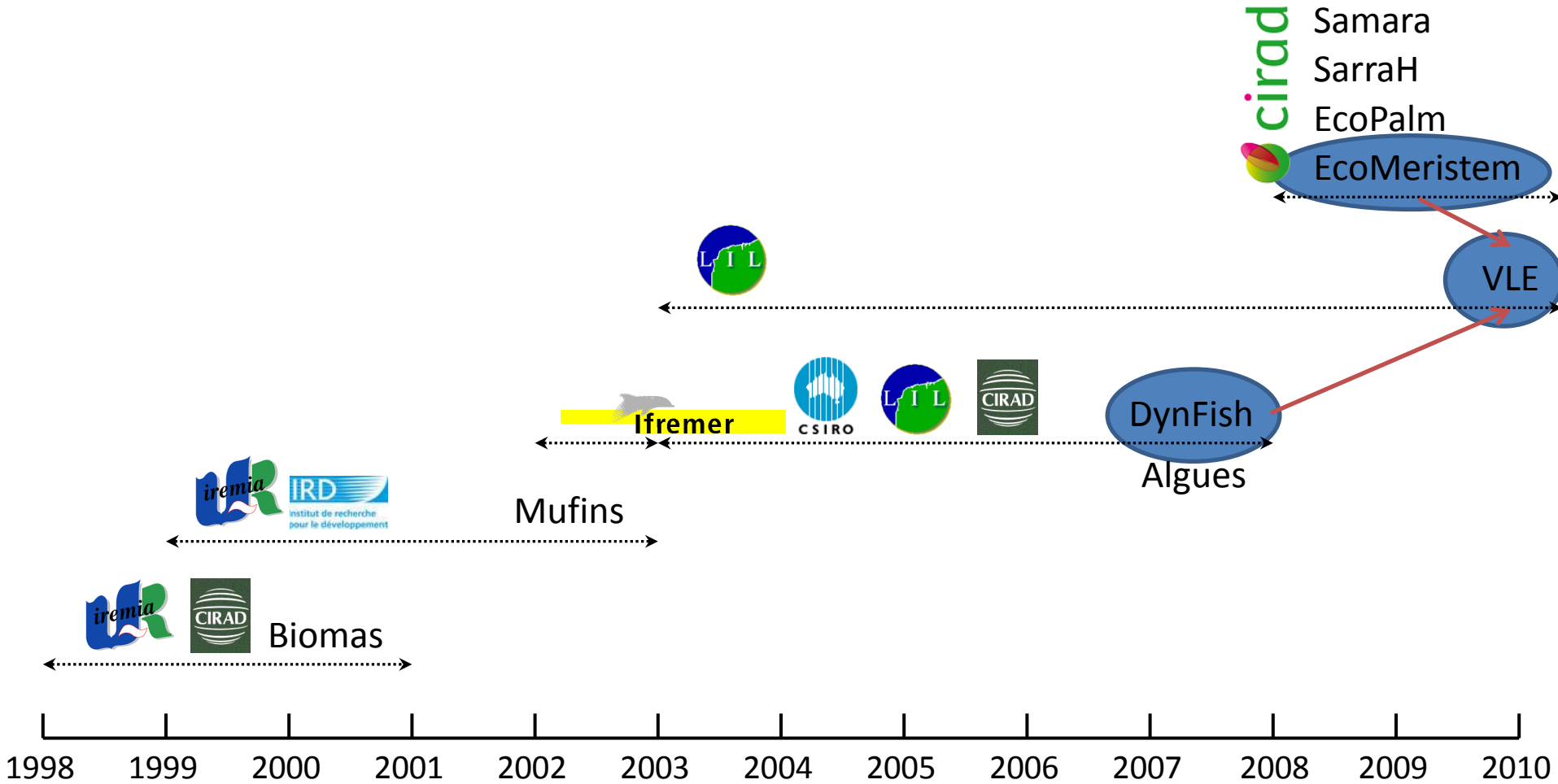


Modélisation / Simulation de Systèmes Biologiques (Exploités)

Jean-Christophe Soulié

CIRAD – UMR AGAP, Equipe PAM

Historique



DynFish

J.-C. Soulié

CIRAD – UMR AGAP, Equipe PAM

O. Thebaud

IFREMER – DEM / CSIRO - CMAR



Ifremer

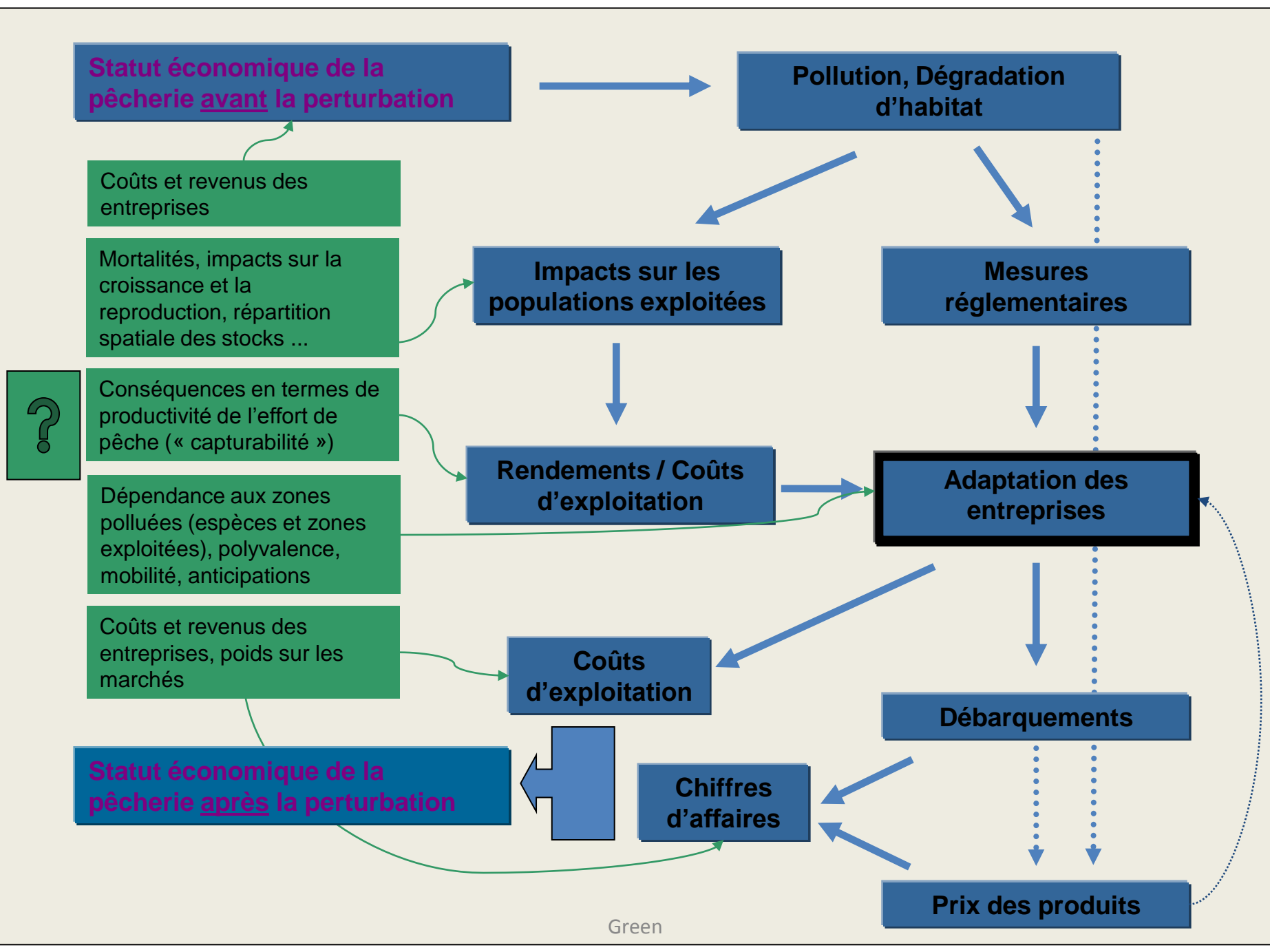


Modélisation des stratégies d'exploitation

- Question centrale :
 - Comment les entreprises de pêche répondent-elles à court-terme aux modifications des conditions (économiques, écologiques, institutionnelles) dans lesquelles elles opèrent ?

Modélisation des stratégies d'exploitation

- Connaissance permettant de mieux évaluer/anticiper :
 - Les effets économiques réels de mesures de régulation ou de perturbations environnementales, au niveau global des pêcheries
 - La répartition de ces effets au sein des pêcheries
 - L'évolution associée de la pression de pêche sur l'écosystème
- Facteurs influant sur l'attitude des pêcheurs vis à vis de changements / phases de transition



Statut économique de la pêche avant la perturbation

Pollution, Dégradation d'habitat

Coûts et revenus des entreprises

Mortalités, impacts sur la croissance et la reproduction, répartition spatiale des stocks ...

Impacts sur les populations exploitées

Mesures réglementaires



Conséquences en termes de productivité de l'effort de pêche (« capturabilité »)

Rendements / Coûts d'exploitation

Adaptation des entreprises

Dépendance aux zones polluées (espèces et zones exploitées), polyvalence, mobilité, anticipations

Coûts et revenus des entreprises, poids sur les marchés

Coûts d'exploitation

Débarquements

Statut économique de la pêche après la perturbation

Chiffres d'affaires

Prix des produits

Green

Modélisation des stratégies d'exploitation

- Hypothèses
 - Les entreprises agissent de façon à maximiser leurs profits
 - A court terme, elles contrôlent l'utilisation (intensité et allocation) d'une capacité de pêche donnée
 - A chaque stratégie d'utilisation correspond un ensemble de coûts variables et de recettes mesurables
 - Maximisation du profit = choix des stratégies de pêche auxquelles sont associées les marges sur coûts variables les plus élevées

Modélisation des stratégies d'exploitation

- Utilisation d'une plate-forme multi-agents
 - Permet d'introduire un nombre important de dimensions dans l'analyse tout en préservant la possibilité de suivre l'évolution de composantes « locales » du système modélisé
 - Avantages techniques

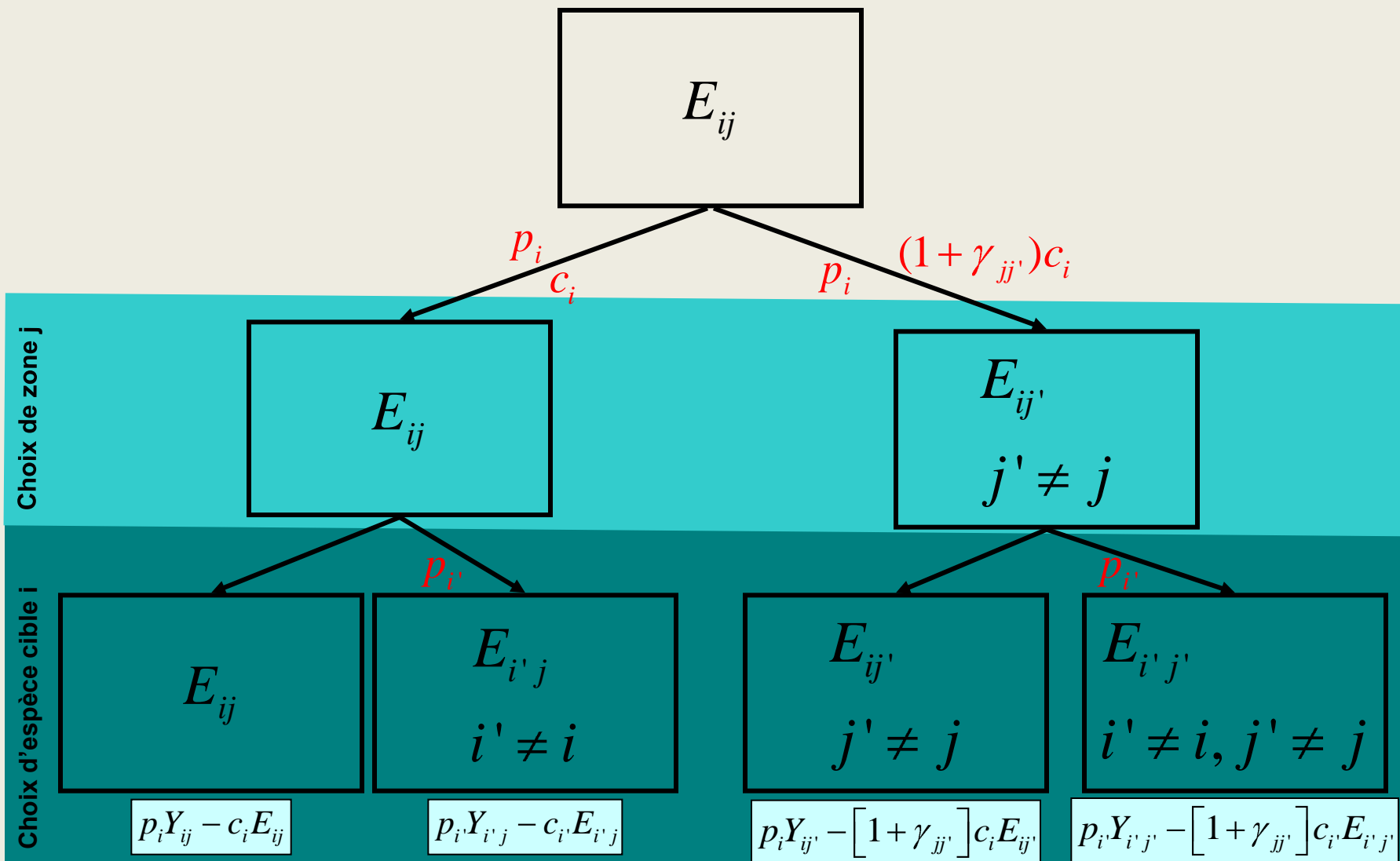
Modèle simple de pêcherie multi-métiers

- Outil : plate-forme Cormas développée par le CIRAD-GREEN
- Une flotte de navires polyvalents et mobiles sur une aire de référence divisée en plusieurs zones
- Un ensemble d'espèces cibles indépendantes distribuées dans les zones
- Mobilité spatiale des espèces variable suivant l'espèce et la connectivité entre zones
- Modèle global par stock (croissance naturelle, biomasse maximale)
- Métier = capture d'une espèce dans une zone, avec un niveau d'efficacité susceptible de varier suivant l'espèce et la zone
- Prix par espèce fixe
- Coûts variables unitaires de la pêche = $f(\text{espèce ciblée})$

Dynamique

- Ressources :
 - Dynamique des stocks = croissance naturelle + migrations – captures
- Effort nominal :
 - Dynamique de l'effort nominal par métier = f(marges par unité d'effort anticipées par métier contraintes techniques de productivité, de mobilité et de polyvalence)
 - Hypothèse de comportement « myope » des entreprises : marges anticipées = marges observées au pas de temps précédent, corrigées des coûts associés à un changement de zone

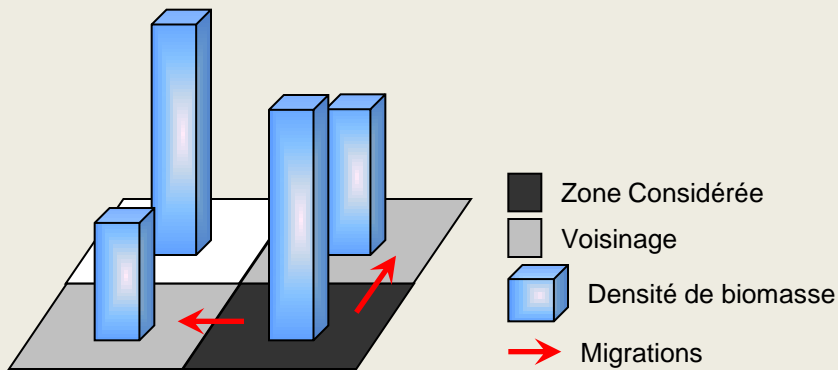
Arbre de décision



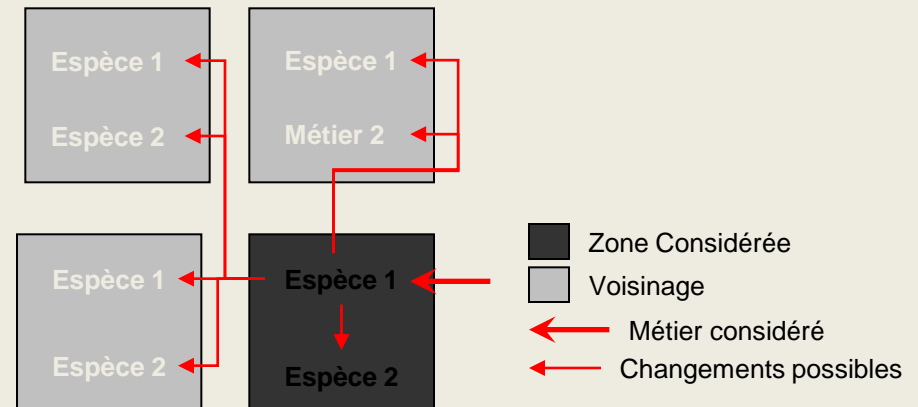
Simulation d'une fermeture temporaire de zone

