



**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-02810652v1>**

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.

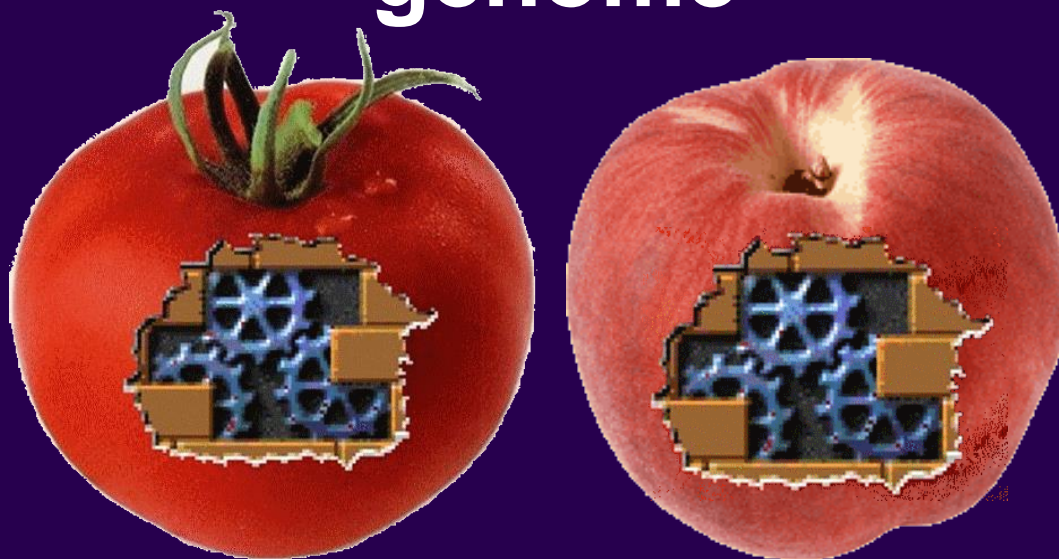
L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



# 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

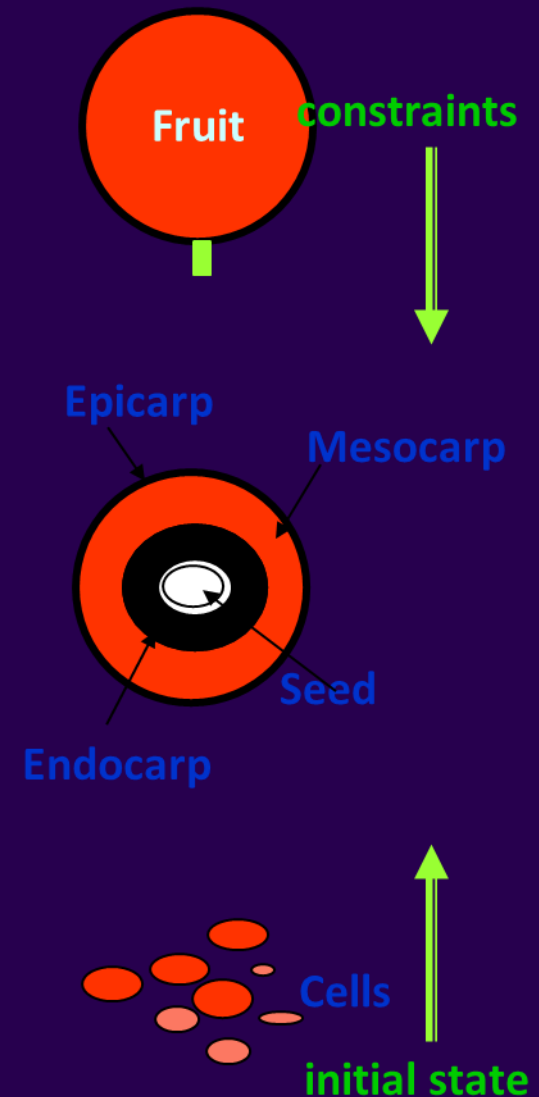
**Analyser le fonctionnement du fruit nécessite une approche systémique**

**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



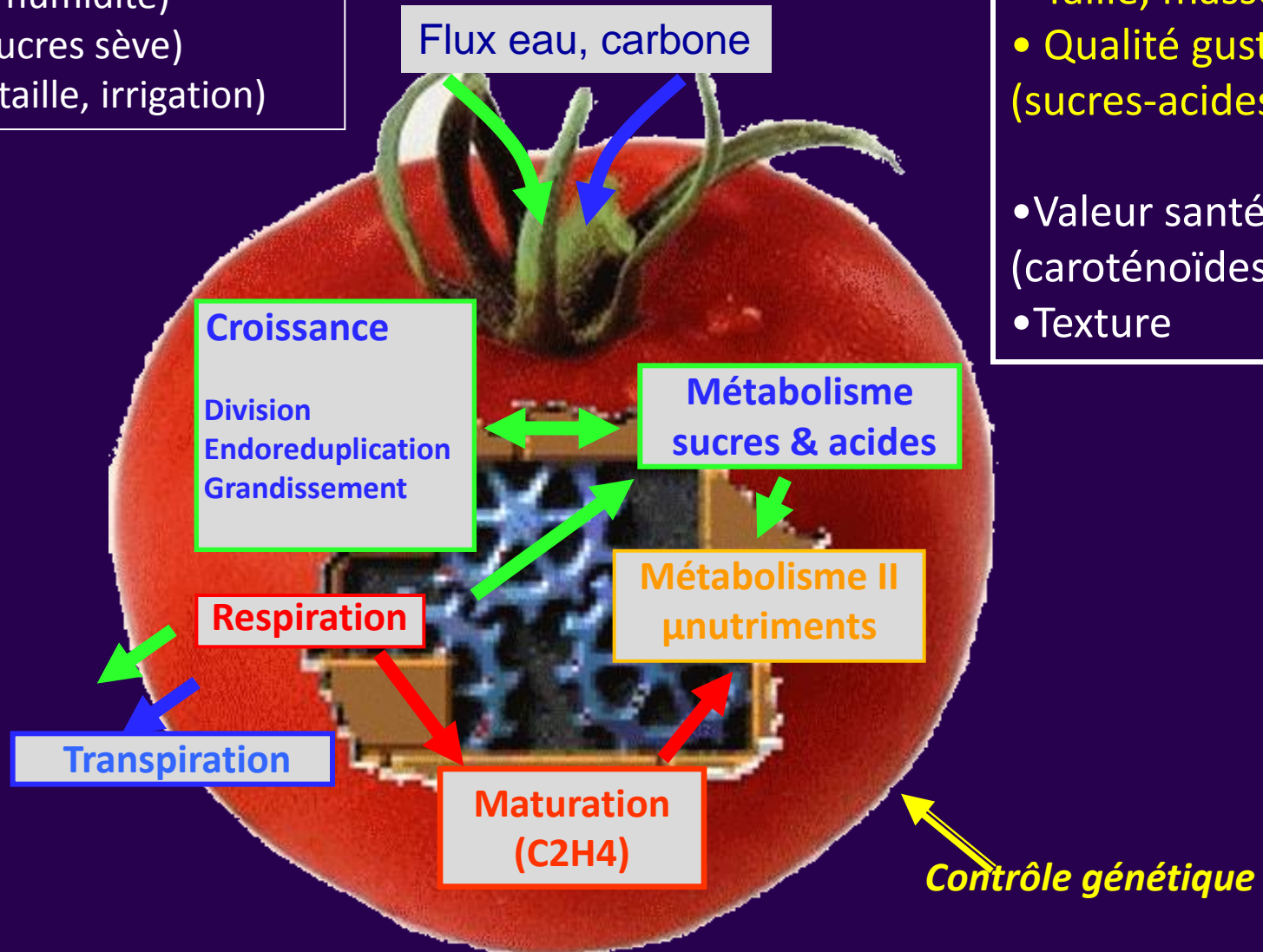
# Fruit Virtuel: plateforme de couplage

## Variables d'entrée

- climat ( $T^\circ$ , humidité)
- plant ( $\Psi$ , sucres sève)
- pratiques (taille, irrigation)

