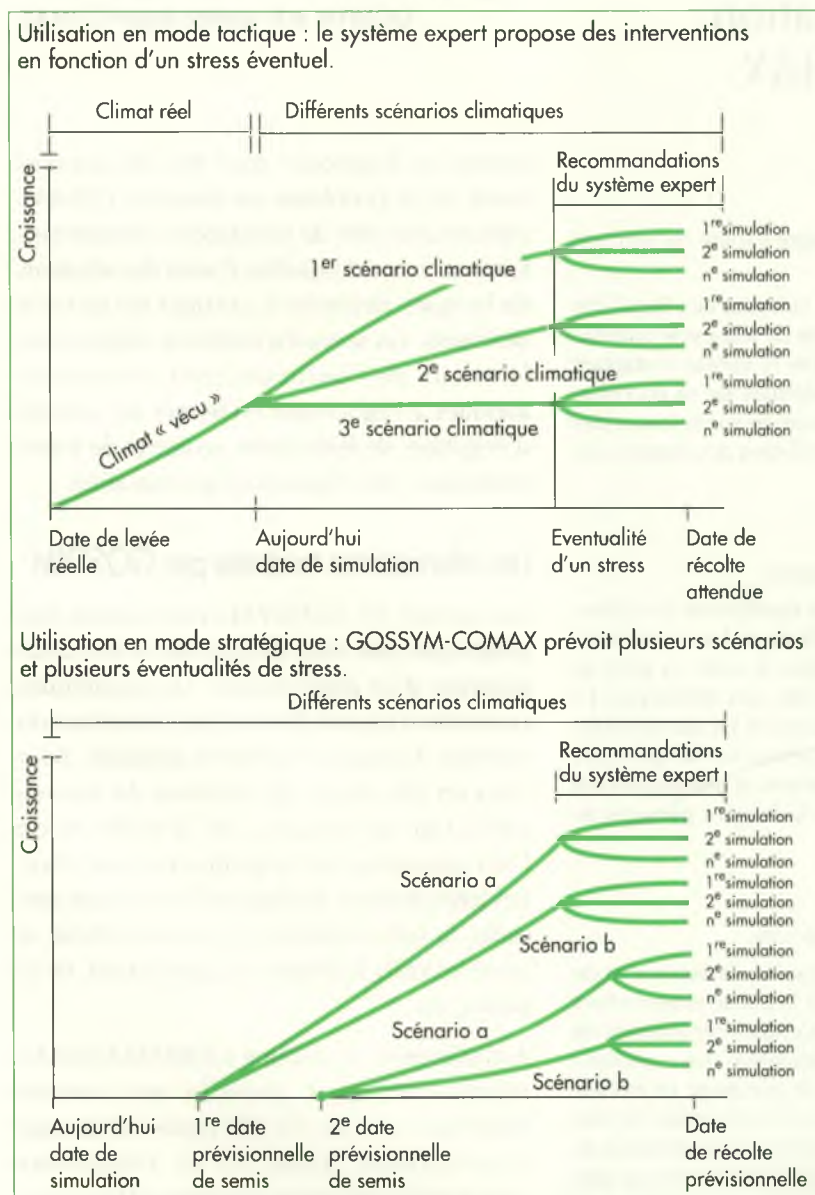


Figure 3. Comparaison des utilisations stratégique et tactique du système GOSSYM-COMAX.

lation 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 kilomètres) ; 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 au champ le diagnostic de la culture peut être effectué visuellement, ou à partir de prélèvements et d'analyses, ces alternatives manuelles sont 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.

Mode stratégique

En mode stratégique, l'agriculteur peut exploiter le système à partir du modèle de simulation GOSSYM ou alors en mettant en œuvre le système expert COMAX. La différence avec une utilisation en mode tactique est que 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 (figure 3).

Une utilisation typique de GOSSYM-COMAX 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 différentes stratégies de densité de plantation, de fertilisation azotée, d'application de régulateurs de croissance ou de pilotage de l'irrigation... En fonction du résultat des simulations, l'agriculteur opte soit pour une maximisation de la productivité, soit pour une limitation des risques.

Les objectifs des agriculteurs utilisant GOSSYM-COMAX sont différents 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.

