

Modélisation structure-fonction des plantes
fourragères et des communautés prairiales –

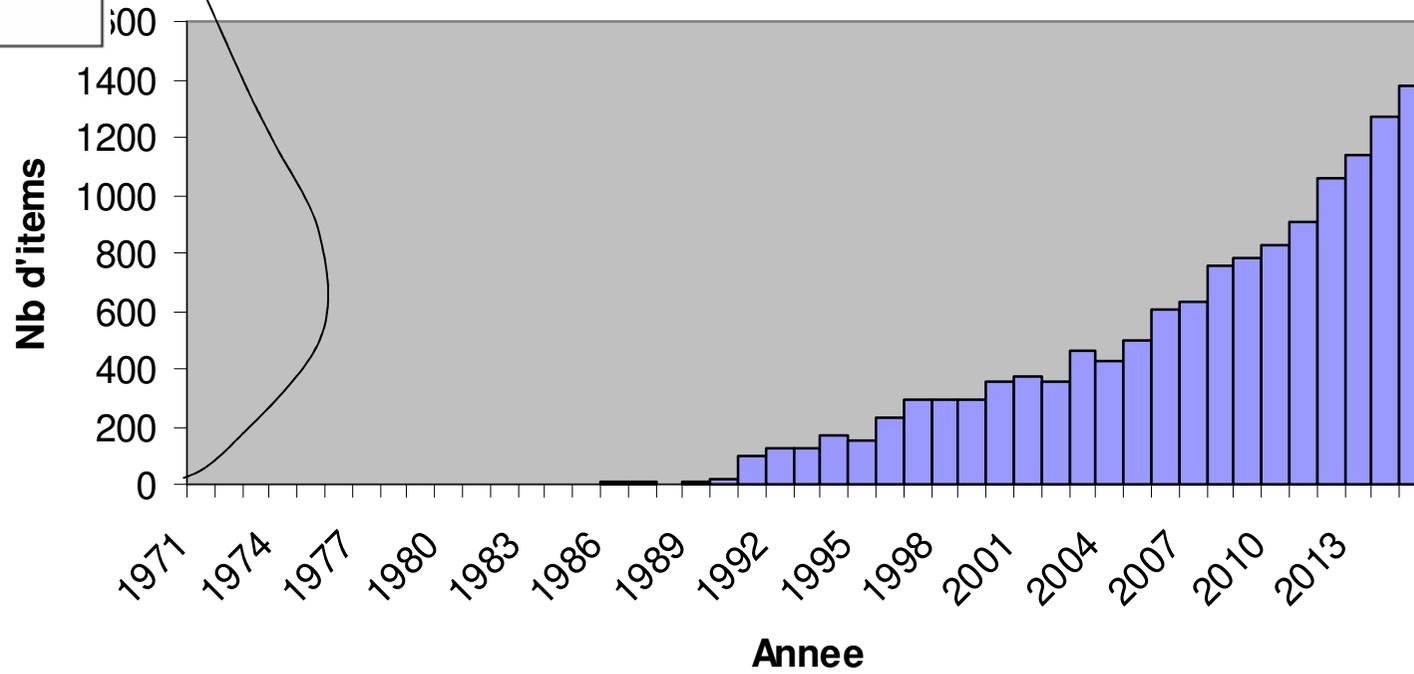
Où en est-on et ou va-t-on ?

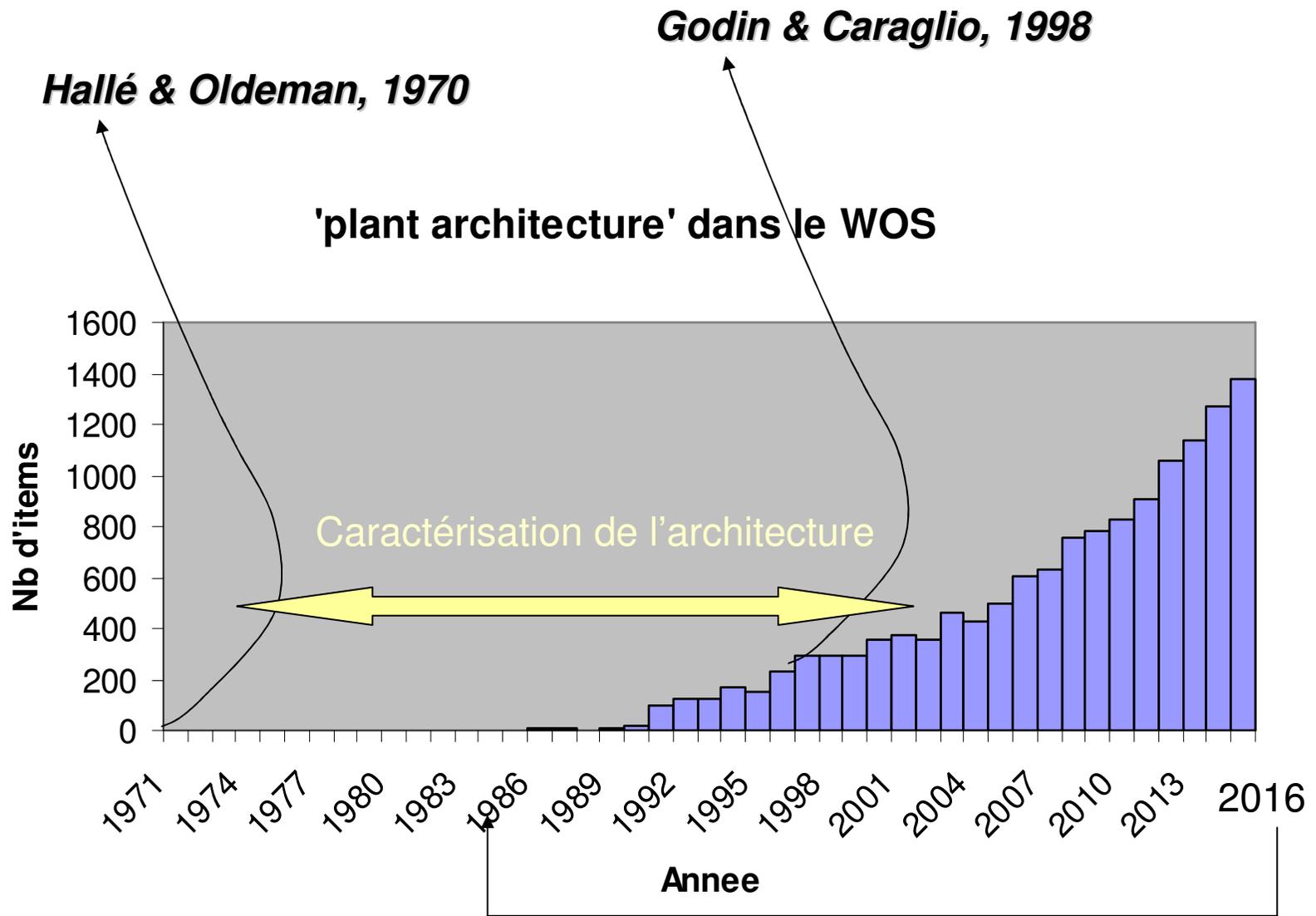
30 ans déjà...



