



HAL
open science

Un fruit virtuel pour analyser le fonctionnement du fruit sous le contrôle de l'environnement et du génome

Nadia Bertin

► **To cite this version:**

Nadia Bertin. Un fruit virtuel pour analyser le fonctionnement du fruit sous le contrôle de l'environnement et du génome. Colloque ENS Modélisation multi-échelle des Plantes, Nov 2013, Lyon, France. 37 p. hal-02810652

HAL Id: hal-02810652

<https://hal.inrae.fr/hal-02810652>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Un fruit virtuel pour analyser le fonctionnement du fruit sous le contrôle de l'environnement et du génome



Un Fruit Virtuel pour

- **Comprendre le fonctionnement du fruit tout en synthétisant nos connaissances**
- **Hiérarchiser les processus impliqués dans la qualité** (Quels processus influent sur la qualité? Comment sont-ils régulés?)
et analyser leurs interactions
- **Produire des outils utiles pour l'analyse des contrôles environnementaux, agronomiques & génétiques de la qualité**
- **Concevoir des idéotypes (multi-performances)**

Fruit

Systeme complexe

- thermodynamiquement ouvert (échanges avec l'environnement)
- composés d'un grand nombre de processus ayant des caractéristiques variées qui interagissent entre eux avec des boucles de rétroaction
- des interactions fortes entre les variables qui pilotent le système

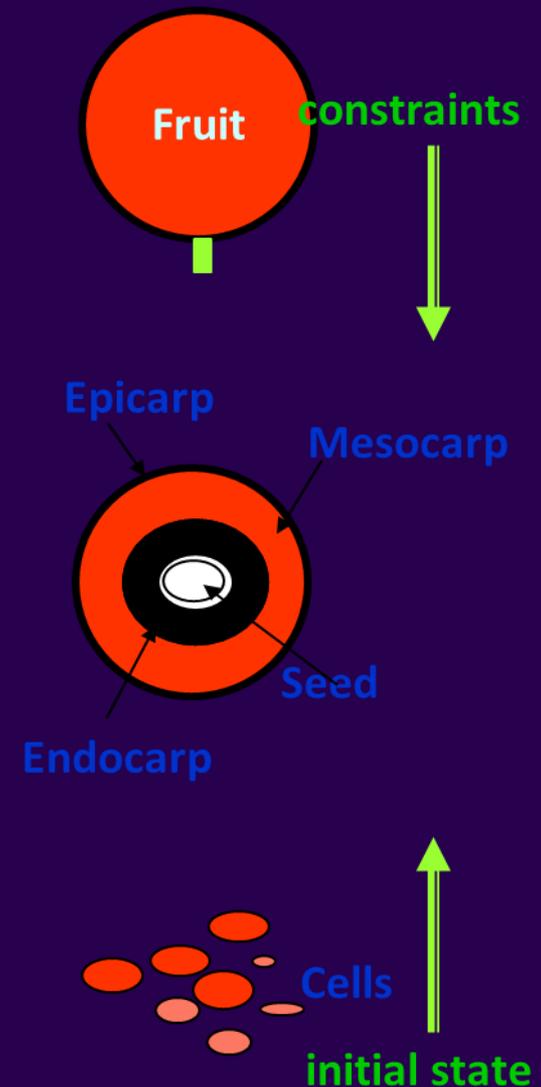
Analyser le fonctionnement du fruit nécessite une approche systémique

Modélisation  **Expérimentation**

Approche de modélisation

- Bottom-up : du gène à la cellule
- Top-down : connecte les performances aux contrôles
- Middle-out : combinaison des deux

hierarchical approach



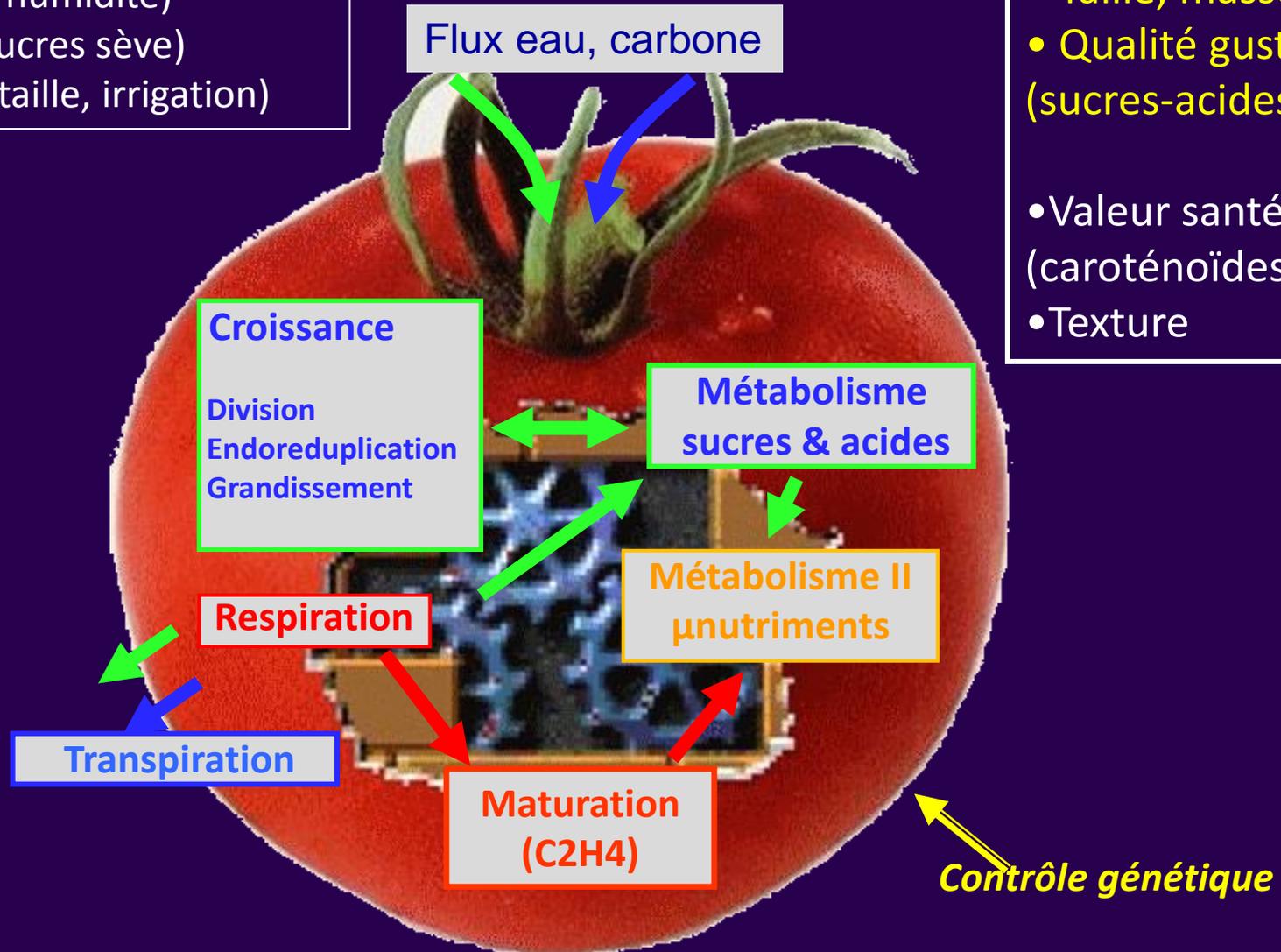
Fruit Virtuel: plateforme de couplage

Variables d'entrée

- climat (T° , humidité)
- plant (Ψ , sucres sève)
- pratiques (taille, irrigation)

Variables simulées

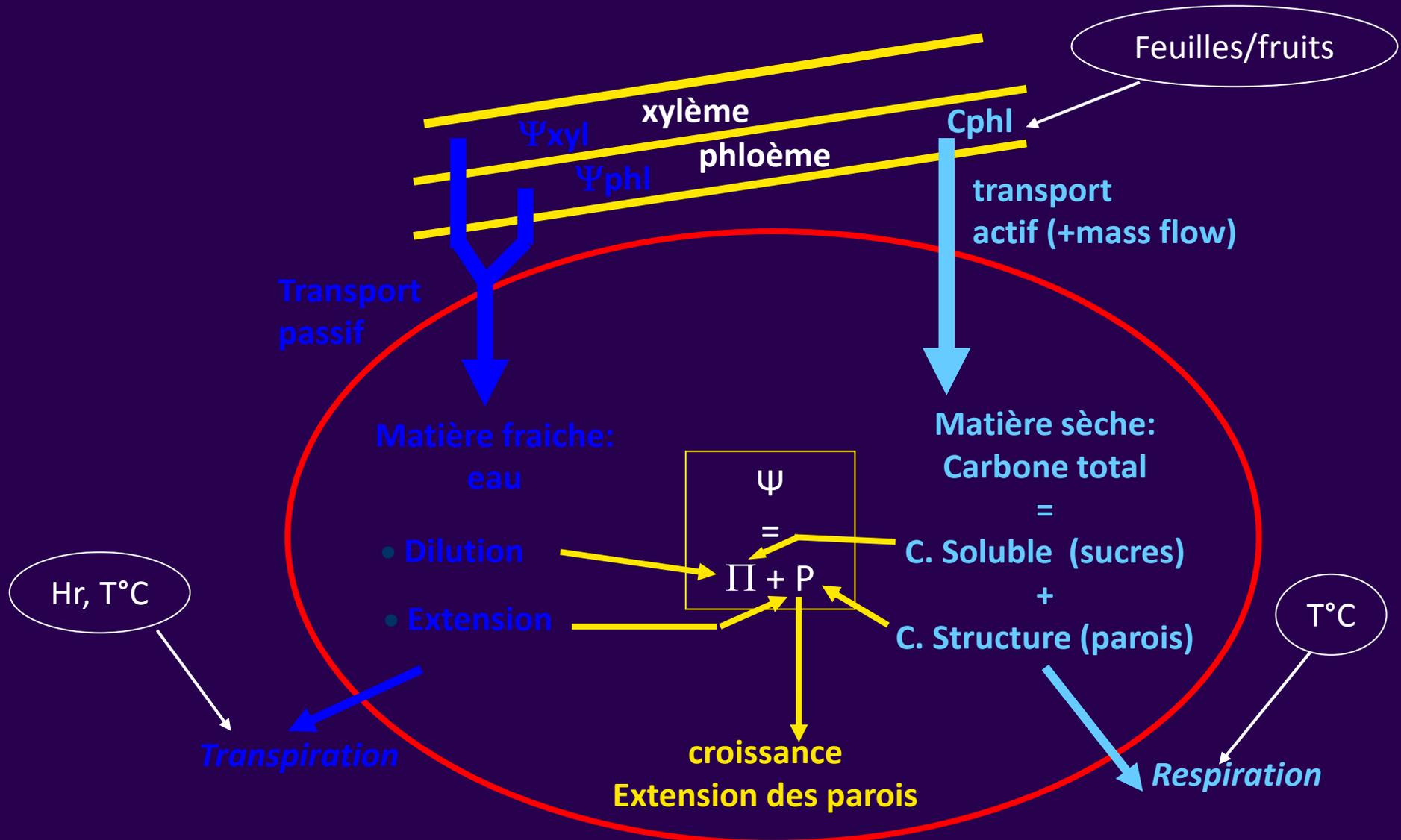
- Taille, masse
- Qualité gustative (sucres-acides)
- Valeur santé (caroténoïdes, vit. C)
- Texture



