



Projet Magestan : l'intégration d'outils numériques dans le secteur de la production maraîchère sous serre



E. Brajeul
V. Truffault

Ctifl

Plan

- Contexte professionnel : [Interfel – Ctifl](#)
- Contexte économique et attentes sociétales
- Contexte technique
- Modèles cognitifs et simulation numérique
- Projet Magestan : [vers une application des technologies numériques pour le pilotage](#)
- Conclusions-Perspectives

Interfel et Ctifl

Interfel : **interprofession de la filière Fruits et Légumes frais**

- accords interprofessionnels – mise en place de règles dans la filière
- communication collective sur les Fruits et Légumes : ex « 5 F&L par jour »
- définition des orientations stratégiques de recherche/développement



Ctifl : **institut technique de la filière Fruits et Légumes Frais**

- mise en œuvre du plan d'action interprofessionnel
- diffusion d'informations – formation des différents acteurs de la filière
- 260 personnes, maj. ingénieurs et techniciens
- siège parisien + 4 centres d'expérimentation
- centre de Carquefou (Nantes – 44) : **compartiments expérimentaux de serre chauffée pour la production de légumes hors sol**



Contexte économique et attentes consommateurs

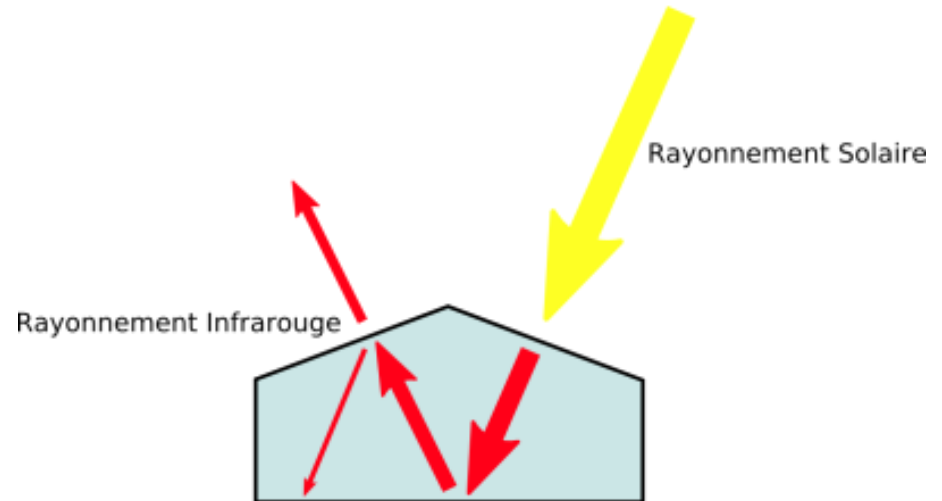
- 80-90 % de la production française de tomates/concombres : **environ 1200 ha de serres hors sol chauffées en France**
- 1 ha de serre : **invest.** : 1 million d'€ ; **fonct.** : ~ 500 000 € / ha / an
- Des producteurs dynamiques qui investissent pour renouveler et moderniser leur outil
- Une production totale (tomate, concombre) qui ne couvre pas la consommation française
- Des consommateurs qui ne rejettent globalement pas ce système
- Pas d'opposition *a priori* entre intensification et durabilité
- ➔ Conditions d'acceptabilité : **respect de l'environnement, amélioration de la qualité (gustative, nutritionnelle, sanitaire), optimisation des conditions de travail**
- ➔ Croisée des chemins en termes d'innovations technologiques
- ➔ En particulier : **pilotage automatisé du process de la serre**

Contexte technique



De l'utilité de l'effet de serre

- Le verre est transparent à la lumière visible, pas aux rayonnements infrarouges longs
- laisse entrer la lumière du soleil qui chauffe le milieu intérieur
- arrête les infrarouges longs émis par ce milieu intérieur chaud. Piégés dans la serre, cela augmente la température intérieure



L'effet de serre réchauffe le milieu intérieur

De l'utilité d'une serre chauffée hors sol

■ Un milieu confiné

- Protection face à la pluie et au vent
- Protection face aux bioagresseurs extérieurs (insectes, ...)
- Protection face à la pollution

■ Une serre chauffée

- Allongement du calendrier = Production toute l'année
- Indépendance vis-à-vis des aléas climatiques (gel, froid)
- Meilleure gestion de l'hygrométrie
- Meilleure gestion du climat de nuit