## Variables simulées

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

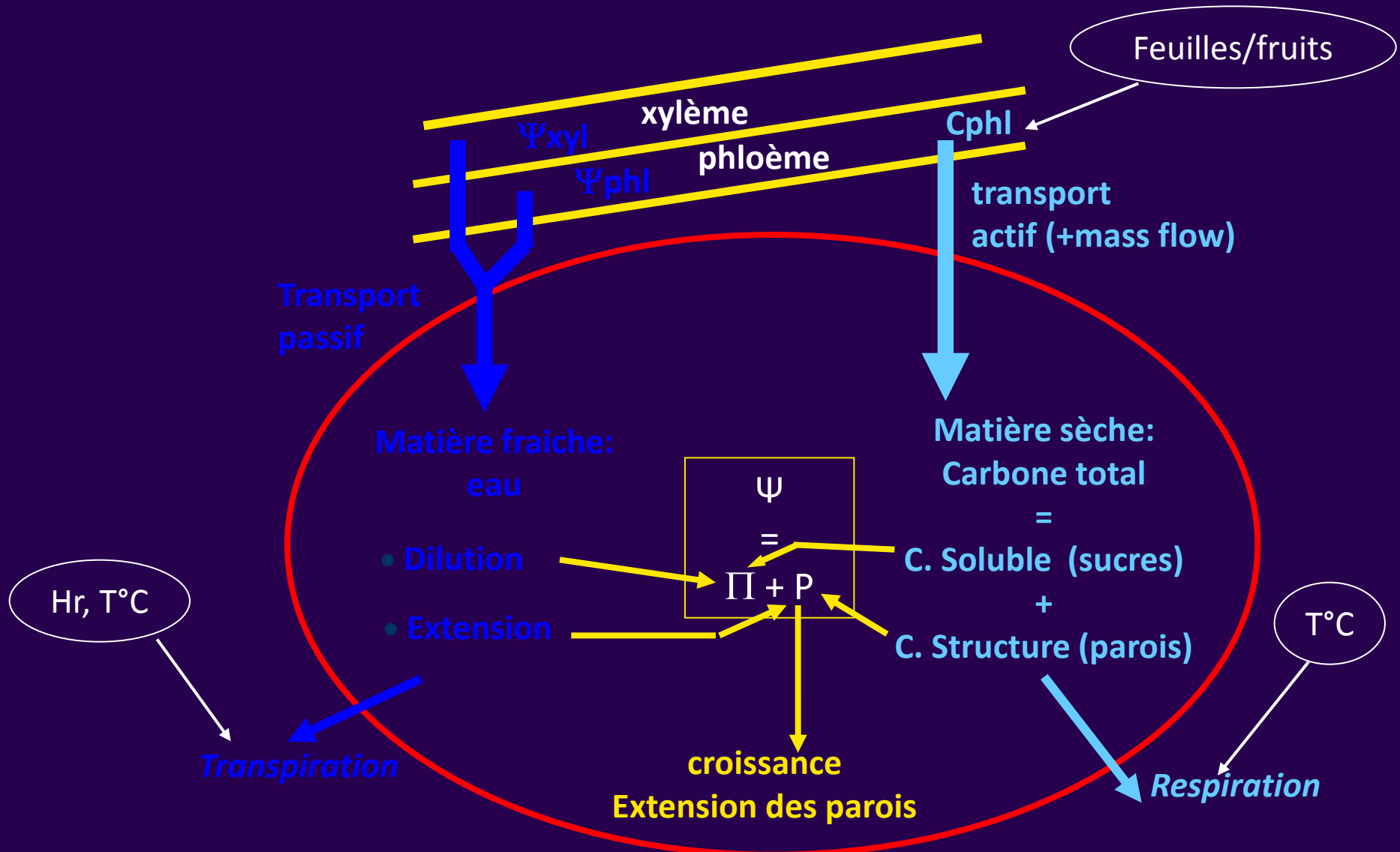


# Fruit Virtuel

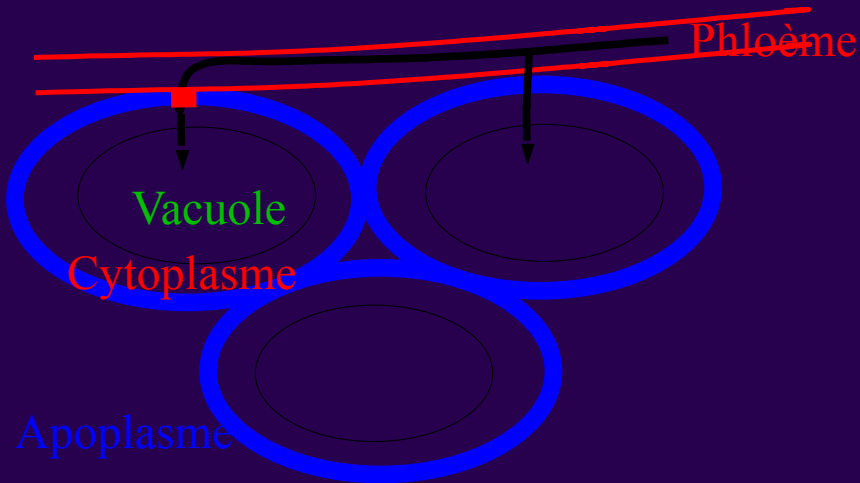
---

- ▶ **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

$$dMS/dt = \text{FluxS} - R_f + (\text{Phot})$$

FluxS = flux de déchargement en sucres

R<sub>f</sub> = respiration du fruit

Phot = photosynthèse (~ 0)

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

$\sigma_p$  Coefficient de réflexion membranaire des sucres

$p_s$  = perméabilité aux sucres

Flux<sub>phl</sub> = eau phloème (85% de l'eau importée dans le fruit de tomate)

C concentrations en sucres

A<sub>p</sub> 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

$\rho$  = 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)

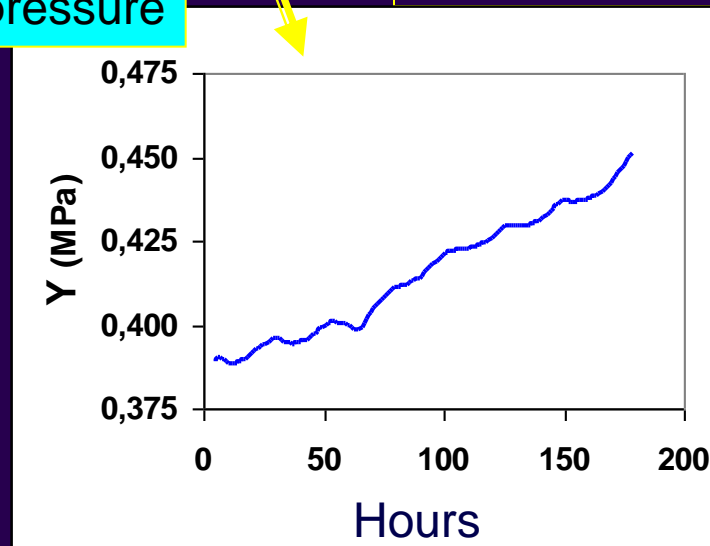
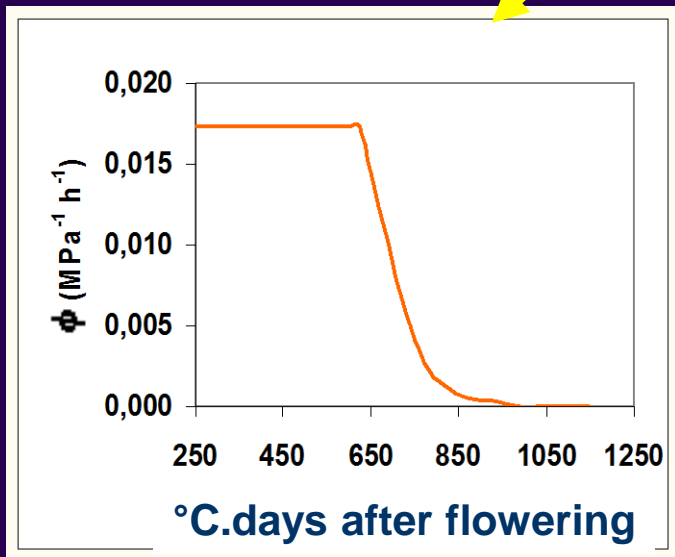
Short-term reversible ELASTIC Variations

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

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

Turgor pressure

Volumetric elastic modulus

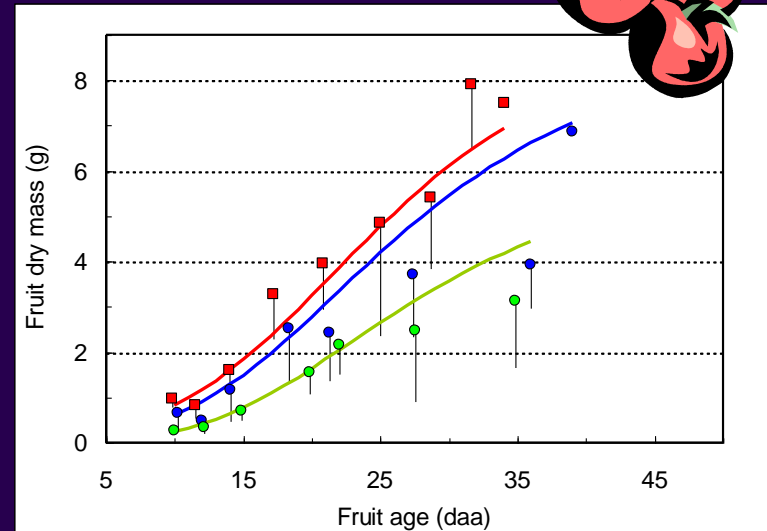
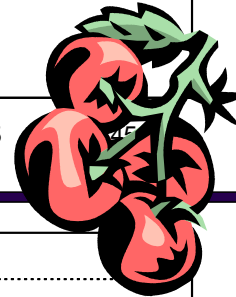
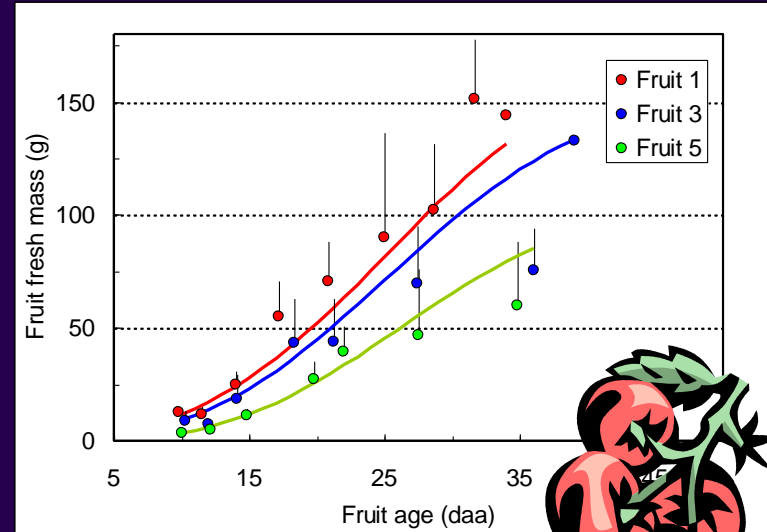
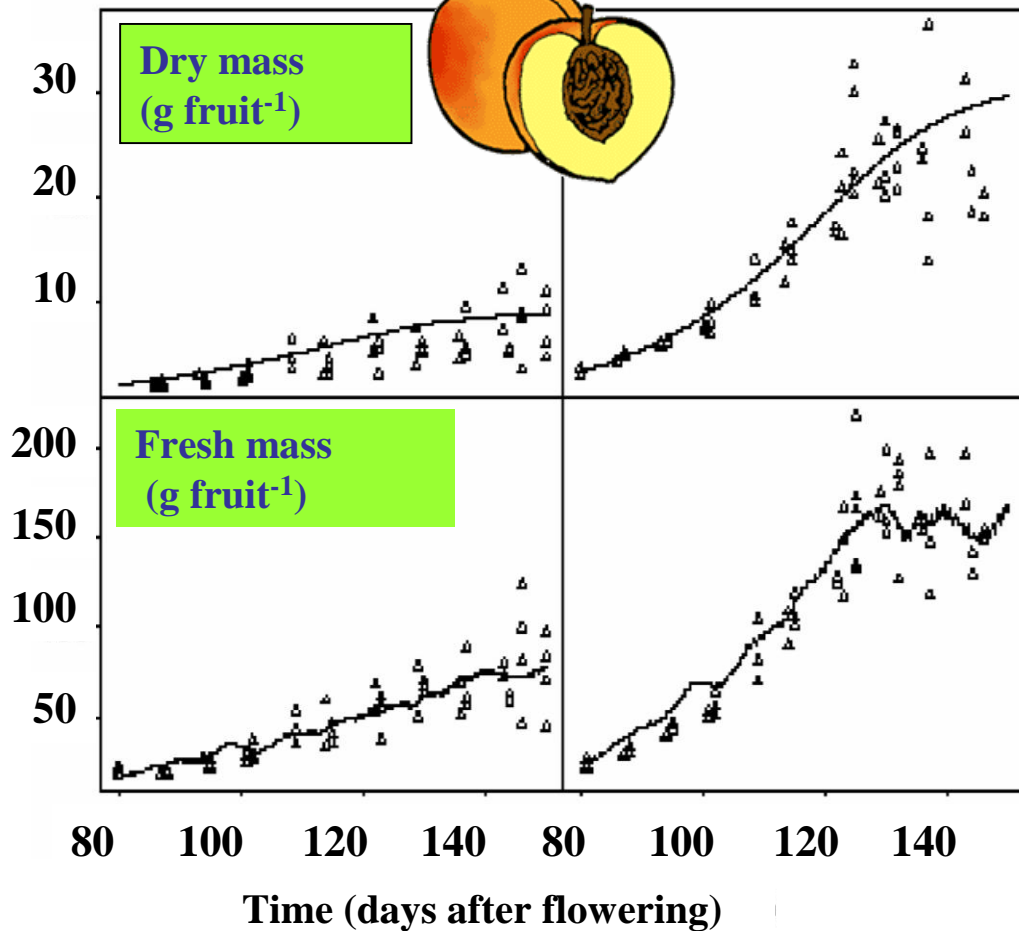


Mangue  
Léchaudel et al. 2007.  
Tree Physiol.