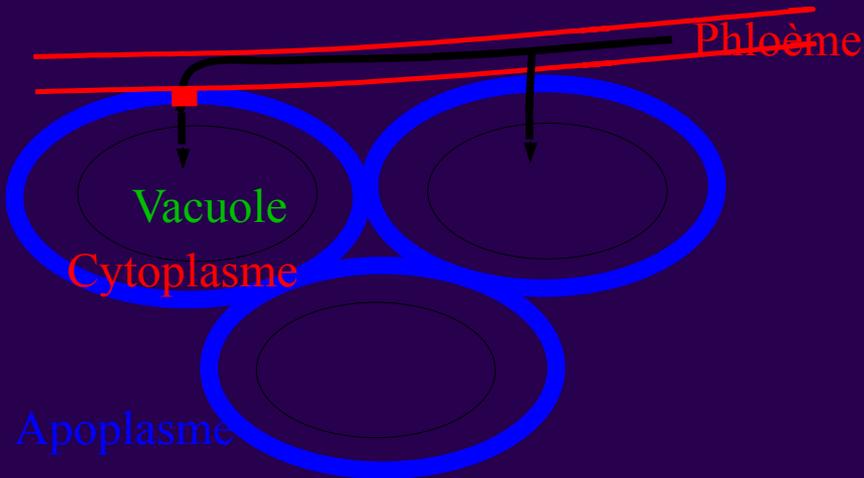
Fruit Virtuel

- ▶ **1. Présentation de quelques sous-modèles (grandissement, sucres)**
- ▶ **2. Fruit virtuel et génétique**
- ▶ **3. Un fruit virtuel pour explorer la complexité et rechercher des idéotypes**
- ▶ **4. Evolution du Fruit Virtuel: vers la biologie intégrative**

Modèles de croissance du fruit



Modèles de croissance du fruit



Flux de carbone

$$dMS/dt = FluxS - Rf + (Phot)$$

FluxS = flux de déchargement en sucres
 Rf = respiration du fruit
 Phot = photosynthèse (~ 0)

$$FluxS = \underbrace{\frac{s \times v_m \times C_{phl}}{(K_M + C_{phl})}}_{\text{Active transport}} + \underbrace{(1 - \sigma_p) C_s Flux_{phl}}_{\text{Mass flow}} + \underbrace{A_p p_s (C_{phl} - C_{fruit})}_{\text{Passive diffusion}}$$

σ_p Coefficient de réflexion membranaire des sucres

p_s = perméabilité aux sucres

$Flux_{phl}$ = eau phloème (85% de l'eau importée dans le fruit de tomate)

C concentrations en sucres

A_p surface d'échanges

Modèles de croissance du fruit

Flux d'eau

$$dEau/dt = F_{xyl} + F_{phl} - T_f$$

F_{xyl} = flux xylémien

F_{phl} = flux phloémien

T_f = transpiration du fruit

$$F_{xyl} = A_x L_x [\psi_{xyl} - \psi_{fr}]$$

L_x = perméabilité hydraulique de la surface traversée A_x

$$F_{phl} = A_p L_p [P_{phl} - P_{fr} - \sigma_p (\pi_{phl} - \pi_{fr})]$$

L_p = perméabilité hydraulique de la surface traversée A_p

$$T_f = Surf \alpha \rho (H_f - H_a)$$

$Surf$ = surface du fruit

ρ = perméabilité du fruit à la vapeur d'eau
 $\alpha = M_{H_2O}^* P / RT$, avec P = pression de vapeur saturante

Modèles de croissance du fruit

Theory of cell expansion

Irreversible PLASTIC variations in volume (Lockart 1965)

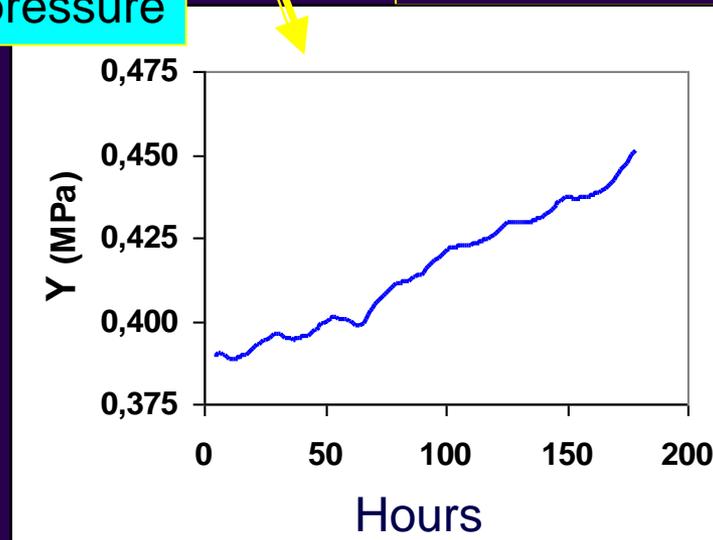
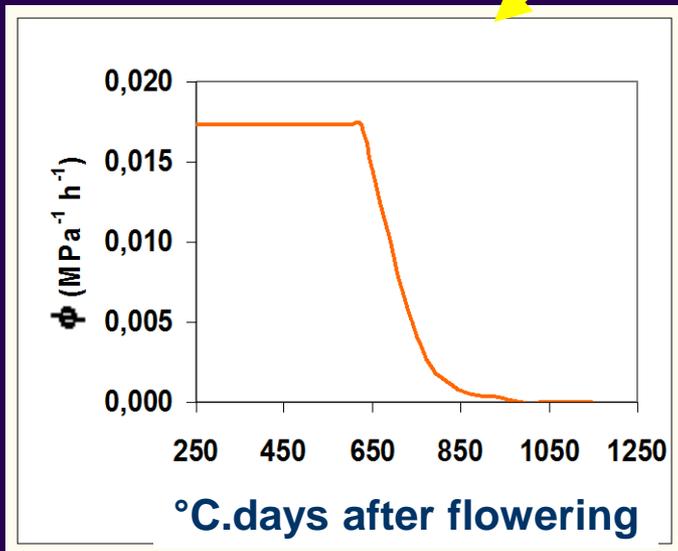
Short-term reversible ELASTIC Variations

$$dV/dt = \phi \cdot V \cdot (P_f - Y)$$

$$+ (1 / \epsilon) \cdot V \cdot (dP_f / dt)$$

Turgor pressure

Volumetric elastic modulus

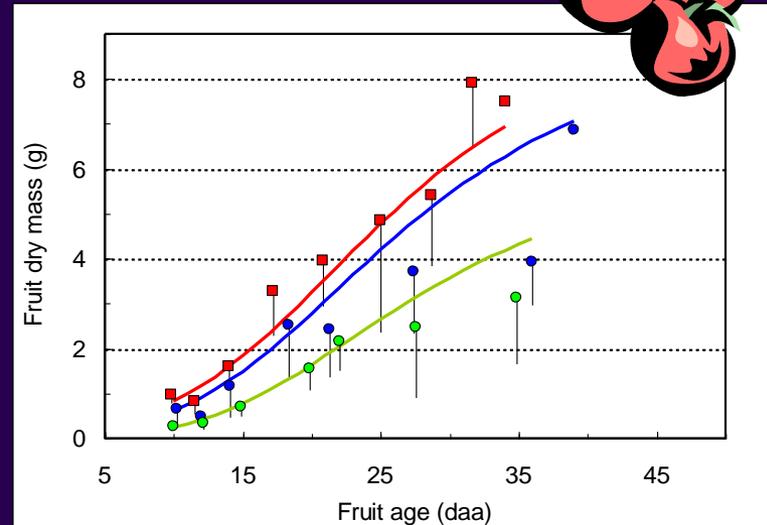
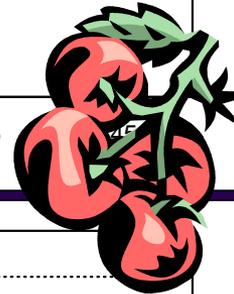
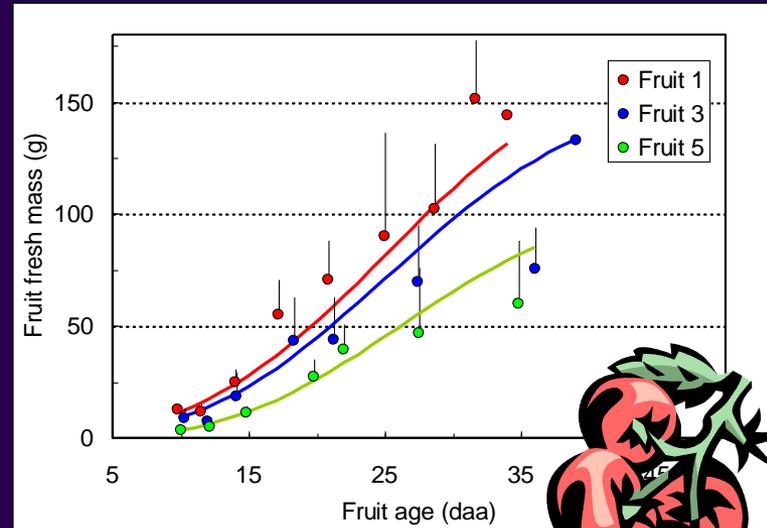
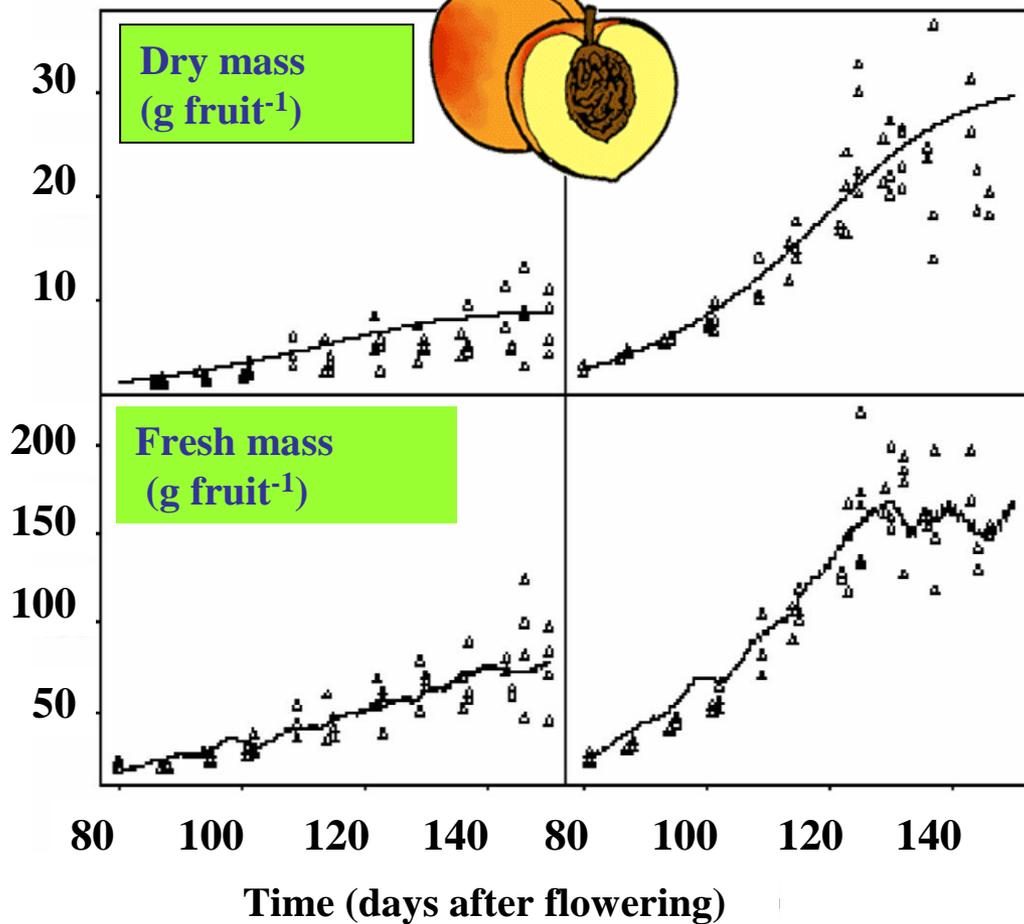
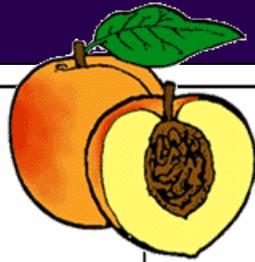


Mangue
Léchaudel et al. 2007.
Tree Physiol.