■ Une culture hors sol = Culture sur substrat

- Limite les maladies telluriques
- Evite l'appauvrissement des sols
- Meilleure gestion de l'eau et des fertilisants (+ goutte à goutte et recyclage)



**Une culture 10 mois sur 12 d'espèces végétales dont l'origine est tropicale (tomates, concombres, ...)
avec une efficacité maximale**

Exemples de serre verre et plastique

Du revêtement plastique à la serre verre





La serre verre hors sol
chauffée pour la tomate et
le concombre



a. Des équipements bien spécifiques

Ballon de stockage d'eau chaude

Chaudière biomasse



Cogénération

Pad-Fan



b. Des équipements bien spécifiques



Relocalisation
du réseau de
chauffage

Ecran thermiques / d'ombrage



Brasseurs d'air





De l'innovation pour produire sous serre

- Dans l'objectif d'optimiser l'efficacité de chacun des intrants, de limiter leurs déperditions / fuites et d'améliorer la qualité des fruits
 - Lumière, température
 - Dioxyde de carbone
 - Eau, fertilisants
 - Traitements phytosanitaires
 - Main d'œuvre

- Un potentiel d'optimisation important avec comme solutions d'innovation :
 - A. L'innovation par la technologie des équipements
 - B. Les progrès génétiques
 - C. Le pilotage à partir d'outils de simulation numériques



A. L'innovation par la technologie des équipements



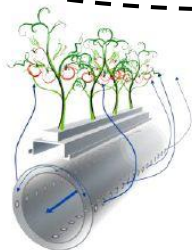
Température
de nuit

- Les écrans thermiques
- La déshumidification
- L'éclairage
- Les serres semi-fermées

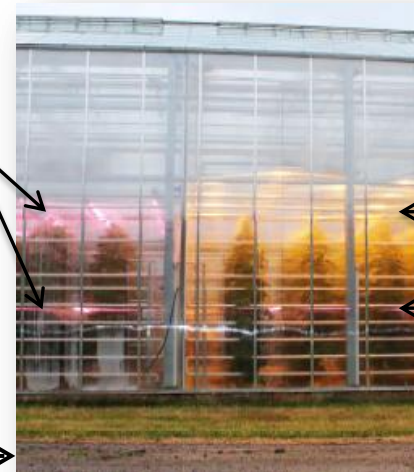
Hygrométrie,
maîtrise sanitaire

Photopériode
Photomorphogénèse

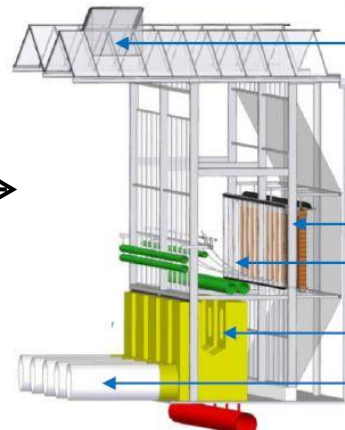
Température,
CO₂, ...



LED en tête de
plante et en
inter-rang



HPS en tête de
plante
LED en inter-
rang



Nombre réduit d'ouvrants en toiture

Refroidissement par *pad cooling*

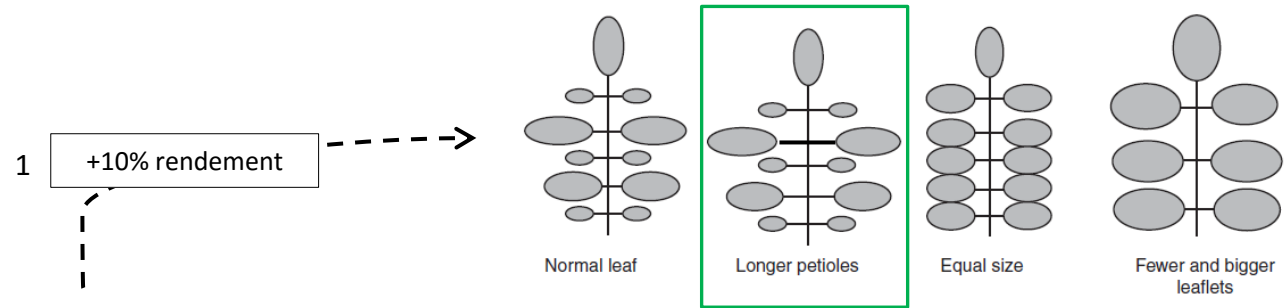
Admission d'air extérieur par un volet en paroi