Mise en œuvre du système GOSSYM-COMAX

La mise en œuvre de GOSSYM-COMAX se décompose en deux étapes. La première étape correspond à l'entrée des données de description de la parcelle (sol, climat et itinéraire technique) pour laquelle une simulation sera réalisée. La deuxième étape est l'initialisation de COMAX, c'est-à-dire l'entrée des objectifs de production et des contraintes sur les interventions culturales pour lesquelles l'agriculteur souhaite des recommandations. Un exemple des opérations nécessaires au lancement d'une simulation est d'abord présenté puis un exemple type de sortie du modèle est discuté.

Dans la version antérieure à 1994, l'interface graphique de GOSSYM fonctionnait sous DOS. Depuis 1994, l'environnement

Windows est utilisé. Sur le premier écran, figurent 12 icônes donnant l'accès à autant de menus de gestion d'informations ; ils correspondent aux caractéristiques de la parcelle, aux techniques culturales, aux modalités d'application des insecticides, des régulateurs et des fongicides, etc.

Afin d'explorer plusieurs stratégies, l'utilisateur peut orienter la simulation en cours pour qu'elle corresponde à ses objectifs ; cette option est présentée un peu plus loin. En fait, une matrice de scénarios est établie, dont les résultats peuvent être comparés grâce à une analyse statistique factorielle sans répétition comme l'ont montré MILLIKEN et JOHNSON (1988), STEVENS *et al.* (sous presse) et SEQUEIRA *et al.* (sous presse).

Les données introduites sont relatives à la localisation, la densité et la date de semis, la date de levée, les dates de début et de fin de la simulation, la densité de peuplement, les données climatiques, les caractéristiques du sol, les modalités d'irrigation, d'application d'azote, de régulateurs de croissance et de défoliants (figure 4). Une simulation est ensuite réalisable ainsi qu'un appel du système expert COMAX afin d'obtenir des recommandations. La figure 5 montre un exemple