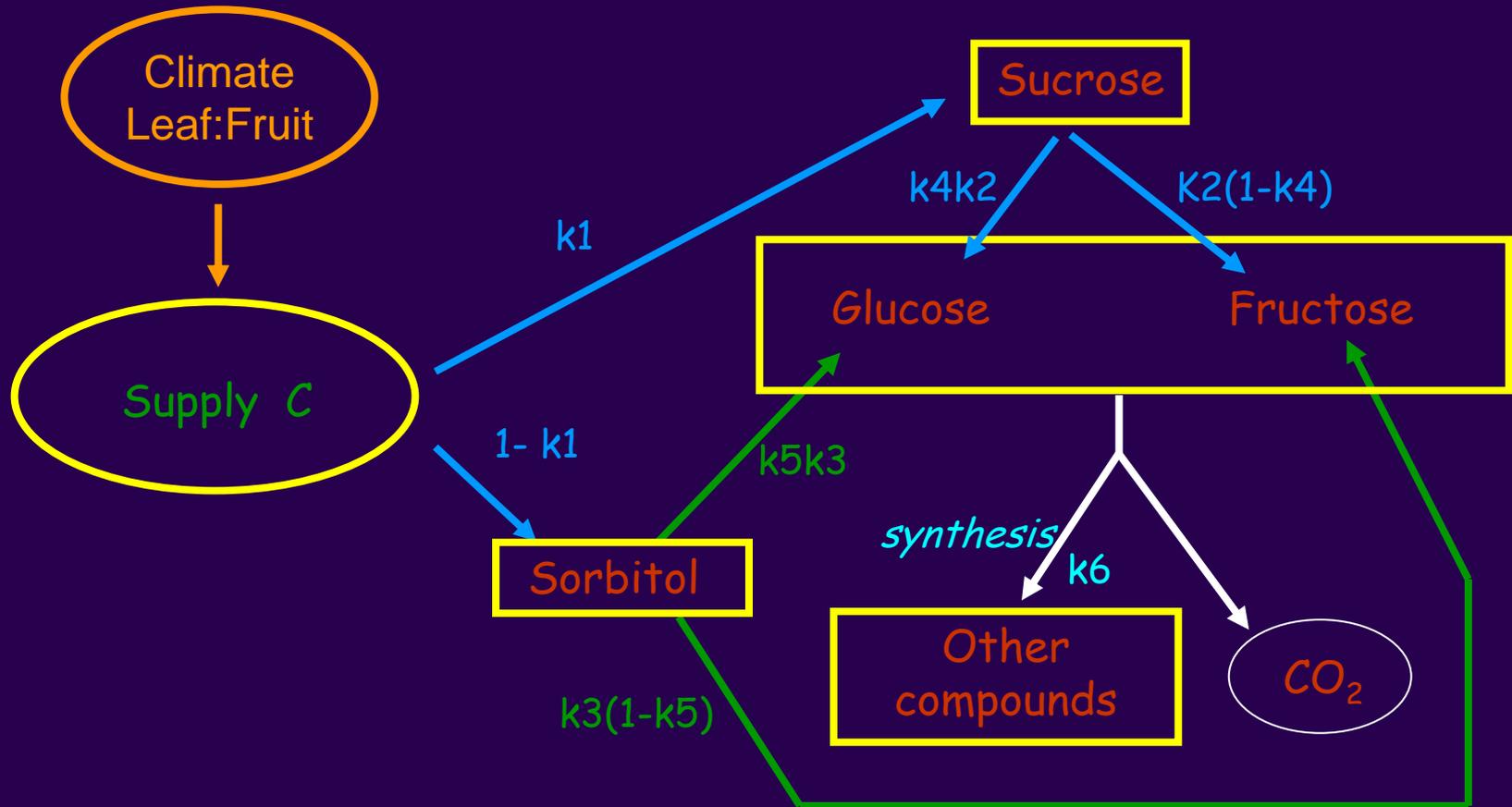
Modèle générique: pêche, tomate, mangue, kiwi, raisin

6 fruits

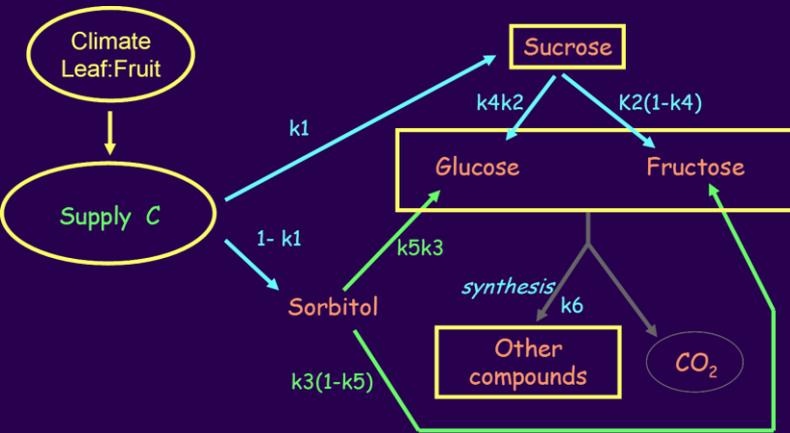
1 fruit



Modéliser la composition en sucres du fruit



Modéliser la composition en sucres du fruit



A set of differential equations

$$\frac{dC_{su}}{dt} = k_1 \frac{dC_{ph}}{dt} - k_2(t) C_{su}$$

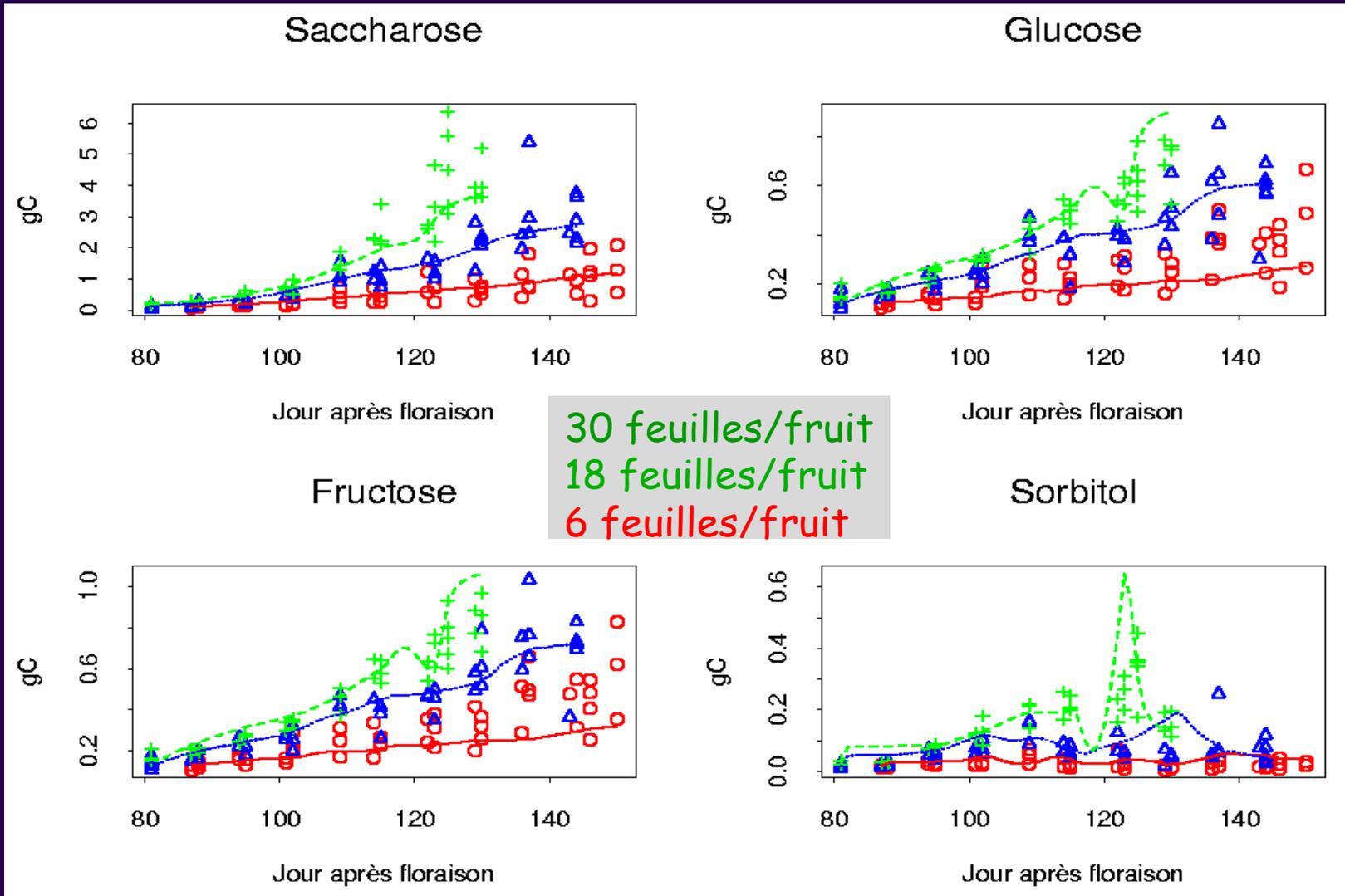
$$\frac{dC_{so}}{dt} = (1 - k_1) \frac{dC_{ph}}{dt} - k_3(t) C_{so}$$

$$\frac{dC_g}{dt} = k_4 k_2(t) C_{su} + k_5 k_3(t) C_{so} - k_6(t) C_g - \frac{C_g}{C_g + C_f} \times \frac{dC_r}{dt}$$

$$\frac{dC_f}{dt} = (1 - k_4) k_2(t) C_{su} + (1 - k_5) k_3(t) C_{so} - k_6(t) C_f - \frac{C_f}{C_g + C_f} \times \frac{dC_r}{dt}$$