Cas simple : 4 zones, 2 espèces

Dynamique de la biomasse

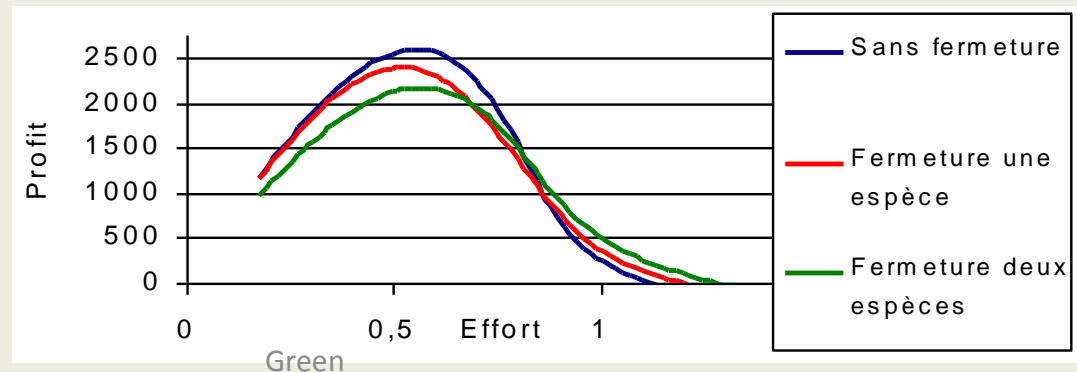


Dynamique de l'effort de pêche



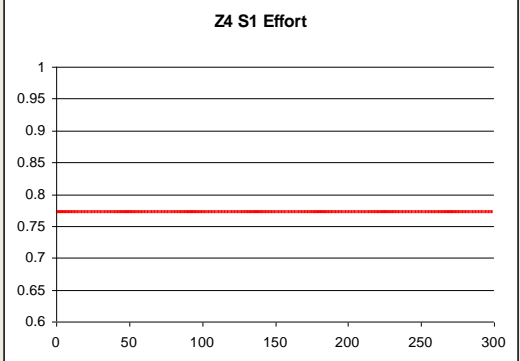
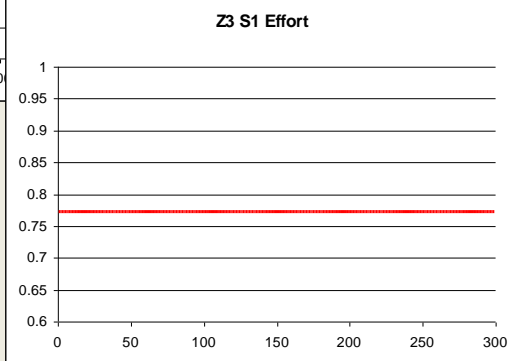
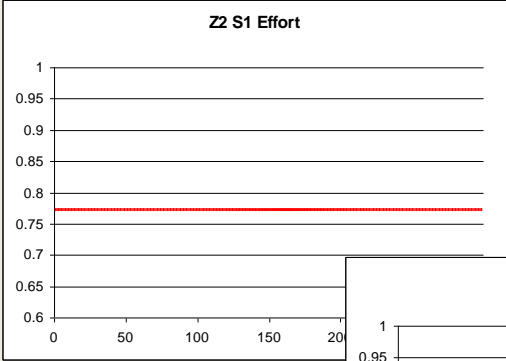
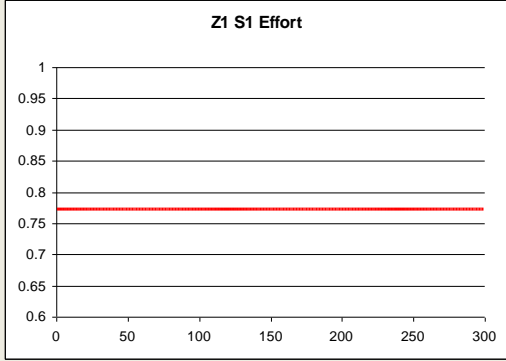
Scenario: fermeture temporaire (respectée) de la zone 1 à la pêche d'une ou deux espèces

Profit d'équilibre global de la pêcherie

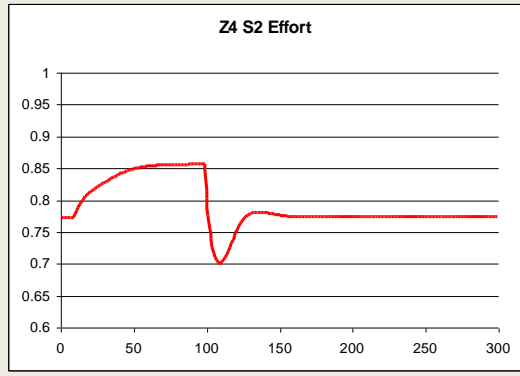
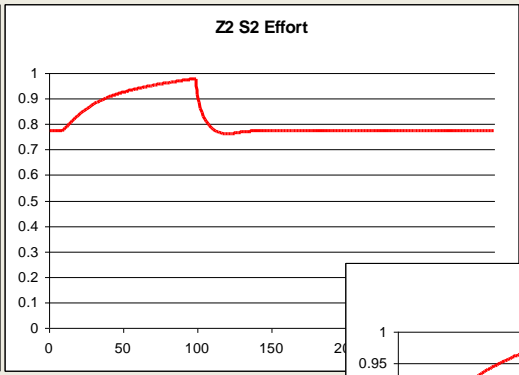
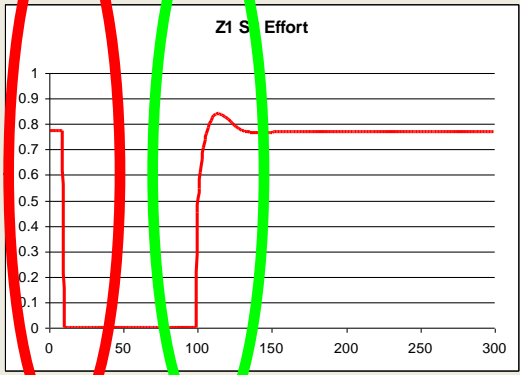


Dynamique de la pêche

Flotte mobile, non-polyvalente



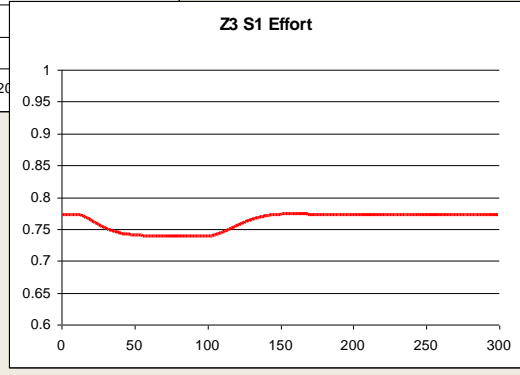
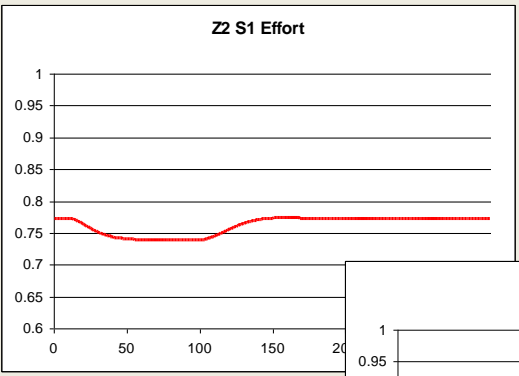
Interdiction de pêche de la espèce 2
à partir de t=100 pas de temps 10



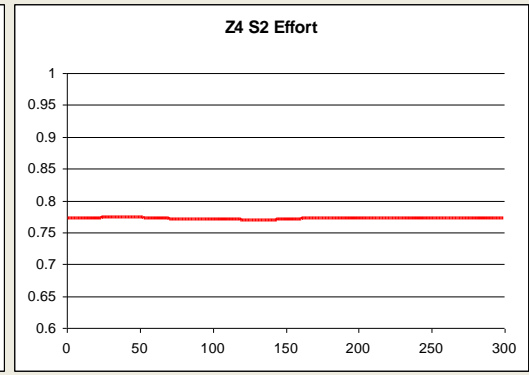
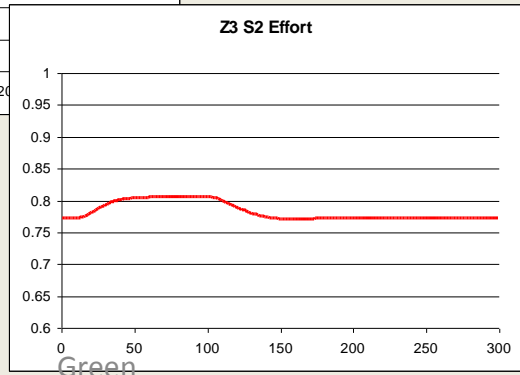
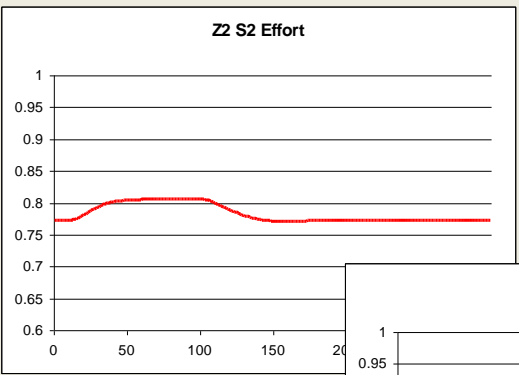
Green

Dynamique de la pêche

Flotte polyvalente, non-mobile

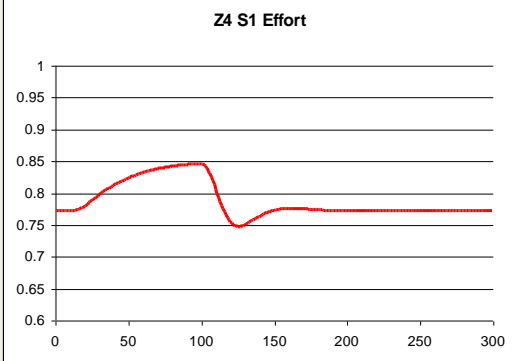
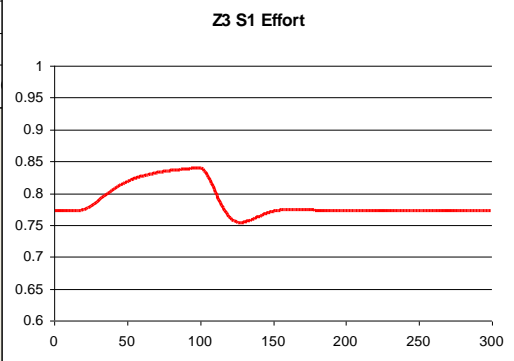
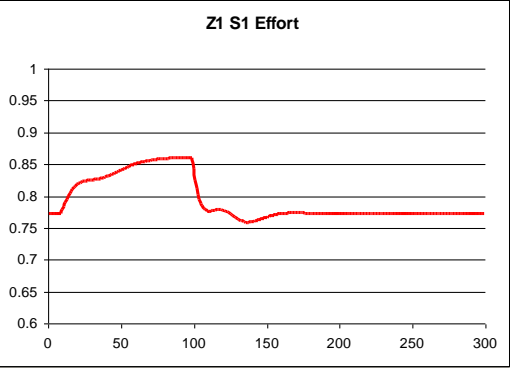


Répartition de pêche de l'espèce 2
par les zones de pêche pas de temps 10

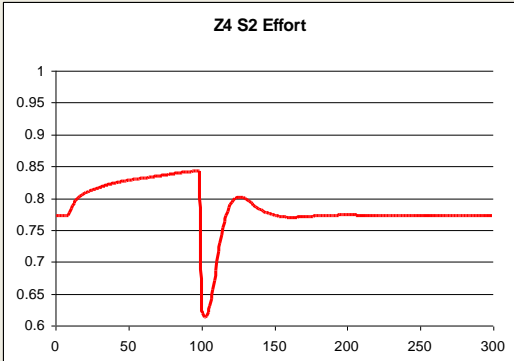
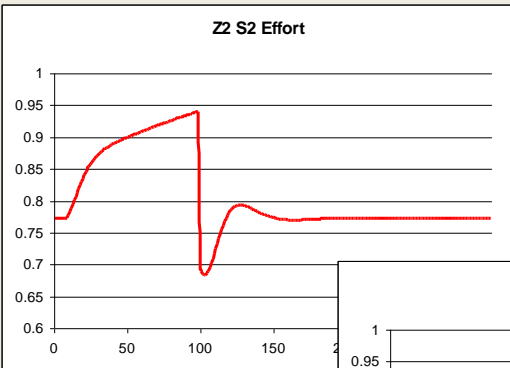
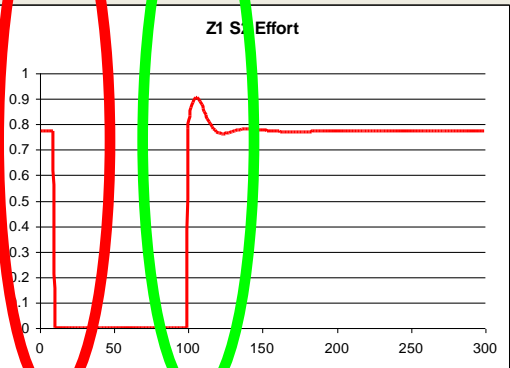


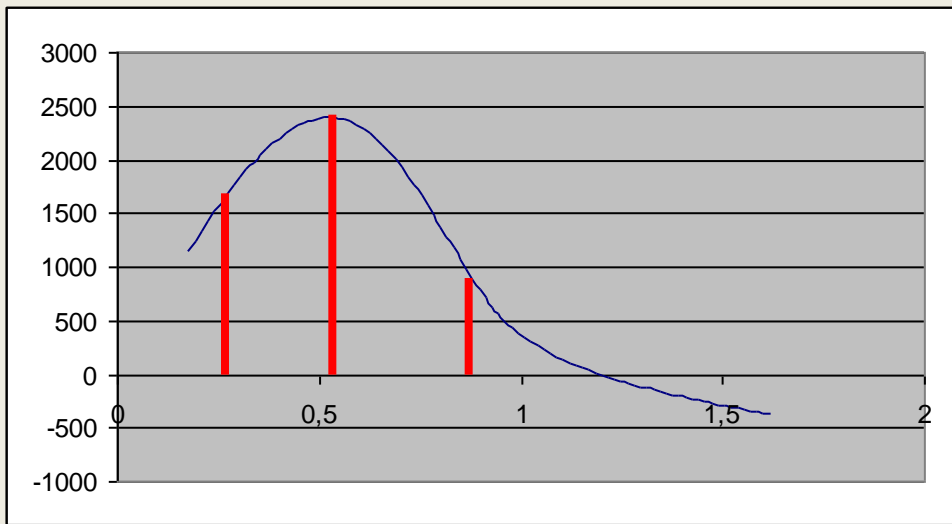
Dynamique de la pêche

Flotte polyvalente et mobile



Interdiction de pêche de la espèce 2
 précise à 100 pas de temps 10

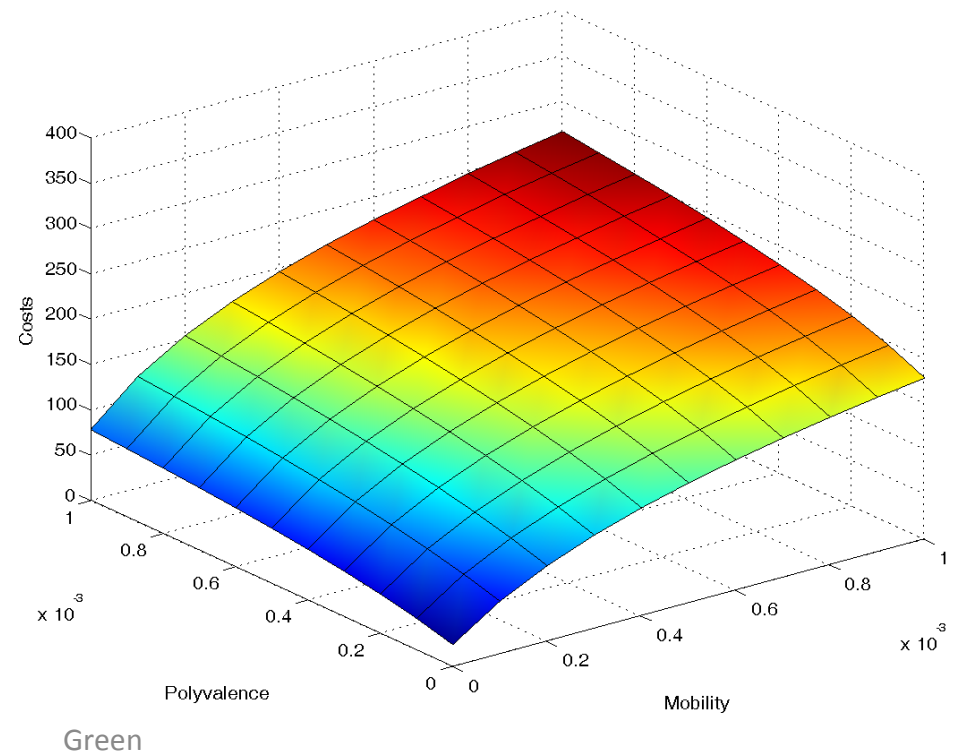




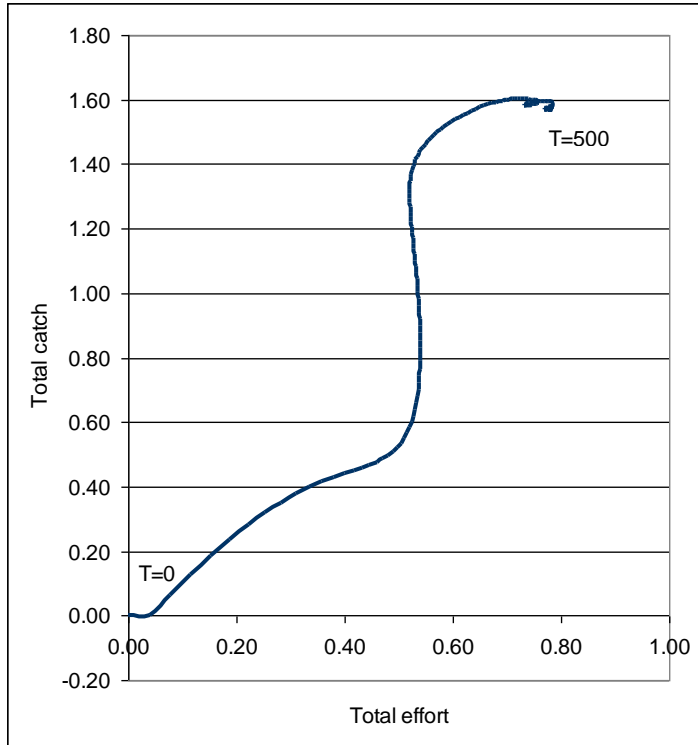
Sensibilité des impacts au statut de la pêche et à la réactivité de la flotte