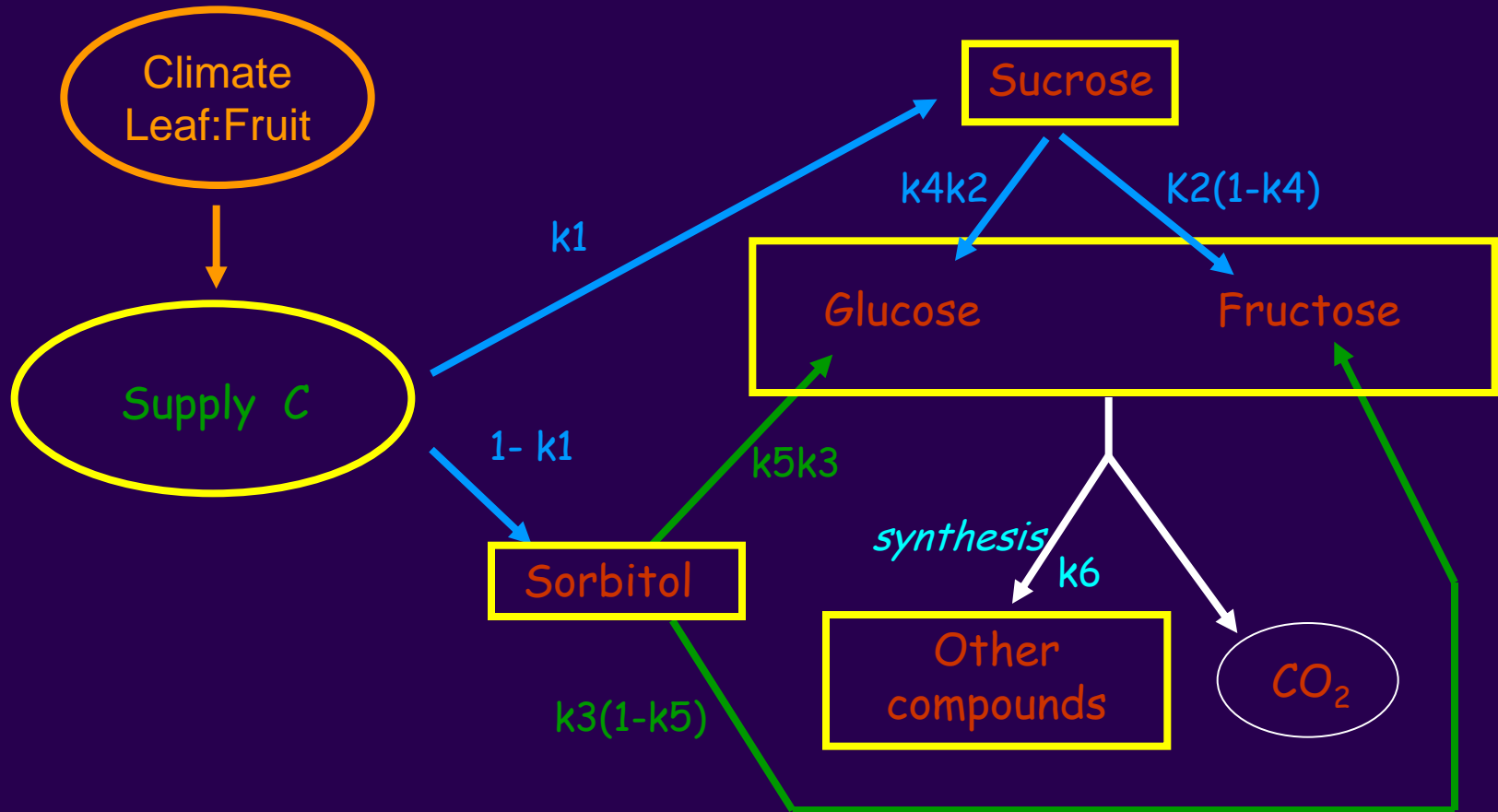
# Modèle générique: pêche, tomate, mangue, kiwi, raisin

6 fruits

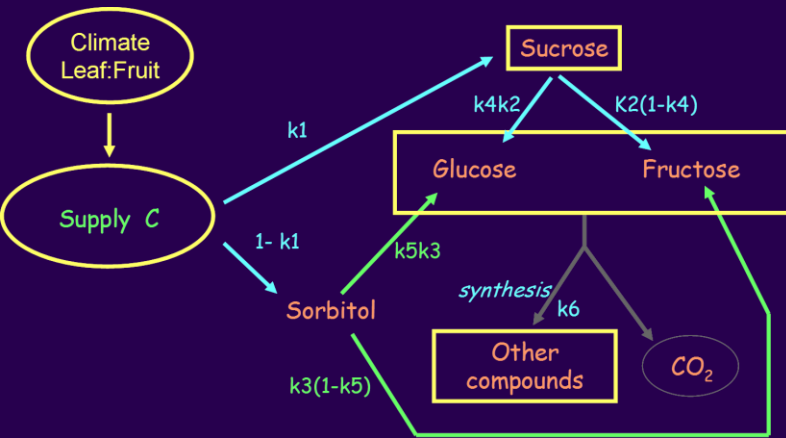
1 fruit



# Modéliser la composition en sucres du fruit



# Modéliser la composition en sucres du fruit



A set of differential equations

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

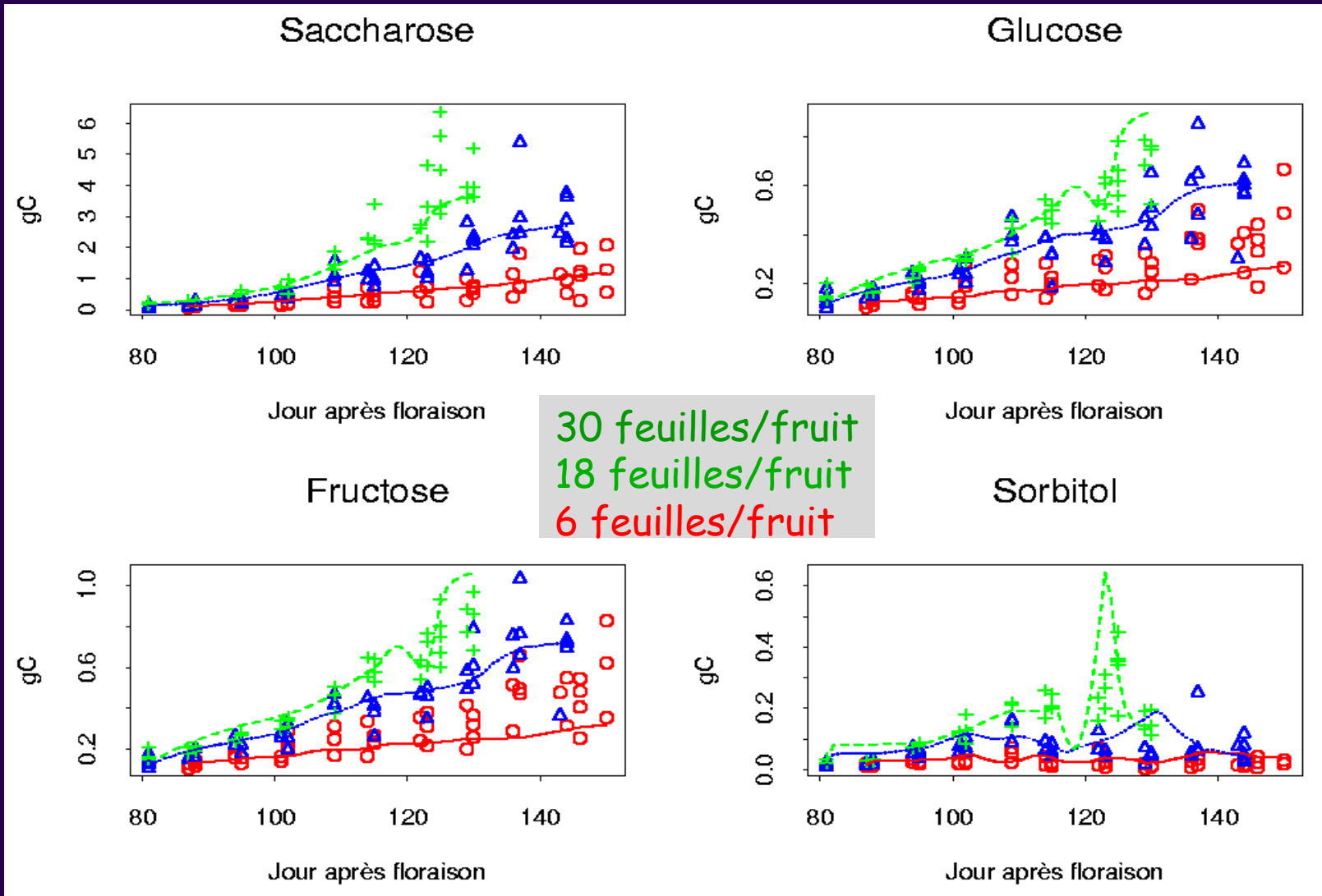
$$\frac{dC_{so}}{dt} = (1 - k_1) \frac{dC_{ph}}{dt} - k_3(t) C_{so}$$