Chauffage par échangeur thermique air/eau

Distribution de l'air par gaine



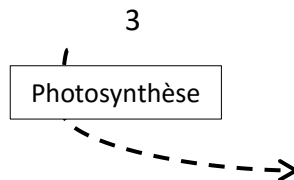
B. L'innovation par la génétique



- Architecture de plante favorisant l'interception lumineuse
- Variétés tolérantes à la lumière continue
- Meilleure affinité de la RubisCO pour le CO₂ (en compétition avec l'O₂)

2

+26% rendement



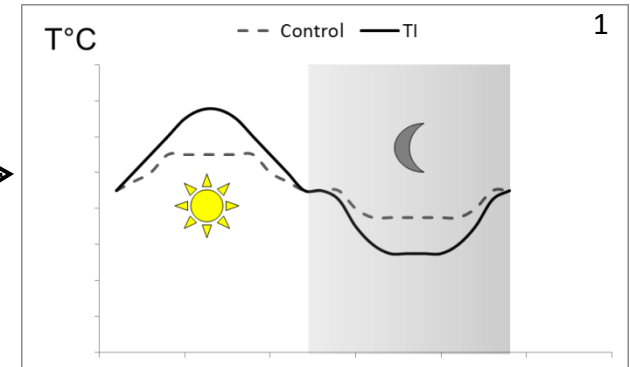
- Qualité nutritionnelle et gustative
- Variétés plus résilientes face aux aléas climatiques



C1. L'innovation par le pilotage

- Intégration de température
- Pilotage en fonction des besoins (eau, nutriments, lumière, température, etc.) de la plante

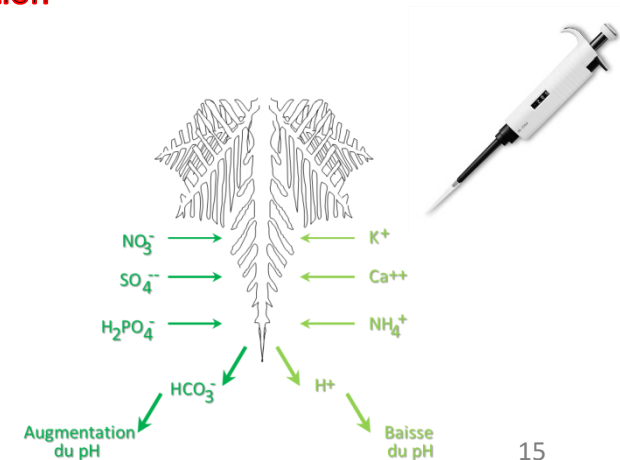
Économie d'énergie



Mais comment les évaluer ?

Des mesures hebdomadaires de croissance et d'architecture, de consommation en eau-nutriments pour un pilotage de correction

- Analyses et mesures





C2. L'innovation par le pilotage

- Pilotage en fonction des besoins (eau, nutriments, lumière, température, etc.) de la plante

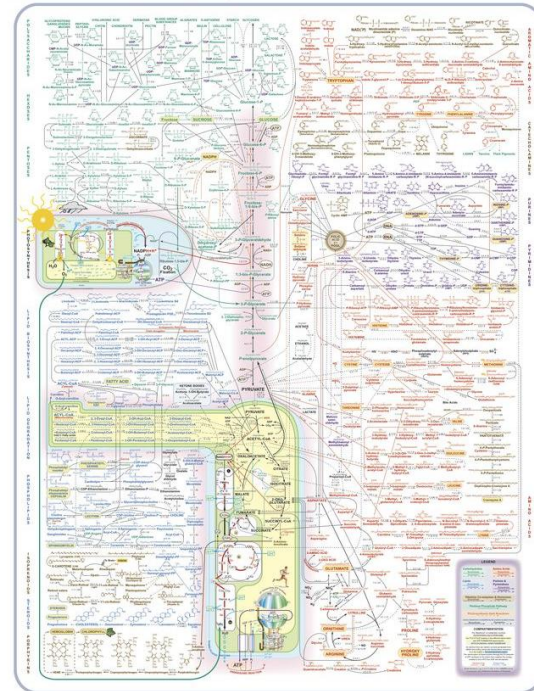
Mais comment les évaluer ?