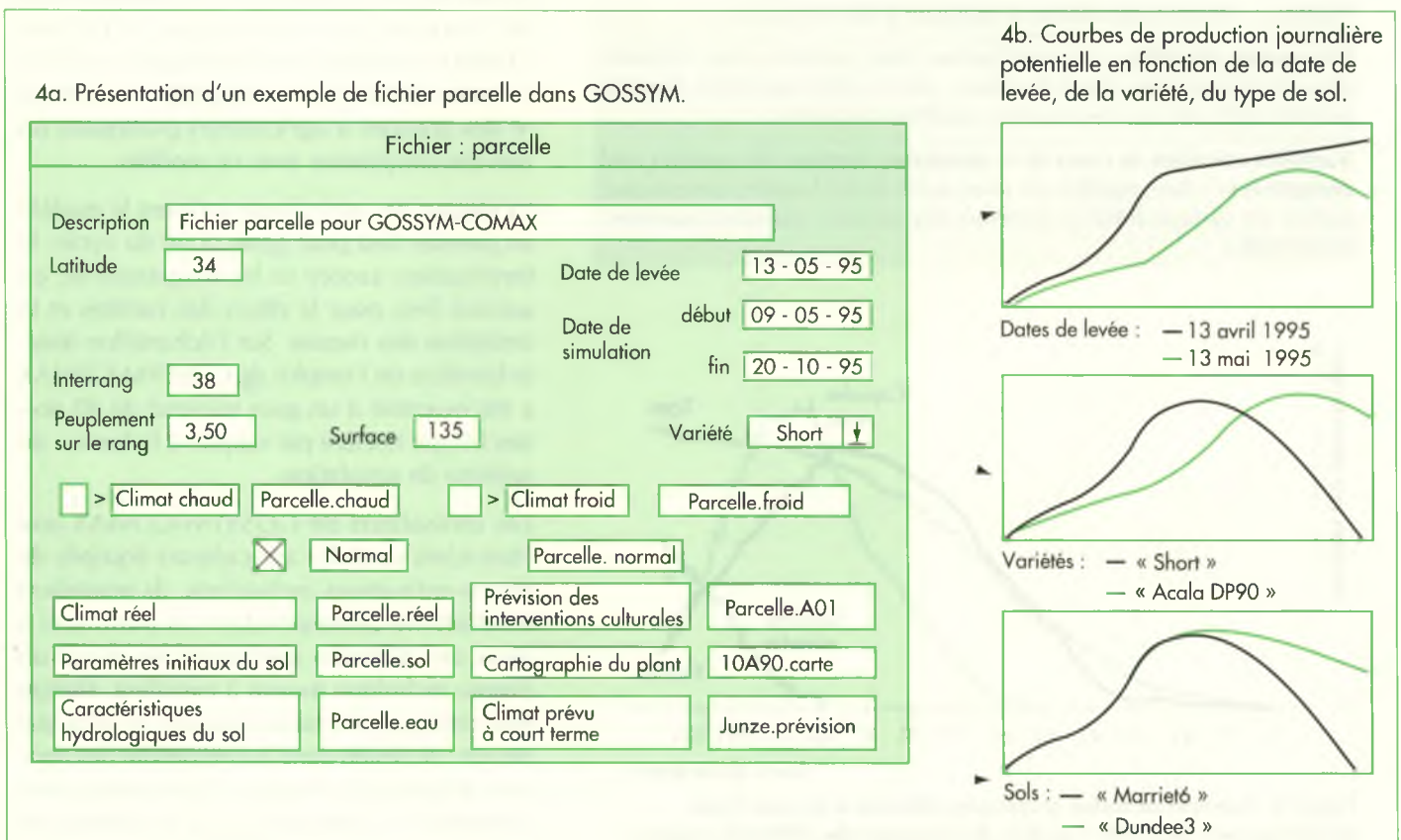


Figure 4. Utilisation de GOSSYM pour comparer différents itinéraires techniques.

des sorties de GOSSYM. Elles concernent les courbes de croissance cumulée et du nombre d'organes en fonction du temps.

En fin de simulation, un tableau récapitulatif comporte les résultats de croissance pondérale et d'apparition des différents organes selon un pas de temps quotidien, signale les périodes éventuelles de stress hydrique et azoté et indique la date d'apparition des différents stades phénologiques (tableau 1). La figure 6 donne un exemple d'une sortie de COMAX.

Après plus de dix années d'utilisation dans des exploitations nord-américaines, il ressort que le modèle GOSSYM simule particulièrement bien le fonctionnement d'une parcelle de cotonnier pour les domaines de variations climatique, pédologique et cultural, dans lesquels il a été développé. JALLAS et SEQUEIRA (non publié) ont montré qu'en dehors de son domaine de validité pédo-climatique, les performances de GOSSYM restent bonnes dans des conditions culturales voisines de l'agriculture nord-américaine. Enfin, GOSSYM est suffisamment robuste pour n'être pas excessivement sensible à aucun paramètre d'entrée (JALLAS, 1995).

Tableau 1. Eléments du tableau récapitulatif d'une simulation.

Evénements identifiés : premier bouton floral, première fleur, dernière date du climat réel, stress hydrique, stress azoté, première capsule ouverte, 60 % de capsules ouvertes, rendement maximal...

Variables calculées au cours de la simulation (environ 40 variables sont enregistrées) : date, nombre de jours après levée, hauteur, entre-nœud, indice de surface foliaire, lumière interceptée, capsules ouvertes, rendement...

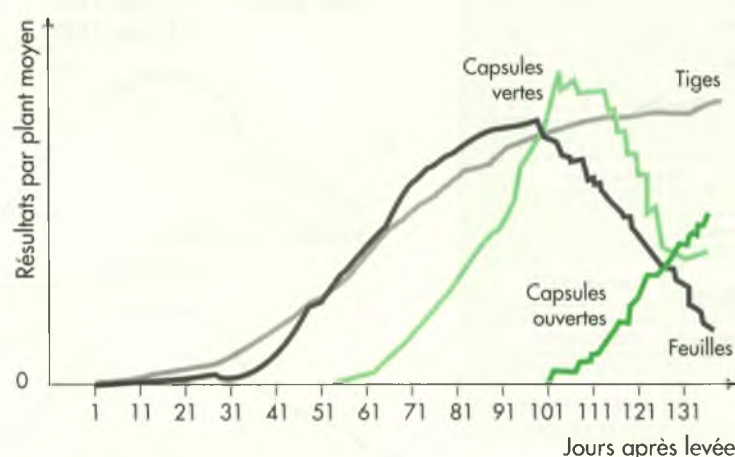


Figure 5. Exemple de sorties graphiques obtenues à la suite d'une simulation avec GOSSYM. Courbes de croissance des différents organes : tiges (hauteur), capsules vertes (nombre), capsules ouvertes (nombre), feuilles (poids sec).