Hallé & Oldeman, 1970

'plant architecture' dans le WOS

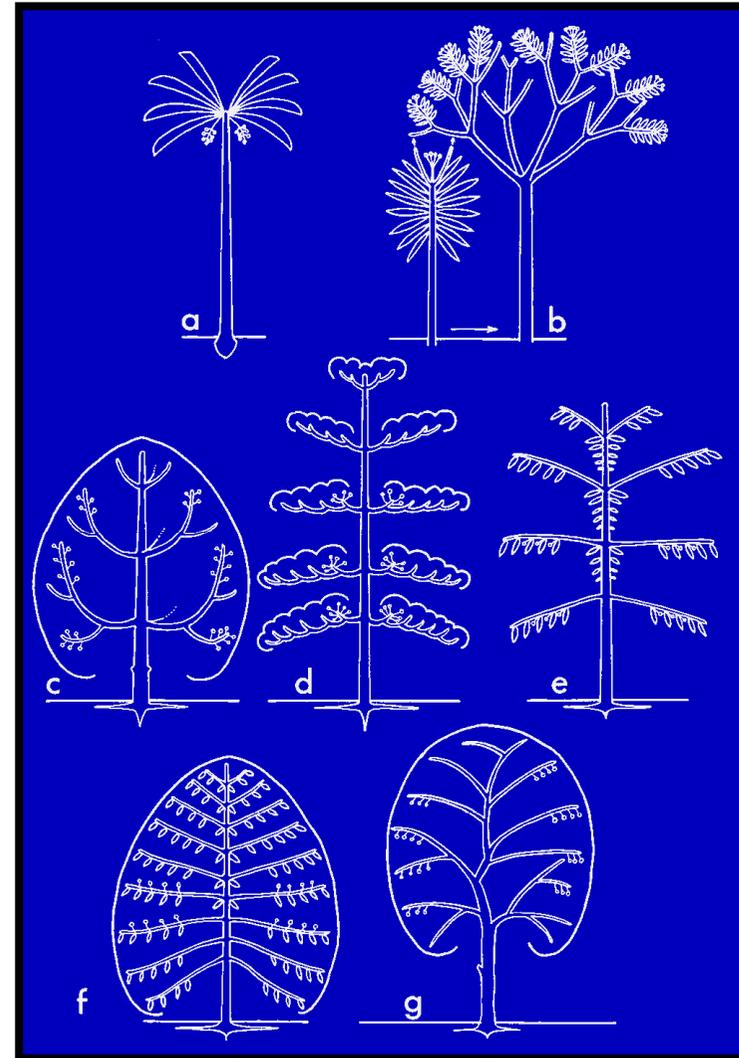




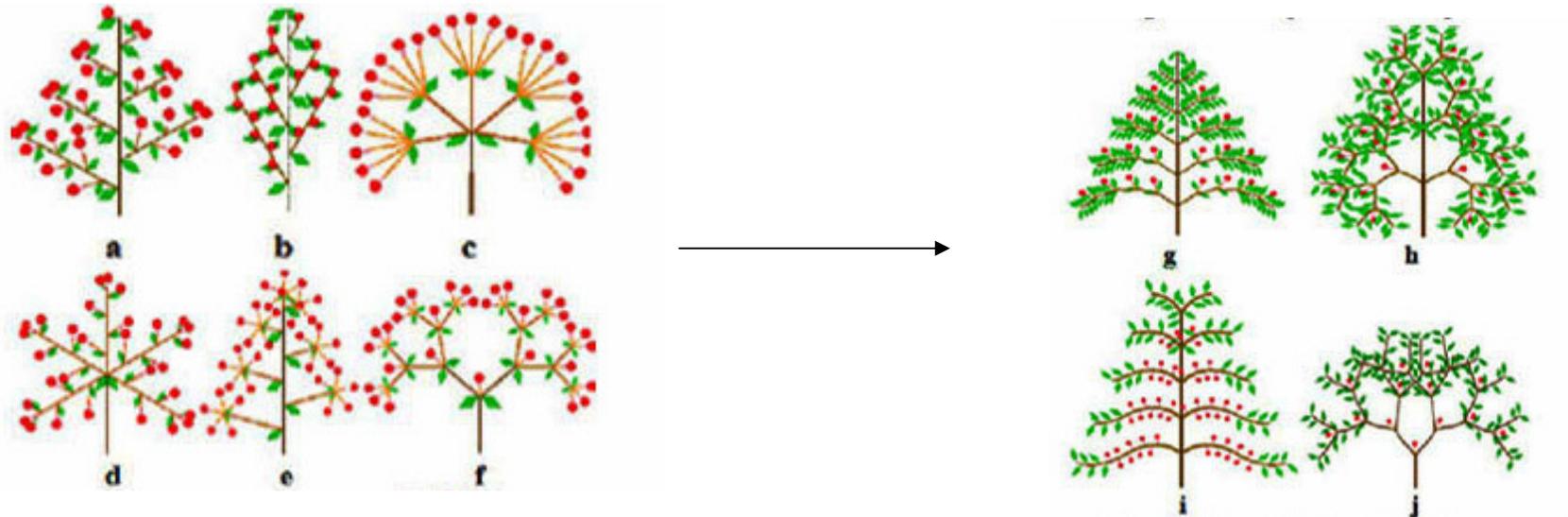
Il y a 30 ans...

Le modèle architectural (Hallé & Oldeman, 1970)

ORSTOM



Le modèle architectural (Hallé & Oldeman, 1970)



- étendre classification botanique des inflorescence aux architectures végétales
- l'architecture est considérée non pas d'une manière statique, mais comme le résultat de l'organogenèse par des méristèmes, qui caractérise la cinétique de la mise en place des axes feuillés
- toutes les espèces synthétisées en une 30aines de 'modèles'

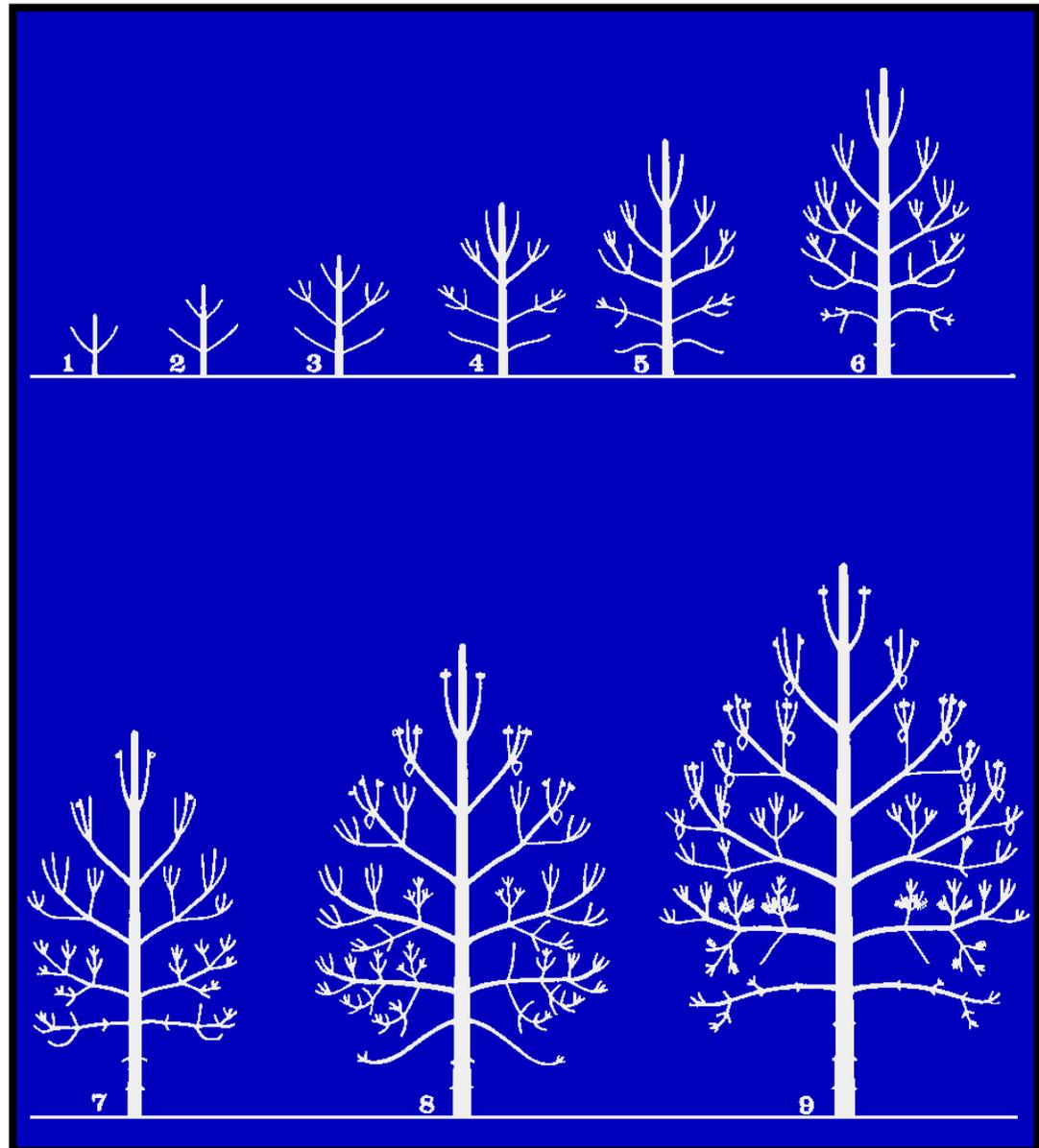
Le modèle architectural (Hallé & Oldeman, 1970)

-une approche dynamique du développement de la plante

- essentiellement qualitative

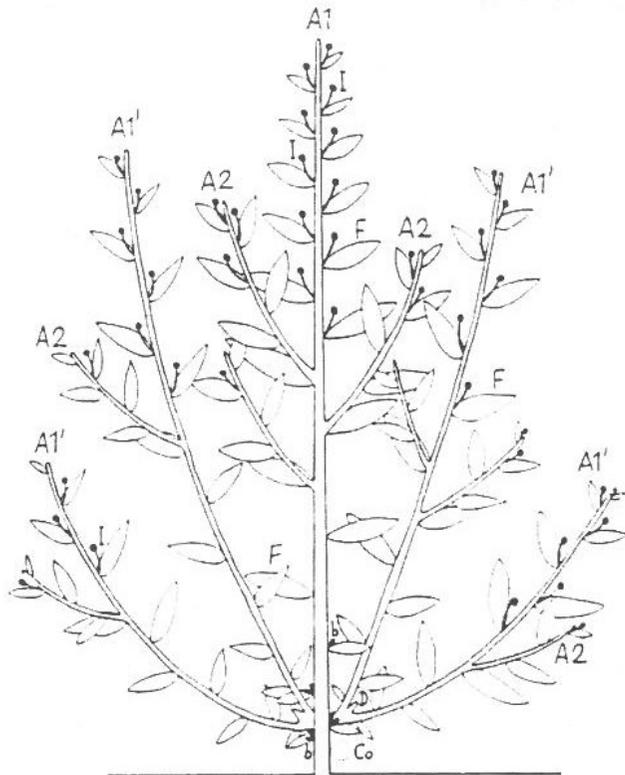
-Différentiation des apex:
classes d'axes
'physiologiques'

-Réitération dans le système ramifié

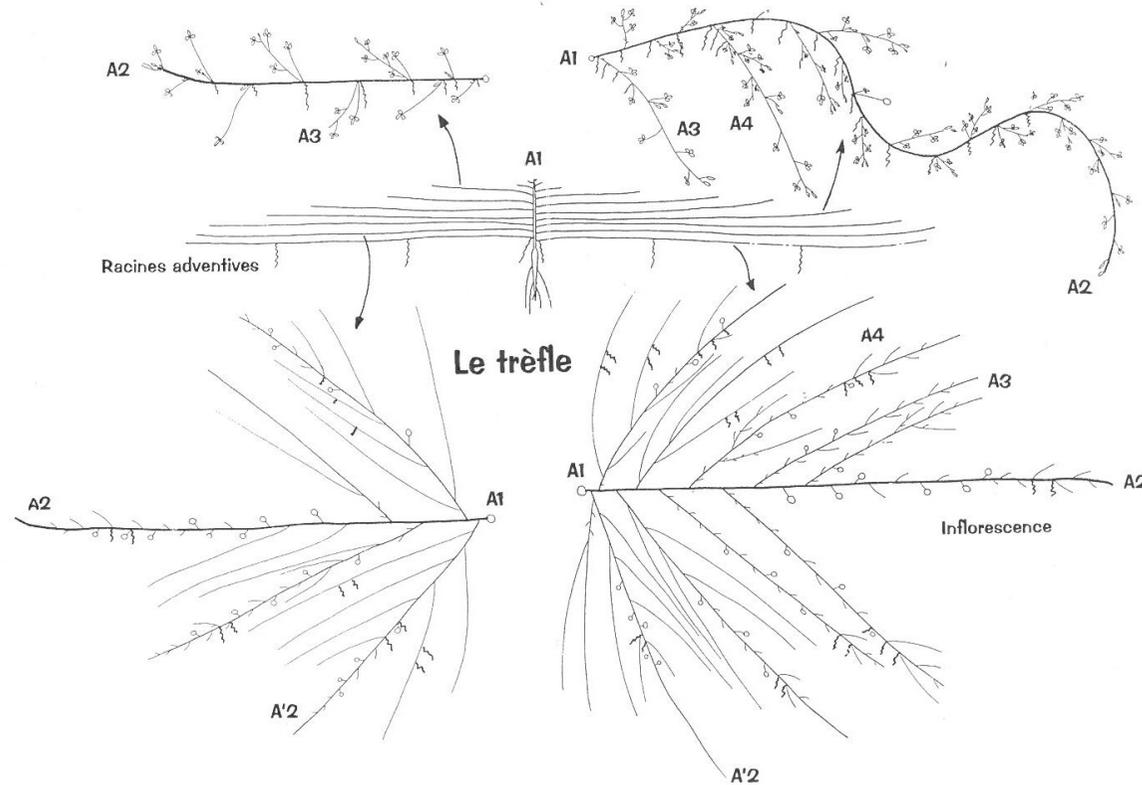




Dans ce mouvement



Mouliat et al. 1999 Maïs / Pois



	A1	A2	A3	A4
Direction de croissance	orthotrope	orthotrope	orthotrope	orthotrope
modalité de croissance	monopodiale	monopodiale	monopodiale	monopodiale
durée de vie	indéfinie	axe long	axe moyen	axe inflorescentiel
modalité de ramification	-continue - strictement basitone	-continue - non strictement basitone (aisselle 2, 3 ou 4 porte les axes les plus longs)	continue	non ramifié
phyllotaxie	spiro-distique	distique	distique	distique
symétrie	radiale	bilatérale	bilatérale	bilatérale
bourgeons axillaires	2 surnuméraires	2 surnuméraires	2 surnuméraires	2 surnuméraires
lignification	forte	forte	nulle	nulle
forme de l'axe	conique	conique	cylindrique	cylindrique
position des premières inflorescences	vers le noeud 15	vers le noeud 8	noeud 3 à 5	-