Un pilotage de la serre par des indicateurs en temps réel

- Une nécessité de résoudre la problématique liée à la complexité de gestion des systèmes
- Des technologies disponibles :
 - Acquisition de données
 - Modélisation des systèmes de culture



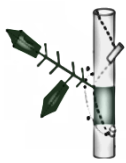
Metabolic Pathways



Les modèles

Enter





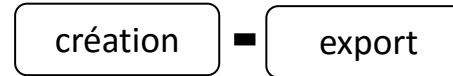
La création et répartition de la biomasse

Modèle Inra¹

La biomasse
disponible



$$\text{Cleaf}_i(t) = \text{Cleaf}_i(t-1) + \frac{\text{Photosynthesis}_i - \text{Loading}_i}{\text{Fresh Mass}_i}$$

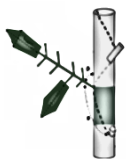


Vegetative Sink + Reproductive Sink

$$= \sum_i (\text{Loading}_i - \text{Leakage}_i + \text{ReLoading}_i)$$

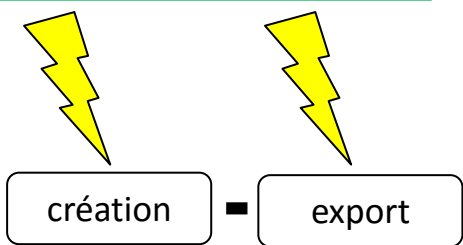
La biomasse qui est
répartie dans les organes
pour leur croissance





Environnement micro-climatique

Références: ¹Baldazzi et al., 2013



Modèle Inra¹

La biomasse disponible



$$Cleaf_i(t) = Cleaf_i(t - 1) + \frac{Photosynthesis_i - Loading_i}{Fresh Mass_i}$$

Export de la biomasse dans le phloème
(le transporteur)

1

$$Loading_i = Leaf Area_i V_{max_{leaf}} \frac{Cleaf_i}{Km_{leaf} + Cleaf_i}$$

Fuite de la biomasse depuis le phloème par
diffusion dans l'apoplasme (le voisin du
transporteur)

2

$$Leakage_i = Fresh Mass_i kC_{phloem}$$

Récupération de la biomasse depuis l'apoplasme
par transport actif

3

$$ReLoading_i = Fresh Mass_i V_{max_{storage}} \frac{Cstorage_i}{Km_{storage} + Cstorage_i}$$

Etc.



La biomasse qui est
repartie dans les organes
pour leur croissance



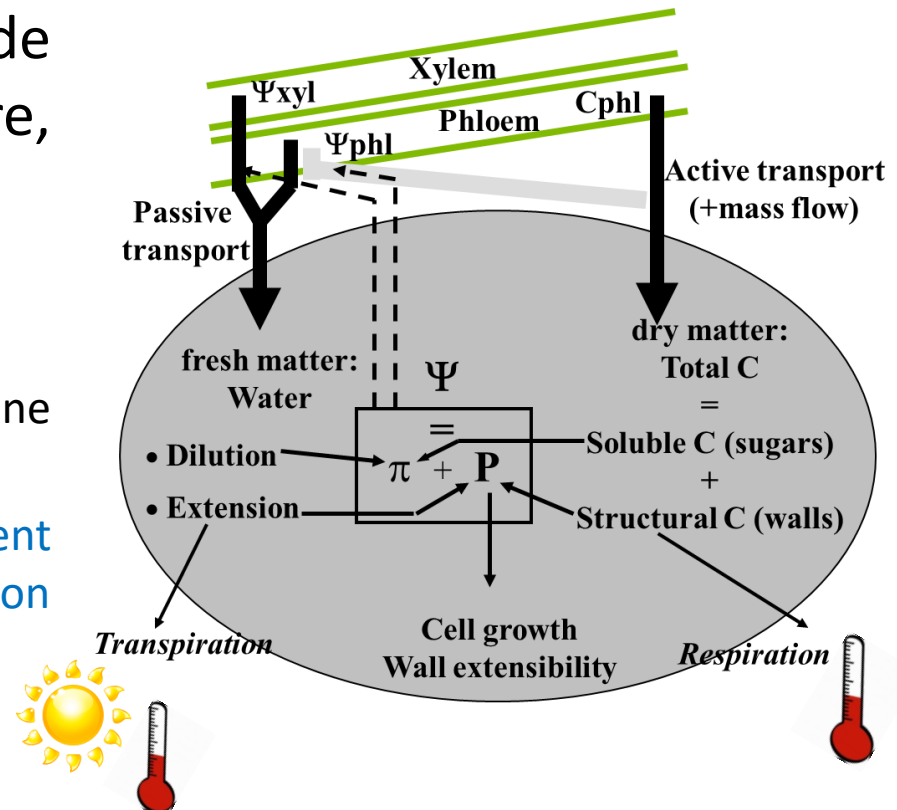
$$\begin{aligned} &Vegetative Sink + Reproductive Sink \\ &= \sum_i (Loading_i - Leakage_i + ReLoading_i) \end{aligned}$$