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

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

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

# Modéliser la composition en sucres du fruit



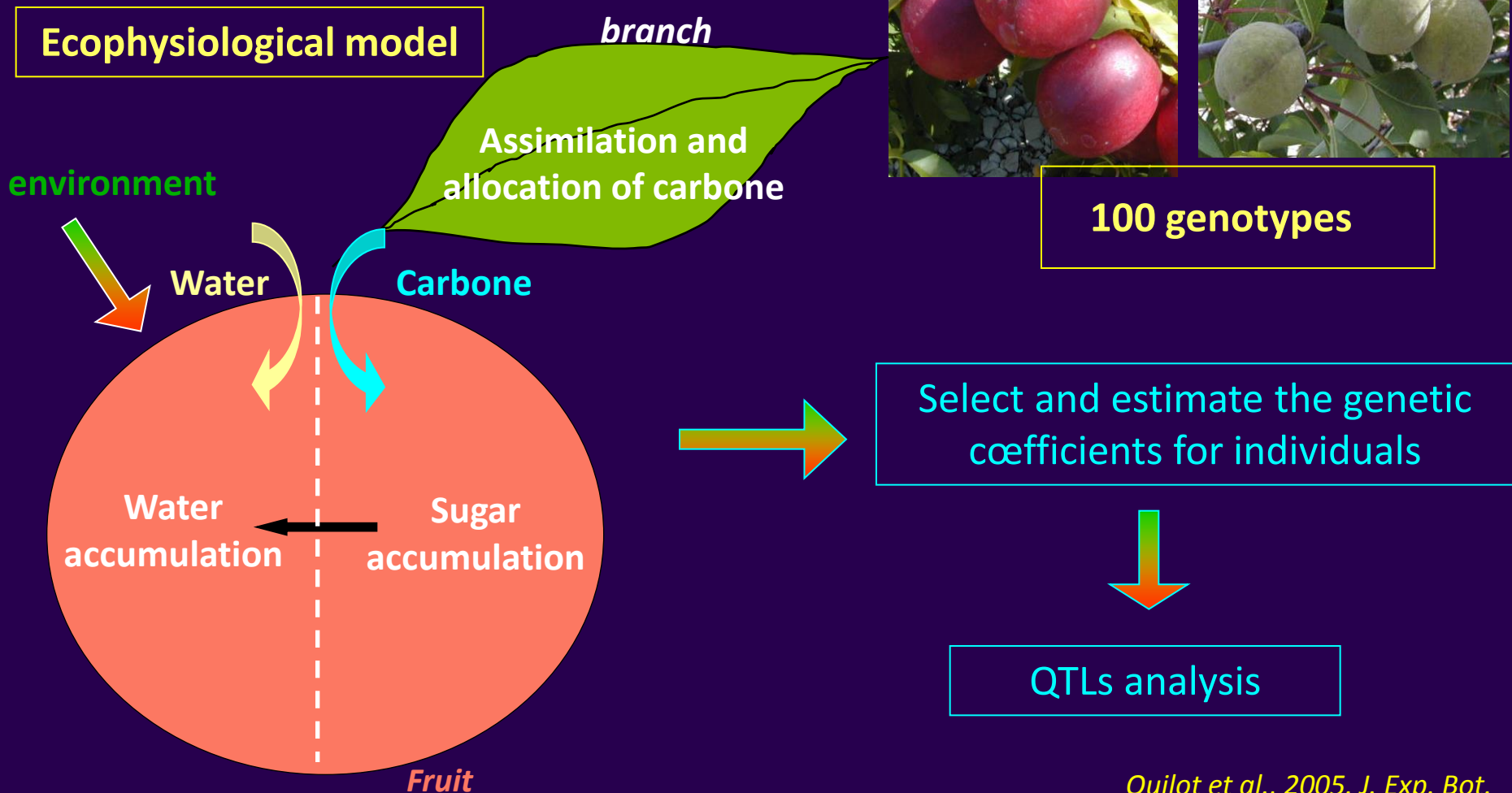
# Fruit Virtuel

---

Fruit virtuel et génétique

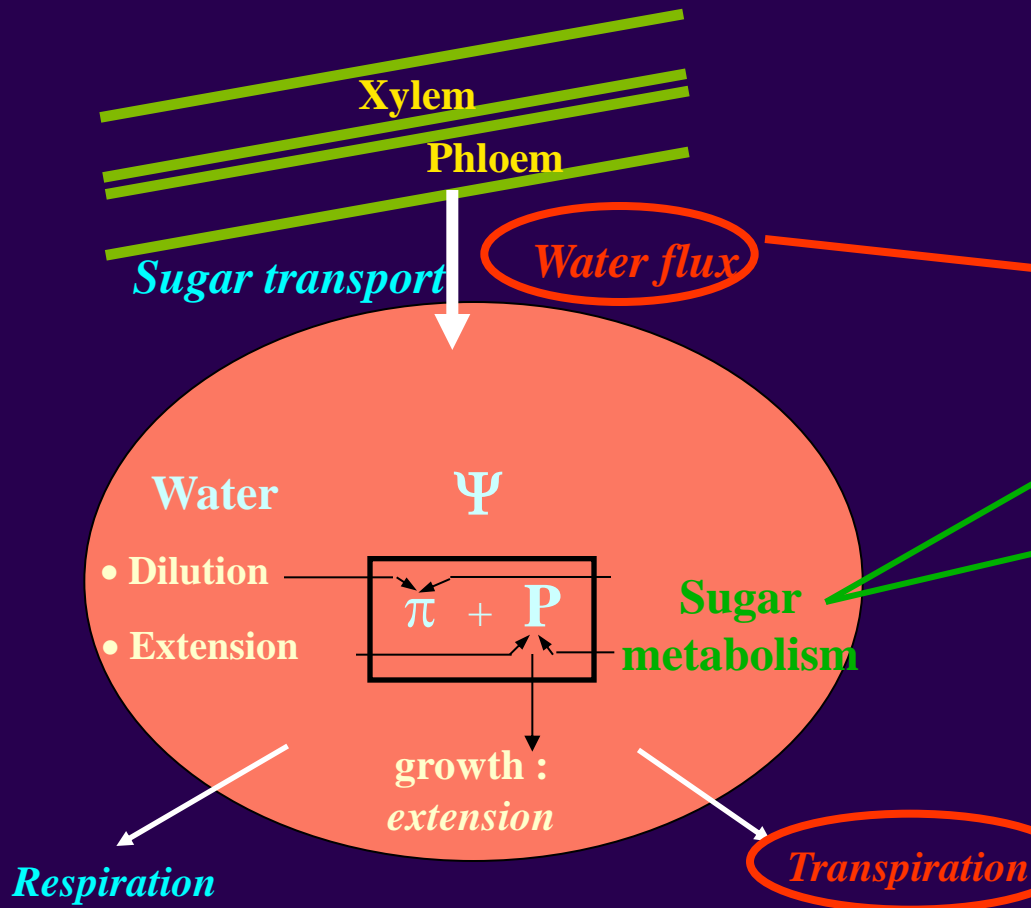
# Fruit virtuel et génétique (pêche)

## QTL-based model

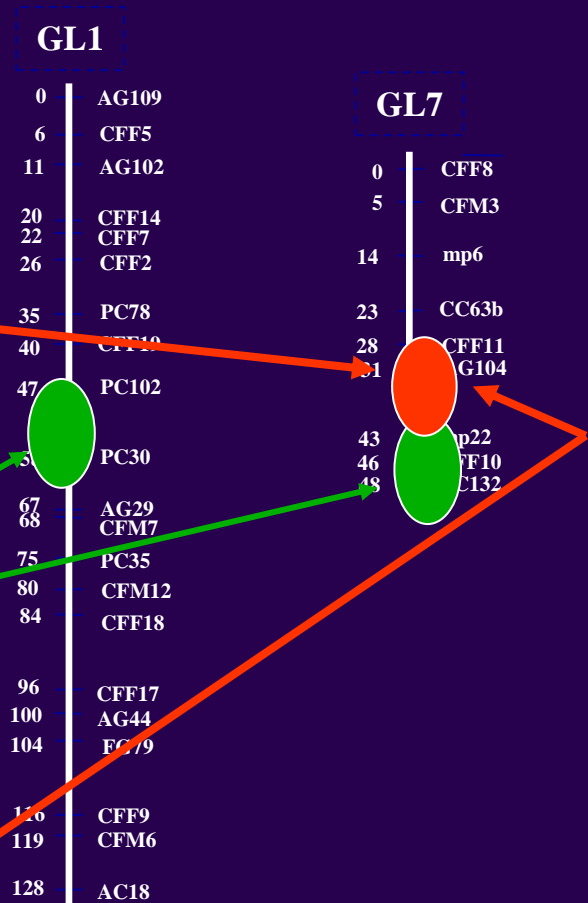


# Fruit virtuel et génétique (pêche)

## Model of water and sugar accumulation



## Genetic map QTL-analysis



# Fruit virtuel et génétique (pêche)

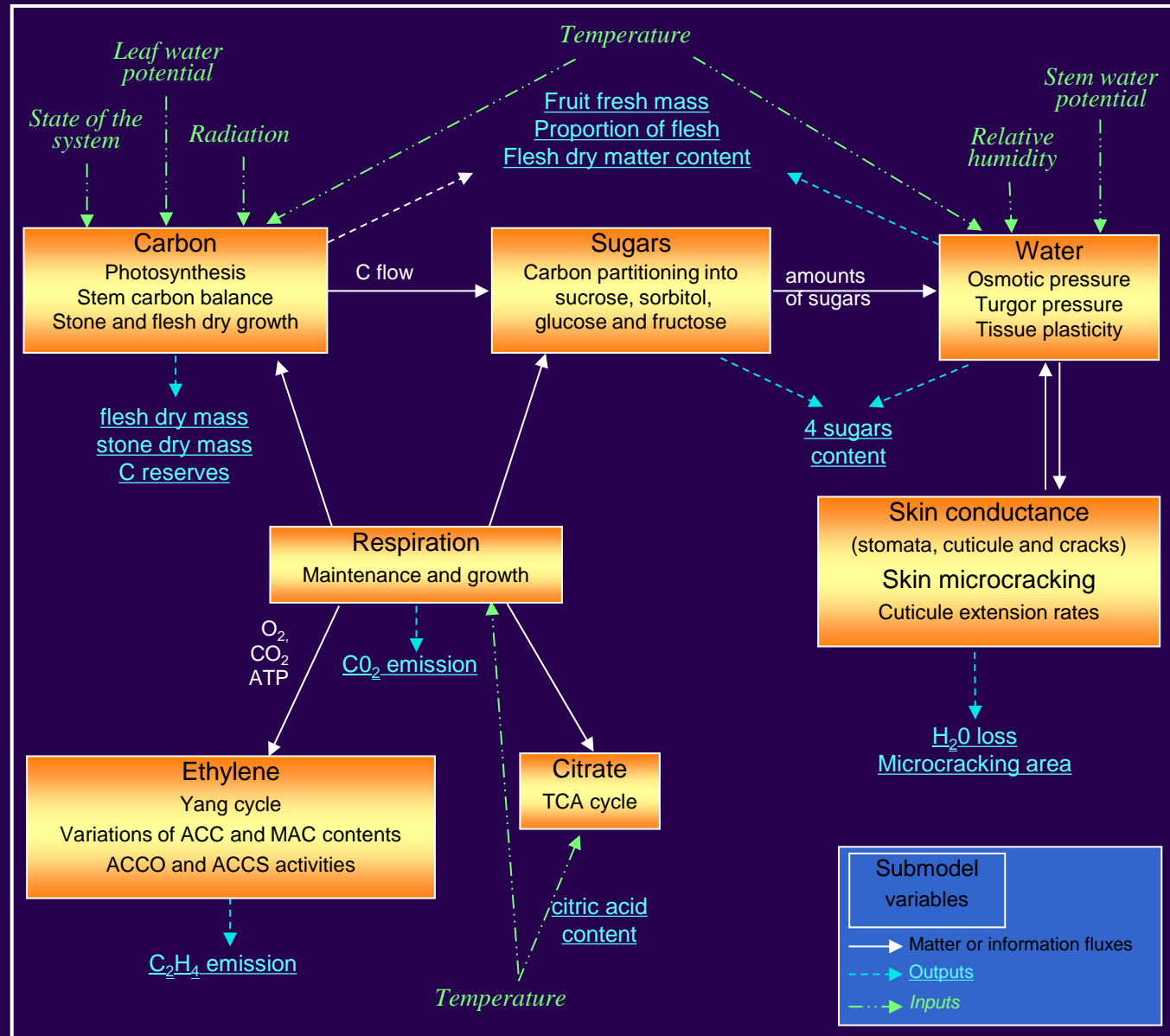
- **Analyse du contrôle génétique en termes de processus**
- **Accroît la stabilité des QTL et leur héritabilité**
- **Prédiction de jeux de paramètres dont les valeurs dépendent des combinaisons alléliques**
- **Prédiction de génotypes virtuels dans différents environnements → support à la sélection**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