Edelin & Loup (Allirand 1998)

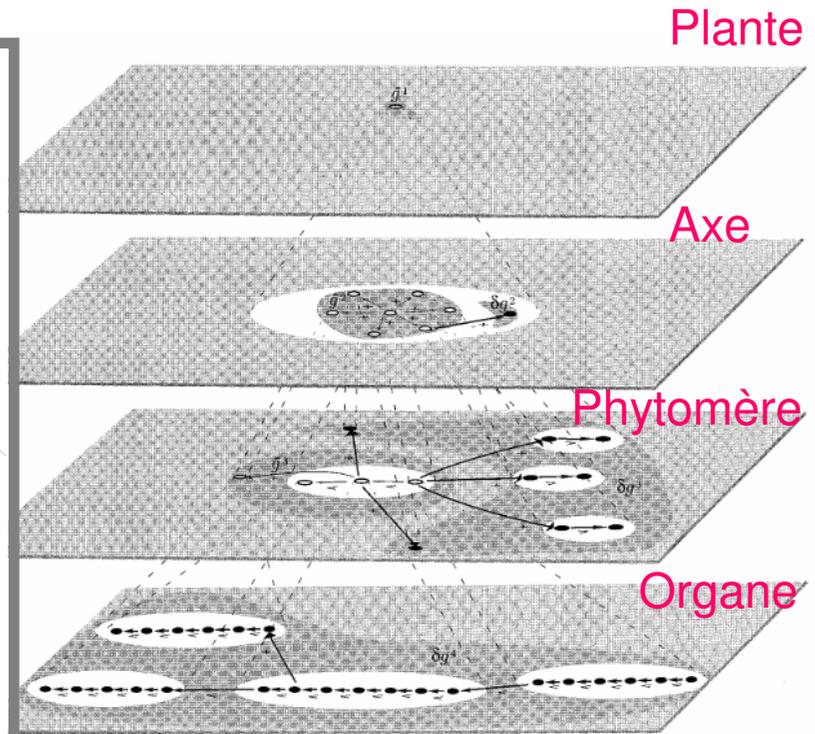
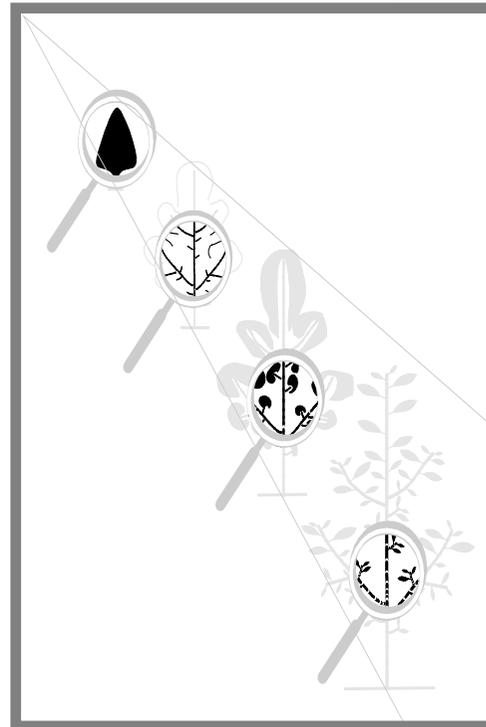
Collab AMAP

AIP « Fonctionnement des végétaux sous contraintes »

L'Architecture de la plante

-Formalisation quantitative de l'architecture : graph multi-échelles (MTG)

Godin & Caraglio, 1998



-Topologie: relations de successions / parentalité entre les constituants élémentaires de la structure (phytomères/organes)

-Géométrie : représentation spatialisée de ces constituants élémentaires (taille, forme, orientations...)

L'Architecture de la plante



DIGITALISATION

(1997-...)

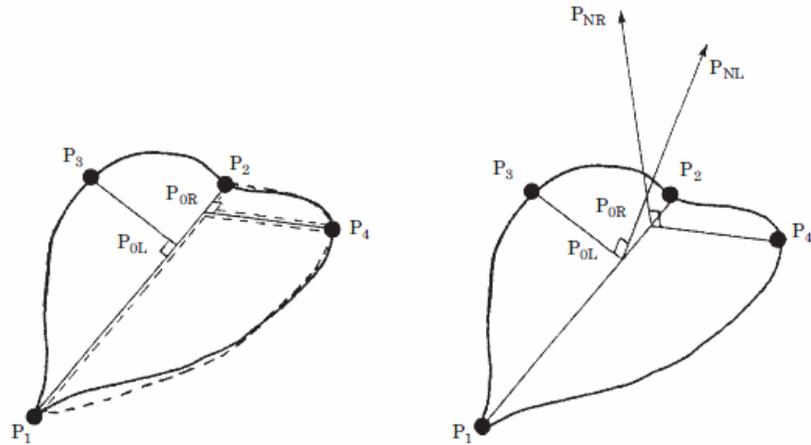
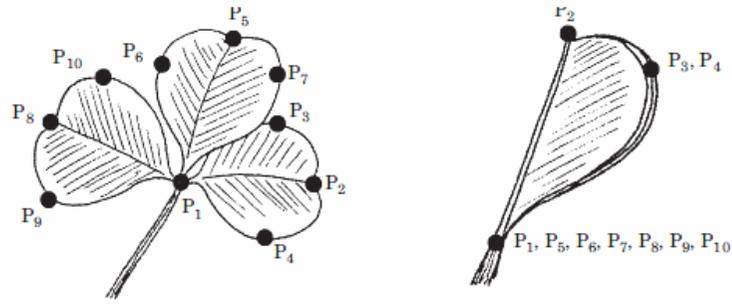
Logiciels POL95 - 3A