Statut de la pêche :

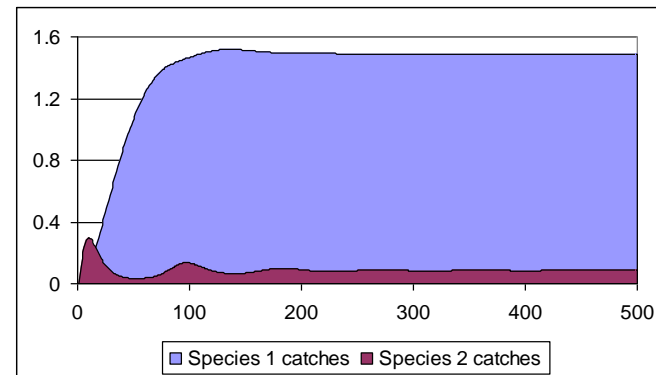
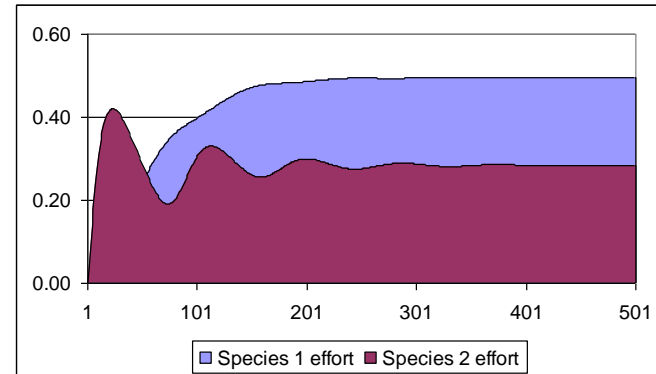
- En deçà du REM (pêche sous-exploitée)
- Au REM (exploitation optimale)
- Au delà du REM (pêche sur-exploitée)



Dynamique de la pêche

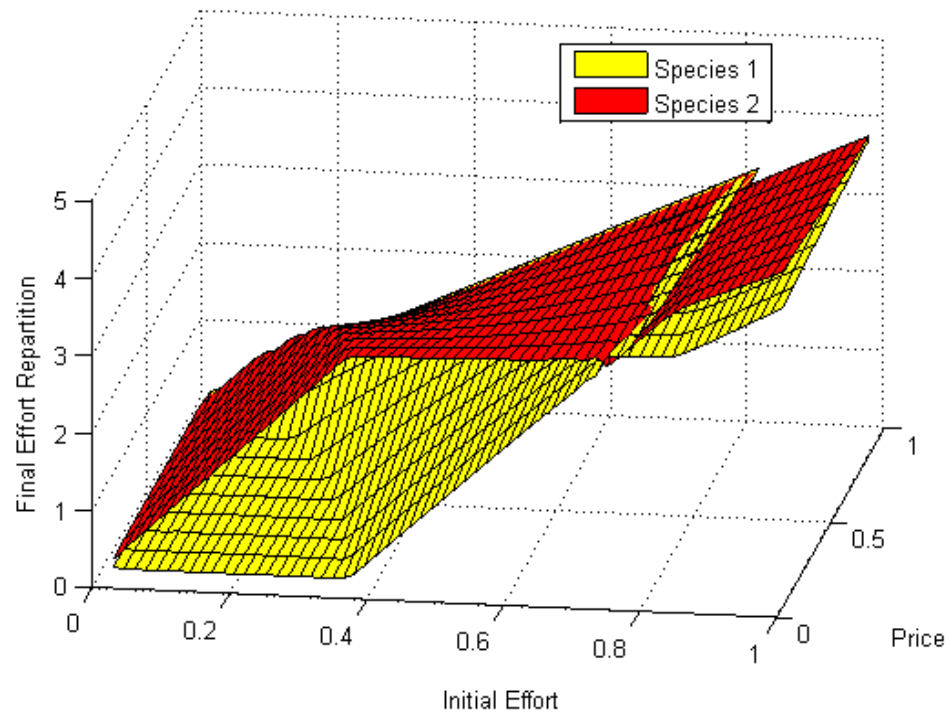


**Evolution de l'effort et des captures
(niveau global)**



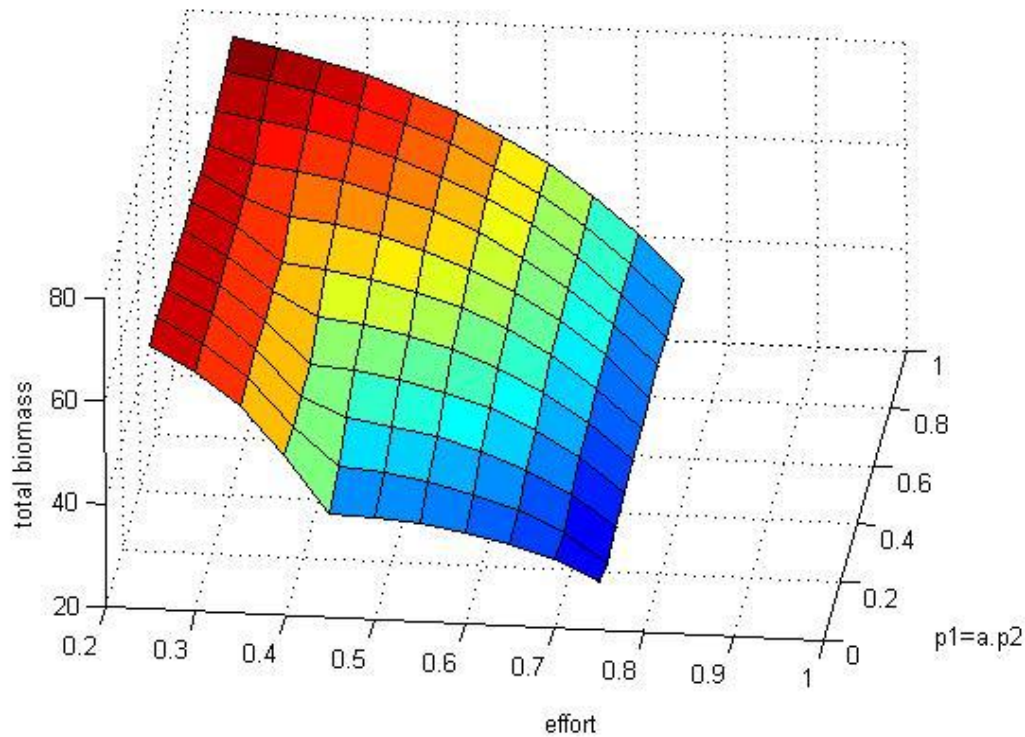
**Evolution de l'effort et des captures
(par espèces)**

Simulation à l'équilibre



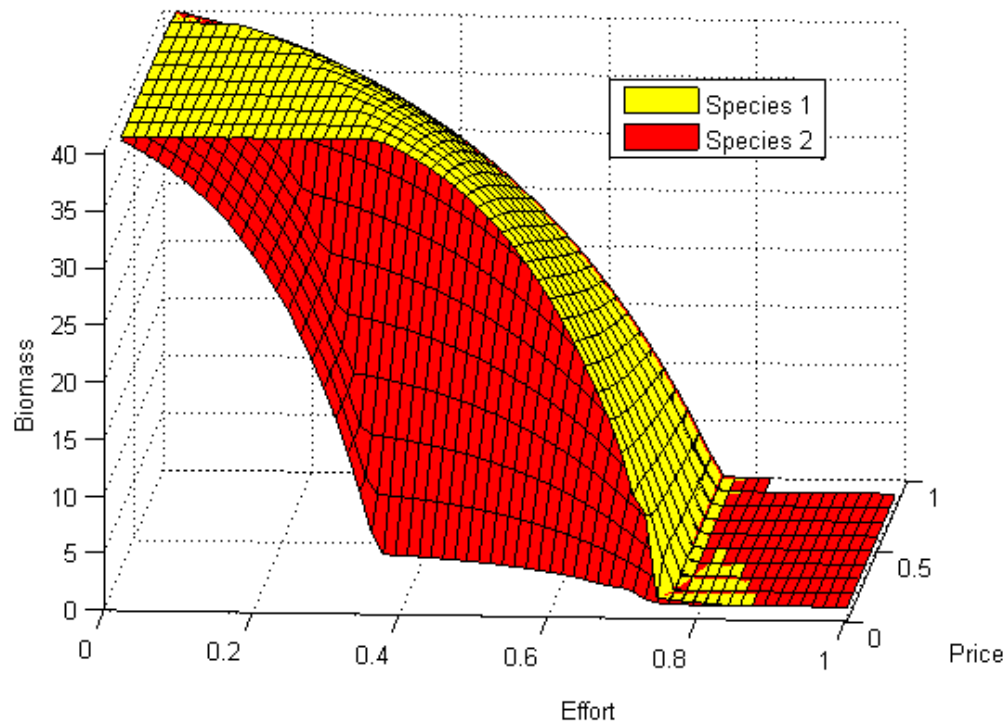
Allocation de l'effort à l'équilibre par espèce en fonction de l'effort total et des différences de prix entre les espèces

Simulation à l'équilibre



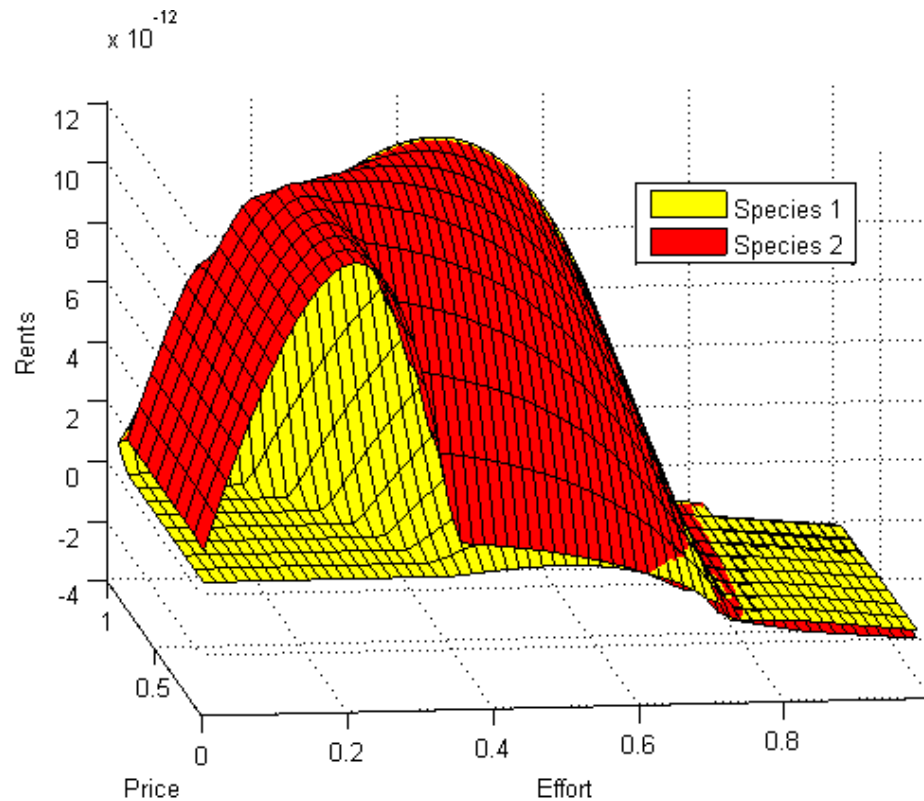
Biomasse globale à l'équilibre en fonction de l'effort total et des différences de prix entre les espèces

Simulation à l'équilibre



Biomasse à l'équilibre par espèce en fonction de l'effort total et des différences de prix entre les espèces

Simulation à l'équilibre



Rente à l'équilibre par espèce en fonction de l'effort total et des différences de prix entre les espèces