$$\frac{dC_r}{dt} = g_c \frac{dDM}{dt} + q_m Q_{10}^{(temp-20)}$$

Modéliser la composition en sucres du fruit

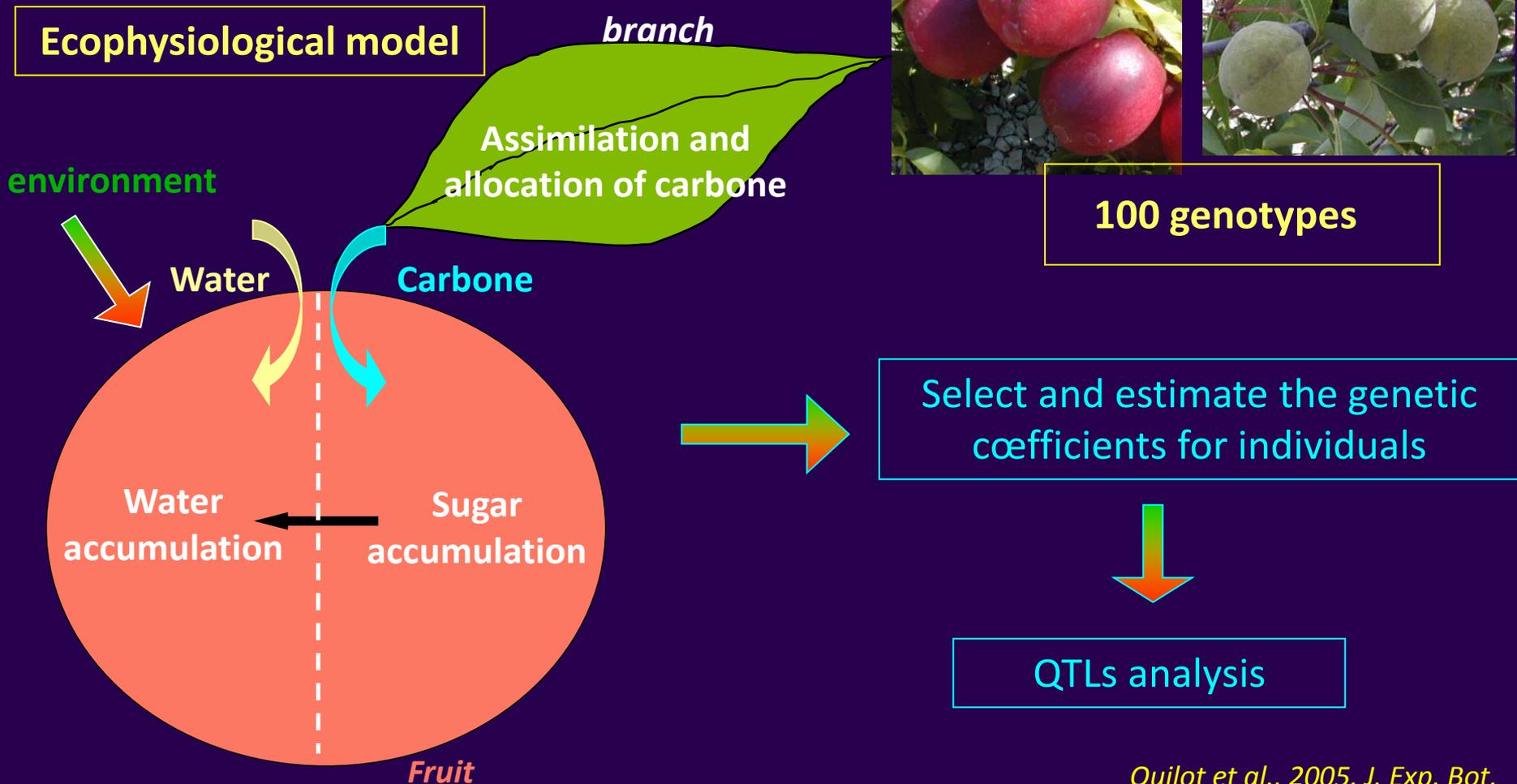


Fruit Virtuel

Fruit virtuel et génétique

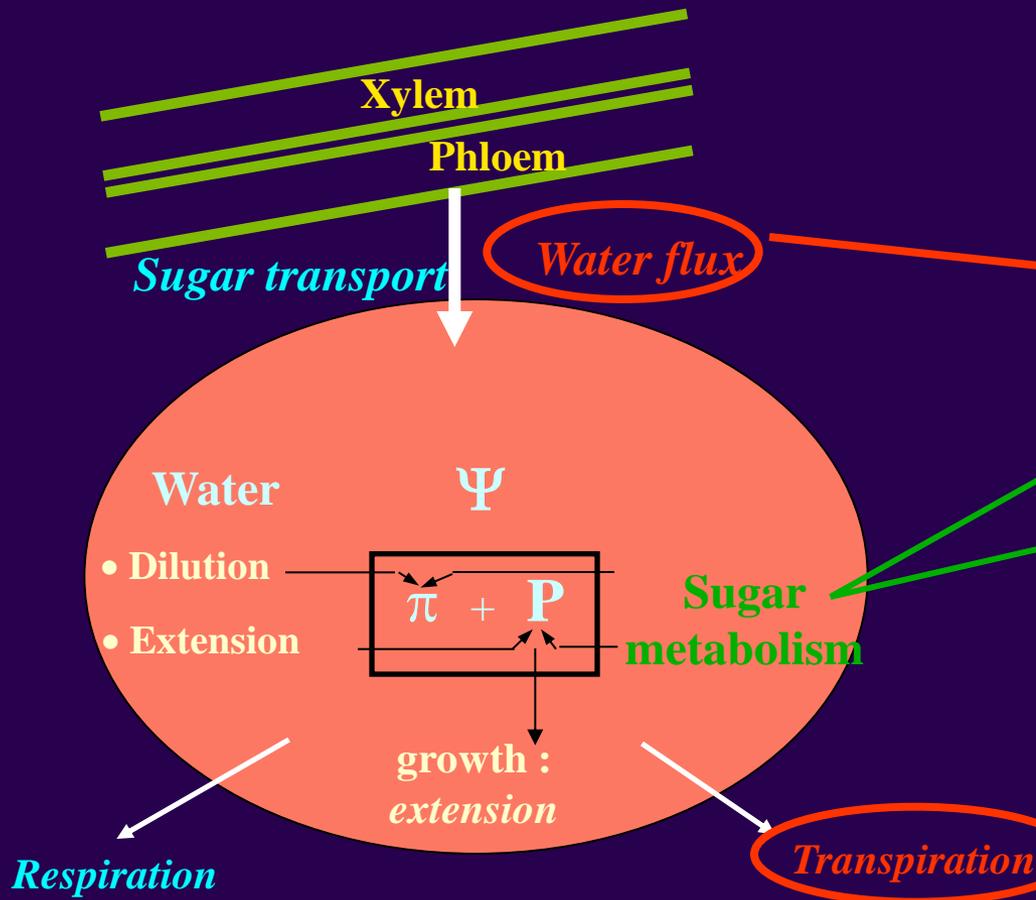
Fruit virtuel et génétique (pêche)

QTL-based model

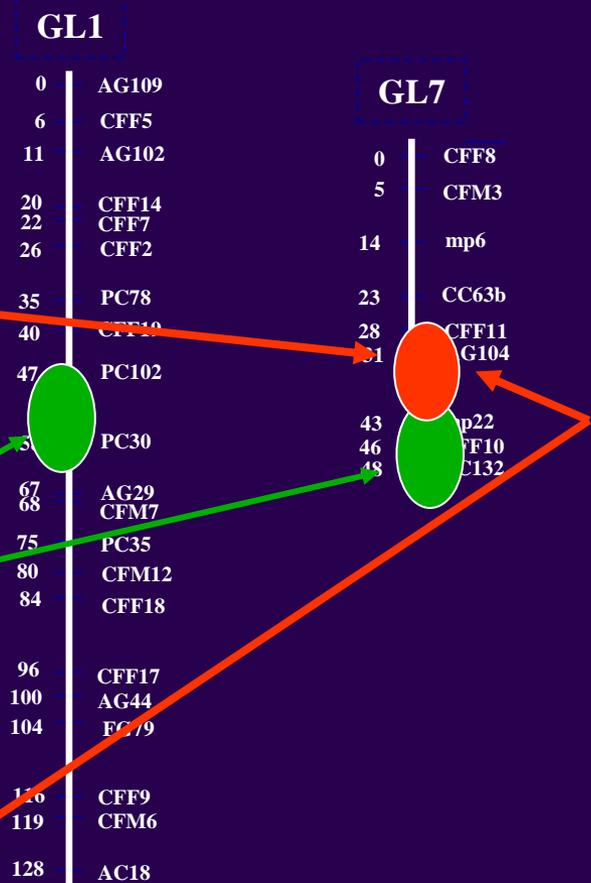


Fruit virtuel et génétique (pêche)

Model of water and sugar accumulation



Genetic map QTL-analysis



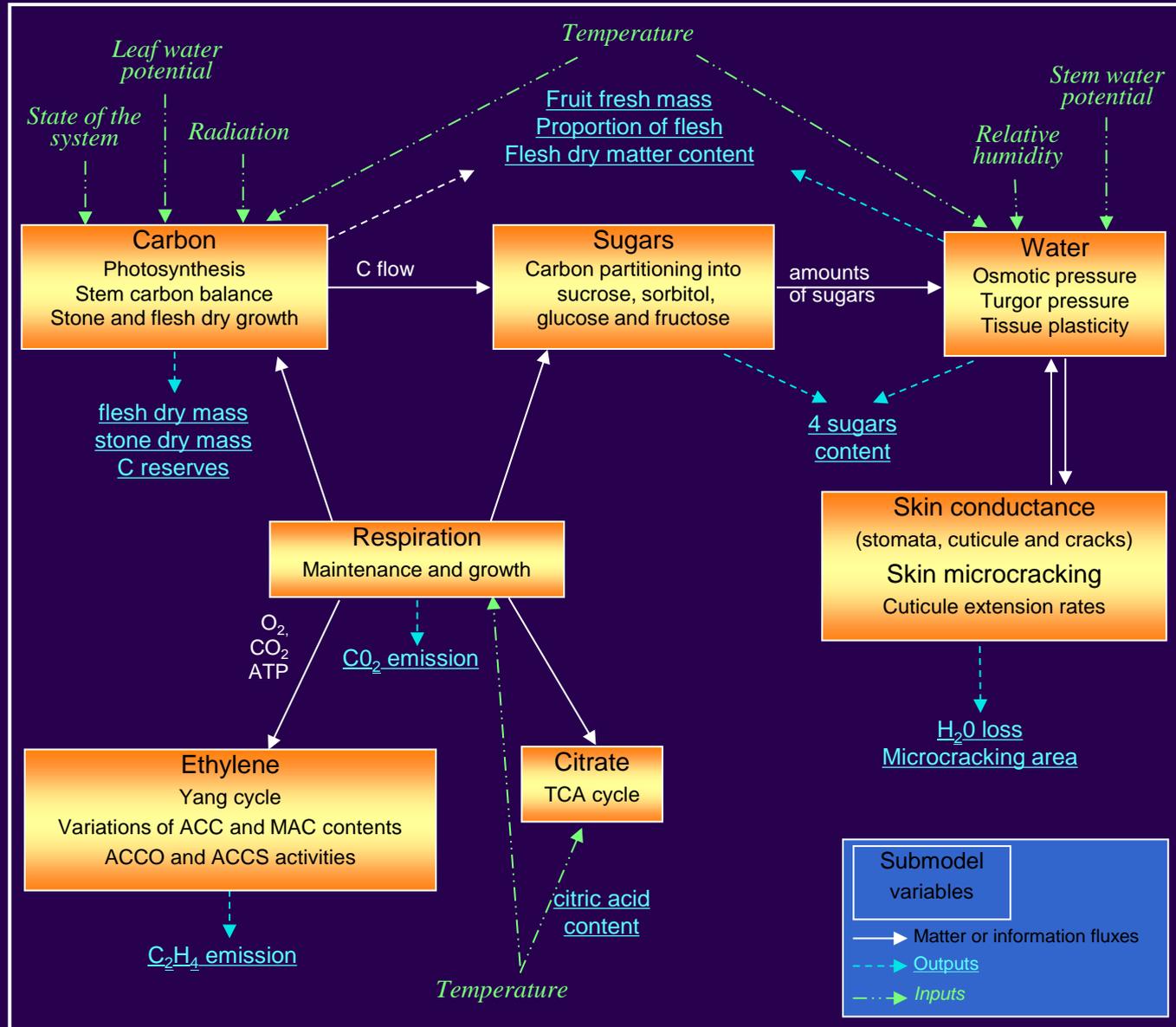
Fruit virtuel et génétique (pêche)