Collab H. Sinoquet
PIAF – Clermont-F

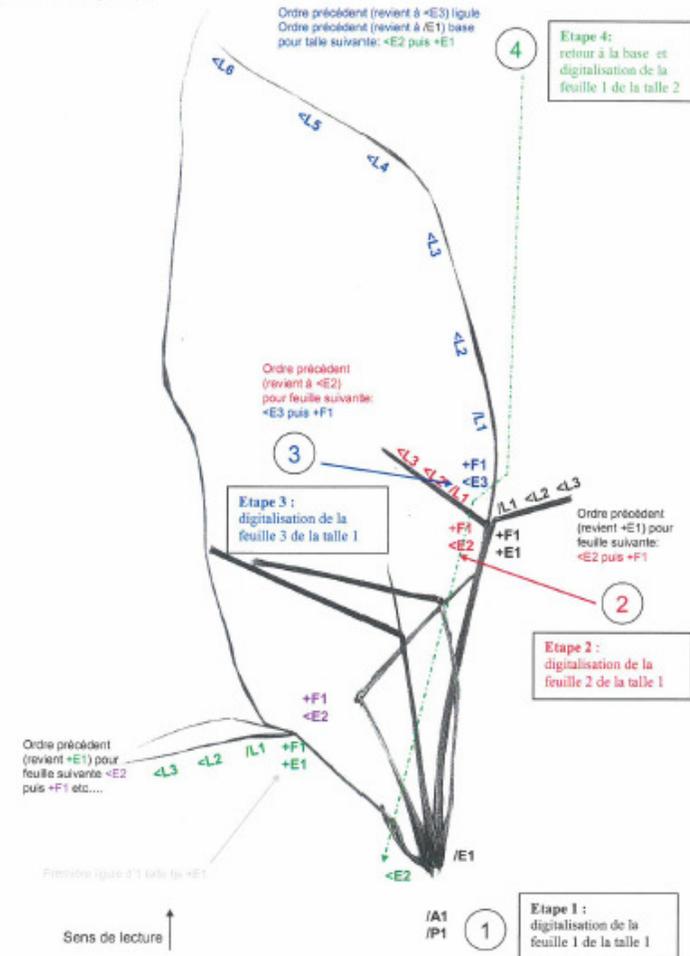


L'Architecture de la plante



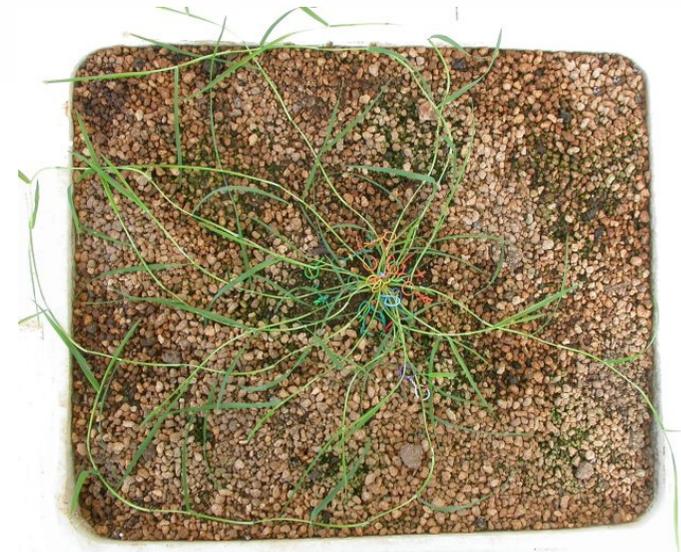
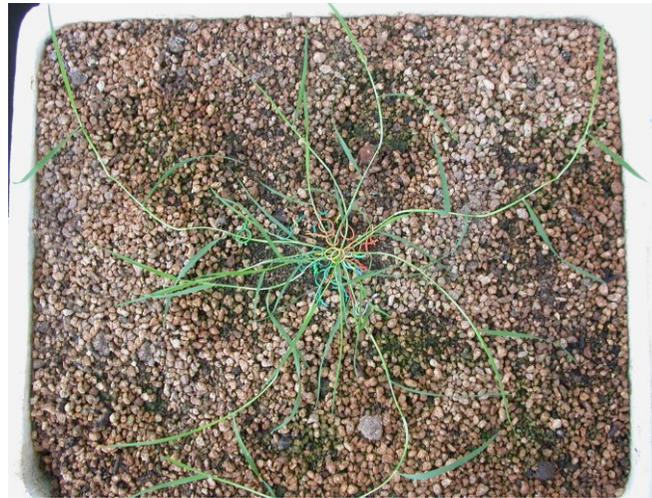
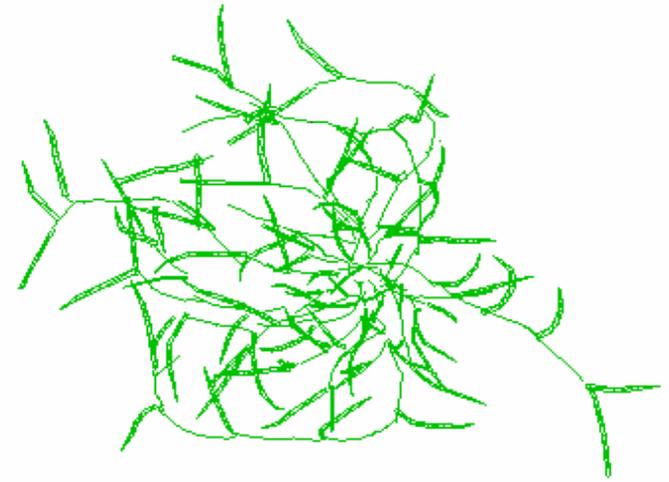
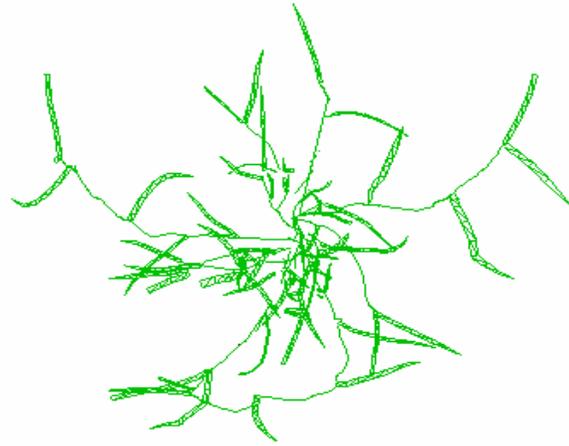
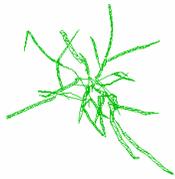
Rakocevic et al. 2000

+F1 largeur
 /L1 1^{er} segment
 <L2, <L3, <L4 <L5 ETC
 (cf schéma de la plante !)



Procédures de formalisation de l'acquisition de l'architecture

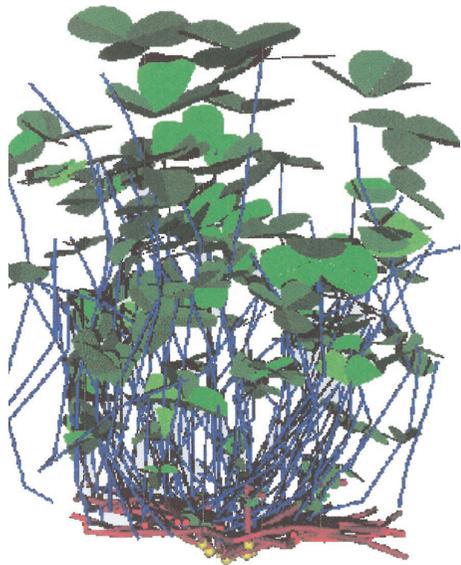
Plante « ombrage vert »



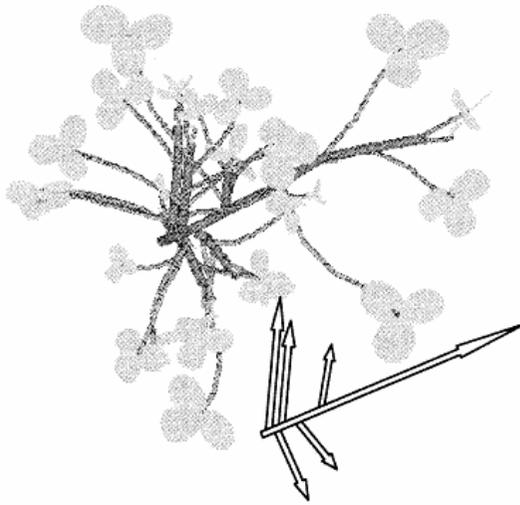
22 avril 2003

1 mai 2003

8 mai 2003



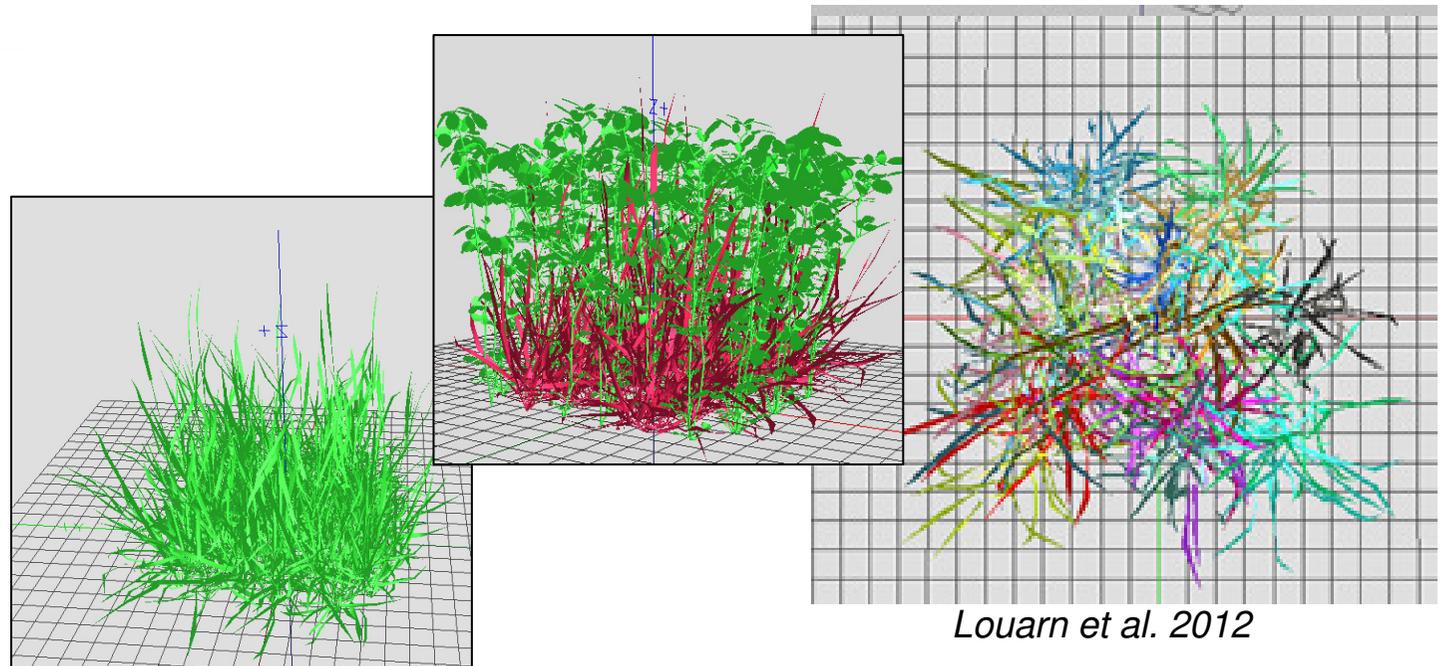
Rakocevic et al. 2000



Christophe et al. 2003



Sonohat et al. 2002



Louarn et al. 2012

SILVA FENNICA

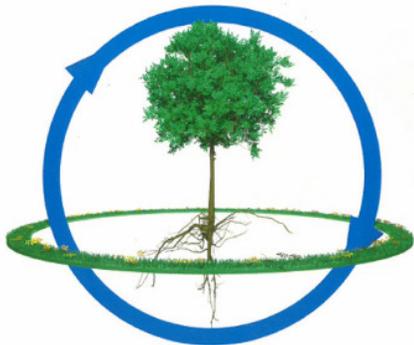
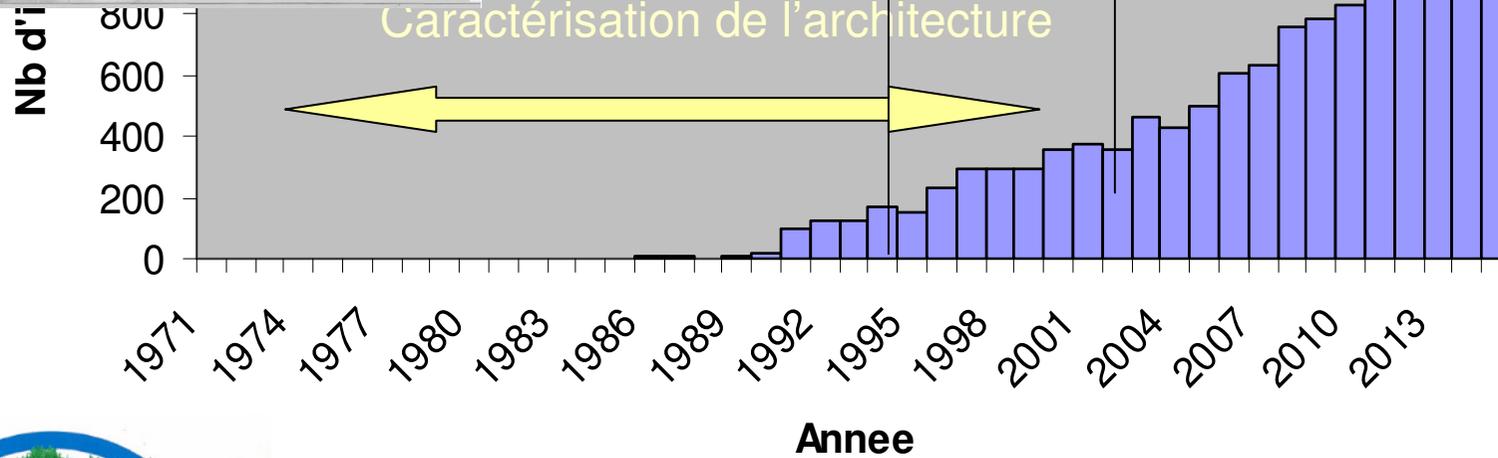