Modélisation & Simulation des Plantes. Application aux interactions GxE

J.-C. Soulié

L. Rouan, D. Luquet, M. Dingkuhn

CIRAD – UMR AGAP, Equipe PAM

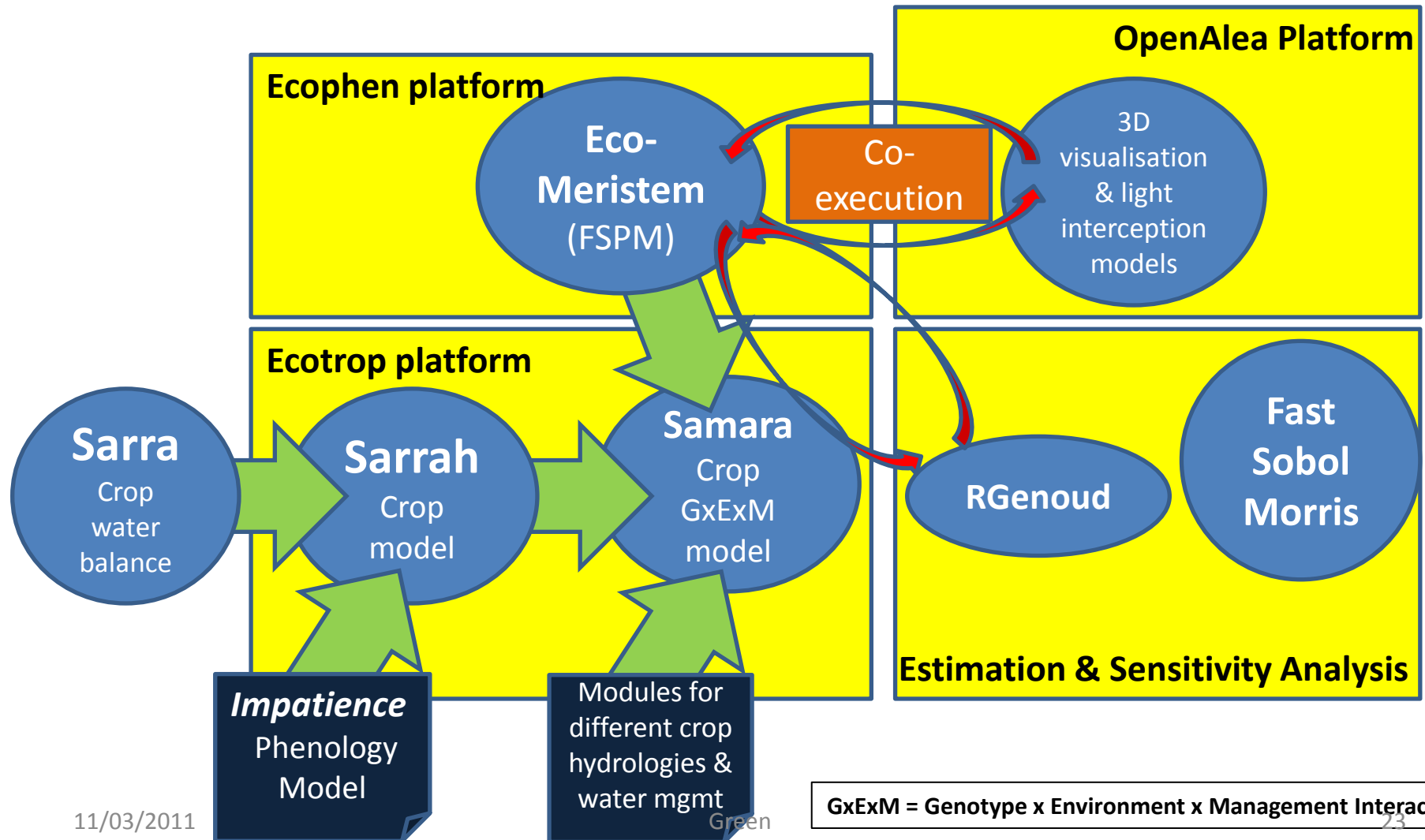
C. Pradal, C. Fournier

CIRAD/INRIA – UMR AGAP, Equipe VP

M. Chelle

INRA UMR EGC

Une famille complémentaire de modèle de cultures

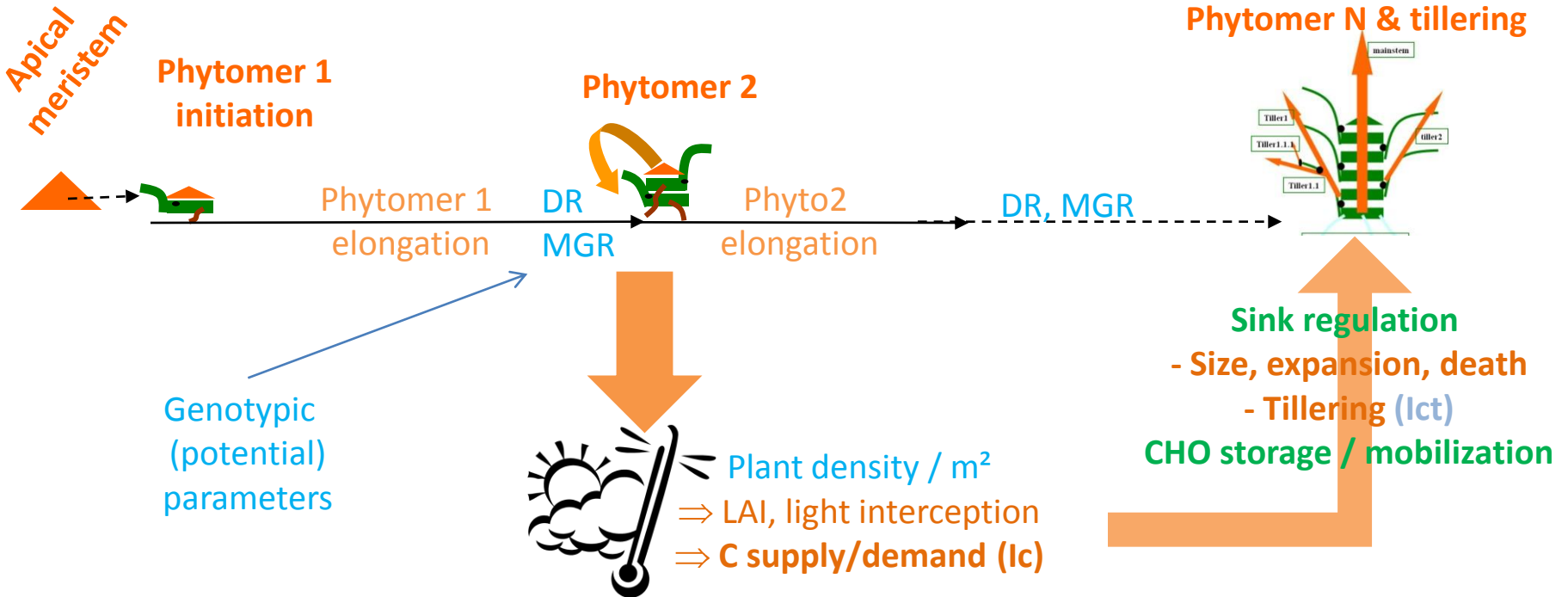


Hypothèses & concepts fondateurs

- Bases G & E de la plasticité phénotypique via la régulation du métabolisme carboné et de l'allocation des ressources C (stress hydrique, photo-thermique, ...)
- Comprendre, quantifier et expliquer la diversité des comportements morphogénétiques (modélisation, étude génétique, ...)
- Thématiques adressées (graminées) :
 - Vigueur au départ et sa plasticité (riz) : tallage vs. plastochron vs. taille des organes vs. réserves en C (projet GCP, CIRAD)
 - Rôle des réserves C comme marqueur du comportement d'un génotype (avec ou sans stress)
 - Compétition grain, sucre, biomasse chez les sorgho sucrés (projet sweetfuel FP7)
 - Compétition biomasse, sucre chez la canne (ANR DELICAS)

Modèle fédérateur : Ecomeristem

Crop model simulating **plant morphogenesis** in its stand at daily time step (GxE)
Initial focus on **vegetative phase**



⇒ Plant phenotypic plasticity in response to C & water status (topology, 3D optional)

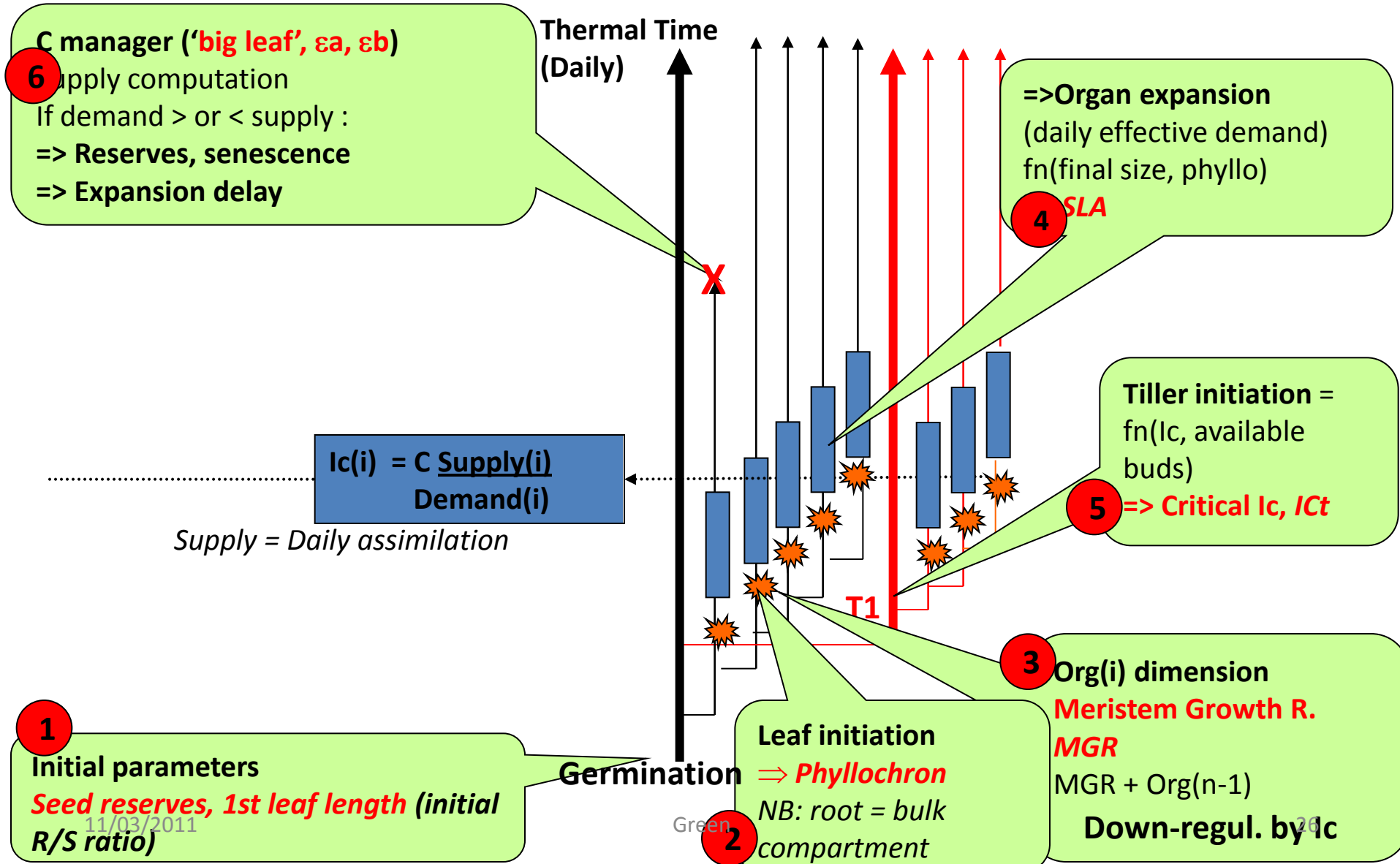
⇒ **Organ, plant & crop growth (biomass, size, death) & C storage** (plant compartment)

(organ structural and non structural biomass)

Ecomeristem: rice morphogenesis and its plasticity

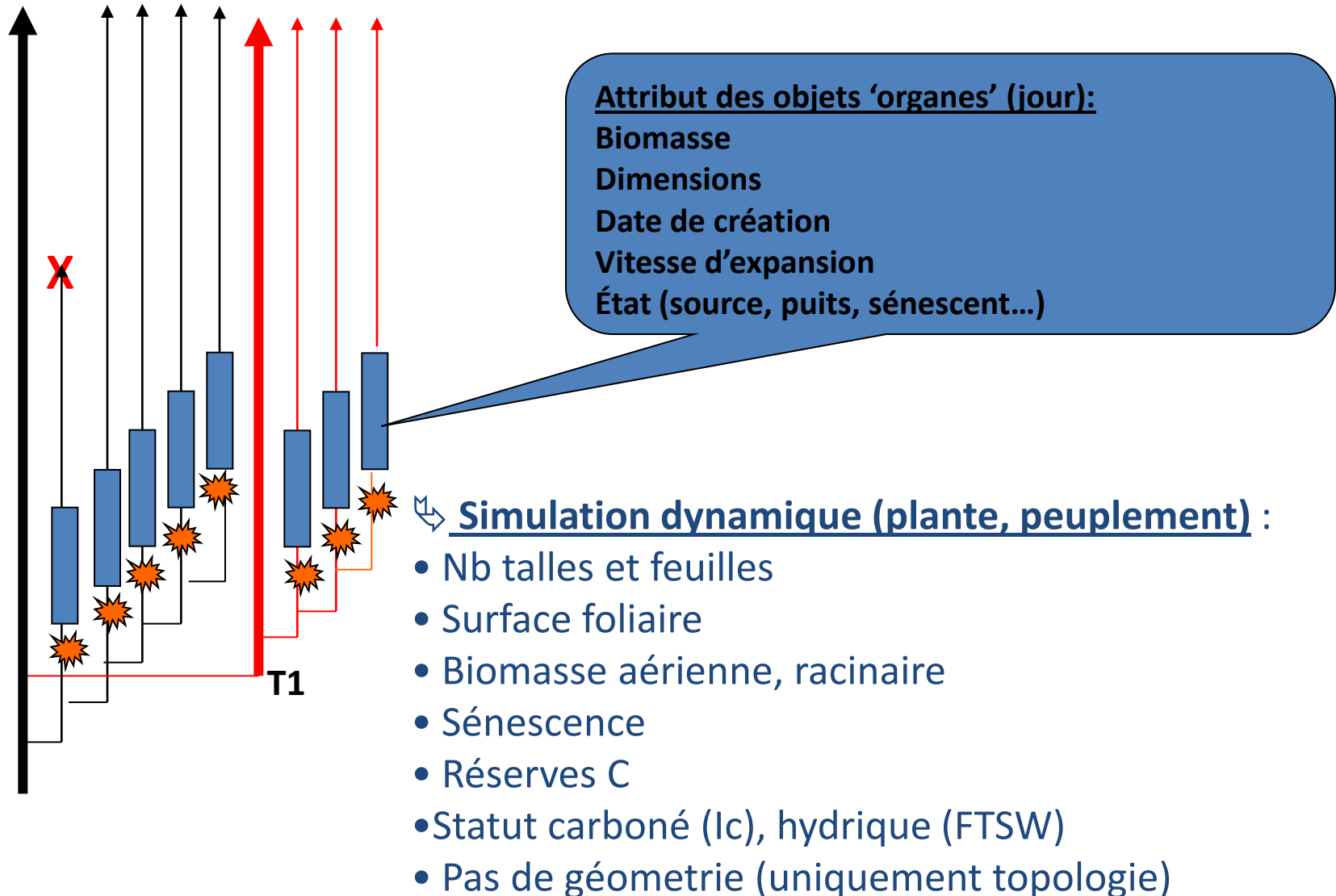
Luquet et al. 2006; Dingkuhn et al. 2006 (FPB 32-4)

Meristem: genetic regulation & env. of organ initiation and dimensioning



Sorties du modèle

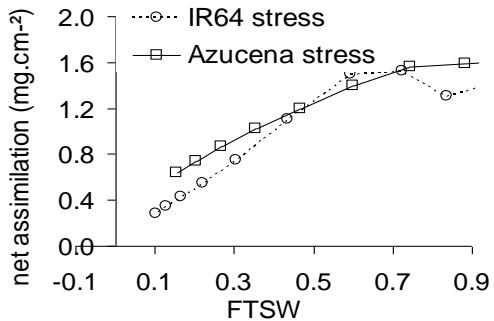
Simulation journalière du phenotype à l'échelle de l'organe



Adaptation du modèle au stress hydrique

4

CHO supply
 plant assimilation
 $fn[Tr, rolling, FTSW]$

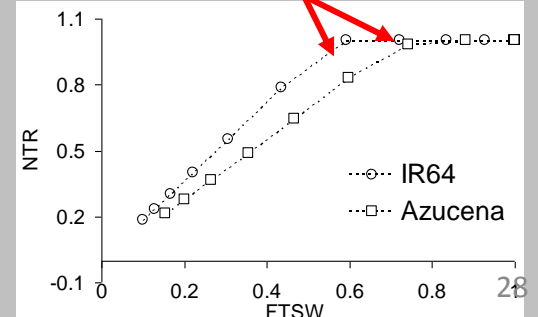


1

Water balance
 \Rightarrow FTSW (% eau dispo)
 $F_n(ETP, Transpir^{\circ}, supply)$

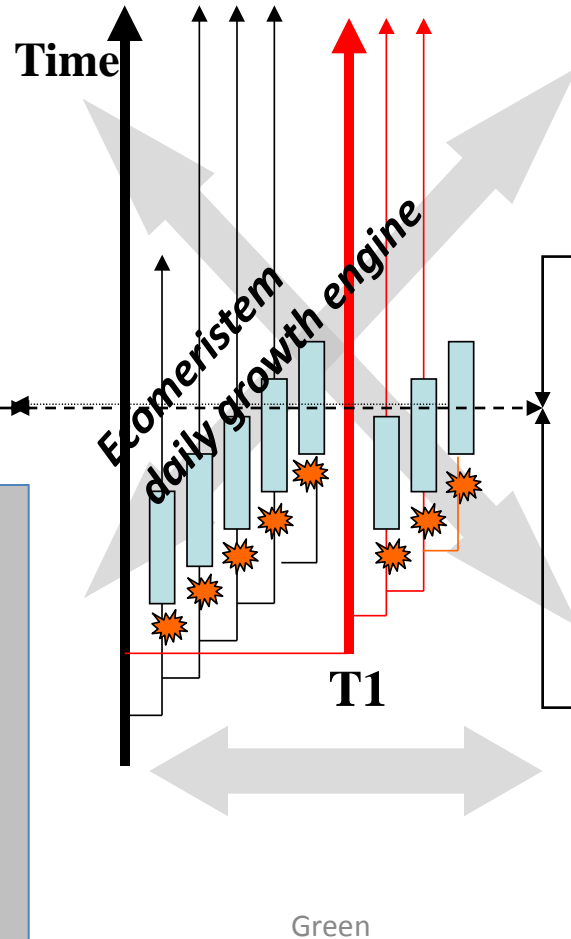
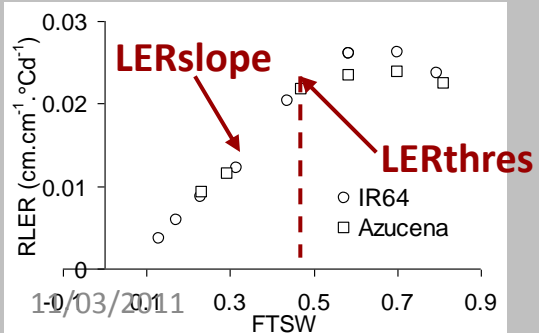
2