- **Analyse du contrôle génétique en termes de processus**
- **Accroît la stabilité des QTL et leur héritabilité**
- **Prédiction de jeux de paramètres dont les valeurs dépendent des combinaisons alléliques**
- **Prédiction de génotypes virtuels dans différents environnements → support à la sélection**
- **Travail expérimental lourd et difficile à valider**

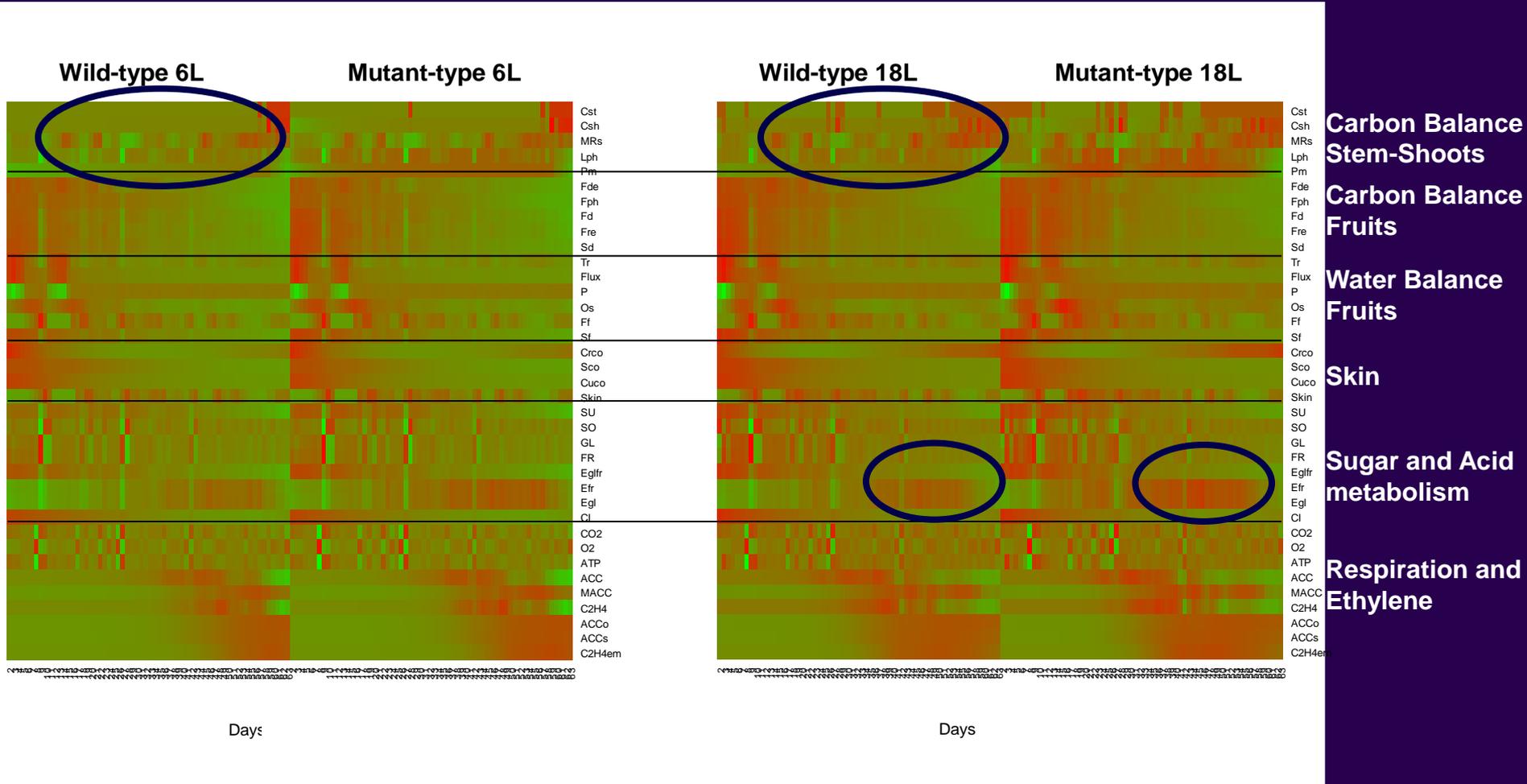
Fruit Virtuel

Un fruit virtuel pour explorer la
complexité et rechercher des
idéotypes

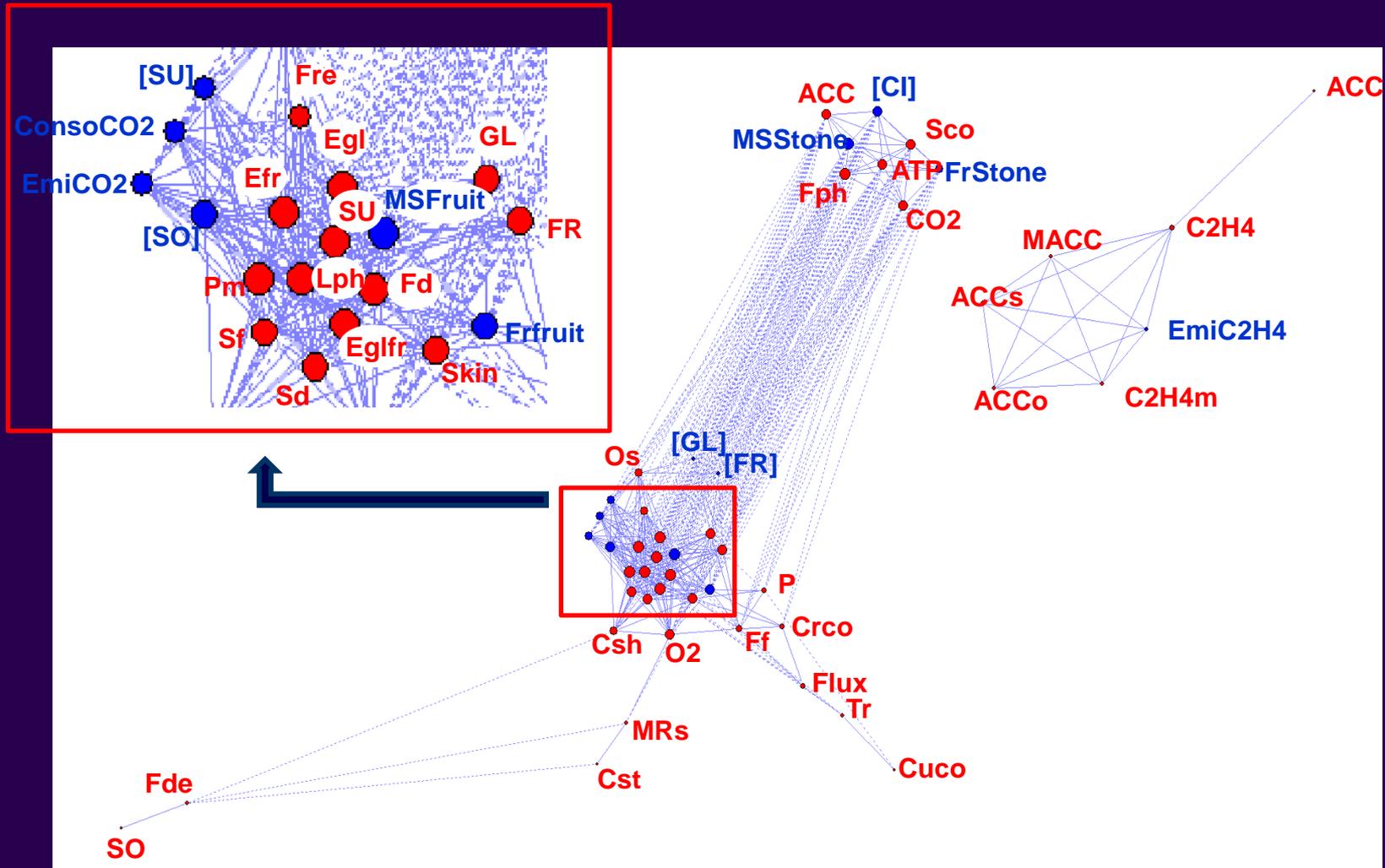
Intégration des processus



Effet du nombre de feuilles et de l'utilisation des réserves foliaires

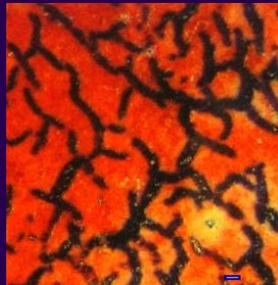