Vol. 31(3), 1997

2004: **FSPM**

1996: 1^{er} **FSTM**

et architecture' dans le WOS



International workshop on functional-structural **plant** models (FSPM), 7-11 June 2004, Montpellier, France

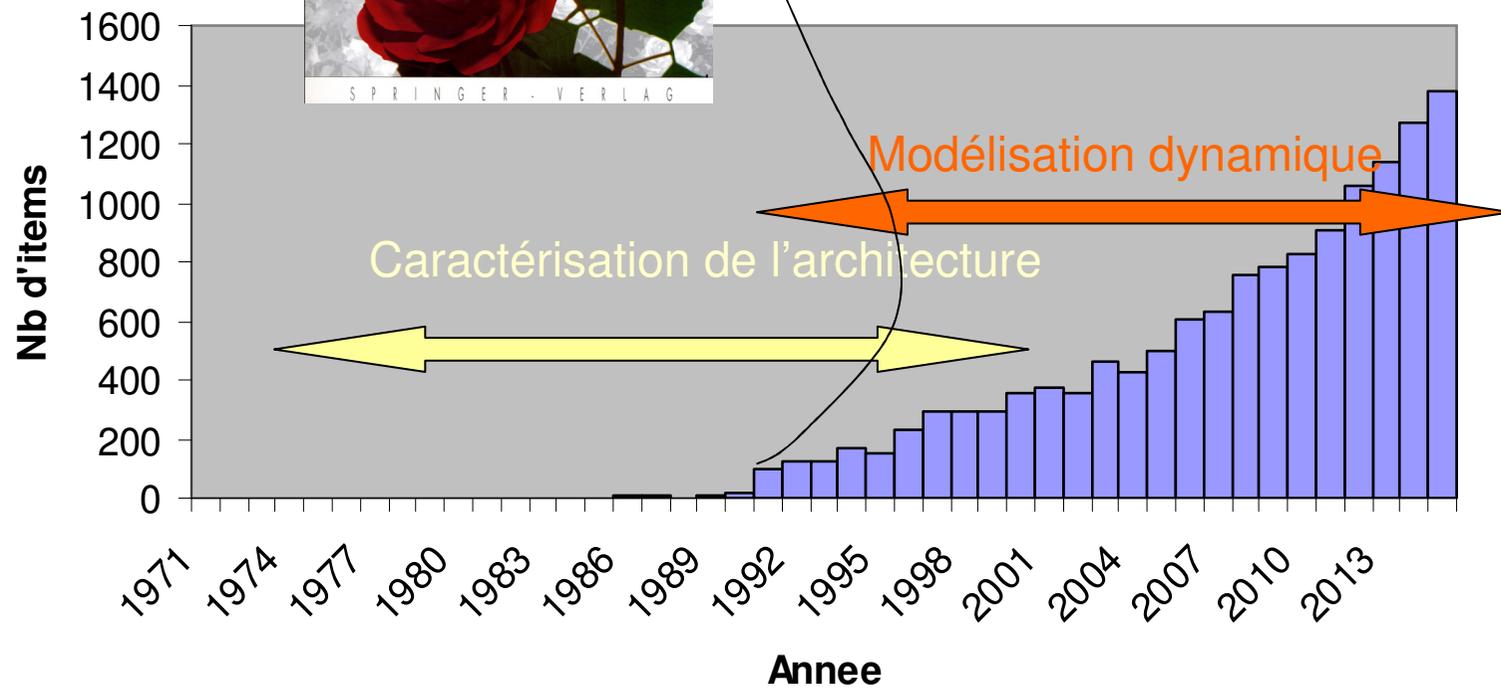


Lindenmayer, 1968



Prusinkiewicks & Lindenmayer, 1991

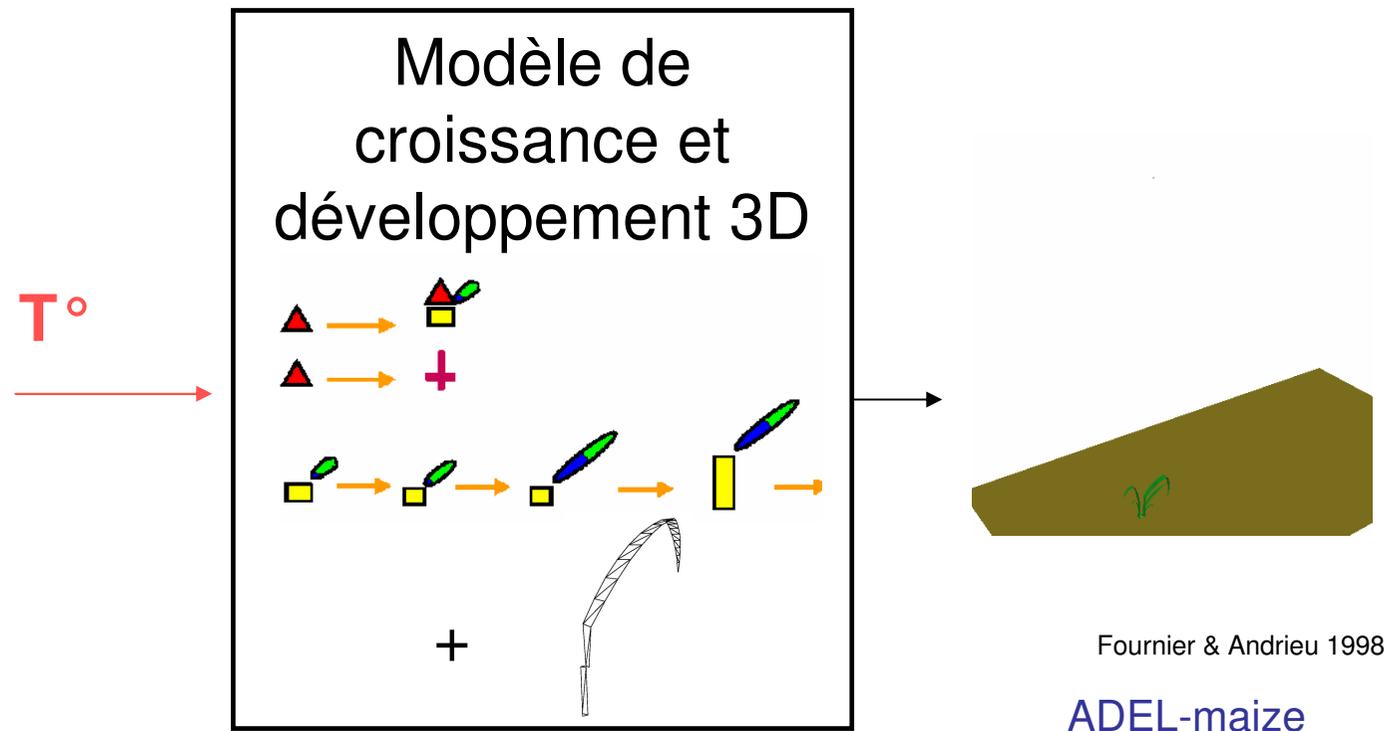
ure' dans le WOS



Modèles dynamiques à structure dynamique

L-systems « paramétrique »

Modèles dynamiques - Gestion simultanée de la production de phytomères
par les méristèmes et de la croissance en dimension des organes

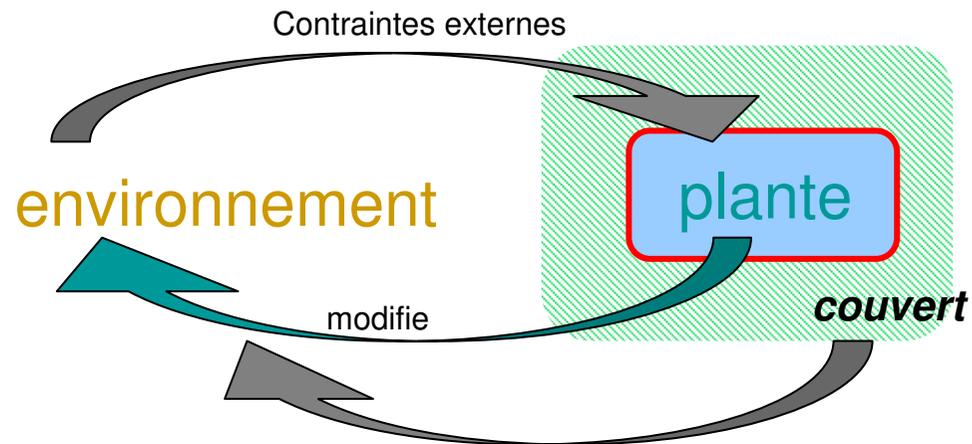


Modèles dynamiques à structure dynamique

L-systems « contextuel »

Modèles dynamiques - Gestion simultanée de la production de phytomères par les méristèmes et de la croissance en dimension des organes