Water demand
 leaf transpiration
 $Tr = fn(TrThres, FTSW)$



3

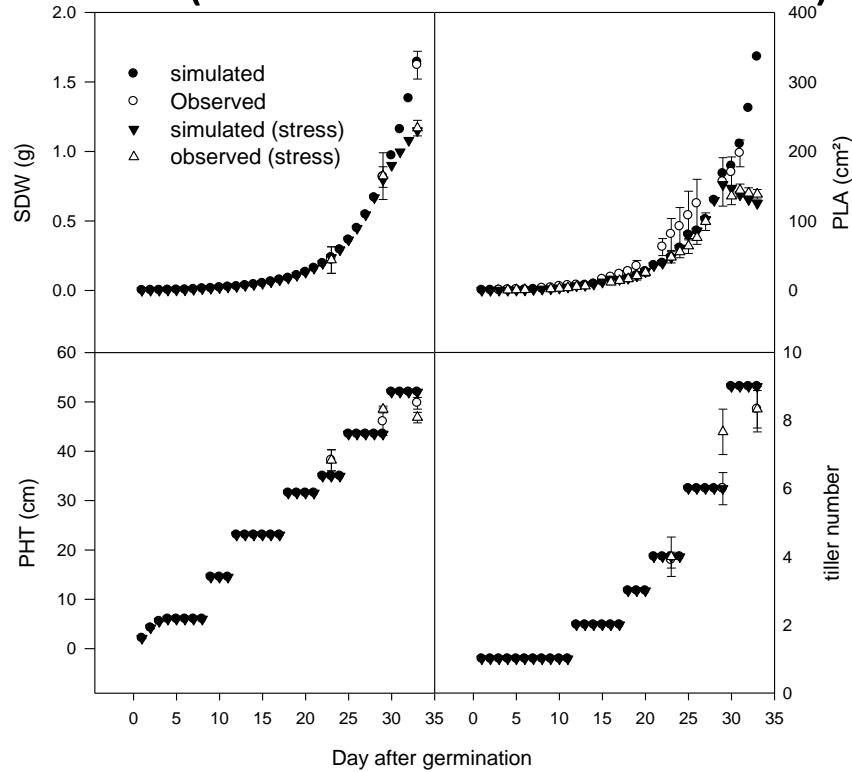
CHO demand
 leaf expansion rate



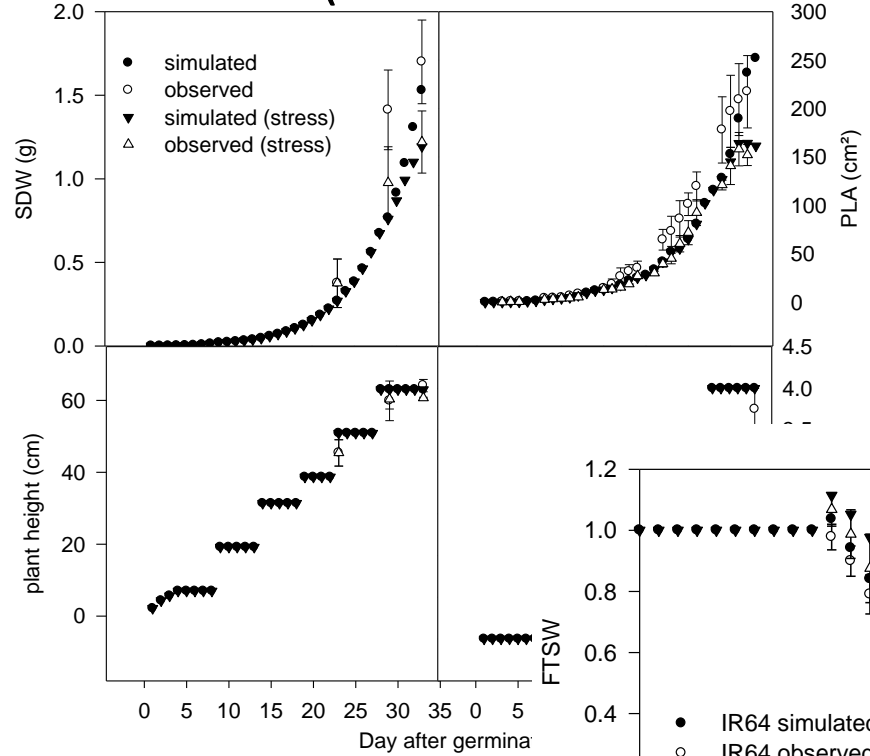
Model validation

In various conditions (Luquet et al. 2006ab, 2008...); vegetative phase (rice, sorghum)

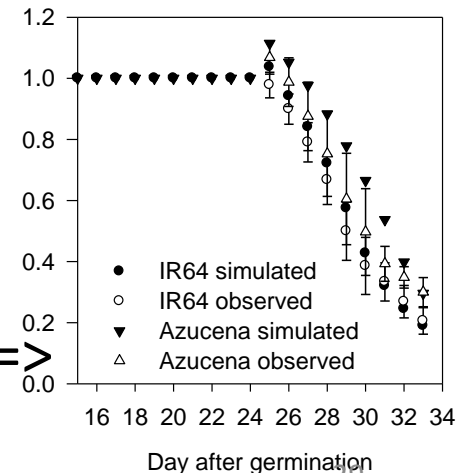
IR64 (validation on 2006 data)



Azucena (validation on 2006 data)



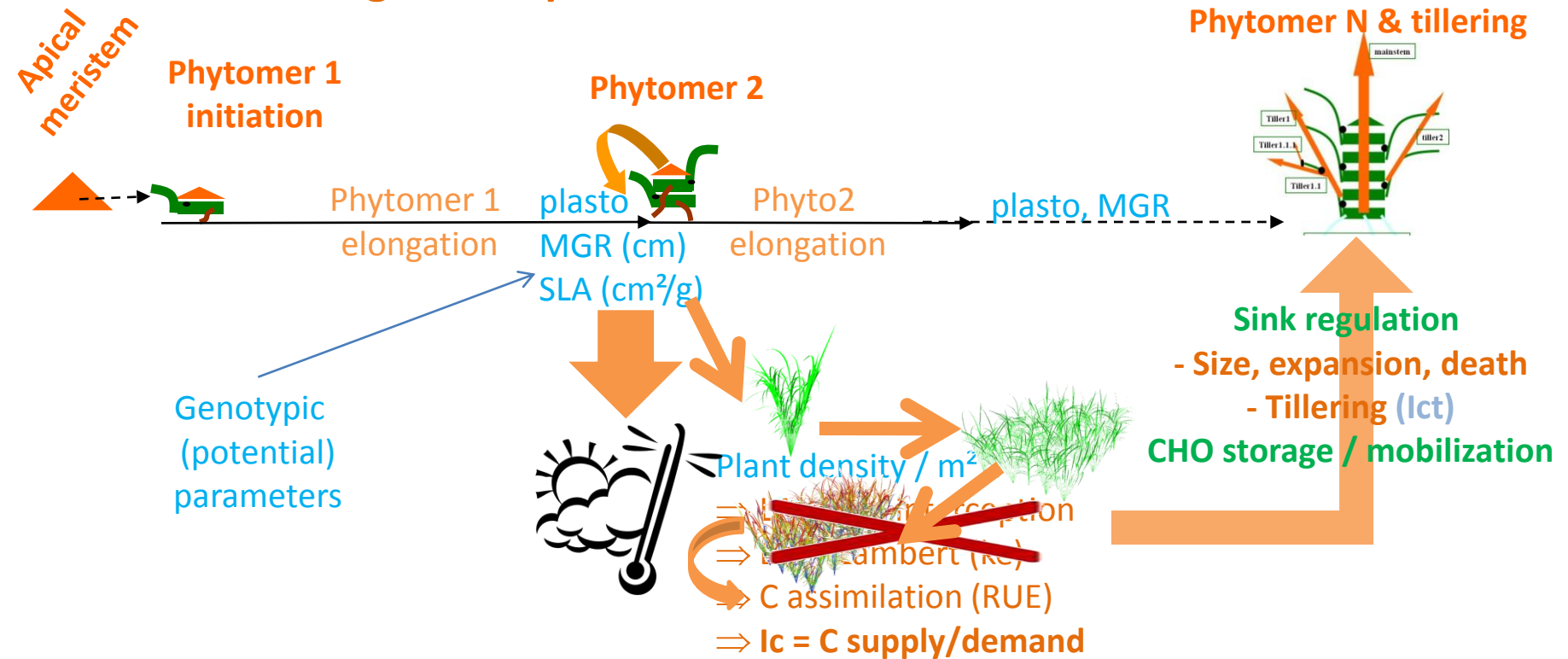
Validation of plant leaf transpiration =>



Ecomeristem – Couplage 3D

[Soulié et al., FSPM 2010]

Crop model simulating **plant morphogenesis** in its stand at daily time step
Initial focus on **vegetative phase**



First tests of Ecomeristem-3D: simulation experiment

- Starting from parameters of a reference genotype IR64 (indica)

| Parameter | Value (IR64) | Value modified sequentially |
|--|--------------|-----------------------------|
| MGR Meristem Growth Rate | 9 | - |
| l_{ct} , l_c threshold for tillering | 1 | 2 (sink limitation) |
| Plastochron °C.d | 45 | - |
| Plant density per m ² | 50 | 200 (source limitation) |

⇔ 3 simulations

- 40d simulation, optimal conditions (daily Tair 26°C; PAR 14MJ.m⁻².d⁻¹)
- 'Theoretical' plant geometry: IR64 tiller angles, wheat leaves (ADEL)
- 3 ways to compute radiation interception
 - Ecomeristem: Beer-Lambert $LIE = (1 - \exp(-K_e * LAI))$
 - Caribu: 1 solar direction (zenithal), only direct radiation
 - Caribu: 16 solar directions, scattered radiation

Coupling principles

(1) Ecomeristem (Luquet et al. 2006)

- Crop/plant morphogenesis & plasticity (GxE)
- Daily **topology, organ size**

(3) Caribu (Chelle & Andrieu 1998)

- PAR interception model on 3D plots
- Plant light Interception Efficiency (LIE)

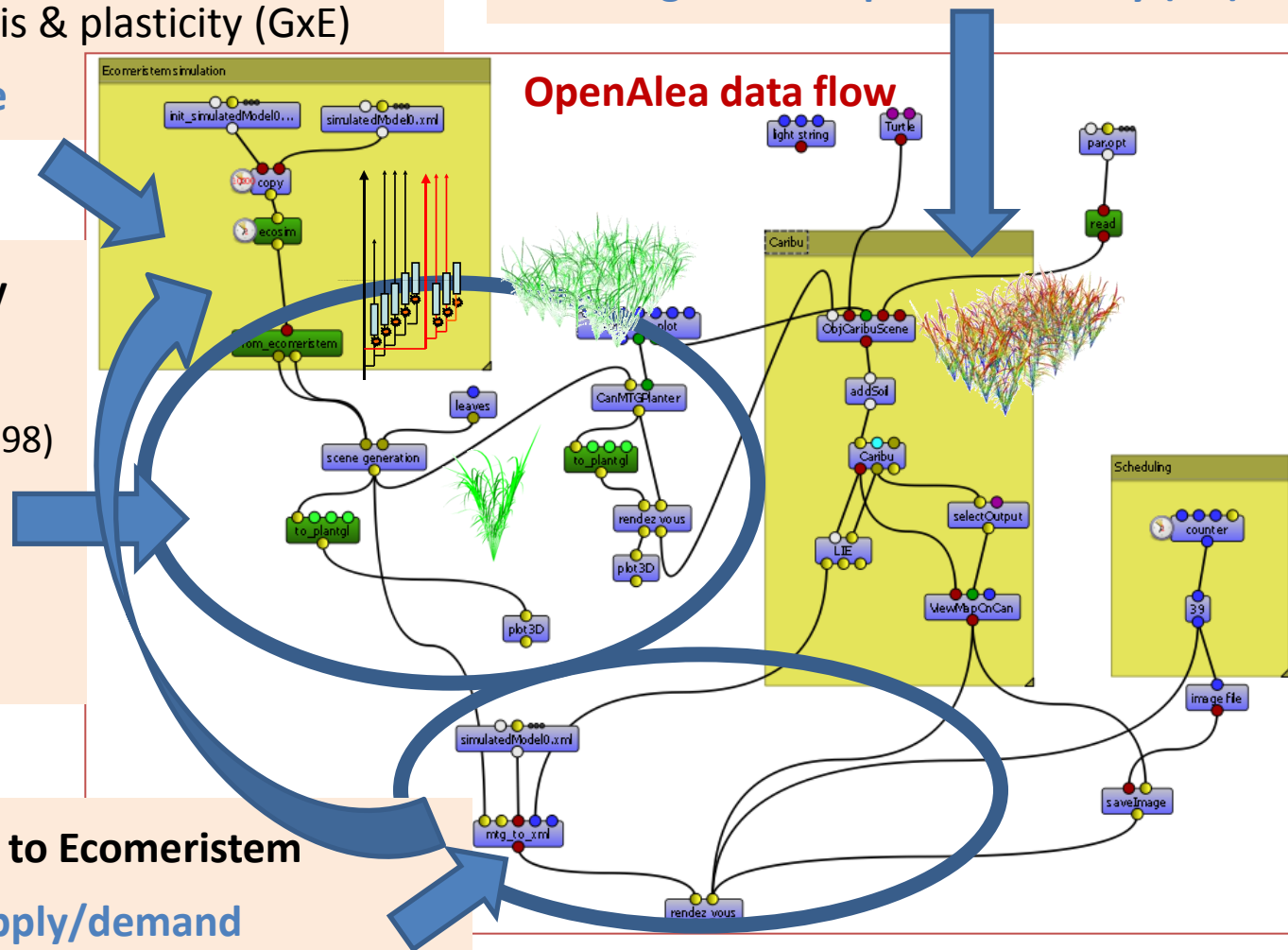
(2) Translation of topology

- MTG file (Godin et al. 1999)
- Leaf (Adel, Fournier & al. 1998)
- **Geometry** (plantGL)
- (Pradal & Bourdon 2009)

• 3D Plant & plot

(4) Plant state variable LIE to Ecomeristem

- C availability (RUE) & supply/demand
- Regulation on daily morphogenesis

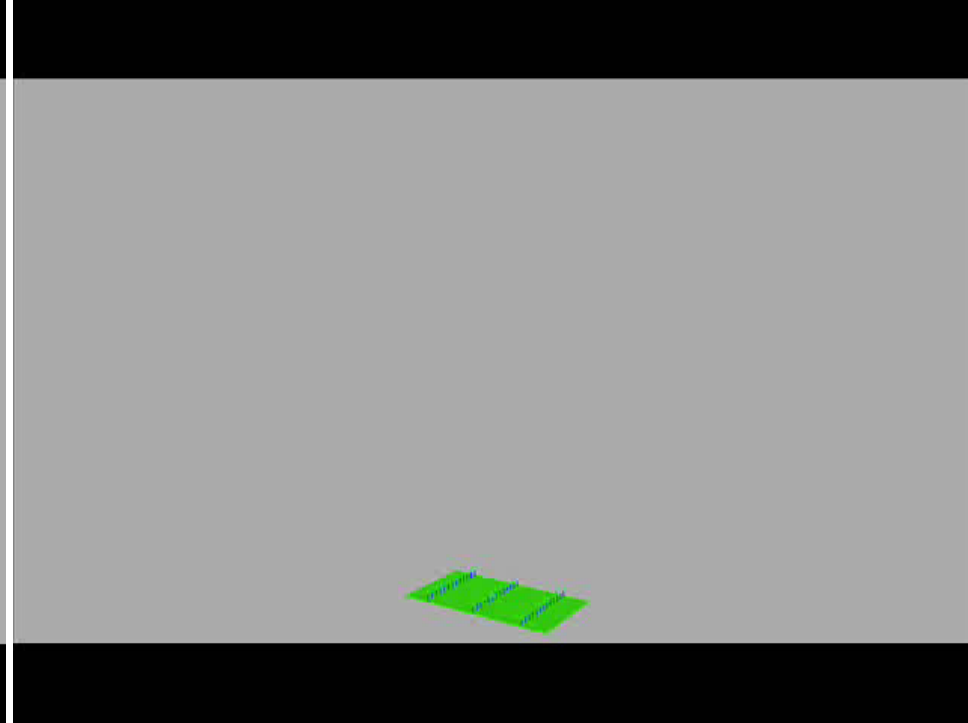
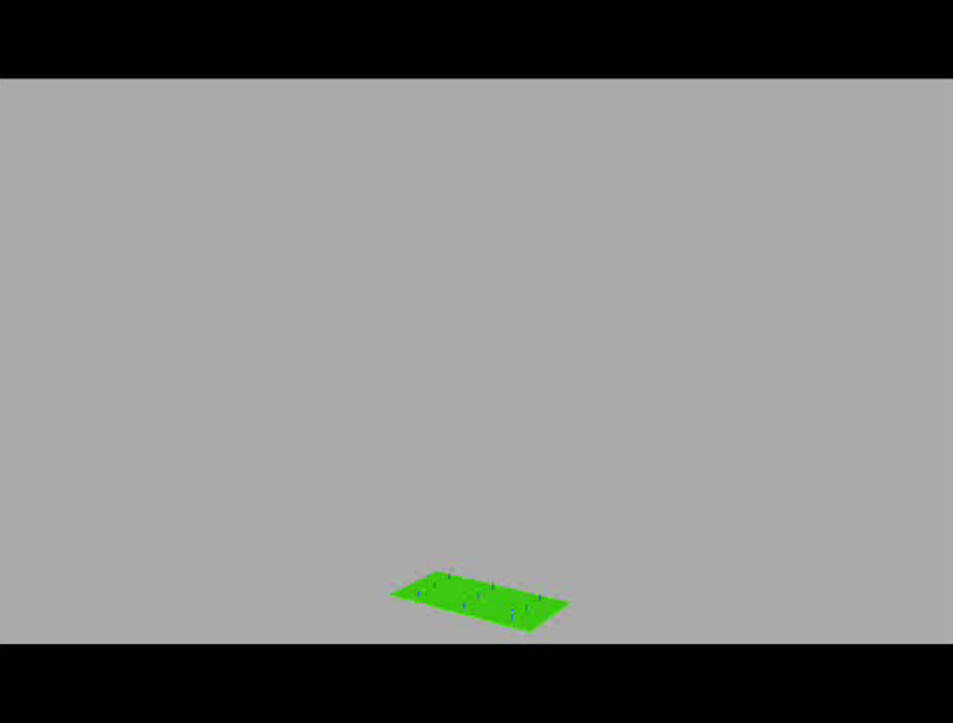