# Fruit Virtuel

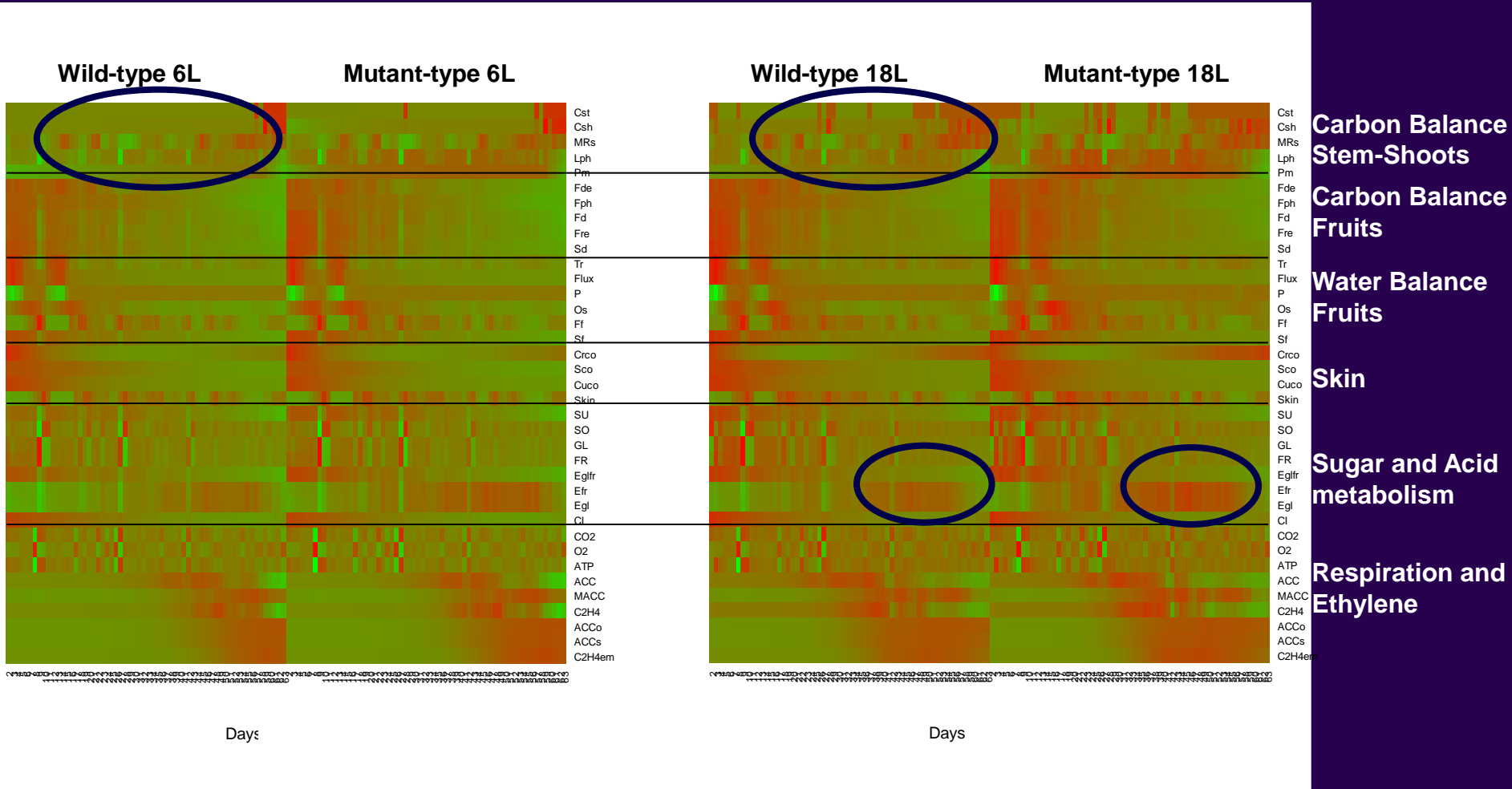
---

Un fruit virtuel pour explorer la  
complexité et rechercher des  
idéotypes

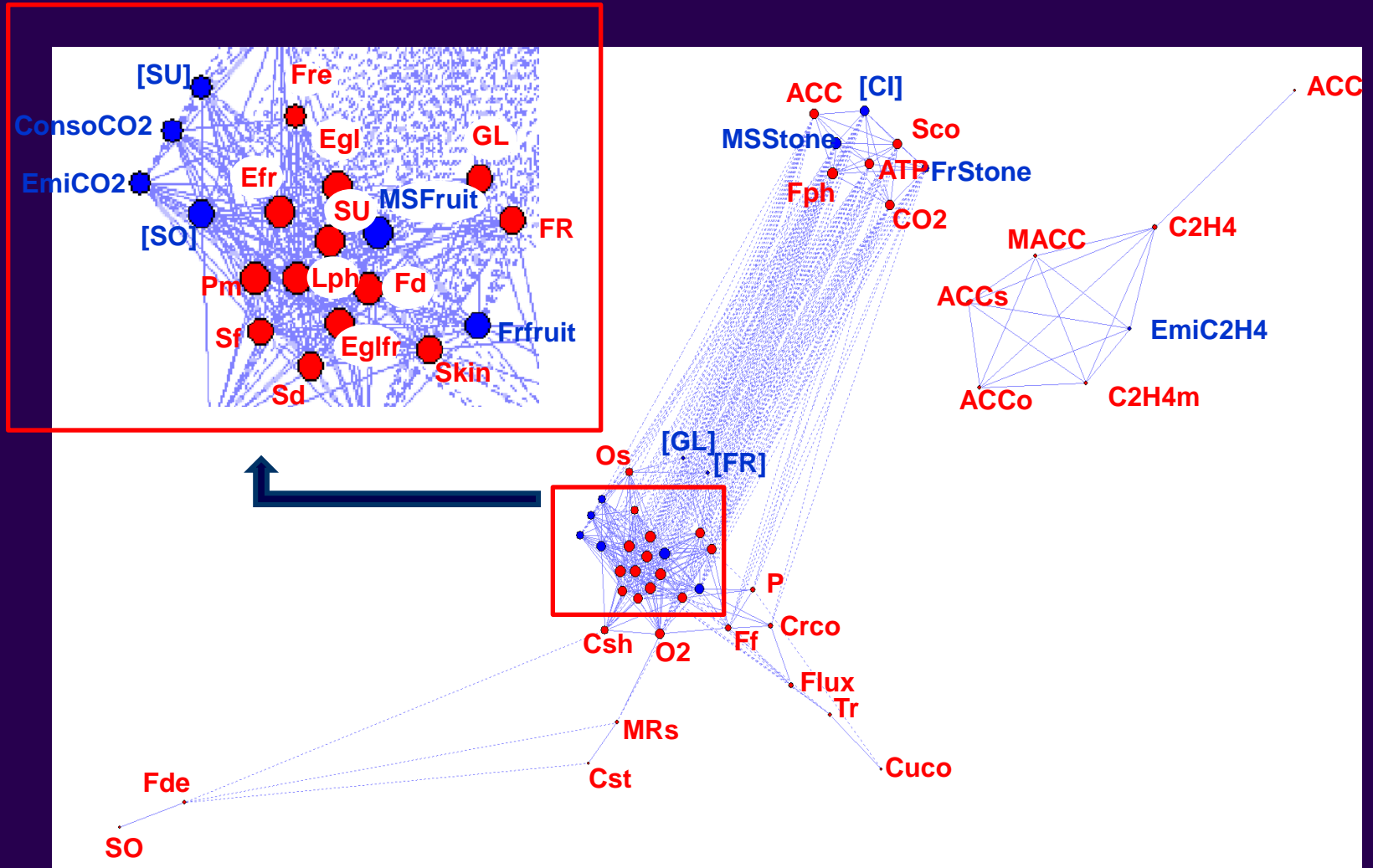
# Intégration des processus



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

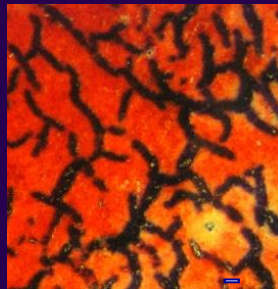


# Un réseau de corrélations: propriété émergente du Fruit Virtuel

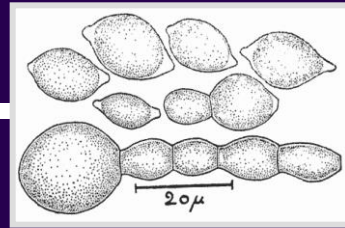


# Recherche d'idéotypes

## Les caractères ciblés



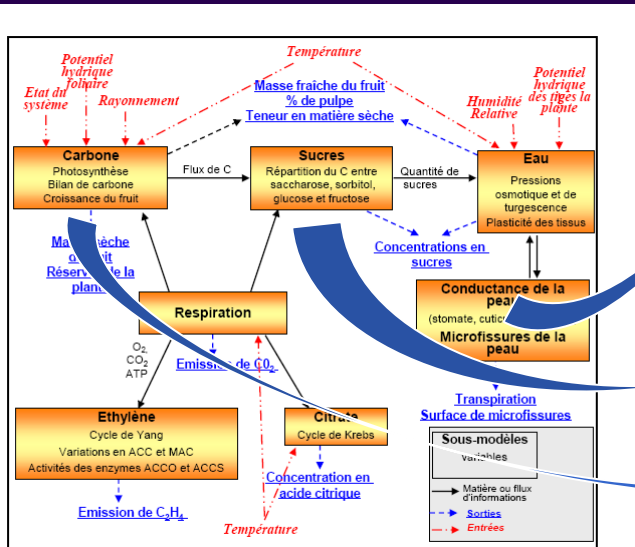