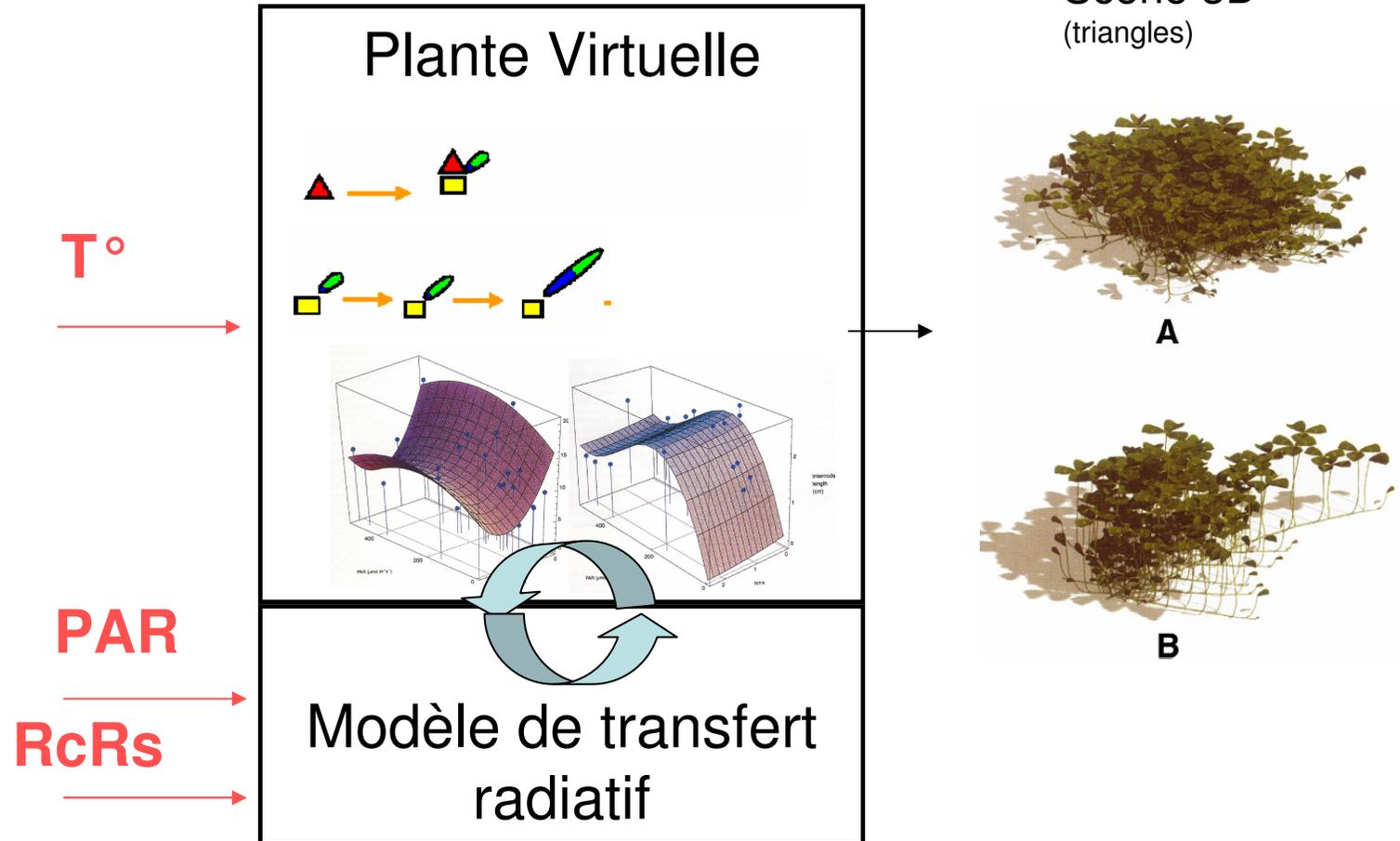
+ rétrocontrôle de l'environnement local (e.g. voisins et lumière)



Modèles dynamiques à structure dynamique

L-systems « contextuel »

Gautier et al. 2000



Collab. Univ Calgary

P. Prusinkiewicz - cpgf



A



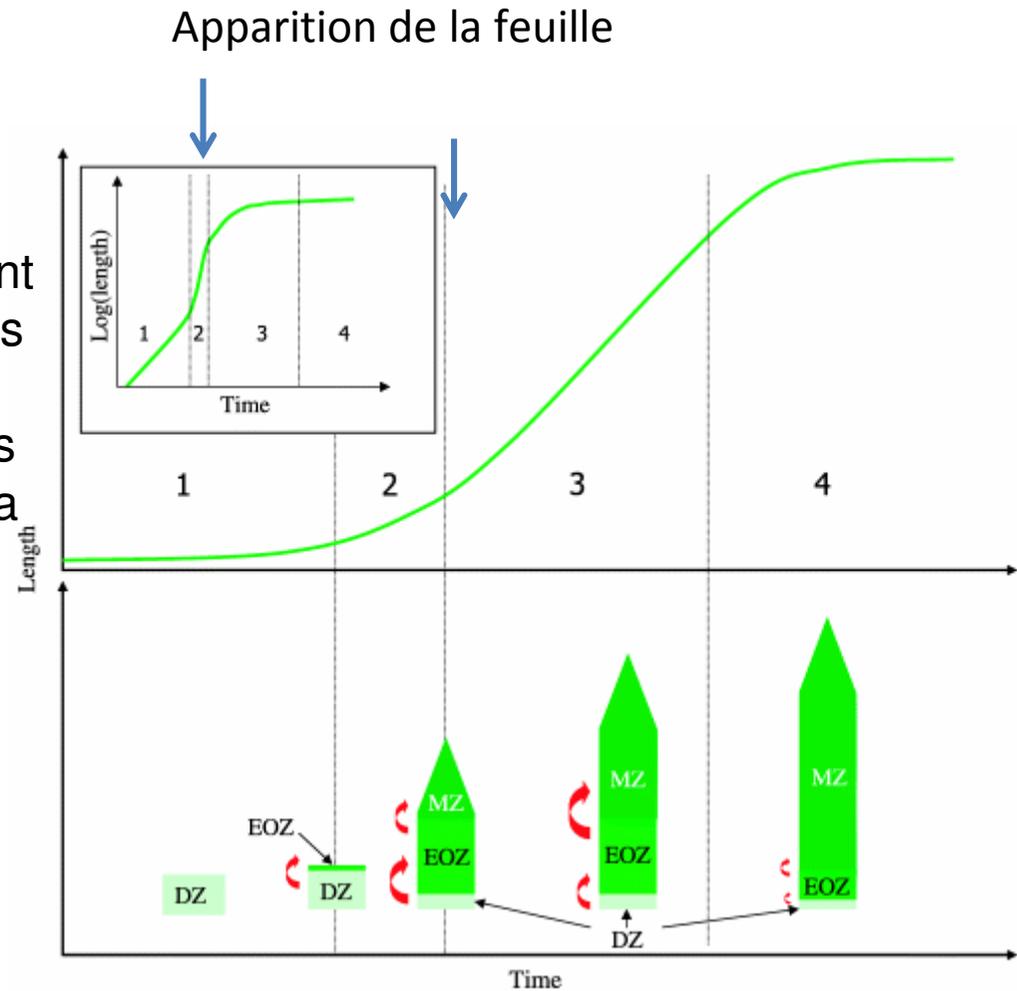
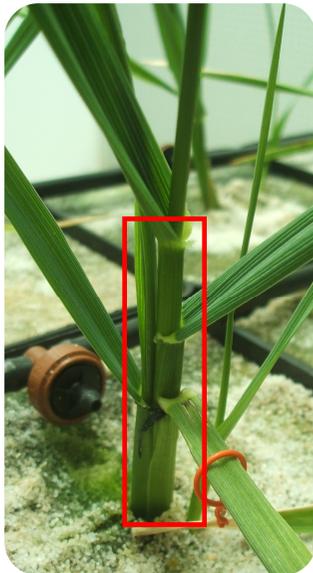
B

Film

L'architecture porteuse d'information: auto-organisation

Déterminisme de la longueur des feuilles et construction de la série foliaire des graminées:

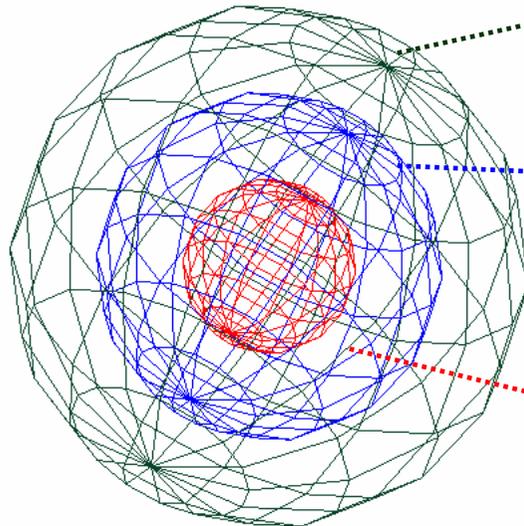
- Événements ontogéniques fortement coordonnés à l'apparition des feuilles
- 'Size effect': Dimension des feuilles précédentes modifie la longueur de la zone de croissance



Fournier et al. 2005

L'architecture porteuse d'information: auto-organisation

Déterminisme de la longueur des feuilles et construction de la série foliaire des graminées:



Contingent factors

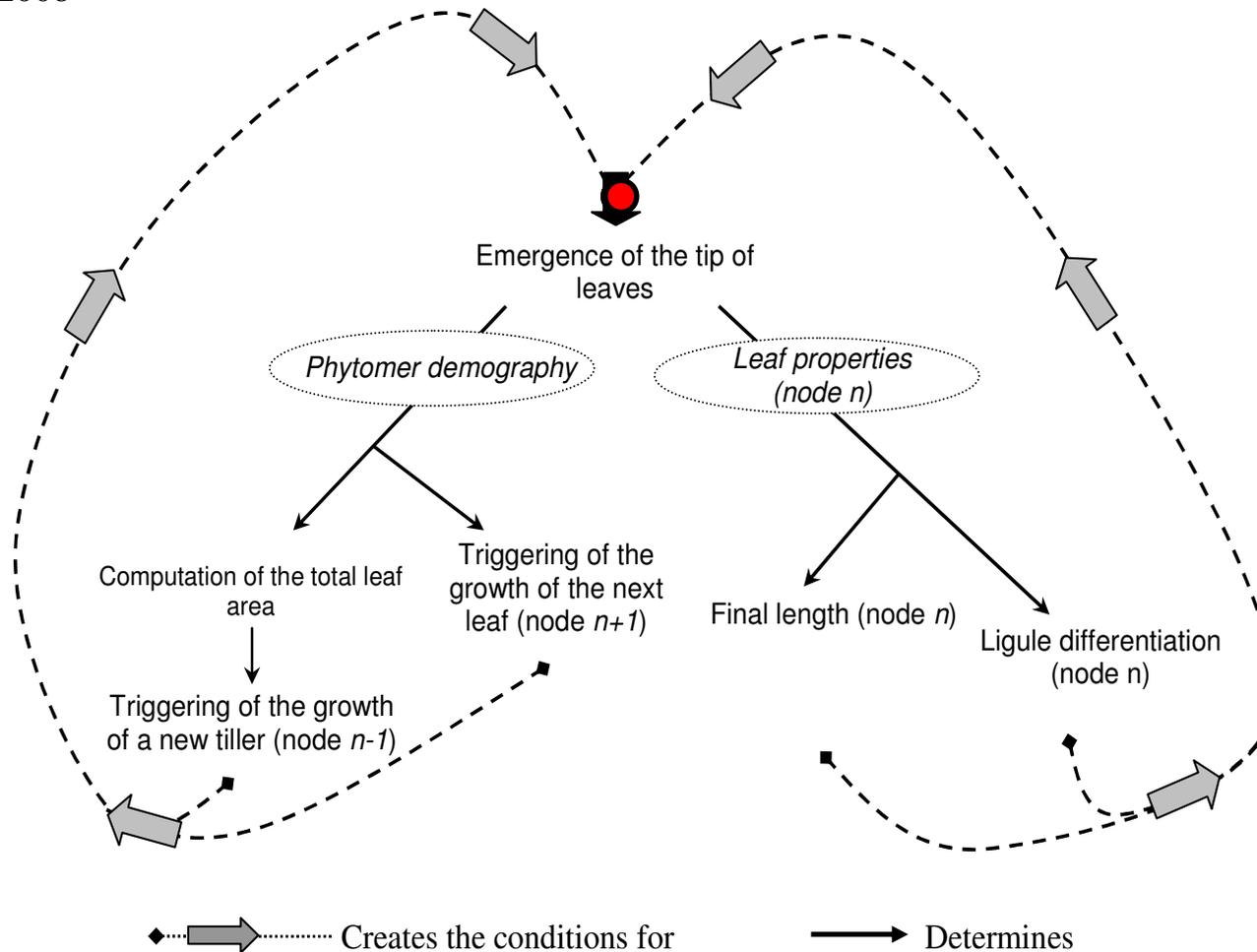
Environment (e.g. actual cell elongation)