'Ecomeristem-3D'

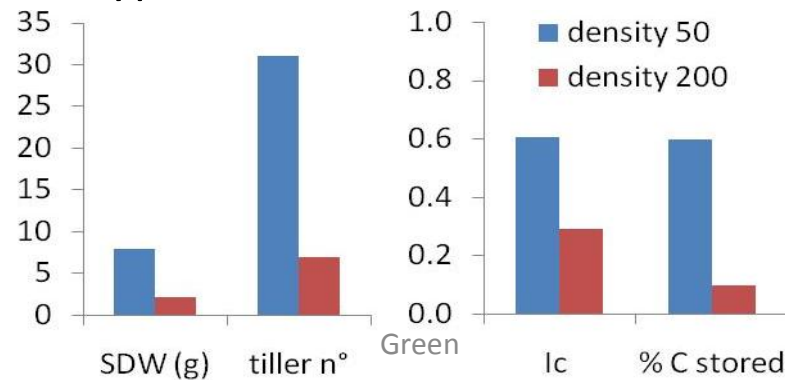
(direct radiation, zenith direction; 40d simulation; IR64)

Plant density : 50 / m²

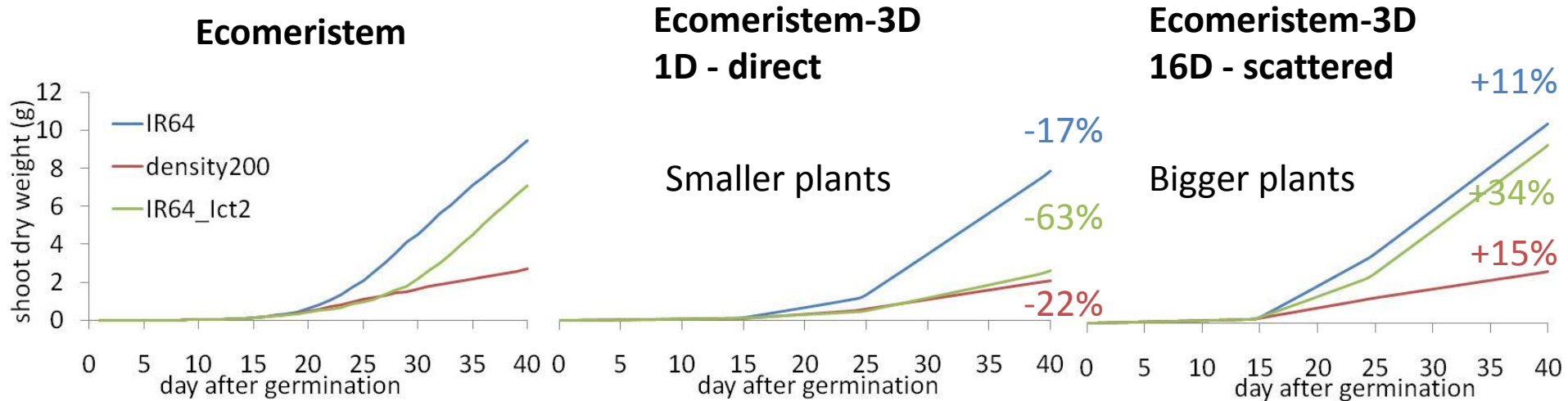
Plant density : 200 / m²



Corresponding phenotypic variables, simulated at 40 days after germination

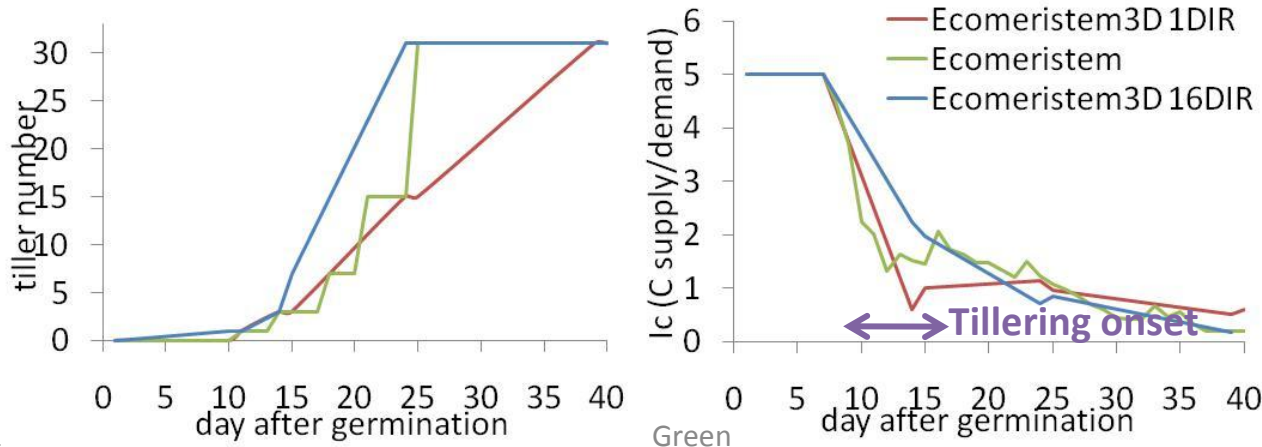


Approach comparison: Differences between simulated phenotypes



eg. IR64 genotype

phenotype variation explained by early tillering response to Ic



Estimation de Paramètres Analyse de sensibilité

J.-C. Soulié et L. Rouan

CIRAD – UMR AGAP, Equipe PAM

Réseau Mexico

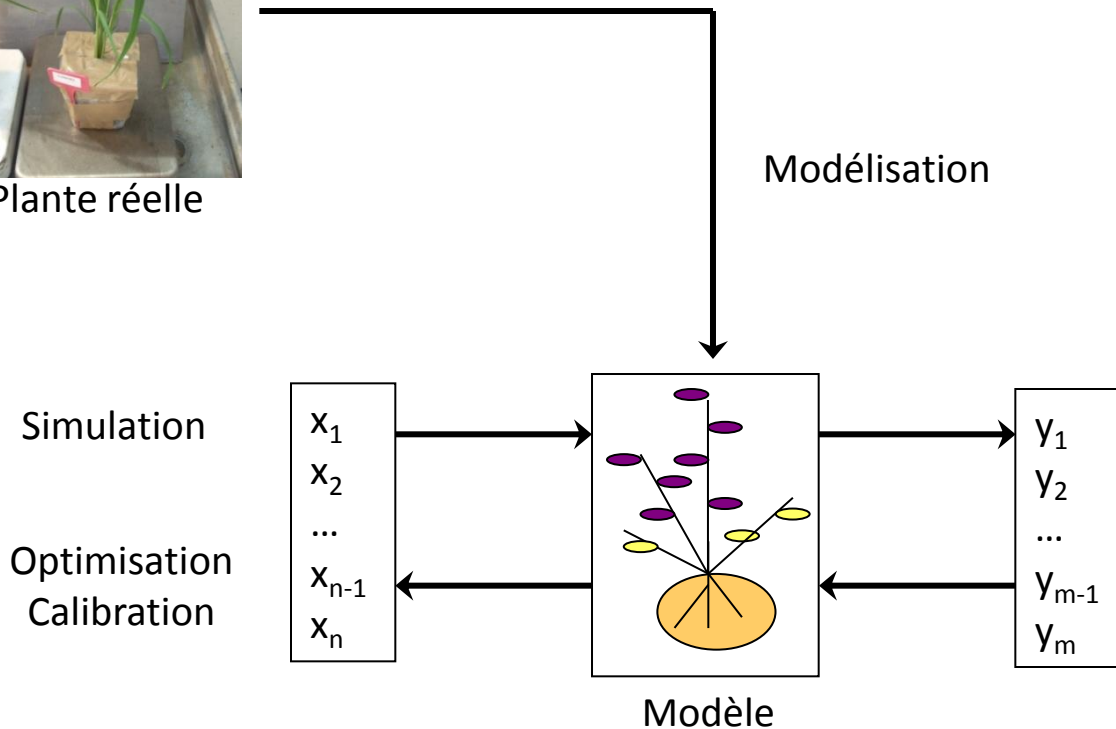
RNSC

ISC-PIF

Principe général



Plante réelle



Pour résumer :

- **Simulation** : $y = f(x)$
- **Optimisation** : $x = f^{-1}(y)$

Situation initiale

Valeurs observées

| line | biomLeaf | tillerNb_1 | PLA | SLAplant | lig |
|------|----------|------------|-----|----------|------|
| IR64 | 3.47 | 14.8 | 375 | 235 | 10.8 |

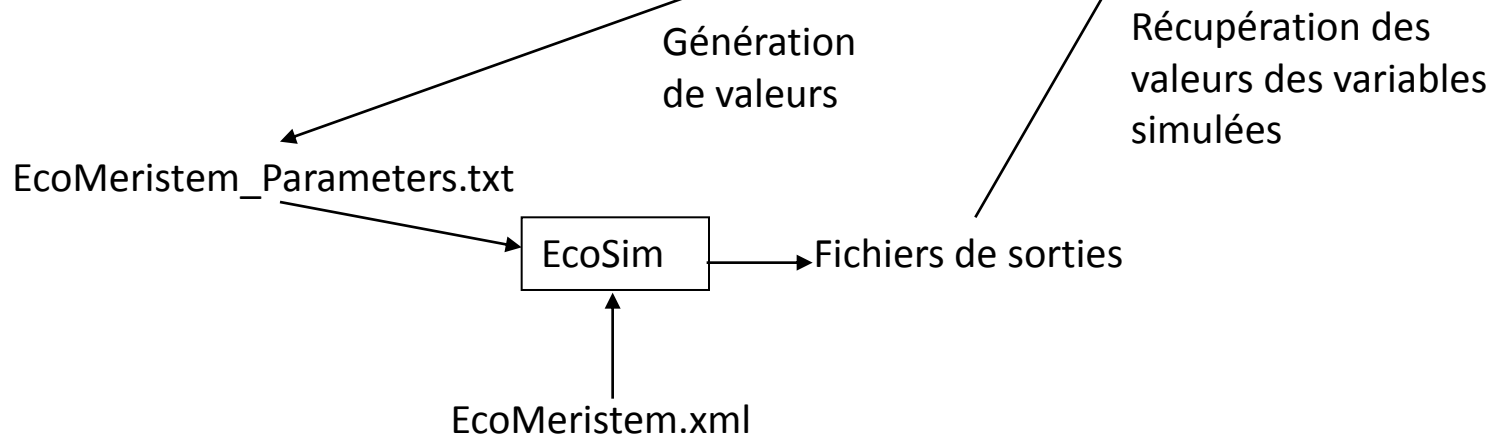
Erreur relative



RGenoud

Variables à optimiser

| MGR | lct | plasto | SLAp | Epsib | Fo = 0.1043 |
|--------|----------|---------|---------|--------|-------------|
| 60.137 | [0.2709] | 390.689 | 670.568 | 4.1256 | |



→ Utilisée sur Azucena x IR64, IR64

Nouveaux besoins

- Cas du phosphore, valeurs observées :
 - Sur 2 répétitions
 - Sur 2 traitements
 - Valeurs manquantes
- Thèse de Camila Rebolledo :
 - 3 répétitions
 - Sans stress / avec stress
 - Dates de début / dates de fin variables
 - Date & état hydrique (FTSW>1) à début stress variables
 - Paramètre feuille initiale variable

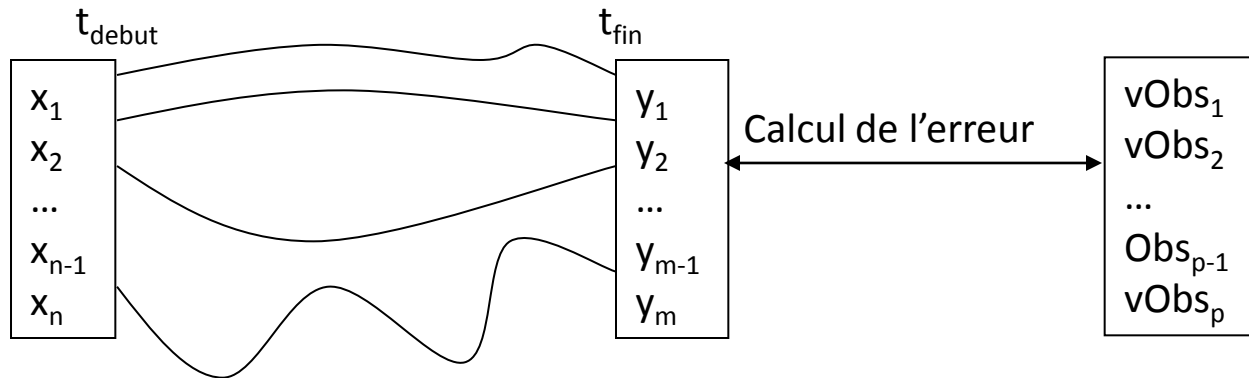
En conséquence

- Réécriture totale de la partie optimisation d'Ecophen
- Génération du script R pour traiter tous les cas possibles
- Multi-simulations
- Mais... On a perdu en vitesse !

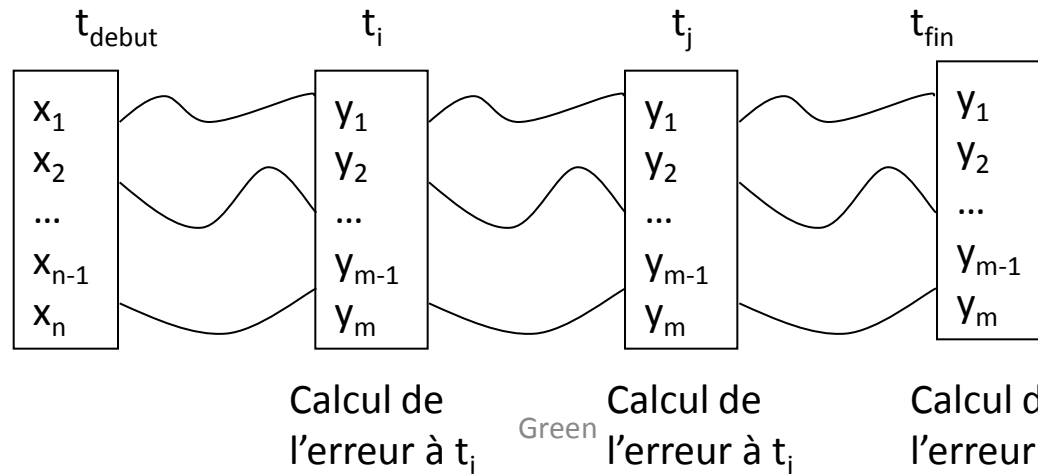
| ligne | Treatment | StartingDate | EndingDate | StressOnset | WaterSupply | Lef1 | FTSW | biomAero2 | PHT | AreaLFEL |
|-------|-----------|--------------|------------|-------------|-------------|------|------|-----------|-------|-----------|
| 9 | 1 | 09/02/2009 | 13/03/2009 | 23 | NA | 7 | 1 | 0.4144 | 41.6 | 17.68275 |
| 9 | 1 | 30/03/2009 | 26/04/2009 | 16 | NA | 7 | 1 | 1.4077 | 56.45 | 36.239125 |
| 9 | 1 | 17/05/2009 | 12/06/2009 | 18 | NA | 7 | 1 | 0.6531 | 37 | 13.430625 |
| 9 | 2 | 09/02/2009 | 13/03/2009 | 23 | 178.38 | 7 | 0.22 | 0.8078 | 41.9 | 22.4895 |
| 9 | 2 | 30/03/2009 | 26/04/2009 | 16 | 197.05 | 7 | 0.15 | 1.2309 | 53.9 | 27.5935 |
| 9 | 2 | 17/05/2009 | 12/06/2009 | 18 | 117.48 | 7 | 0.16 | 1.0262 | 41.2 | 17.4725 |