cuticular cracks



Monilinia laxa



## Fruit virtuel



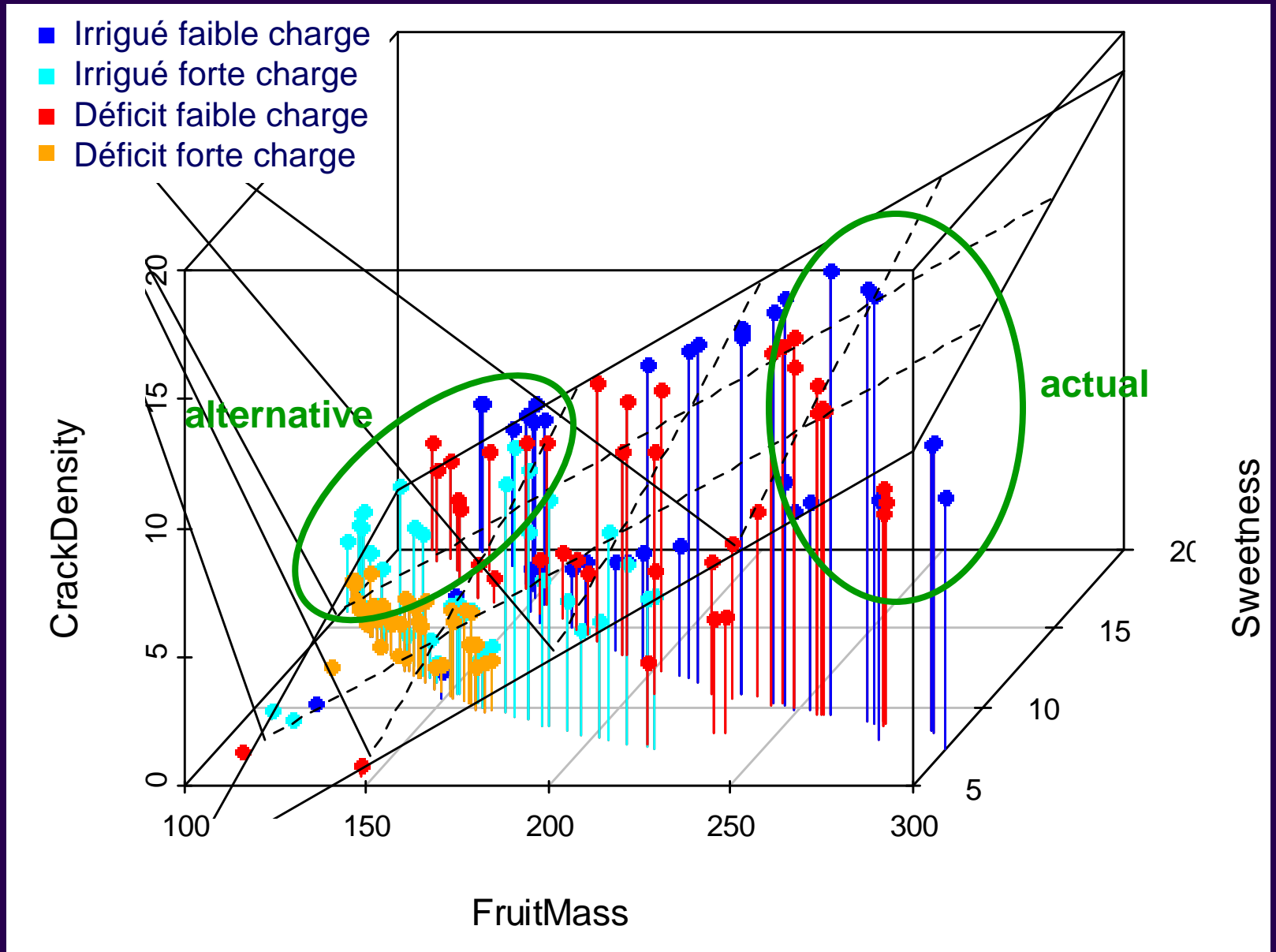
## Sensibilité

## Sucres

## Masse du fruit

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

# Optimization: multi-objective evolutionary algorithm

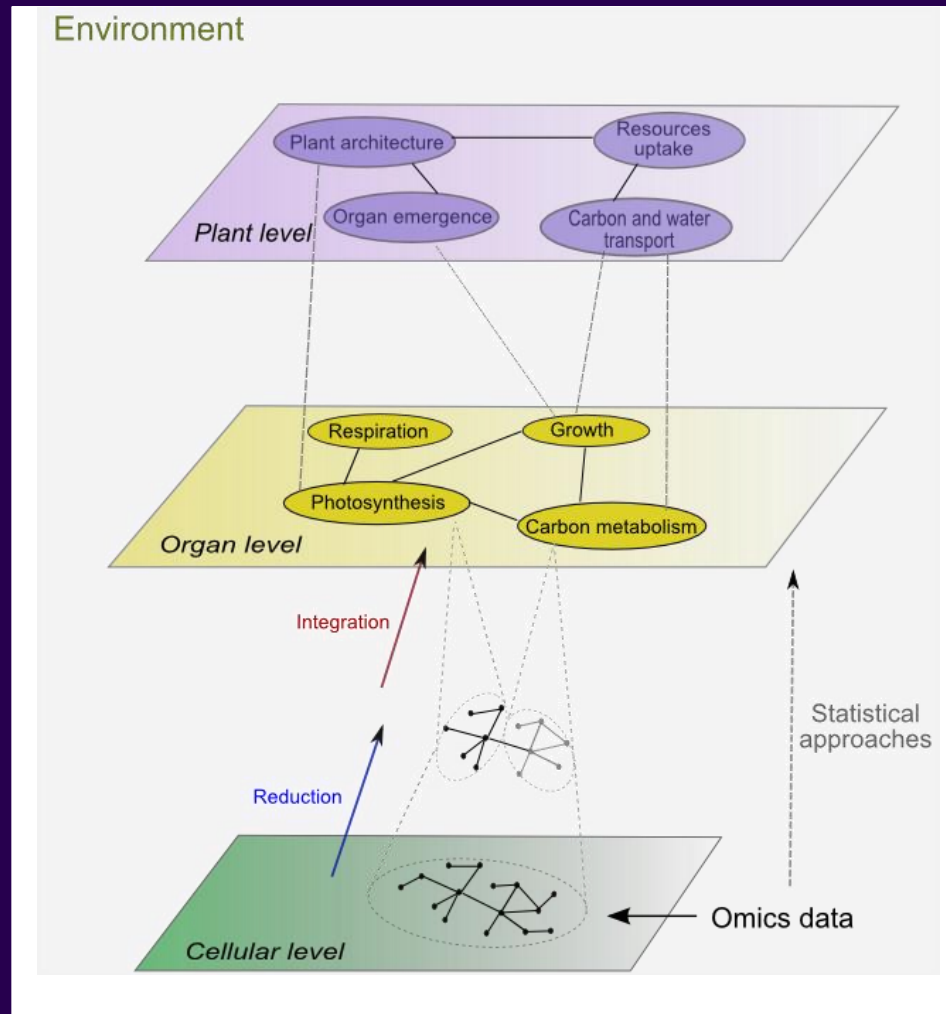


# Fruit Virtuel

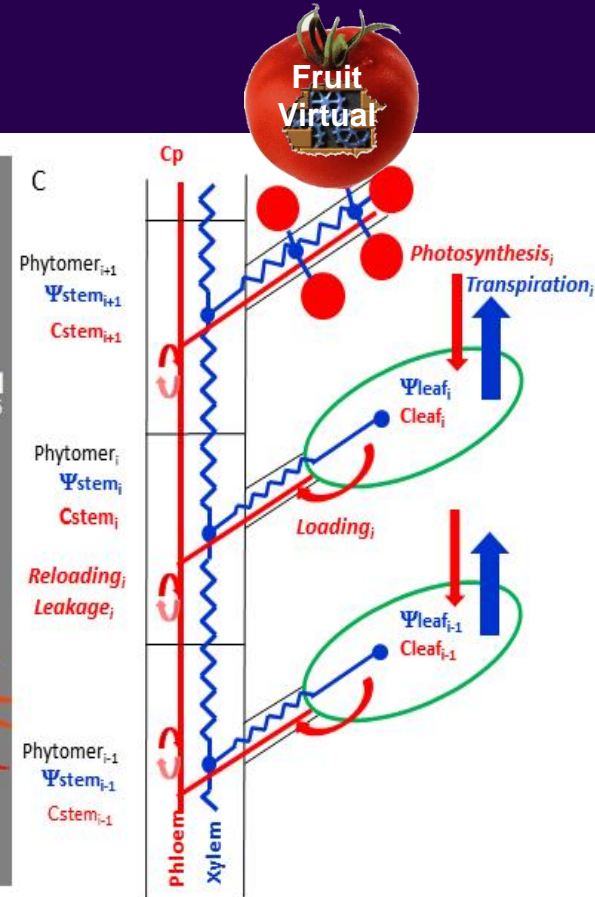
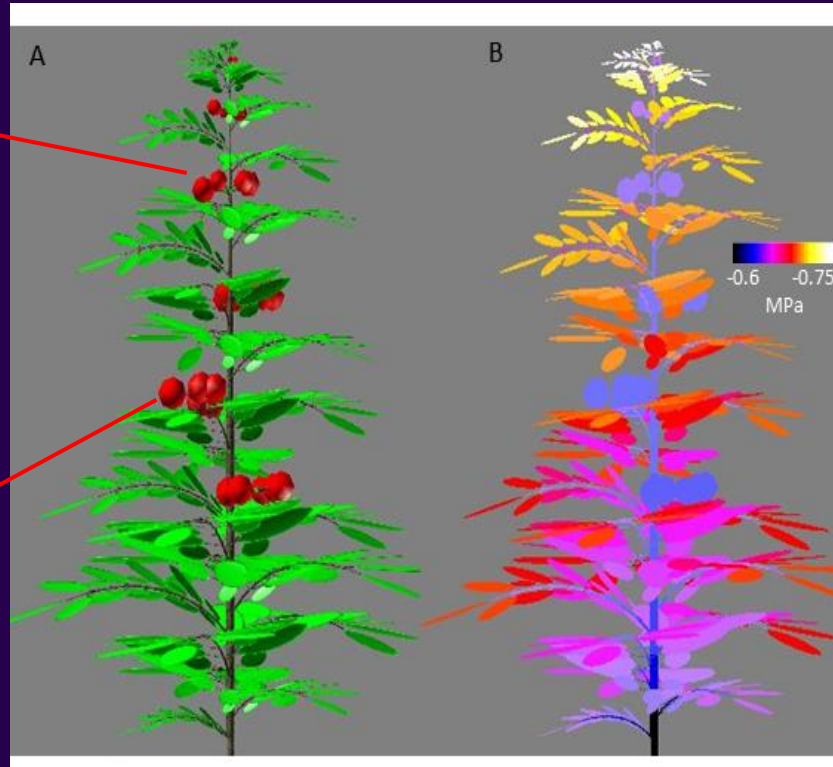
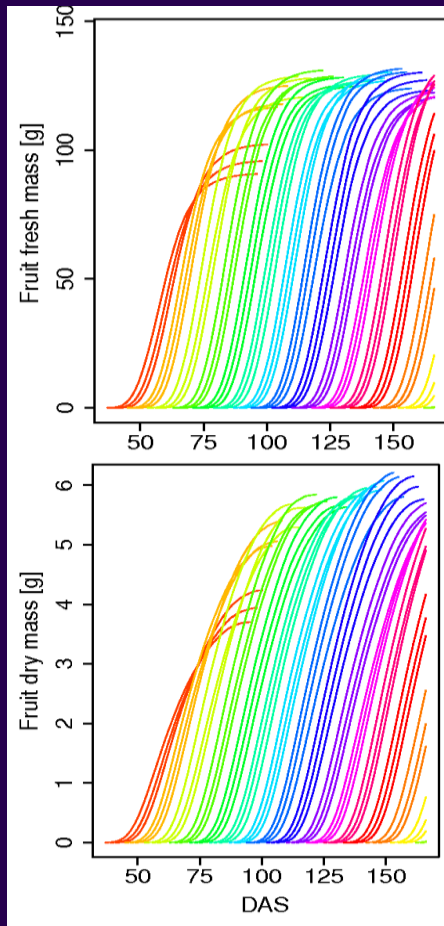
---