| Applications de COMAX | | | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|---------|----------------------------------|-----------|
| Fertilisation | | | | | |
| NH ₄ | NO ₃ | Urée | Méthode | Localisation par rapport au rang | |
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | - | Profondeur | Interrang |
| | | | | - | - |
| Irrigation | | | | | |
| Date | Quantité (mm) | Méthode d'application | | | |
| 29-04-91 | 90 | sprinkler | | | |
| 10-05-91 | 90 | sprinkler | | | |
| 21-05-91 | 90 | sprinkler | | | |
| 11-06-91 | 90 | sprinkler | | | |
| 13-07-91 | 90 | sprinkler | | | |
| 12-08-91 | 90 | sprinkler | | | |
| 27-08-91 | 90 | sprinkler | | | |

Figure 6. Exemple de recommandations de fertilisation et d'irrigation proposées par COMAX.

Retombées économiques de l'utilisation de GOSSYM-COMAX

Deux études sur l'intérêt économique de GOSSYM-COMAX ont été conduites aux Etats-Unis par une équipe de l'Université Texas A&M (LADEWIG et TAYLOR, 1989 ; LADEWIG et THOMAS, 1992), indépendante de l'équipe qui a développé GOSSYM-COMAX. Menées dans les douze Etats de la ceinture cotonnière, des enquêtes ont comparé des groupes d'agriculteurs pratiquant ou non des simulations avec ce modèle.

La plupart des agriculteurs utilisent le modèle en premier lieu pour gérer la fin du cycle, la fertilisation azotée et les irrigations et, en second lieu, pour le choix des variétés et la limitation des risques. Sur l'échantillon testé, le bénéfice de l'emploi de GOSSYM-COMAX a été quantifié à un gain minimal de 80 dollars US par hectare par rapport à l'absence de système de simulation.

Les utilisateurs de GOSSYM-COMAX aux Etats-Unis sont des agriculteurs équipés de micro-ordinateurs individuels, ils possèdent un diplôme correspondant au minimum à deux ans d'études universitaires et ont un niveau technique moyen à excellent. Malgré leur niveau de formation avancé, le principal défaut cité réside dans la complexité des données d'entrée du modèle. Ils reconnaissent toutefois la cohérence et la souplesse de l'outil, une fois les difficultés d'apprentissage dépassées.

Les perspectives d'adaptation de GOSSYM aux conditions tropicales

Jusqu'en 1994, le système GOSSYM-COMAX était d'un accès peu coûteux aux Etats-Unis (100 dollars US pour un jeu de disquettes et la documentation) à l'issue d'une formation de trois jours (300 dollars US). Depuis 1994, les producteurs américains doivent acheter le logiciel distribué par une société privée.

Une version adaptée aux conditions tropicales est prévue pour 1998 ; cette version sera distribuée conjointement par le CIRAD et l'USDA (United State Department of Agriculture, Etats-Unis). La sortie d'un document décrivant les bases théoriques du modèle, son évolution et les différentes applications permises est prévue pour 1996. Enfin une version intégrant le modèle GOSSYM-COMAX et le modèle AMAP (modèle architectural conçu par le CIRAD) est actuellement en cours de mise au point. Ainsi, la nouvelle génération des modèles mécanistes inclura la variabilité du peuplement et la géométrie des plantes.

Le modèle GOSSYM a été élaboré dans les conditions de l'agriculture américaine. De nombreuses simplifications dans la description des processus ont donc été possibles. Dans ce contexte fortement mécanisé, les peuplements sont relativement homogènes et certaines caractéristiques peu variables comme l'écartement entre les rangs, la densité de peuplement sur le rang... En milieu tropical, les conditions de culture sont très hétérogènes, les simplifications qui avaient été retenues dans la conception du modèle doivent être modifiées et les mécanismes mieux explicités. Une fois adapté, le modèle sera exploité par exemple dans les travaux de recherche pour tester des itinéraires techniques dans différents milieux et pour effectuer des prévisions de production. Le modèle GOSSYM pourra être aussi présenté au cours de formations de chercheurs, de techniciens d'encadrement des cultures cotonnières.

Bibliographie

- 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.
- CRETENET, 1995. Note sur les essais longue durée au CIRAD-CA. Document interne, CIRAD-CA, Montpellier, France, 10 p.
- 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.
- FORESTER J.W., 1961. Industrial Dynamics. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, Etats-Unis, 406 p.
- 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.
- 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. 61-64.
- 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. 1016.
- 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.
- PLANT R.E., 1989. An integrated decision support system for agricultural management. Agric. Systems. 29 : 49-66.
- ODUM H.T., 1983. Systems Ecology, an Introduction. J. Wiley, New York, Etats-Unis, 512 p.