Un Fruit Virtuel pour la croissance du fruit

1

En fonction des paramètres de l'environnement (température, intensité lumineuse)

- Des flux d'eau et de carbone
- Le fruit est simplifié comme étant une seule et unique cellule
- D'autres modèles plus complexes intègrent en supplément les processus de division cellulaire



Un Fruit Virtuel pour l'élaboration de la qualité

1

En fonction des paramètres de l'environnement
(température, intensité lumineuse)

- Taille
- Qualité gustative (sucres-acides)
- Valeur santé (caroténoïdes, vit. C)
- Texture

Chaque processus peut être exprimé
sous la forme d'une équation

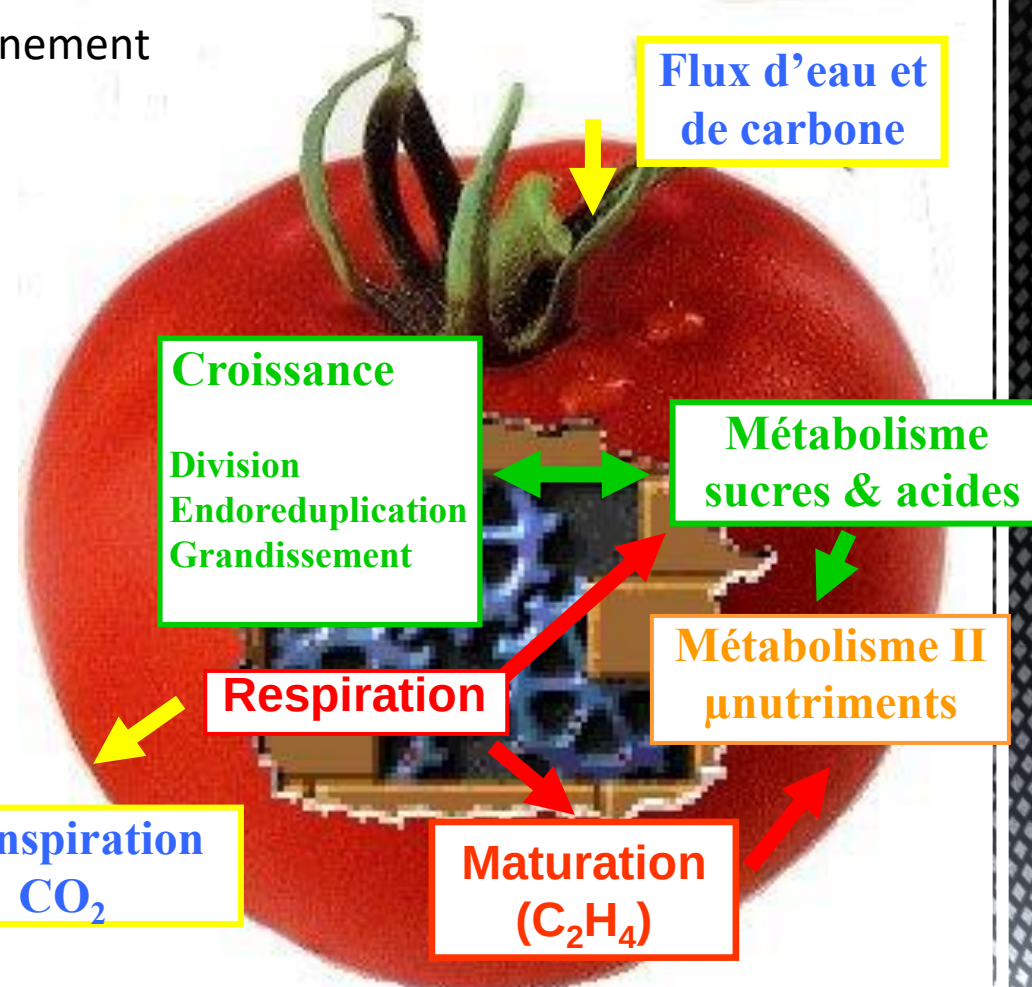
Respiration utilisée
pour la croissance du
fruit