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

# Vers la biologie intégrative, réseaux de processus & réseaux architecturés

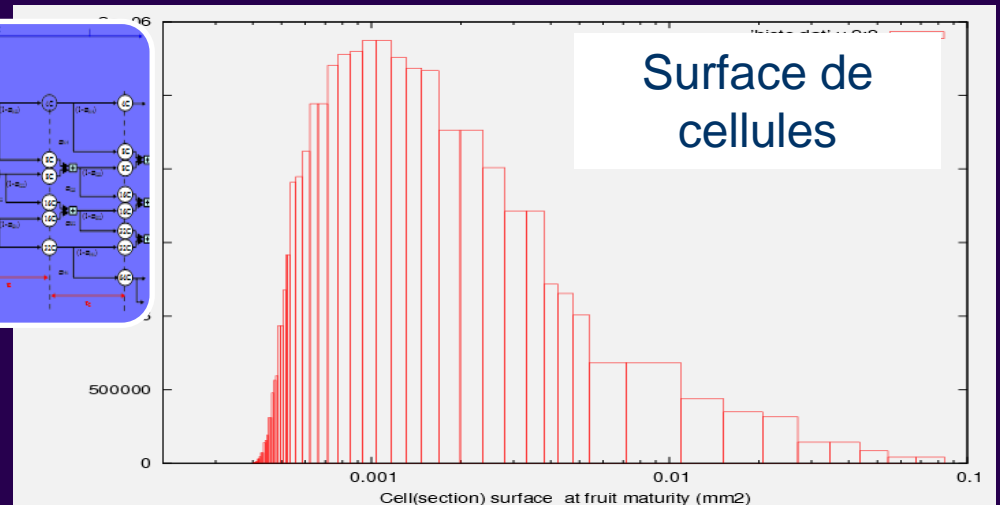
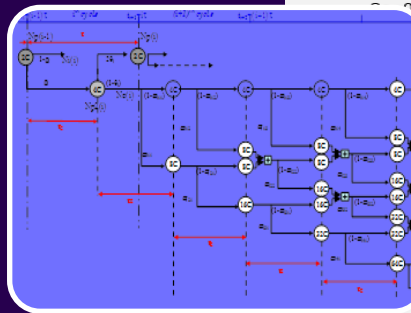
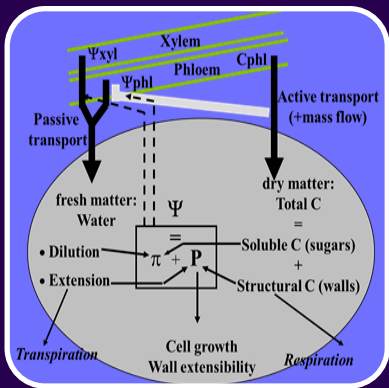
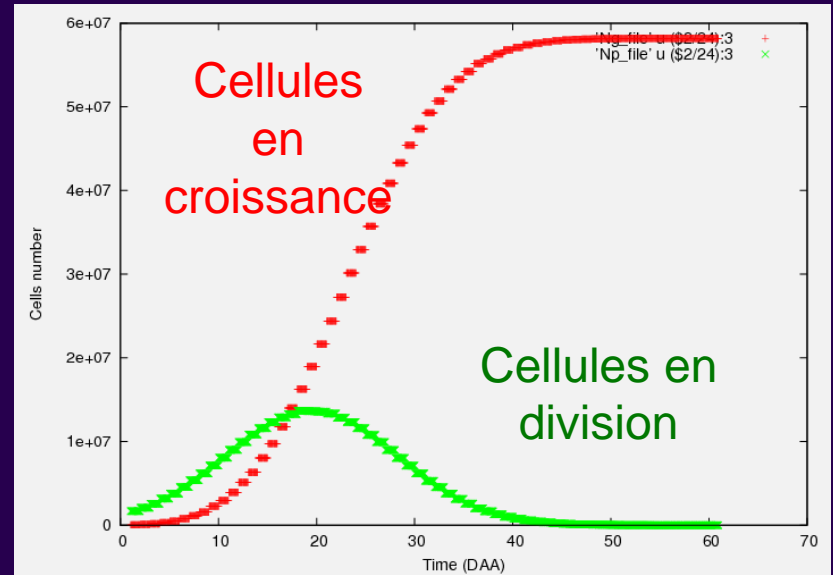
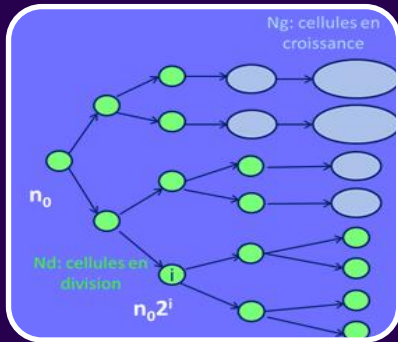


# Intégration vers le haut...



# Intégration vers le bas...

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

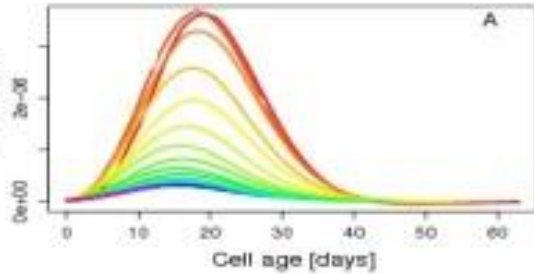


En cours...

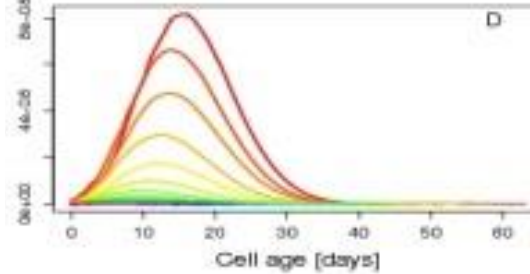
# Intégration vers le bas...

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

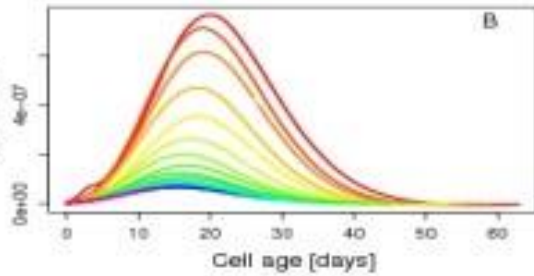
Flux phloémien



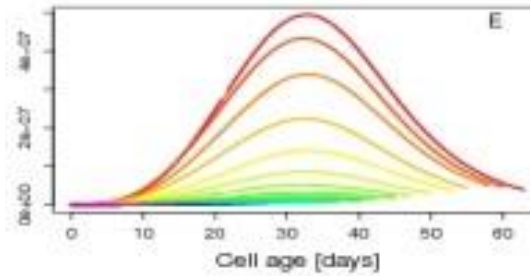
Transport  
symplastique



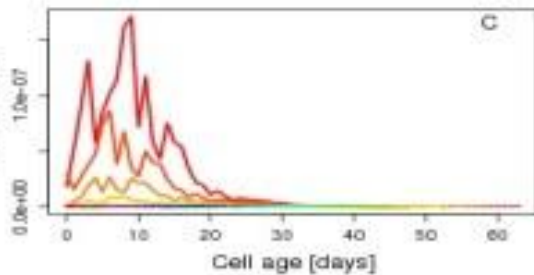
Flux xylémien



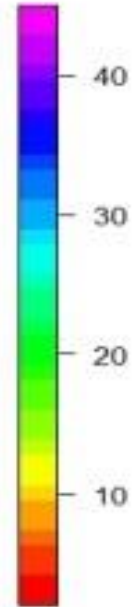
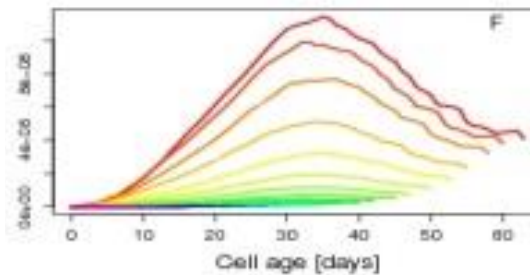
Transport actif



Transpiraton

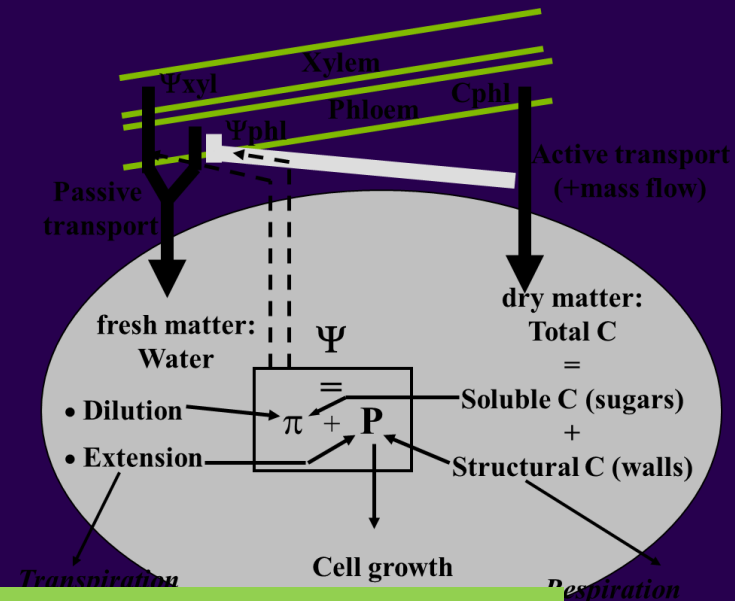
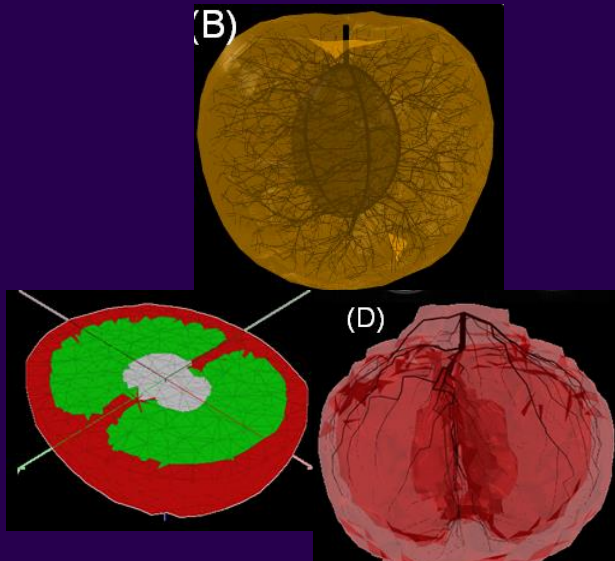