OLSON R.L., SEQUEIRA R.A., MCKINION J.M., *in press*. The cotton modeling application framework: a foundation for the object-oriented simulation of cotton. Computers and Electronics, *in press*.

SFBILOTTE M., 1990. Some concepts for analyzing farming and cropping systems and for understanding their different effects. Inaugural Congress, European Society of Agronomy, Paris, France. 5-7 décembre 1991.

SEQUEIRA R.A., STONE N.D., EL-ZIK K.M., MAKELA M.E., 1991. Object-oriented simulation: plant growth and discrete organ to organ interactions. Ecol. Mod. 58 : 55-89.

SEQUEIRA R.A., WILLERS J., OLSON R.L., *in press*. Validation of a Deterministic Model-Based Decision Support System. J. Artificial Intelligence App., *in press*.

SOUTHWOOD T.R.F., 1968. Ecological Methods. Chapman and Hall Pub. London, Grande-Bretagne, 490 p.

STAPLETON, BUXTON H.D., WATSON F.,

NOLTING D., BAKER D., 1973. COTTON: A computer model for cotton growth. Univ. of Arizona, Etats-Unis, Ag. Exp. Station Tech. Bull. 206, 89 p.

STFRING W.L., HARSTACK A.W., DEAN D.A., 1992. TEXCIM50: The Texas cotton-insect model. Texas Ag. Exp. Station Misc. Publ., College Station, Texas, Etats-Unis, MP-1646, 331 p.

STEVENS G., WILLERS J.L., SEQUEIRA R.A., GERARD P., *in press*. Applications of non-replicated factorial two-level experiments to analyze deterministic simulation models. Agricultural Systems, *in press*.

STONE N.D., FRISBIE R.F., RICHARDSON J., SANSONE C., 1987. COTFLEX, a modular expert system that synthesizes biological and economic analysis: the pest management advisor as an example. Proceedings of Beltwide Cotton Conference, 1987. National Cotton Council, Memphis, TN, Etats-Unis, p. 194-197.

VOITERRA V., 1926. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. Journal Cons. perm. int. Ent. Mer. 3 : 3-51.

WANJURA D., NEWTON O., 1981. Predicting cotton crop boll development. Agron. J. 73 : 476-481.

WALLACH D., 1980. An empirical mathematical model of a cotton crop subject to damage. Field Crops Res. 3 : 7-25.

WANG Y., GUTIERREZ A.P., OSIER G., DAXL R., 1977. A population model for plant growth and development : coupling cotton-herbivore interaction. Can. Entomol. 109 : 1359-1374.

WILSON A., HUGHES R., GILBERT N., 1972. The response of cotton to pest attack. Bull. Entomol. Res. 61 : 405-414.

WILSON L.T., PLANT R., KERBY T., ZELINSKY L., GOODELL P., 1987. Transition from a strategic to a tactical crop and pest management model : use as an economic decision aid. Proceedings of Beltwide Cotton Production Research Conference, 1987, Dallas, Etats-Unis. National Cotton Council, Dallas, Texas, Etats-Unis, p. 207-213.

Résumé... Abstract... Resumen

R.A. SEQUEIRA, E. JALLAS — GOSSYM-COMAX : simulation de la croissance du cotonnier et utilisation par l'agriculteur d'un système d'aide à la décision.