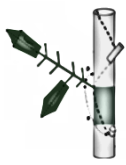
Avec ds/dt étant la
prise de poids sec du
fruit et q_g une vitesse
de croissance

Respiration du fruit :

$$R_f = q_g \frac{ds}{dt} + q_m(T)s$$

Respiration de
maintenance
Avec T étant
l'influence de la
température et
 q_m un
coefficient

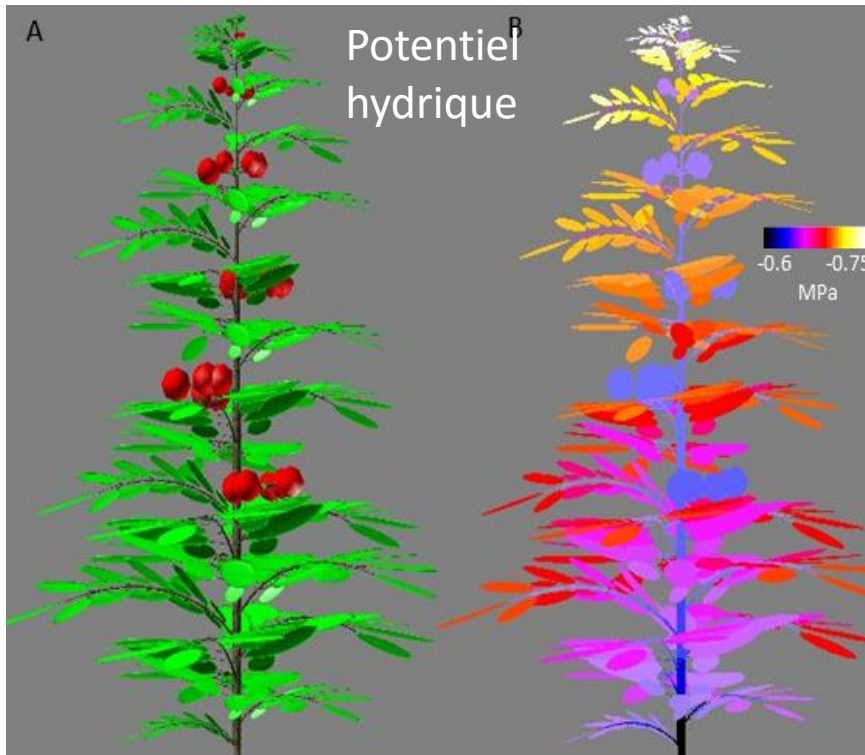




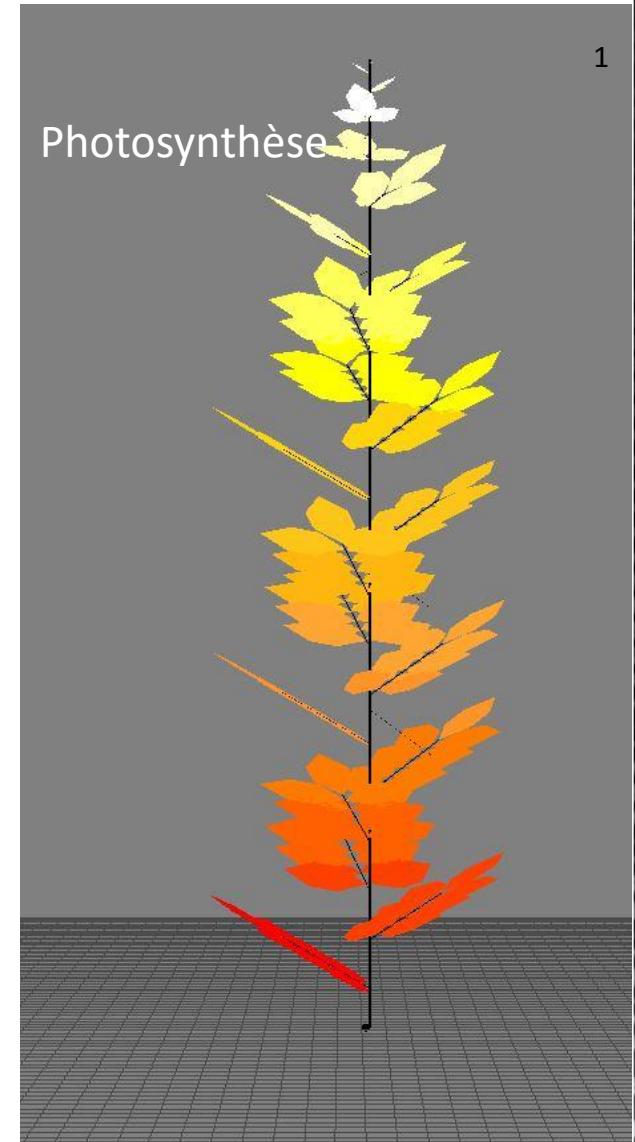
La plante en 3D

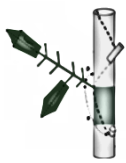
En fonction du rang de feuille et du micro-climat

- Photosynthèse
- Transfert de carbone et d'eau



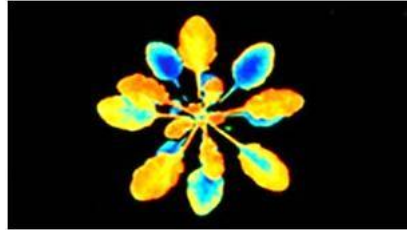
1





Les technologies de capteurs

- Imagerie (forme, couleur, stress, ...)