Un réseau de corrélations: propriété émergente du Fruit Virtuel

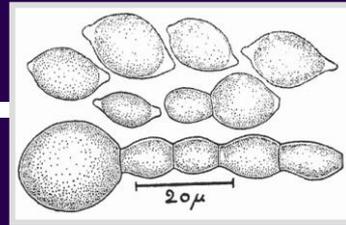


Recherche d'idéotypes

Les caractères ciblés



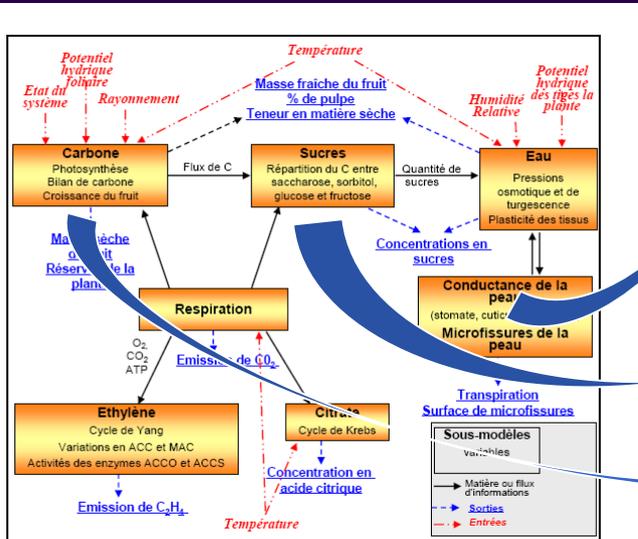
cuticular cracks



Monilinia laxa



Fruit virtuel



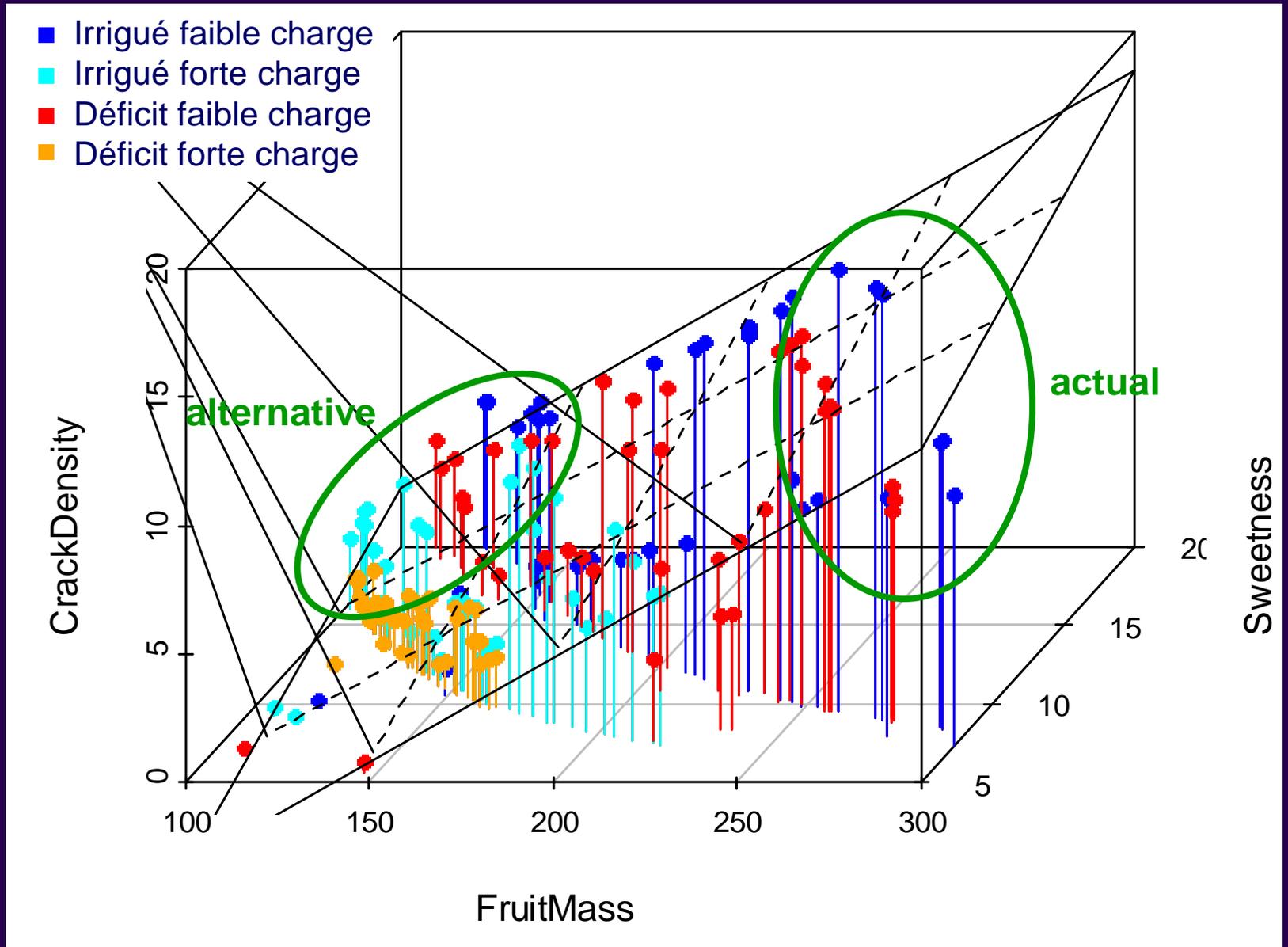
Sensibilité

Sucres

Masse du fruit

- Irrigué faible charge
- Irrigué forte charge
- Déficit faible charge
- Déficit forte charge

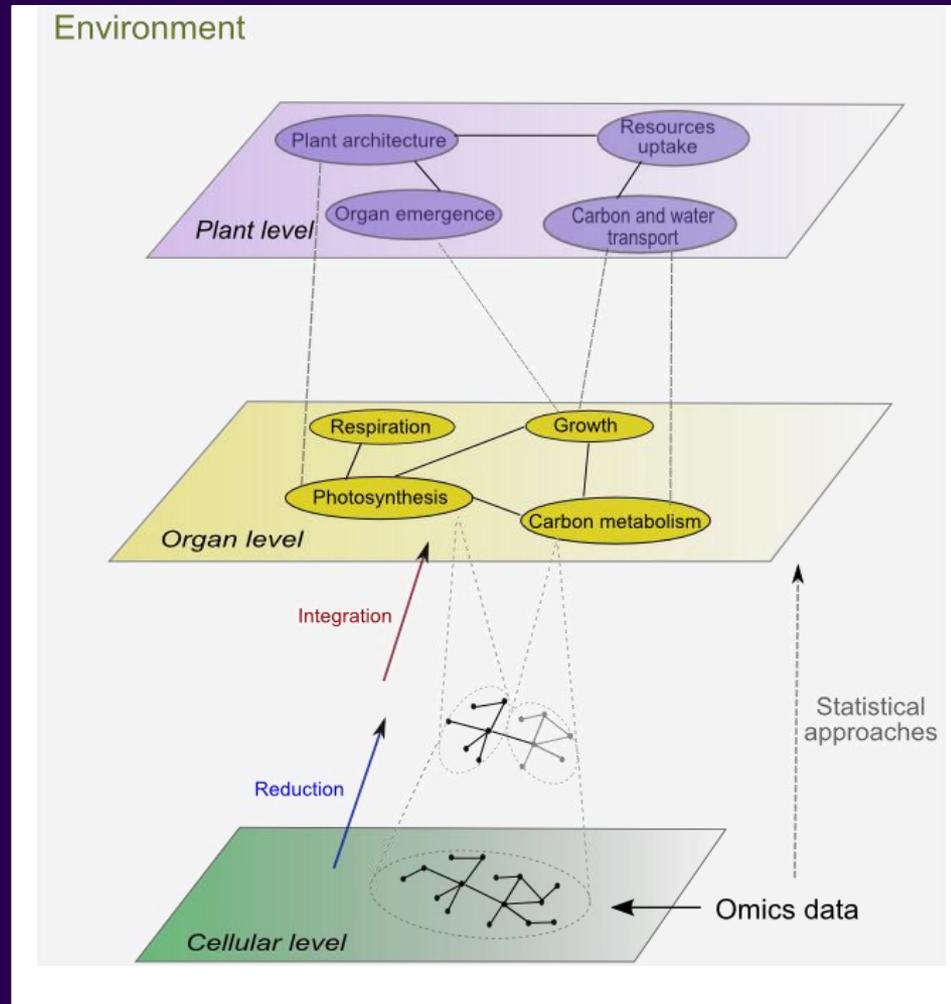
Optimization: multi-objective evolutionary algorithm



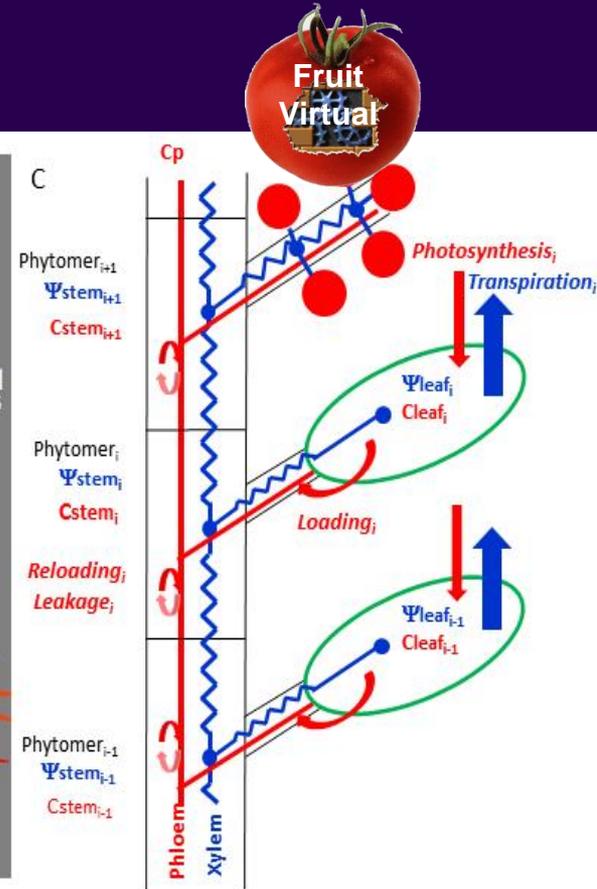
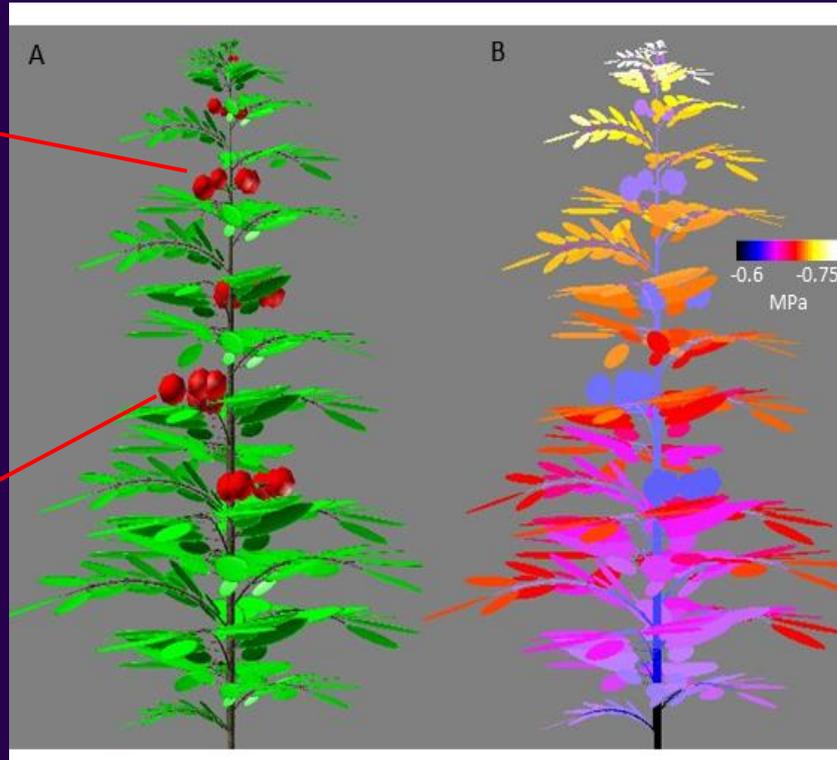
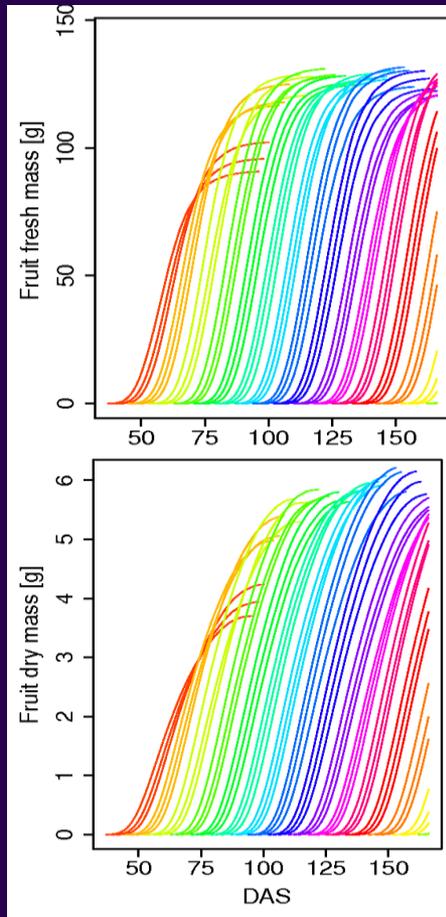
Fruit Virtuel

