

Vers un Jumeau Numérique de la production de tomate sous serre :

Intégration multi-modèles et adaptation dynamique de l'échelle

Nattida Juewong¹, Julie Bourbeillon¹, Etienne Chantoiseau², Rémi Gardet¹, Gerhard Buck-Sorlin¹

¹Institut Agro, Univ Angers, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, 49000 Angers, France.

²Institut Agro, EPHor, 49000, Angers, France

La production de tomate sous serre est un système complexe mettant en jeu des interactions entre le climat intérieur, le rayonnement lumineux, la physiologie des plantes, le fonctionnement des équipements et les décisions du producteur. Face aux enjeux d'optimisation des intrants (énergie, eau, fertilisants) et d'adaptation aux aléas climatiques, des outils de pilotage prédictifs et adaptatifs sont devenus indispensables. Le concept de Jumeau Numérique (JN), réplique virtuelle dynamique couplée en temps réel par des mesures terrain à un système physique réel, offre un cadre particulièrement prometteur pour répondre à ces défis.

Un JN se distingue d'une simple simulation par une alimentation en continu par des données expérimentales pour recalibrer ses paramètres, anticiper l'évolution du système et tester des scénarios de conduite dans un temps compatible avec le pilotage du système réel. Dans le contexte de production sous serre, cela implique l'intégration cohérente de plusieurs couches de modèles : comportement bioclimatique de la serre et des équipements, dynamique de croissance des plantes, et processus d'échange radiatif et gazeux à différentes échelles. C'est l'ambition du projet de long terme que nous développons, à l'interface de l'écophysiologie végétale, de la physique du bâtiment agricole et de l'informatique scientifique.

Le premier pilier est la modélisation du climat sous serre. Un modèle physique de l'enveloppe et des équipements de la serre décrit les échanges de matière (eau, air CO₂) et d'énergie entre extérieur, intérieur, cultures et équipement de gestion climatique. Ce modèle permet de prévoir à la fois les conditions microclimatiques internes à la serre et les consommations d'énergie et de matière en fonction du climat extérieur et des règles de pilotage choisis. Dans un jumeau numérique complet, ce modèle s'appuiera sur un réseau de capteurs environnementaux déployés en conditions réelles et couplés aux données météorologiques et aux consignes de chauffage et ventilation. En plus de permettre un recalage du modèle sur le système réel, les données expérimentales permettent de (re)paramétrer le modèle.

Le deuxième pilier est la représentation 3D de la plante et du couvert. Nous développons des modèles Fonctionnels-Structuraux (FSPM) de la tomate dans l'environnement GroIMP, simulant l'architecture 3D en lien avec la physiologie (photosynthèse, transport de carbone, dynamique source-puits), couplé à un lanceur de rayons pour calculer l'interception lumineuse à l'échelle de l'organe. L'objectif est de pouvoir nourrir en continu le modèle, ici par un phénotypage automatique des plantes, afin de vérifier leur bon développement, décider d'opération culturale, et le cas échéant de modifier les règles de pilotage de la serre.

L'un des verrous centraux de ces deux piliers concerne le choix de la bonne échelle spatiotemporelle de modélisation et de simulation. Selon la finalité, le temps de calcul, et les données disponibles, la complexité des modèles doit être adaptée afin d'avoir

le résultat le plus précis possible dans le temps disponible. Pour une plante densément instrumentée sans contrainte forte sur le temps de calcul, un modèle mécaniste de photosynthèse couplé à la conductance stomatique (type Farquhar-von Caemmerer-Berry) sera pertinent. En contexte plus contraint sur le temps, avec peu de mesures disponibles, on privilégiera des approches agrégées et/ou plus empiriques (loi de Beer-Lambert pour le rayonnement, ratio de biomasse fixé par unité de rayonnement journalier). Cette adaptation de l'échelle, potentiellement dynamique, pilotée par la disponibilité des données, constitue une originalité forte de notre approche.

La formalisation de l'adaptation de l'échelle de représentation des phénomènes est adressée par le troisième pilier de notre projet, centré sur la structuration formelle des connaissances. Face à la multiplicité et la complexité des modèles mobilisés et trouvés dans la littérature, des ontologies de référence (Plant Ontology, Crop Ontology...) sont mobilisées afin de mettre en relation les modèles par leurs entrées-sorties, leurs échelles de représentation, les paramètres qu'ils utilisent... L'objectif est de pouvoir dans un premier temps juger et s'assurer de l'interopérabilité sémantique entre modèles d'origine différente. À terme, il s'agira de formaliser les conditions et les opérations nécessaires pour remplacer un modèle par un autre dans le JN selon les besoins opérationnels.

Cette présentation illustrera l'avancement des différents projets (modélisation fonctionnelle structurale, climatique sous serre, phénotypage et informatique scientifique) qui convergent vers la formalisation d'un outil de décision robuste et évolutif, au service d'une production de tomate plus durable et résiliente.

Mots-clés : ontologies, modélisation multi-échelle, FSPM, photosynthèse, phénotypage automatique