- Activité de plante



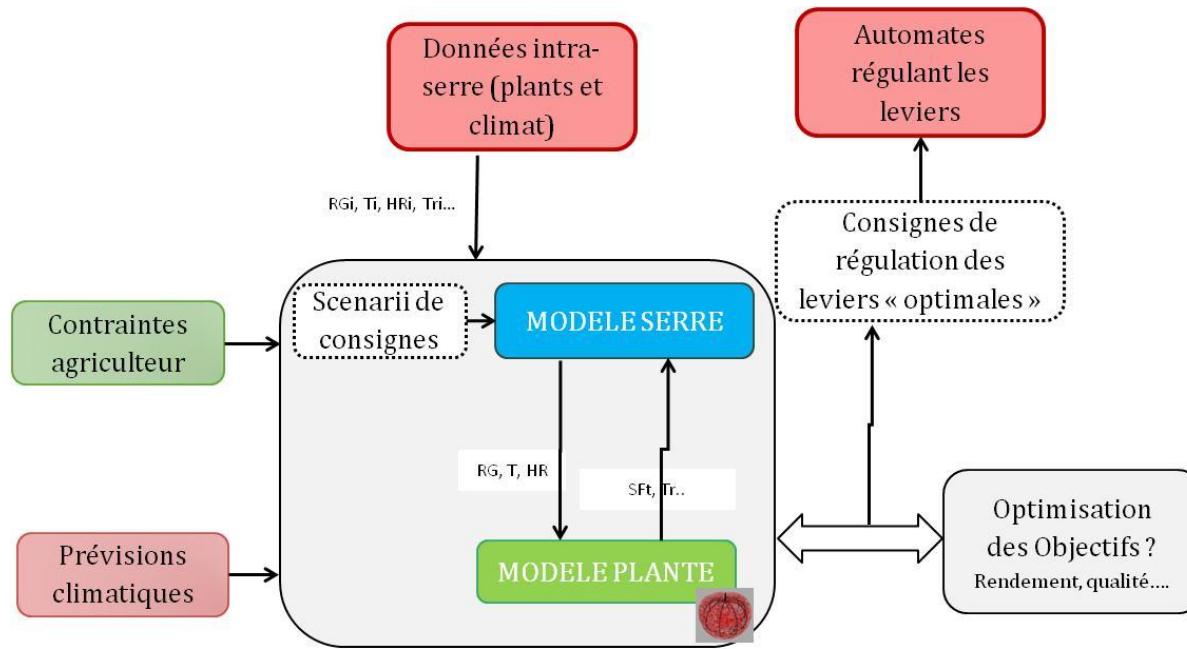
- Température d'organes



- Concentration en éléments minéraux

L'utilisation des modèles pour le pilotage de la culture

- Intégration de plusieurs modèles mécanistes simples pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement global de la plante avec des fruits
- Prise en considération des contraintes technologiques, économiques et sociétales de la production sous serre
- Le modèle de fonctionnement de la **plante** doit communiquer avec le modèle **climatique** de la serre pour simuler la performance **économique** du système



Des technologies numériques pour l'étude et la mise en place de nouveaux modes de cultures appliqués aux productions maraichères

- Application à la culture de la tomate
- Un système d'acquisition de données intégrant les technologies Internet of Things
- Des outils de modélisation exploitant ces données pour prédire le déroulement des cycles de croissance de la tomate
 - Systèmes complexes, multi-échelle/multi-agents : serre, plante, fruit
 - Simulant la qualité et la quantité
- Des techniques de pilotage basées sur la quantité et la qualité des fruits
 - Identification pour chaque variété des traits dictant les potentiels de rendement et de qualité