**Evolution du Fruit Virtuel: vers la
biologie intégrative**

Vers la biologie intégrative, réseaux de processus & réseaux architecturés

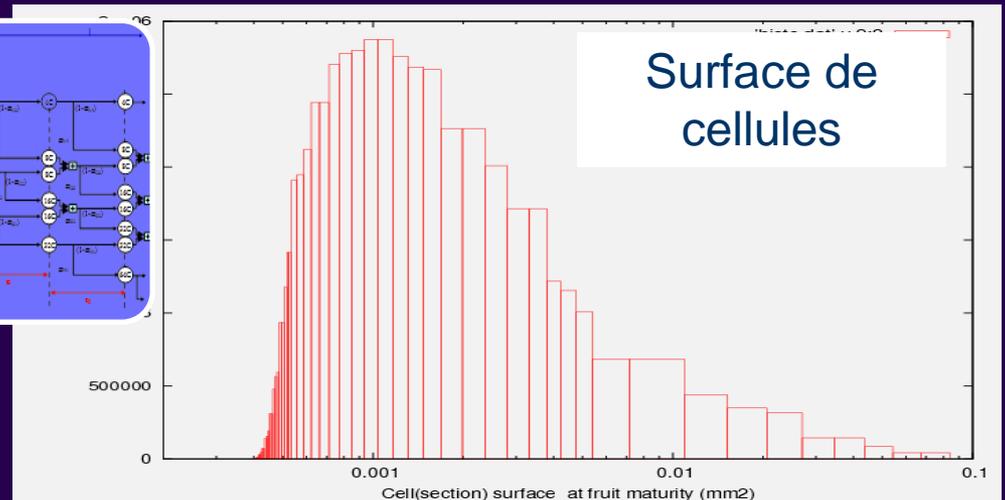
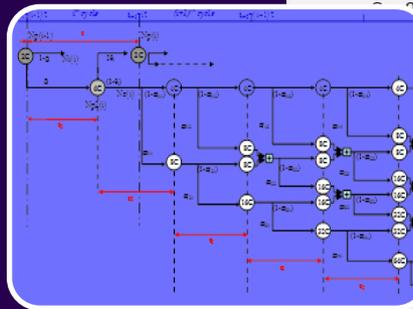
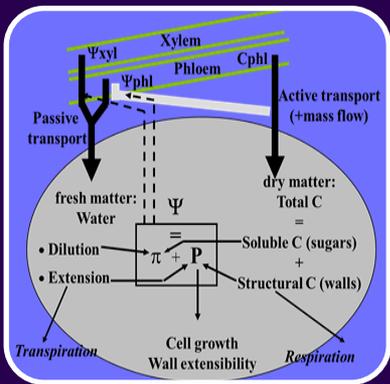
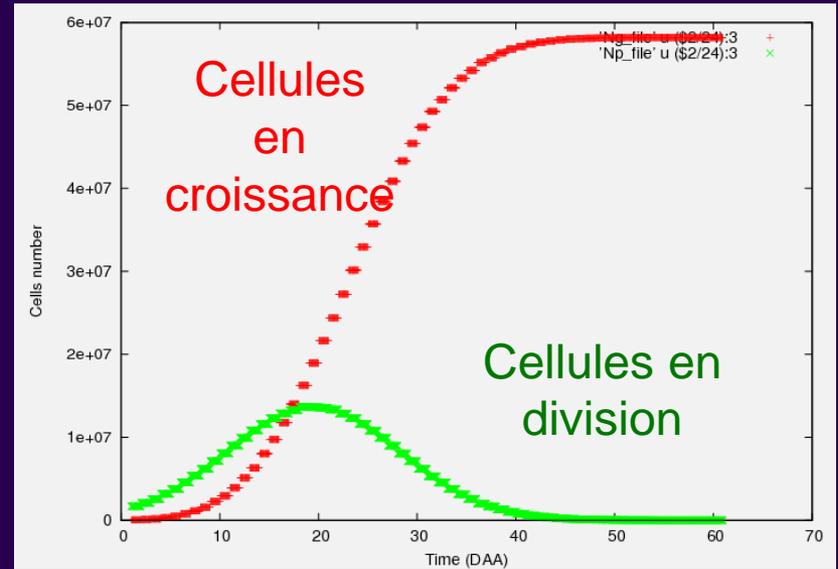
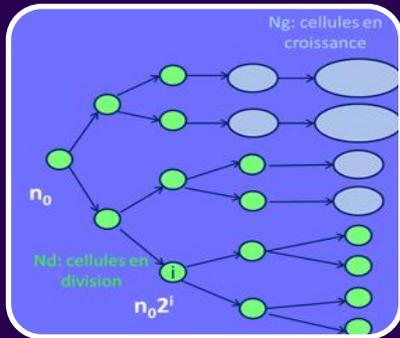


Intégration vers le haut...



Intégration vers le bas...

Modélisation couplée des processus de division cellulaire, d'endoréduplication et de croissance

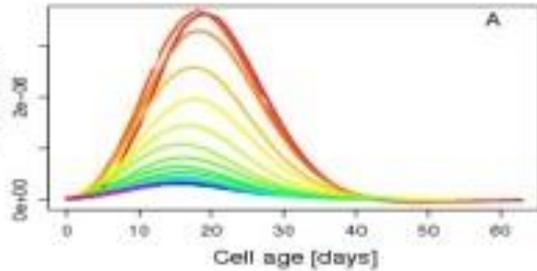


En cours...

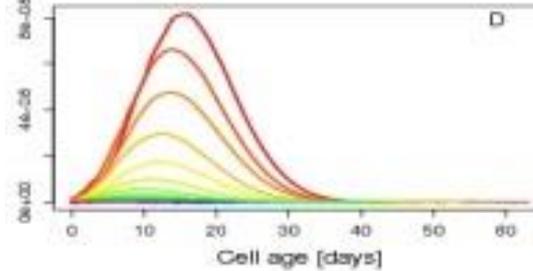
Intégration vers le bas...

Flux à l'échelle cellulaire fonction de l'âge de la cellule

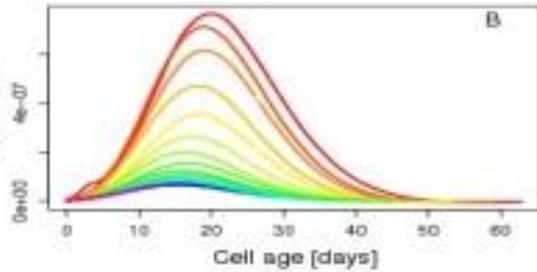
Flux phloémien



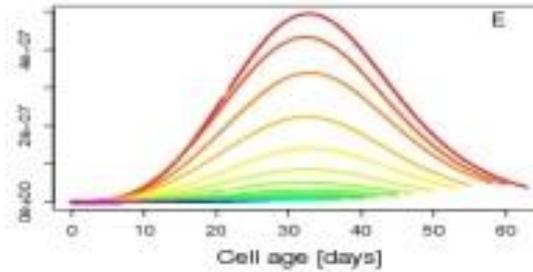
Transport
symplastique



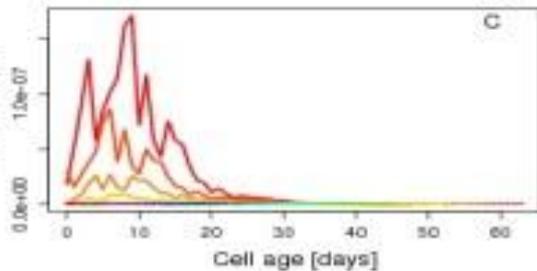
Flux xylémien



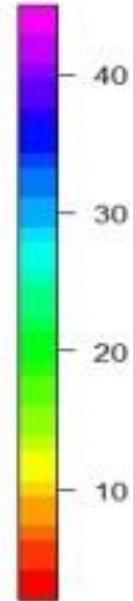
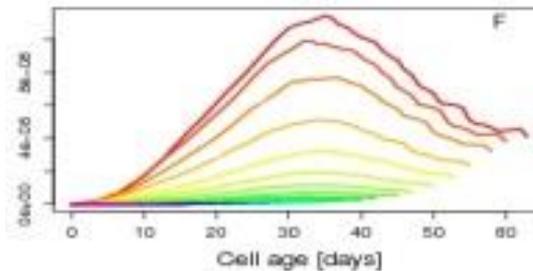
Transport
actif



Transpiraton

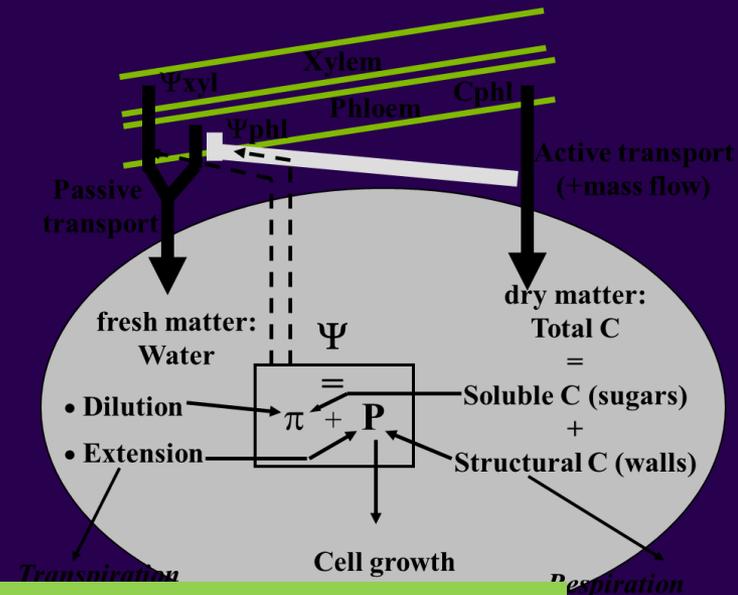
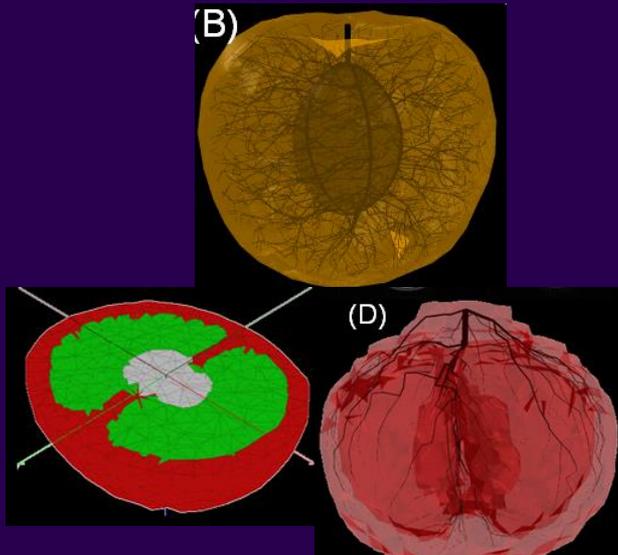


Respiration



Cell birth date (DAA)