Le cotonnier est une des premières cultures à faire l'objet de modélisation et de nombreuses tentatives ont été proposées depuis les années 70. Les modèles de simulation semblent être l'une des solutions d'avenir pour l'aide à la conduite des cultures : avec un outil unique, ils permettent d'étudier les principaux facteurs de production, les paramètres sont adaptés à chaque exploitation. Le modèle GOSSYM est un modèle mécaniste, développé en 1983 dans le contexte de l'agriculture américaine. Il simule la croissance et le développement quotidiens d'une culture de cotonnier en fonction des données fournies, un sous-système calcule la production d'assimilats et un second sous-système la demande potentielle en assimilats. Le modèle GOSSYM effectue une simulation de la parcelle et le système expert associé COMAX fournit des recommandations optimales à partir des scénarios climatiques, pour minimiser les stress (correction d'un stress hydrique ou azoté, utilisation de régulateurs de croissance) pour des interventions culturales correspondant aux objectifs de production et aux contraintes agroclimatiques. L'agriculteur obtient des prévisions de croissance, une estimation du rendement et des états physiologiques de la plante, etc. Il peut définir aussi la meilleure stratégie pour la saison à venir (prévision d'un assolement, densités de plantation, irrigation en fonction des caractéristiques des différentes parcelles). Actuellement, le système GOSSYM-COMAX fonctionne sous l'environnement graphique Windows et il existe aussi une version Fortran sous DOS. Une adaptation de GOSSYM aux conditions de la culture cotonnière en région tropicale est en cours. Les contextes agroclimatiques et les problèmes culturaux, différents de l'agriculture américaine, impliquent des modifications du modèle.

Mots-clés : cotonnier, modèle mécaniste, GOSSYM, COMAX, croissance, développement, technique culturale, Etats-Unis.

R.A. SEQUEIRA, E. JALLAS — GOSSYM-COMAX : Cotton growth simulation and a decision-making system for farmers.

Cotton was one of the first crops to be modelled and several proposals have been made since the 1970s. Simulation models show promise as crop management aids, i.e. the main production factors can be studied with a single tool, and the parameters are adapted to specific plantations. GOSSYM is a mechanistic model that was developed in 1983 for assessment of American agricultural situations. It simulates the daily growth and development of a cotton crop using input data; one subsystem calculates assimilate production and another assesses potential assimilate demand. GOSSYM produces simulations for single plots and the associated expert system supplies optimal recommendations, in terms of climatic scenarios, with the aim of limiting crop stress (solutions to water and nitrogen stress, use of growth regulators) for cultivation operations that meet with production objectives and agroclimatic constraints. Farmers thus obtain growth predictions, yield estimates, plant physiological status, etc. They can also develop an optimal strategy for the coming season (e.g. cropping plans, planting rates, irrigation adapted to specific plot features). The GOSSYM-COMAX system is now run through the Windows graphic environment, but a DOS-Fortran version is also available. GOSSYM is currently being modified to produce simulations of tropical cotton cultivation conditions, with different agroclimatic contexts and cropping problems than those encountered in USA.

Keywords: cotton, mechanistic model, GOSSYM, COMAX, growth, development, cultivation technique, USA.

R.A. SEQUEIRA, E. JALLAS — GOSSYM-COMAX : simulación de crecimiento de la planta de algodón y utilización por el agricultor de un sistema de ayuda a la decisión.

El cultivo de algodón fue uno de los primeros en haber sido modelizado, habiéndose propuesto numerosos intentos desde los años 70. Los modelos de simulación parecen ser una de las soluciones de futuro para ayudar a manejar los cultivos, pues, al ser una herramienta única, permiten estudiar los principales factores de producción y adaptar los parámetros a cada caso. El modelo GOSSYM es un modelo mecanista, creado en 1983 en la agricultura norteamericana, que simula el crecimiento y desarrollo diarios de un cultivo de algodón. En función de los datos suministrados, un subsistema calcula la producción de material asimilado y otro subsistema su demanda potencial. El modelo GOSSYM efectúa una simulación de la parcela y el sistema experto asociado, COMAX, proporciona las recomendaciones óptimas en base a hipótesis climáticas con objeto de minimizar el estrés (corrección de un estrés hídrico o nitrogenado y utilización de reguladores de crecimiento) para intervenciones en el cultivo que respondan a los objetivos de producción y las exigencias agroclimáticas. El agricultor obtiene previsiones de crecimiento, una estimación del rendimiento y los estados fisiológicos de la planta, etc. También puede definir la mejor estrategia para la siguiente temporada (previsión de rotación, densidades de plantación y riego en función de las características de las diferentes parcelas). Actualmente, el sistema GOSSYM-COMAX funciona en el entorno gráfico Windows y también existe una versión Fortran para DOS. Se está realizando una adaptación de GOSSYM a las condiciones de cultivo algodonnero en región tropical, pues los contextos agroclimáticos y los problemas de cultivo, diferentes de la agricultura estadounidense, requieren modificar el modelo.

Palabras clave: algodón, modelo mecanista, GOSSYM, COMAX, crecimiento, desarrollo, técnica de cultivo, Estados Unidos.