 - Pilotage en quasi-TR de l'environnement intra-serre basé sur le potentiel de rendement et qualité
- Des prototypes servant de preuve de concept
 - Comparateur sous serre Expert : conduite optimisée versus conduite témoin
 - Démonstrateur sous serre End User où sera mise en application la conduite optimisée

Les perspectives de la production sous serre

L'utilisation de modèles rend possible l'automatisation du pilotage de la serre en fonction des besoins de la plante en temps réel. Leur utilisation fait rentrer la production sous serre dans une nouvelle ère technologique.

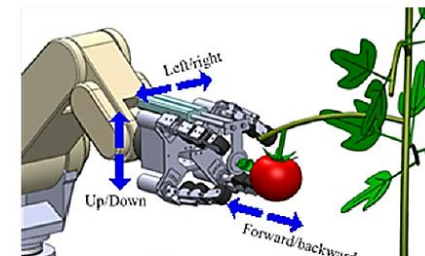
Conclusion - perspectives

- Un pilotage automatisé en temps réel → Gestion de systèmes complexes
- Des nouvelles technologies (captage CO₂, stockage chaleur, ...)

→ Tendre vers une serre autonome ----->

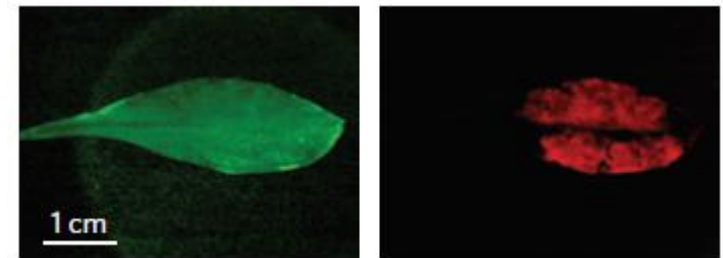
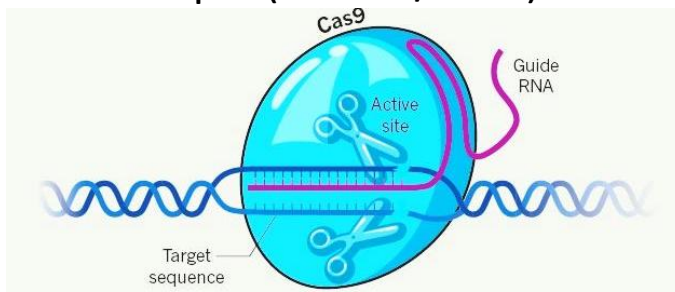
La serre produit 3 -6 fois plus d'énergie en été que ce dont elle a besoin en hiver pour être chauffée !

▪ La robotisation ----- Main d'œuvre ----->



▪ Nanotechnologie ----- +30% Photosynthèse ¹ ----->

▪ Génétique (CRISPR/Cas9) ----- Activation / inhibition d'un gène ----->



Nanotubes de carbone incorporés dans les chloroplastes



Merci pour votre attention