Vers un fruit virtuel 3D



Structural model

Carbon and water fluxes model

Structure

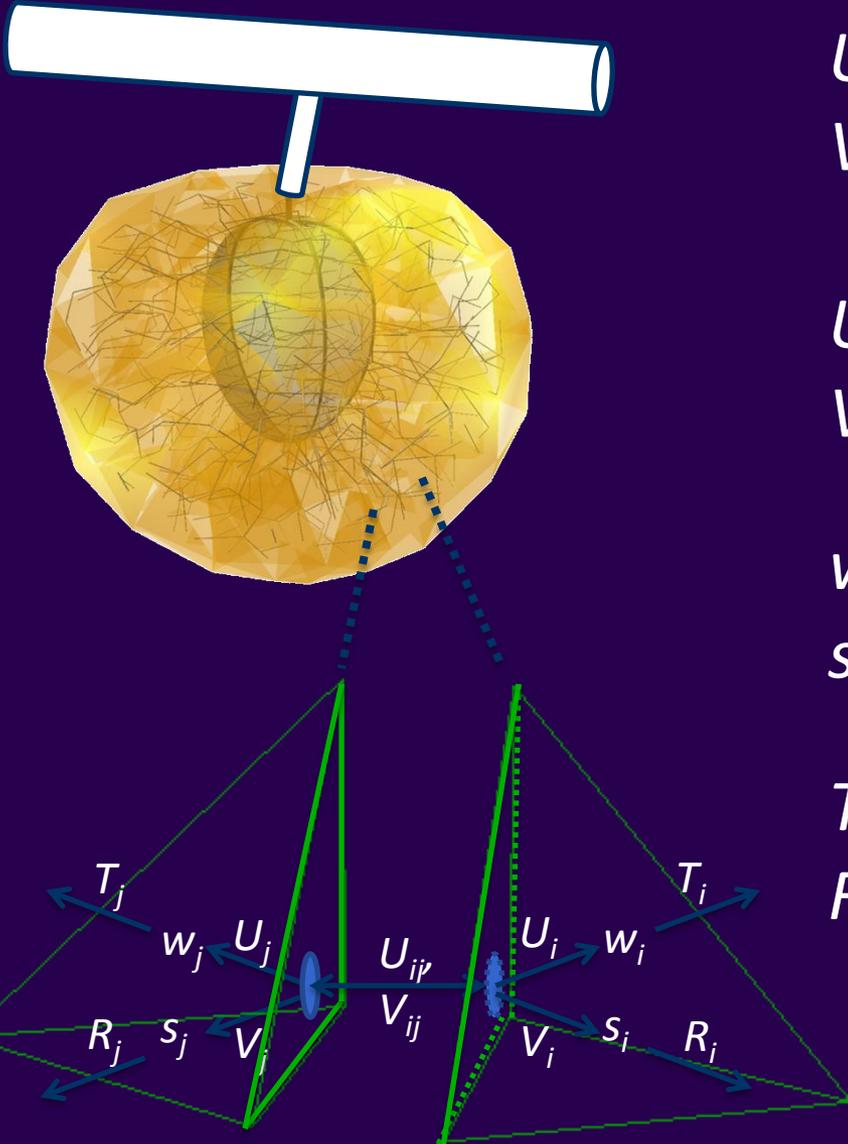
- External shape
- skin properties
- Internal tissues:
 - pericarp, columella, seeds+jelly, and vasculature

Function

- Carbon and water fluxes
- Growth
- Transpiration
- Respiration

Idéotypes
forme, structure
interne, cuticule...

Modelling water and carbon flow



U_{ij} : Water flow in xylem & phloem

V_{ij} : Carbon flow in phloem

U_i : Water inflow from xylem & phloem

V_i : Carbon inflow from phloem

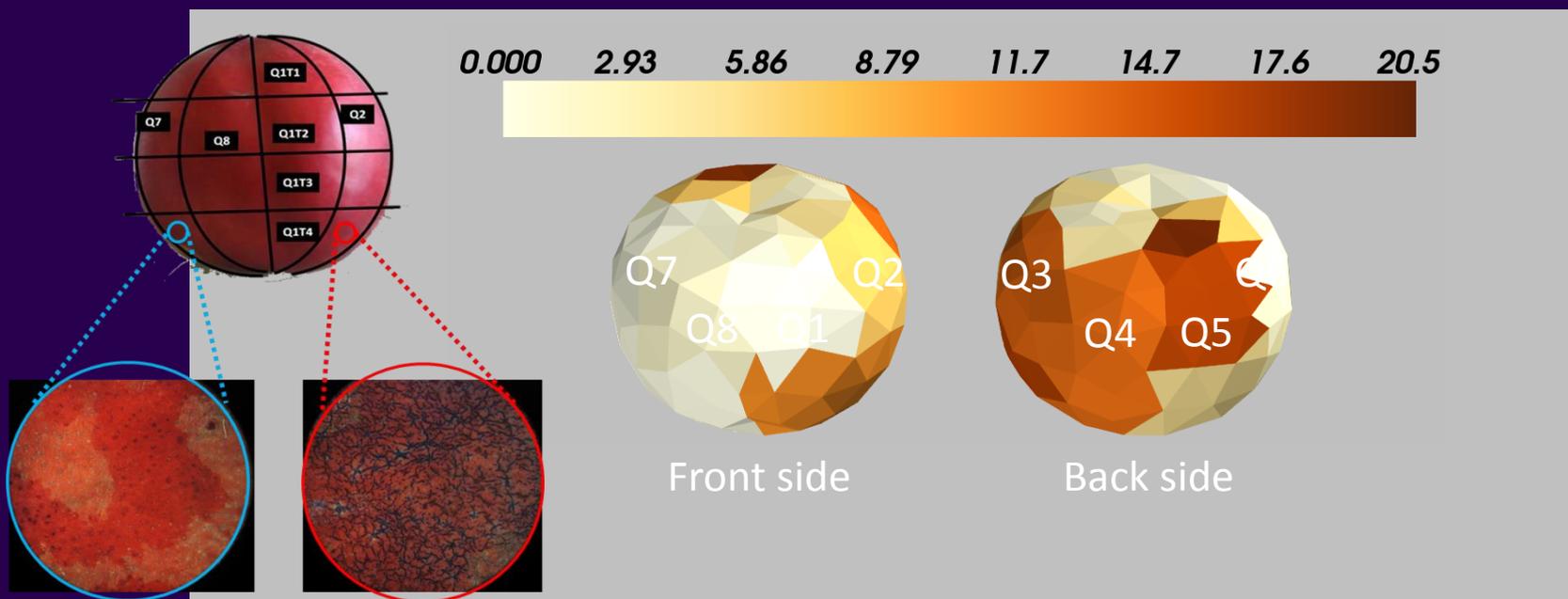
W_i : water content

S_i : carbon content

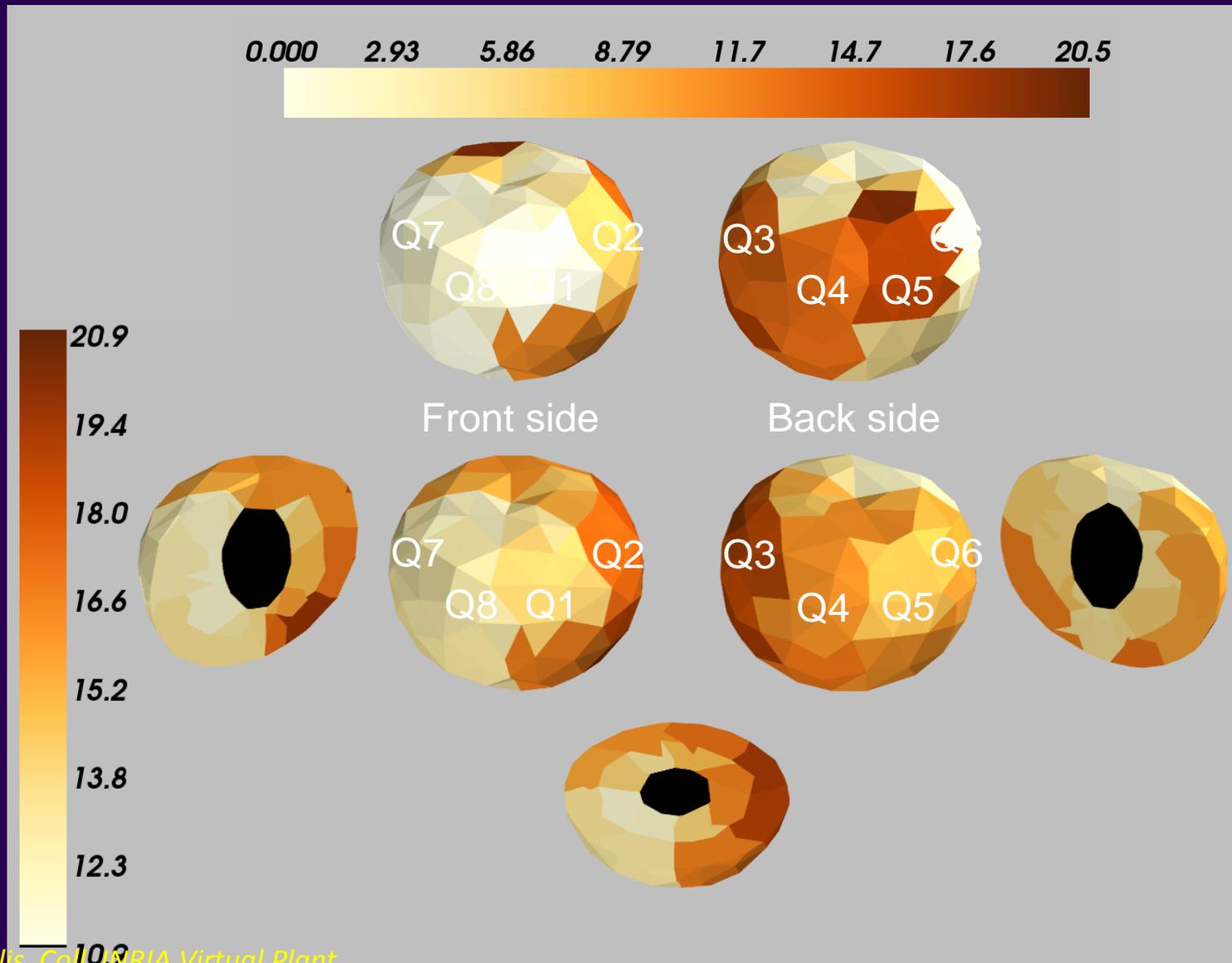
T_i : Transpiration from external tetrahedra

R_i : Growth and maintenance respiration

Effects of skin microcracking on sugar distribution in nectarine fruit



Visualisation of percent of microcracks and sugar distribution at 140 dafb



Perspectives

- **Tester la généralité des modèles (pêche, tomate, mangue, raisin,...)**

- **Développer des modèles sur :**

- les micro-constituants: vit.C, caroténoïdes
- la sensibilité du fruit aux maladies
- la forme et la texture du fruit...

- **Utiliser les modèles pour analyser le contrôle génétique**

Prédire les valeurs de paramètres de modèles avec suffisamment de précision à partir des QTLs (saturation des cartes en marqueurs)

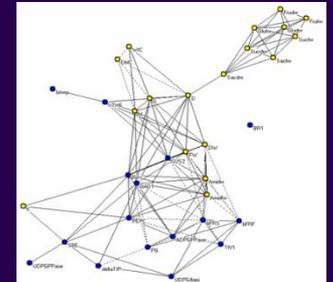
Simuler des descendance et faire de la sélection in silico d'idéotypes (méthodes d'optimisation multicritères)

- **Coupler le fruit virtuel avec les approches omiques**

Liens réseaux simplifiés de gènes, protéines, métabolites
/ réseaux de processus modélisés

Difficultés pour l'intégration du niveau cellulaire / moléculaire

- Complexité des voies métaboliques impliquées
- Grande quantité des données sur les phénotypes moléculaires (métabolomiques, transcriptomique)
- Mais manque de
 - information sur les mécanismes de contrôle des processus chez les différentes espèces
 - information sur certaines étapes (eg transporteurs intra-cellulaires, stockage)
 - données au cours du développement
 - réponses à l'environnement
 - Informations sur les liens gènes – processus modélisés



- Difficile d'identifier les variables et mécanismes à considérer dans le modèle
- Nécessaire de changer d'échelle et de niveaux de complexité selon les questions scientifiques

Equipe Ecophysiologie de la plante horticole





Merci !