Respiration



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

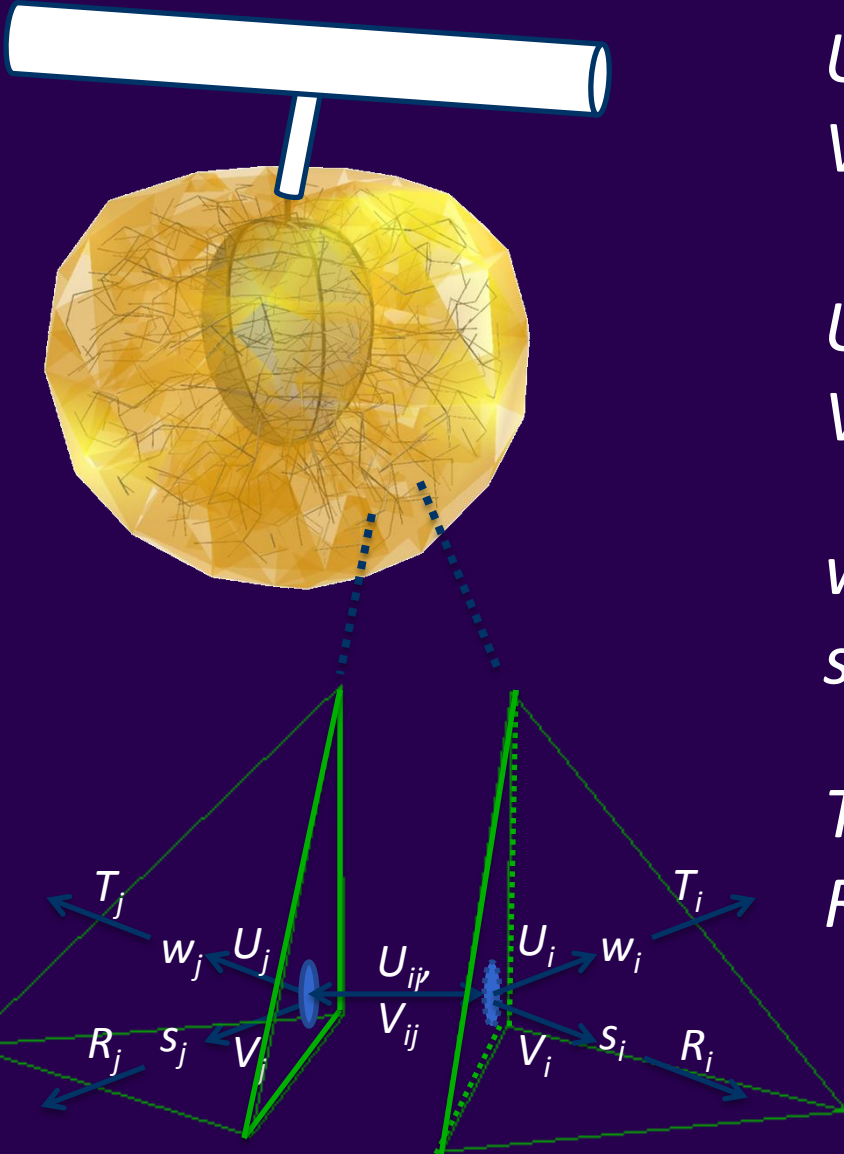


Idéotypes  
forme, structure  
interne, cuticule...

## Function

- Carbon and water fluxes
- Growth
- Transpiration
- Respiration

# 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

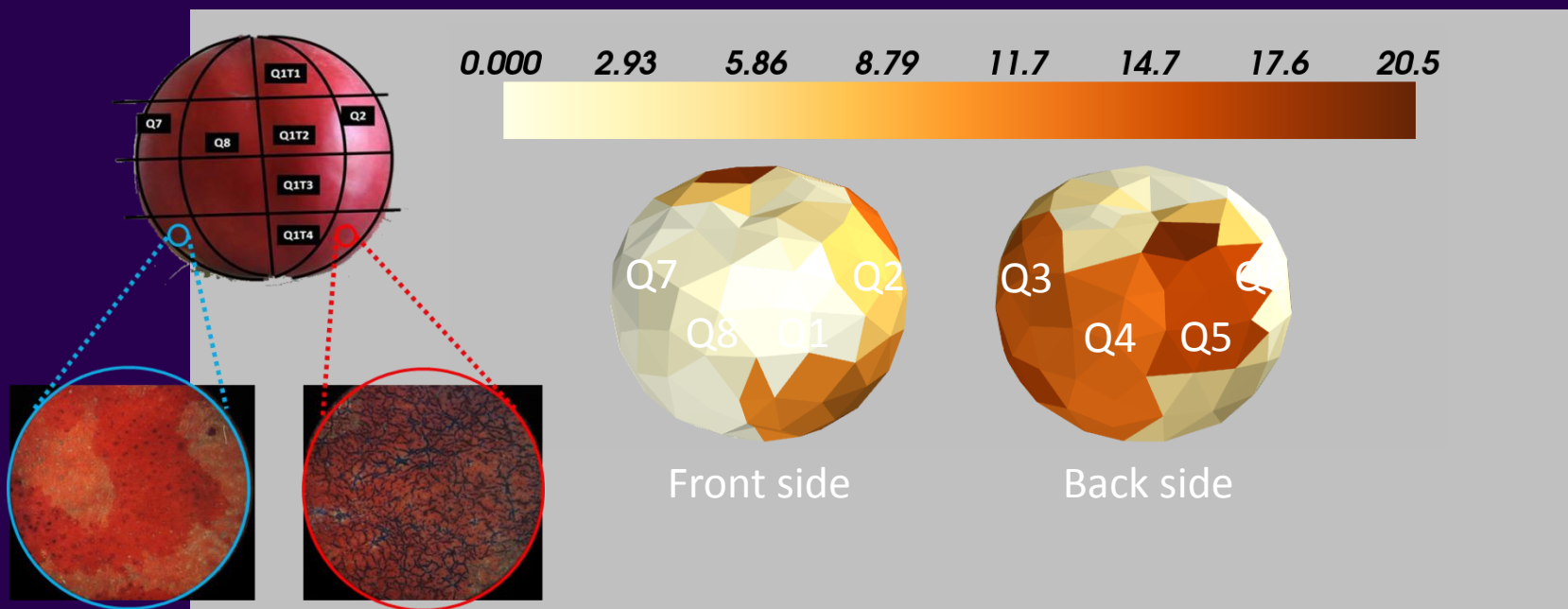
$W_i$  : water content

$S_i$  : carbon content

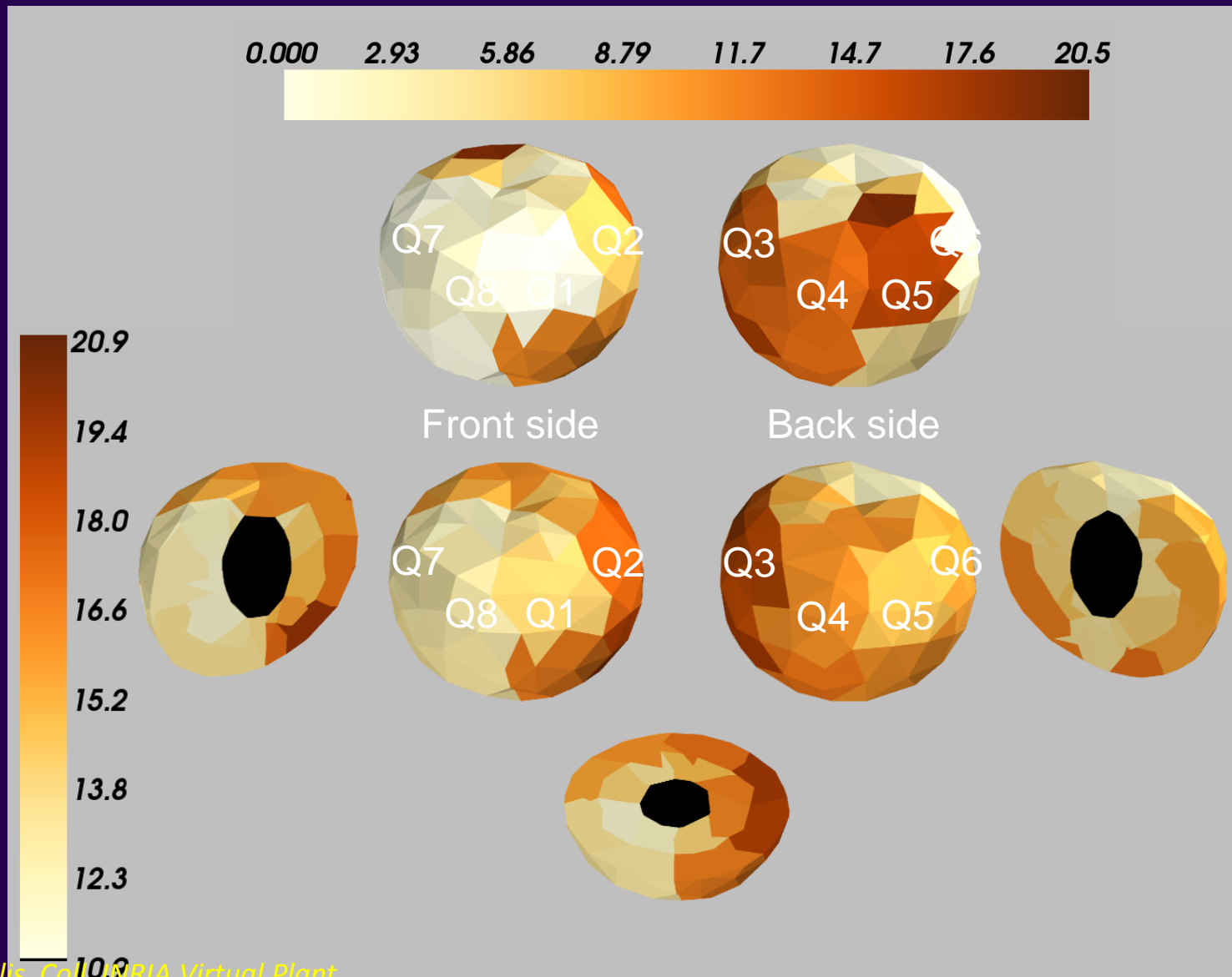
$T_i$  : Transpiration from external tetrahedra

$R_i$  : 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)

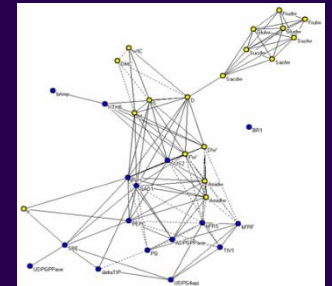
Simuler des descendance et faire de la sélection in silico d'idéotypes (méthodes d'optimisation multicritères)

- **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