Architecture (determination of the growth potential : e.g. actual number of cells)

Genetic factors (e.g. control of the max.cell division and expansion rate)

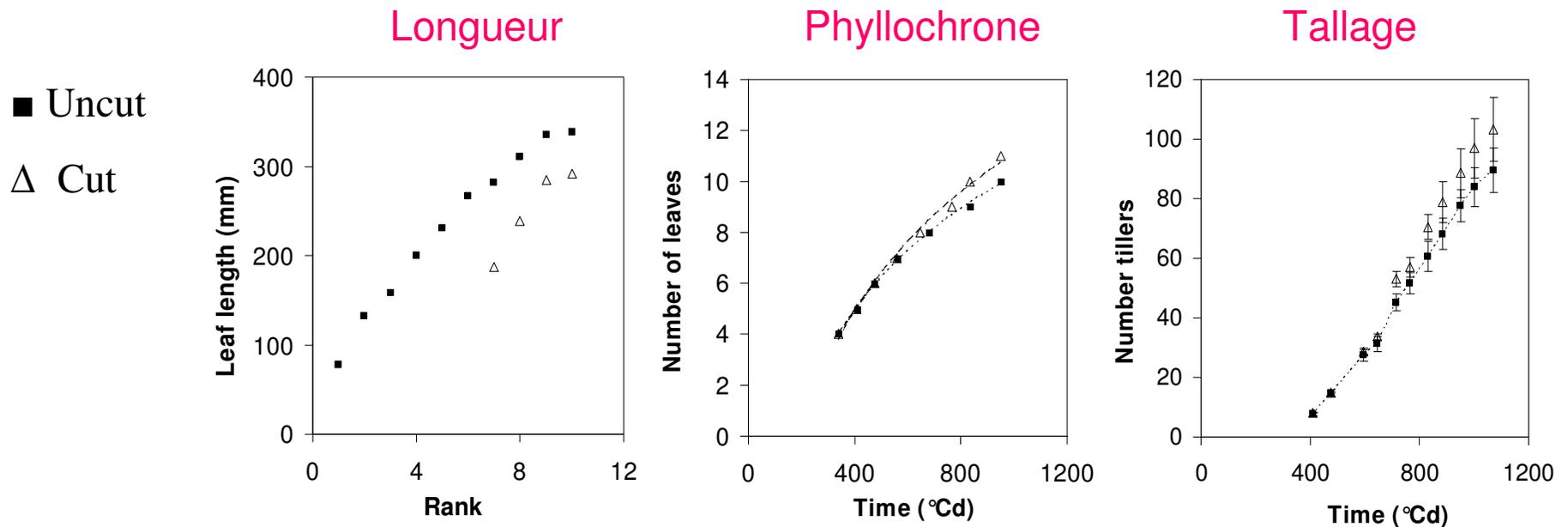
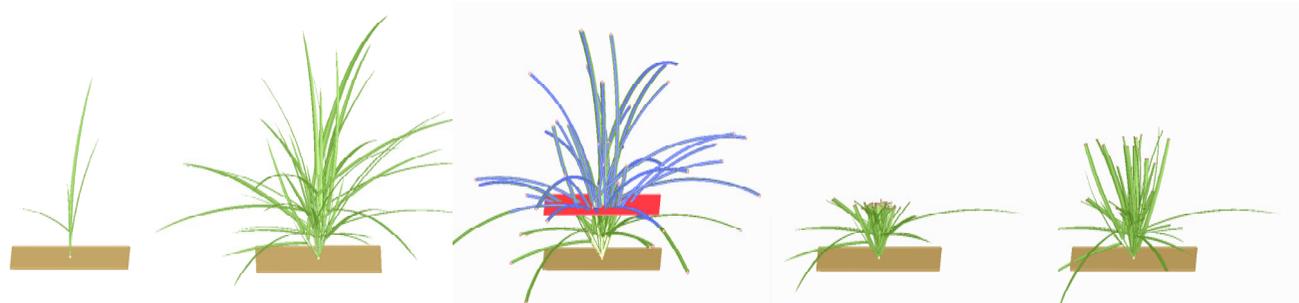
L'architecture porteuse d'information: auto-organisation

Verdenal et al., 2008



Couplage des réponses propres à l'architecture (production de phytomères / croissance) et à l'environnement (répression du tallage)

L'architecture porteuse d'information: auto-organisation



Phyllochrone, nb de talles, taille finale des feuilles et réponse à la coupe sont des propriétés émergente du système auto-organisé

L'architecture porteuse d'information: auto-organisation



$$L_{\max} = C \cdot (T_{01} e^{k_1(t+t_{b1})} - T_{02} e^{k_2(t+t_{b2})} - L)$$



$C=0.5$

$C=1$

$C=1.2$

$C=2$

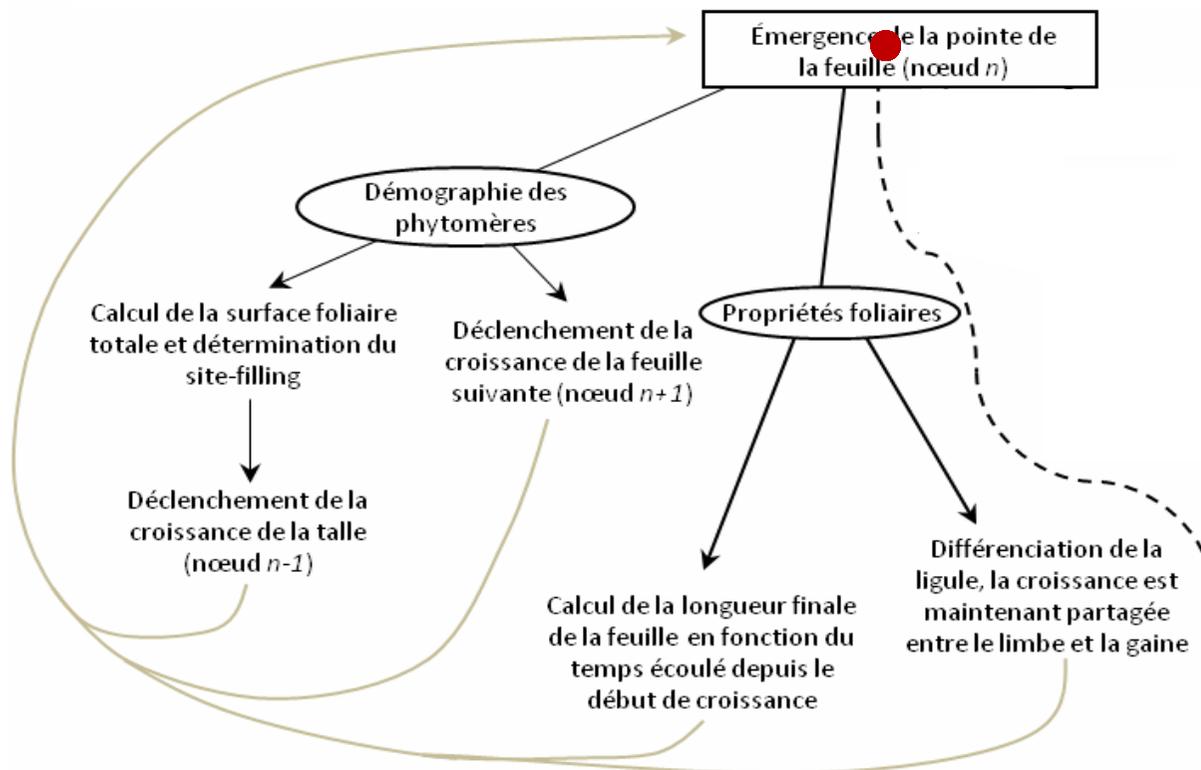
Paramétrage capable de capturer la diversité de phénotypes des graminées (types gazons -> fourrages) + trade-offs (tallage/longueur de feuilles)

L'architecture porteuse d'information: auto-organisation

Migault, 2015



Collab. INRA Avignon
L. Pagès - Archisimple



P		T _L	
1	Leaf emerges	4	
2	Leaf elongates	10	
3		17	
4	Leaf matures	25	
5		32	T _R
6	Root appears	40	2
7		48	8
8	Root elongates	56	17
9		66	25
10	Root branches	77	31
11			37
12			47
13			56
14			65
15	Root starts to...		76