Ce qu'il reste à faire

- Pour l'instant, on ne travaille que sur la dernière valeur simulée



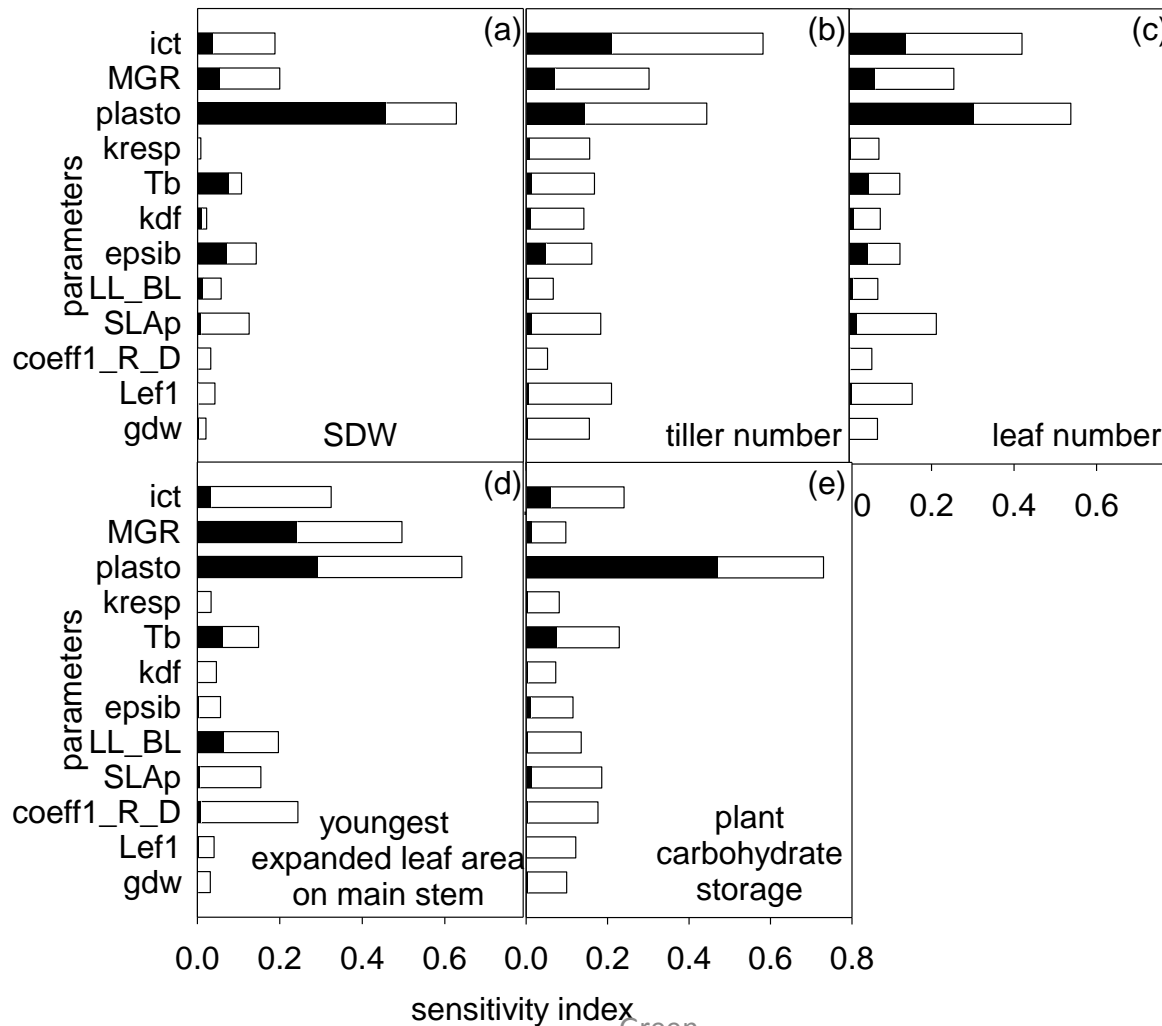
- Pouvoir disposer pour une même valeur observée de plusieurs mesures à différentes dates



Analyse de sensibilité

- Analyse de sensibilité globale (FAST : Fourier Amplitude Sensitivity Test)
- Tous les facteurs varient
- Méthode basée sur la variance
- Indépendante du modèle
- Donne en sortie 2 types d'indices:
 - Principal (effet propre)
 - Total (effet propre + interaction)

Exemple sous EcoMeristem



Modèles formels et couplage de modèles

J.-C. Soulié

CIRAD – UMR AGAP, Equipe PAM

G. Quesnel & E. Ramat

INRA, BIA - Toulouse

DEVS qu'est-ce que c'est ?

- DEVS: Discrete Event System Specification
- Un formalisme de modélisation basé sur la systémique :
 - Evènements discrets
 - Etats, transition, fonction de transition entre les états
 - Approche modulaire et hiérarchique
- Vient des maths applis et de la micro-électronique
- DEVS a été créée par B. P. Zeigler in 1976 [Zeigler 1976, 2000]

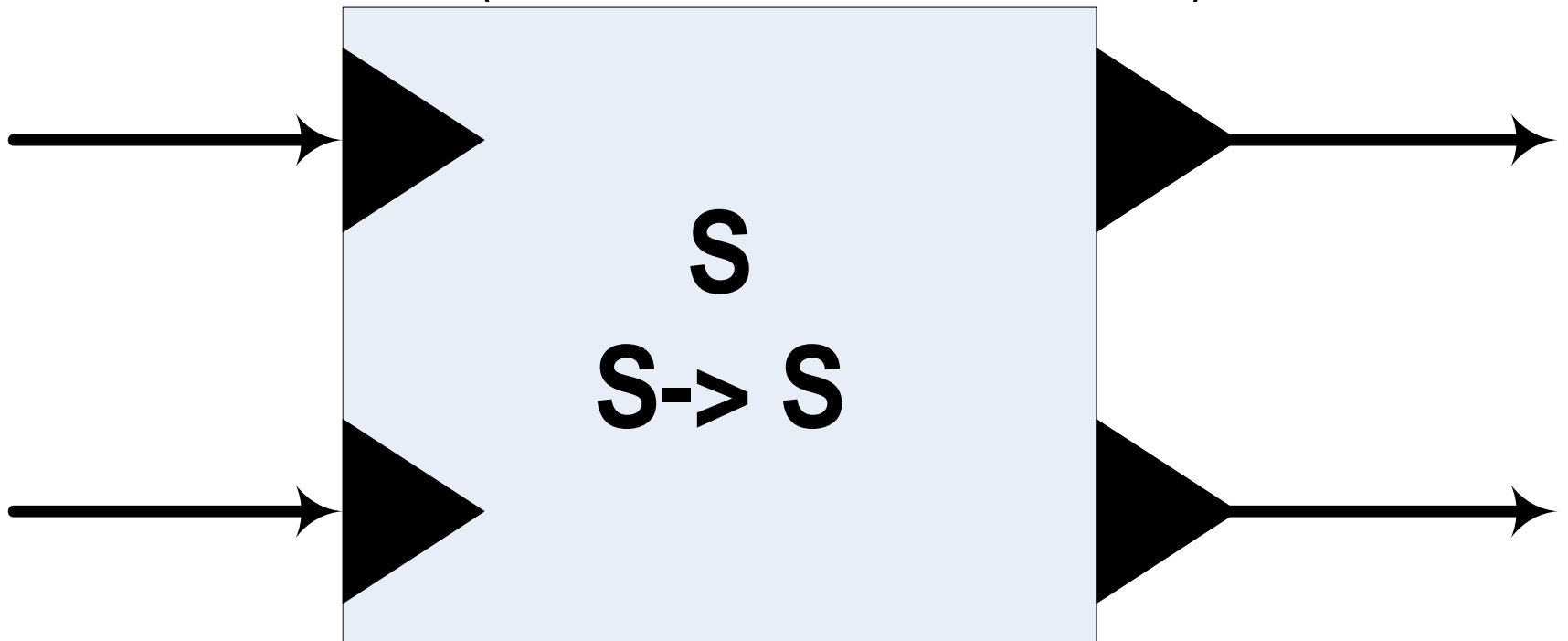
DEVS qu'est-ce que c'est ?

- DEVS [Zeigler, 1976] :
 - Définit un formalisme de haut niveau
 - Propose un cadre formel pour le couplage de modèle
 - Utilise le paradigme des événements discrets
 - Les événements pilotent la simulation
 - Définit un cadre opérationnel : les simulateurs abstraits
 - Un ensemble d'algorithmes

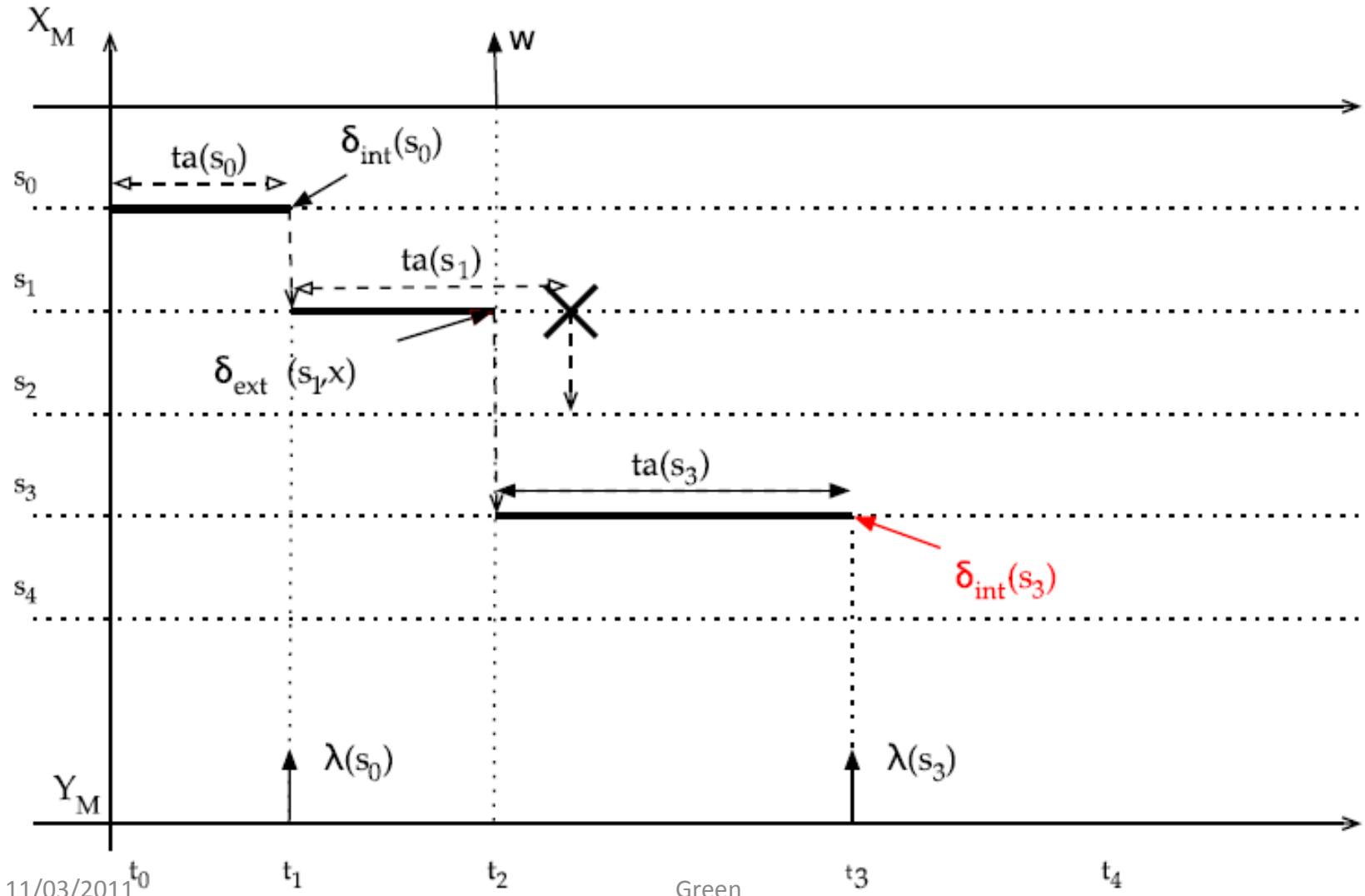
Définition des modèles atomiques

- Une structure mathématique composée de :

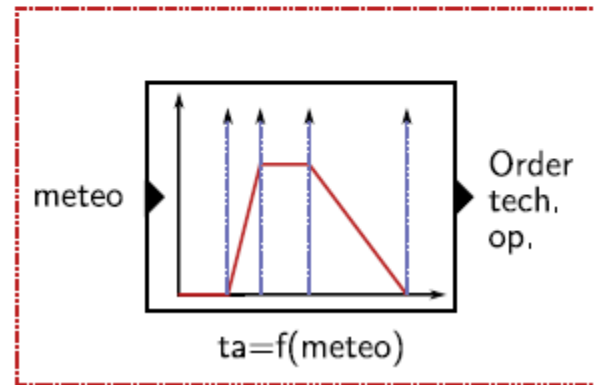
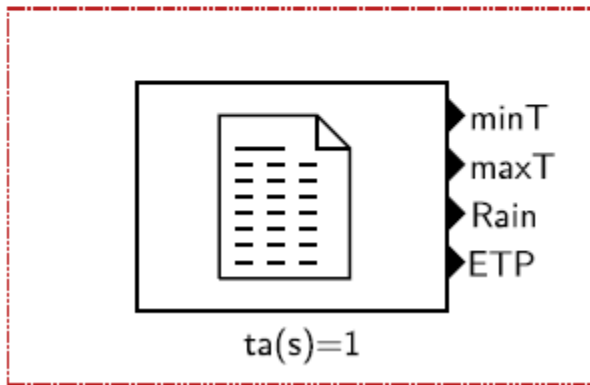
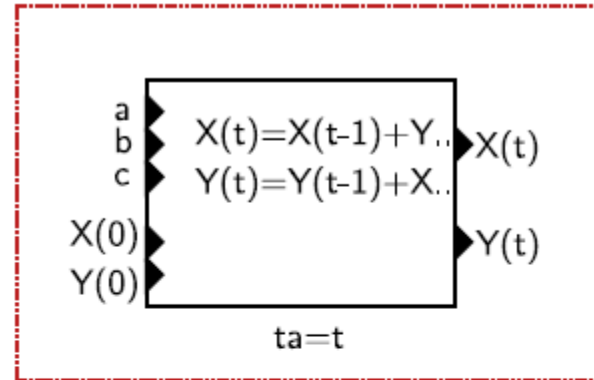
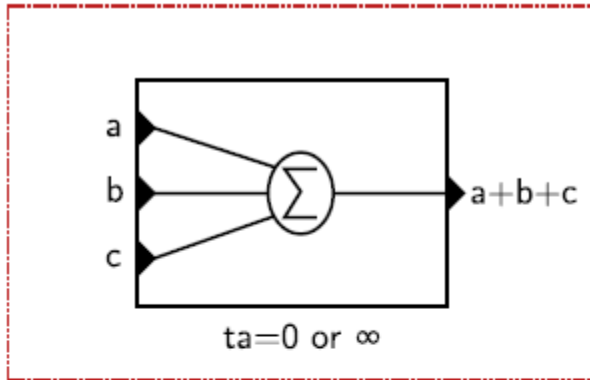
$$M = \langle X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, ta, \lambda \rangle$$



Example

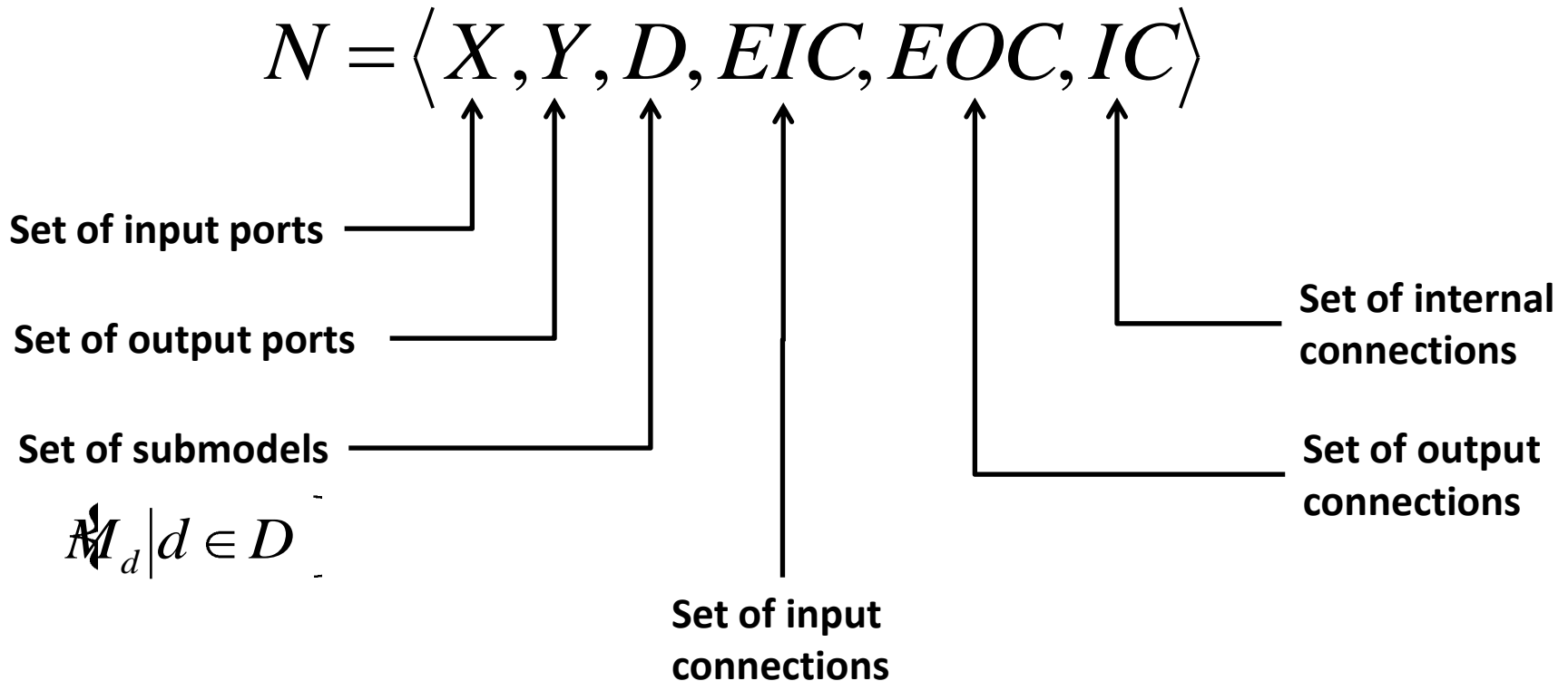


Example



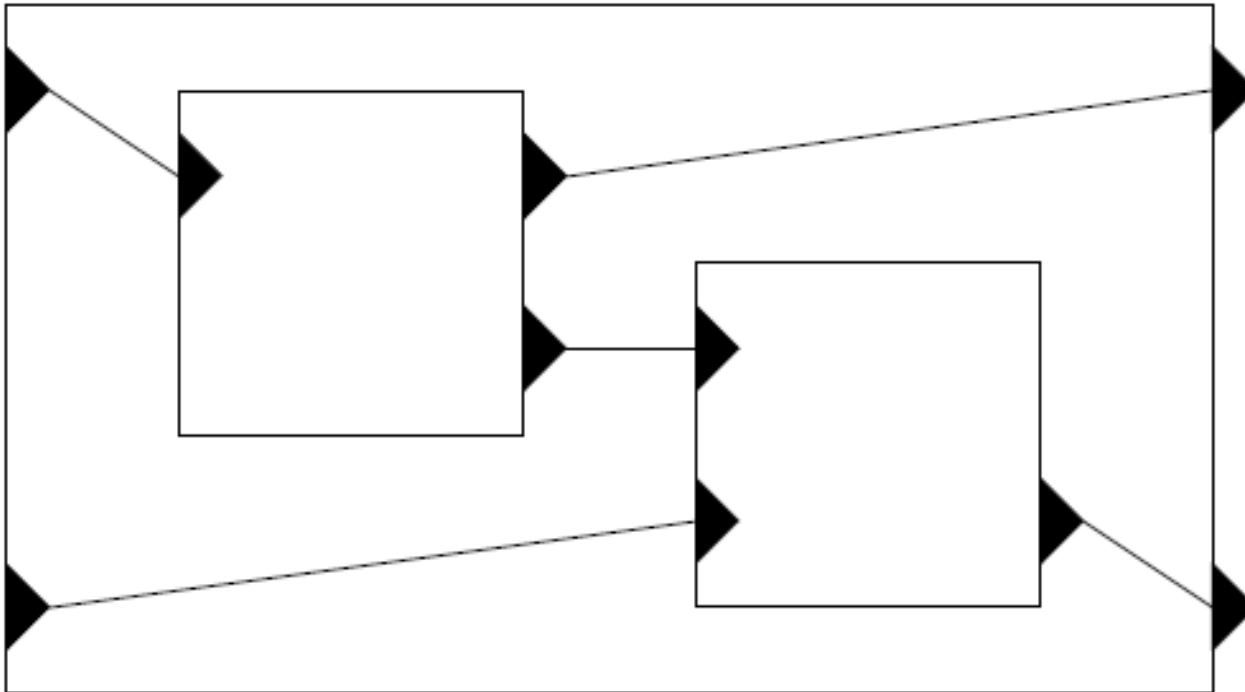
Coupled model definition (or network of models)

- A mathematical structure that only contains variables:



Modèles couplés : définition (réseau de modèles)

- Représentation graphique :

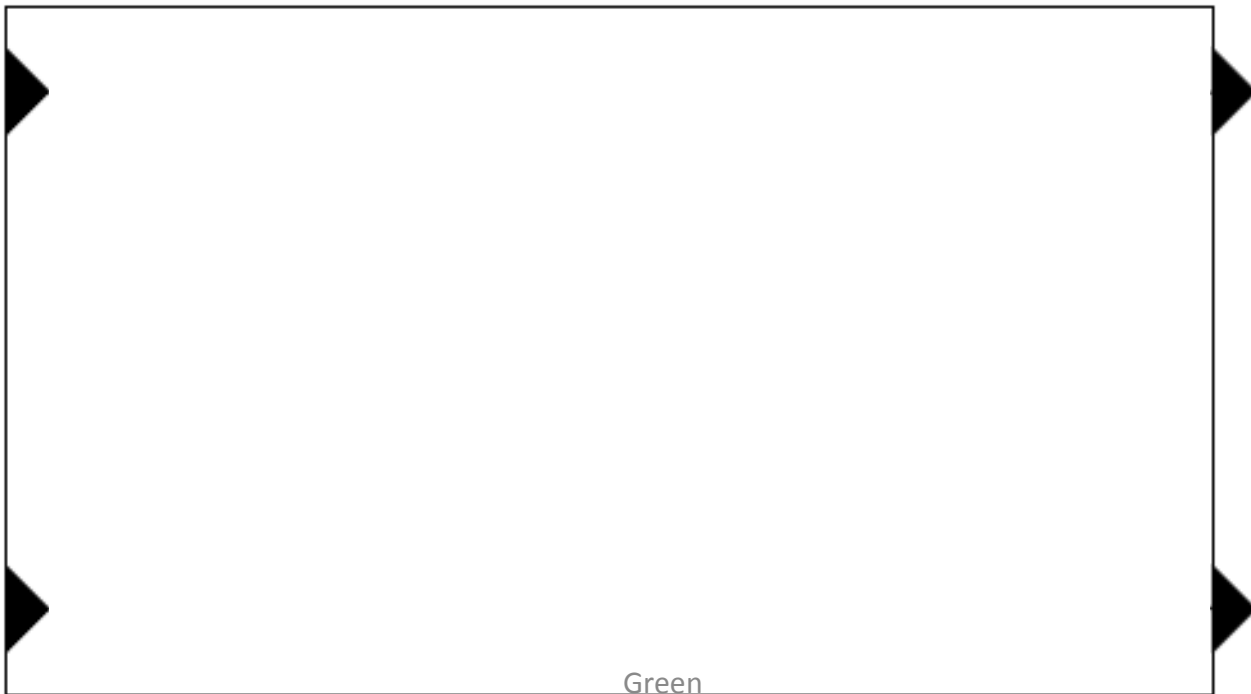


DS-DEVS

- Le graphe de connection d'un modèle DEVS est statique → problème avec les systèmes dynamiques
- DS-DEVS permet d'ajouter la dynamique
- DS-DEVS ajoute un nouveau modèle atomique spécial : le modèle exécutive
- Le modèle exécutive a le contrôle complet sur la structure du modèle couplé (ajout / destruction de model ; ajout / retrait de connexions ou de ports

Propriété de fermeture sous couplage

- Une des plus essentielles propriété de DEVS :
 - Un modèle couplé a exactement les même propriétés qu'un modèle atomique

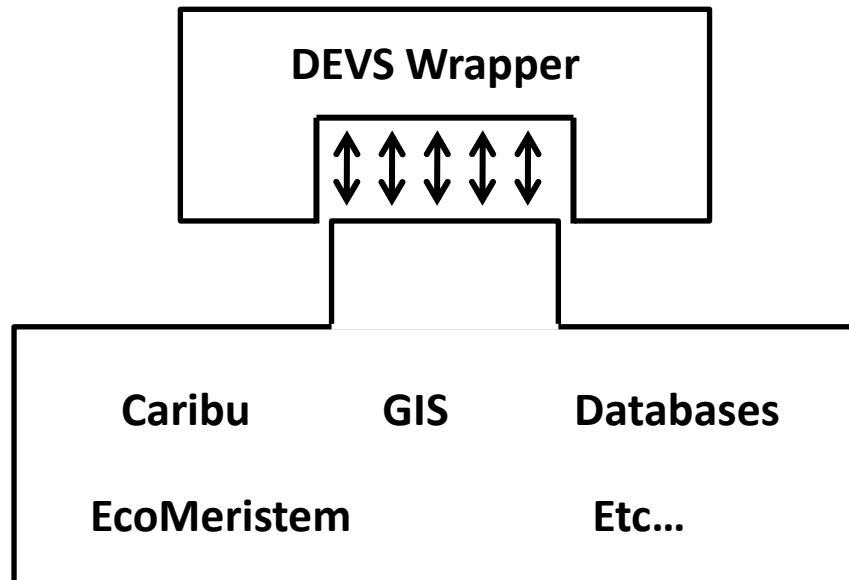


Un formalisme de haut niveau

- Le niveau de généricité de DEVS permet d'encapsuler d'autres formalismes de modélisation et de simulation
- On distingue 2 types d'extensions :
 - Dynamique pour encapsuler des formalisme mathématiques tels que les équations différentielles, les équations aux différences, les réseaux de Petri, etc.
 - Manipulation de la structure des modèles : automates cellulaires, graphes, etc.

Couplage de simulateurs

- Wrapping:
 - Ajout d'un plugin DEVS sur un modèle non DEVS



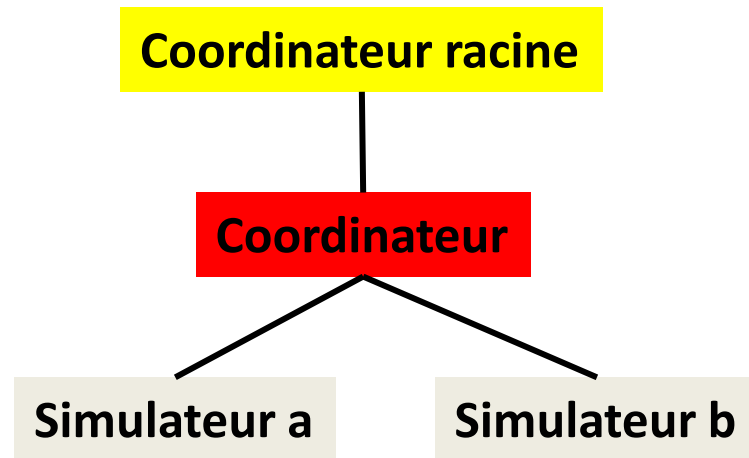
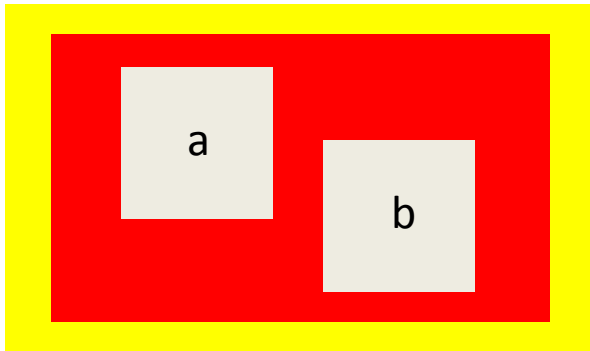
Couplage de simulateurs- Principe

- Définir les interactions possibles avec le modèle
- Définir l'interface du modèle wrappé (au sens DEVS du terme)
- Coder les opérations de transformation :
 - Evénements → Entrées du modèle
 - Sorties du modèle → Evénements

Simulation DEVS

- B.P Zeigler définit des algorithmes de simulation appelés simulateurs abstraits [Zeigler et al., 2000]
 - Chaque atomique modèle a un simulateur dédié : il gère les appels de fonction dans le modèle atomique
 - Pour chaque modèle couplé, il y a un coordinateur dédié : il gère les événements entre les modèles
 - Le coordinateur racine s'occupe de la simulation en gérant les événements internes

Comment ça marche ?



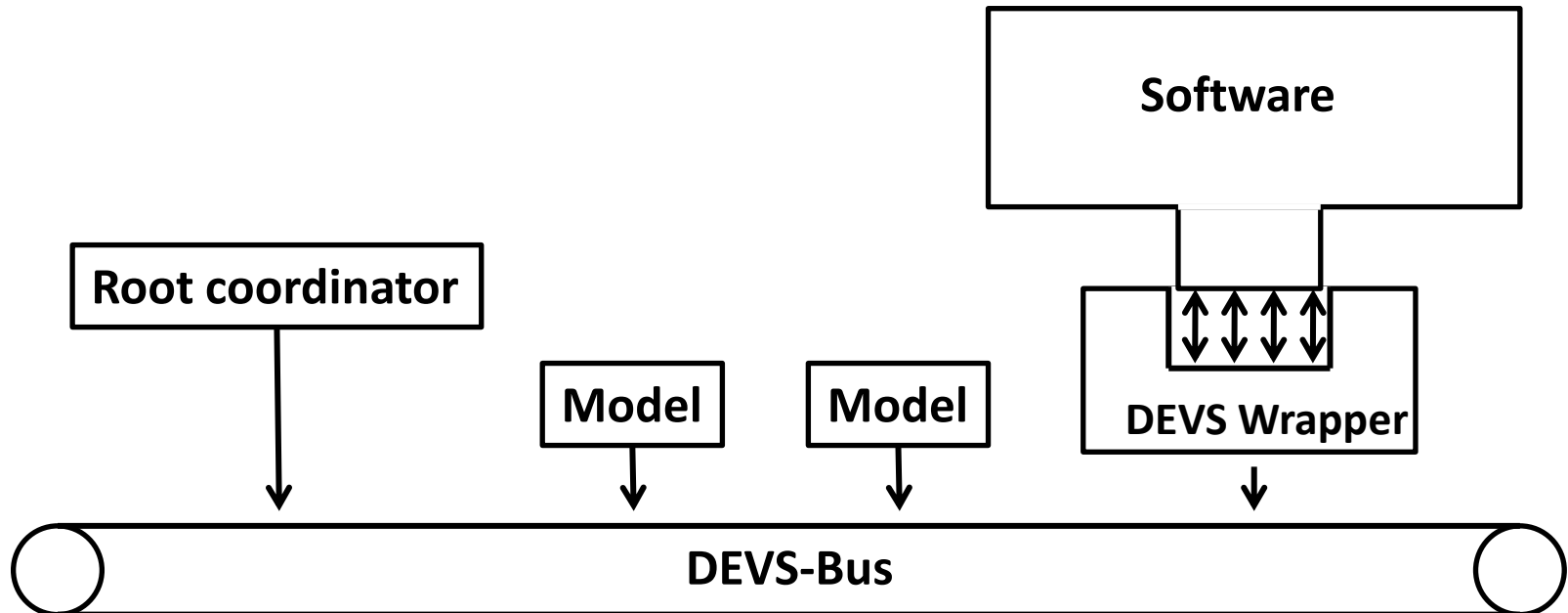
- Les événements internes sont envoyés au coordinateur racine
- Les événements externes sont envoyés aux coordinateurs

- Le coordinateur gère les événements externes
- Si les événements vont en dehors du modèle, ils sont envoyés aux parents

- Gère les événements internes → quelle simulateur est actif ?

Techniquement

- Implémentation du Bus-DEVS [Kim and Kim, 1996]



Implémentation de DEVS

- +50 simulateurs DEVS (libres / non libres, spécialisés, etc.)
- Monde : USA (Univ. Arizona), Canada (Univ. Mc Gill), Corée du Sud (Univ. Hang Kong), Allemagne (Univ. Rostock), . . .
- France: Toulouse (INRA), Clermont-Ferrand (ISISMA), Corse (Univ. Corse), Marseille (Univ. Aix 3), ...
- Différents langages d'implémentation : C++, Java, ...

Extensions DEVS

- Equations aux différences
- Cell-DEVS (automate cellulaire)
- Euler, Runge-Kutta (résolution d'équation différentielle ordinaire)
- QSS1, QSS2, QSS3 (résolution d'équations différentielles du premier ordre)
- Cell-QSS (résolution d'équations différentielles spatialisées)
- Petri-DEVS (implémentation des réseaux de Petri)
- Statecharts (automates à états finis)
- GSMP et GSMDP (Processus markovien généralisés)
- Agent-DEVS (implémentation Agent)
- ...

Pour conclure

- VLE en tant que framework d'intégration :
EcoMeristem, EcoPalm, DynFish
- VLE en tant que moteur de simulation :
OpenAlea
- EcoMeristem implémenté sous 3 formalismes
/ langages différents :
 - Avantages
 - Inconvénients

Merci !