Matthew et Kemball, 1997

Robin et al., 2010

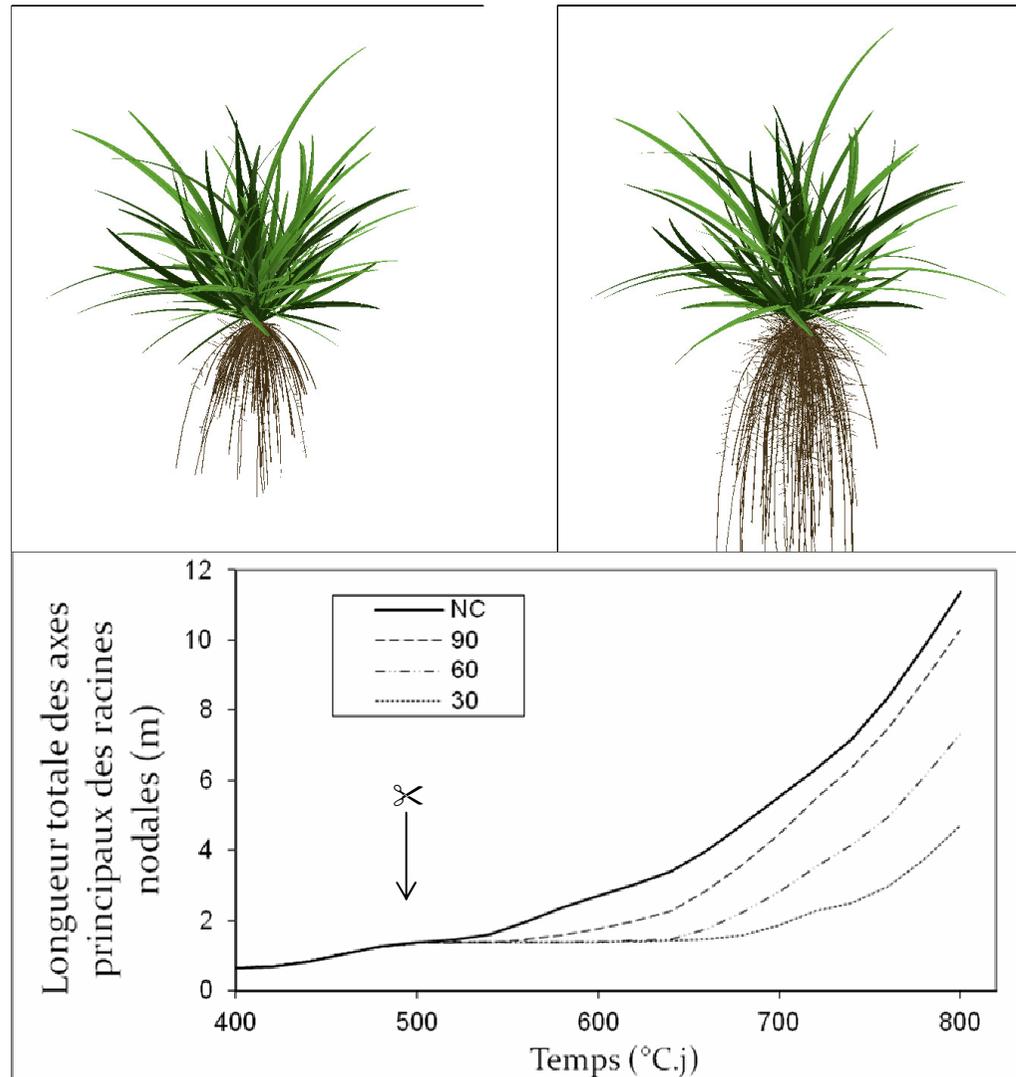
L'architecture porteuse d'information: auto-organisation

Modèle de morphogenèse de
plante entière

-

Réponse intégrée à la coupe:

Effets morphogénétiques et
trophiques des parties
aériennes sur le développement
racinaire

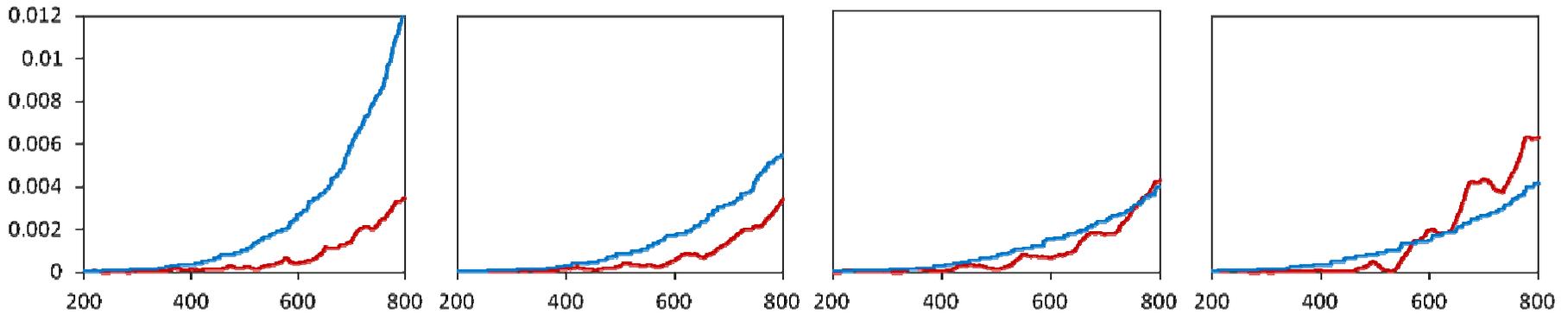


Prise en compte des relations trophiques entre organes (Allocation du C)

Gazon → Fourrage

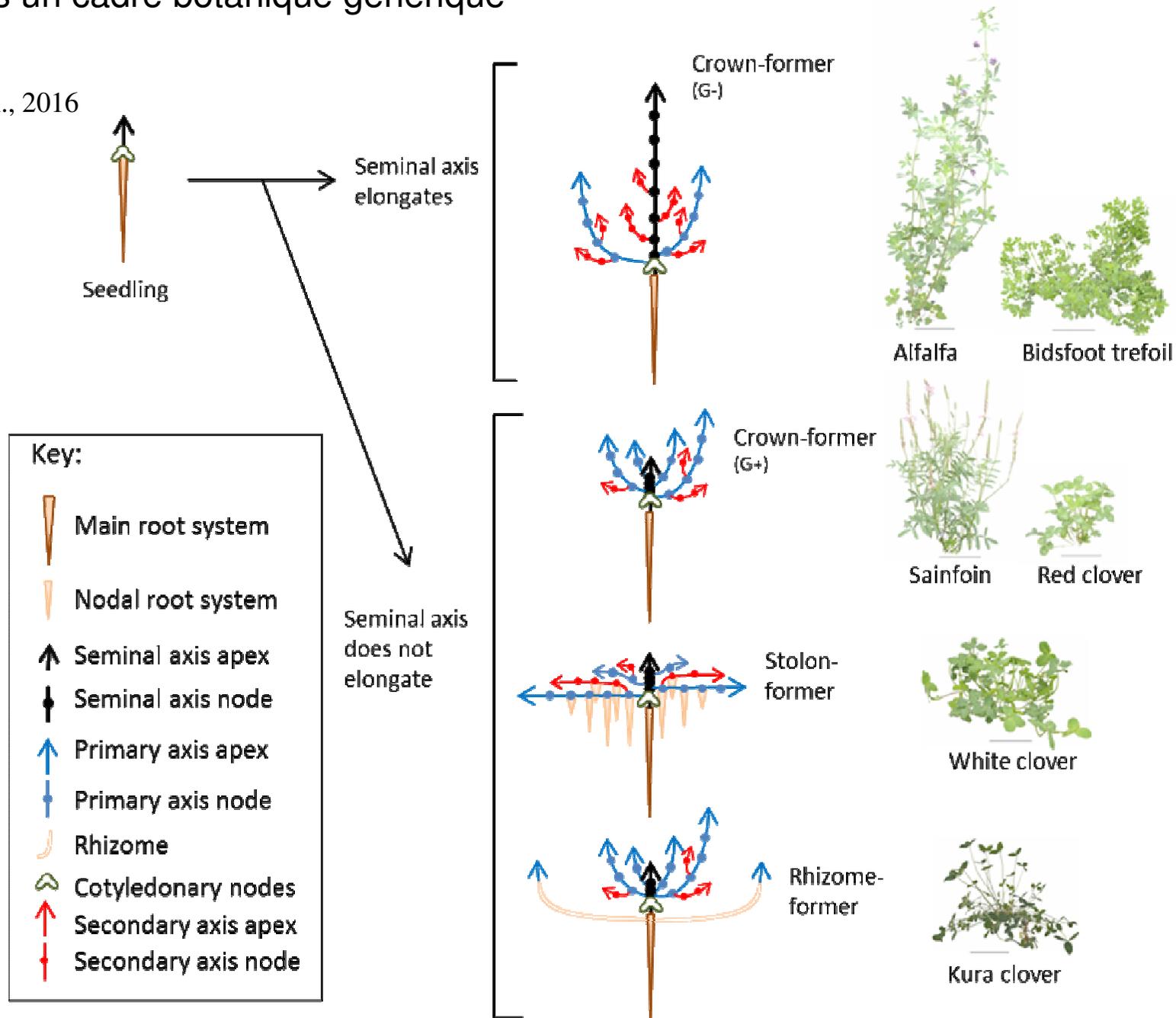


— Demande
— Offre



Intégration de la diversité des légumineuses dans les FSPM : Classification des axes dans un cadre botanique générique

Faverjon et al., 2016



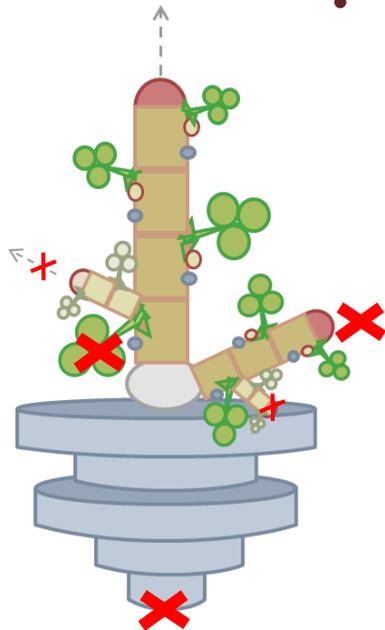
Morphogenèse potentielle

Reponses aux signaux et contraintes

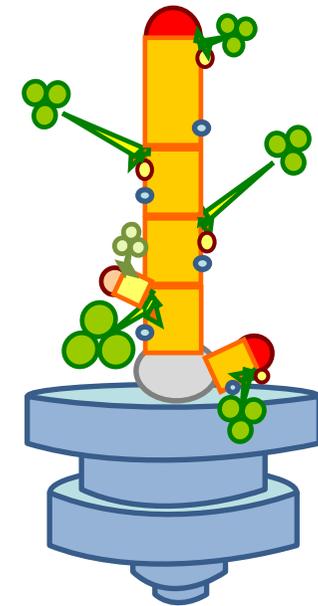
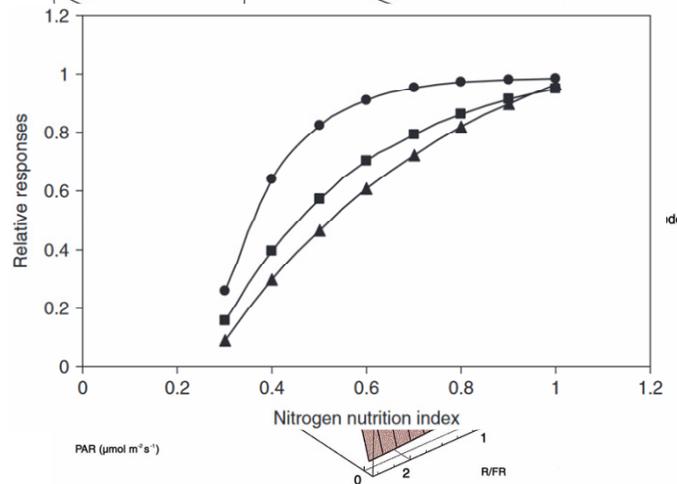
Competition

Morphogenèse réalisée

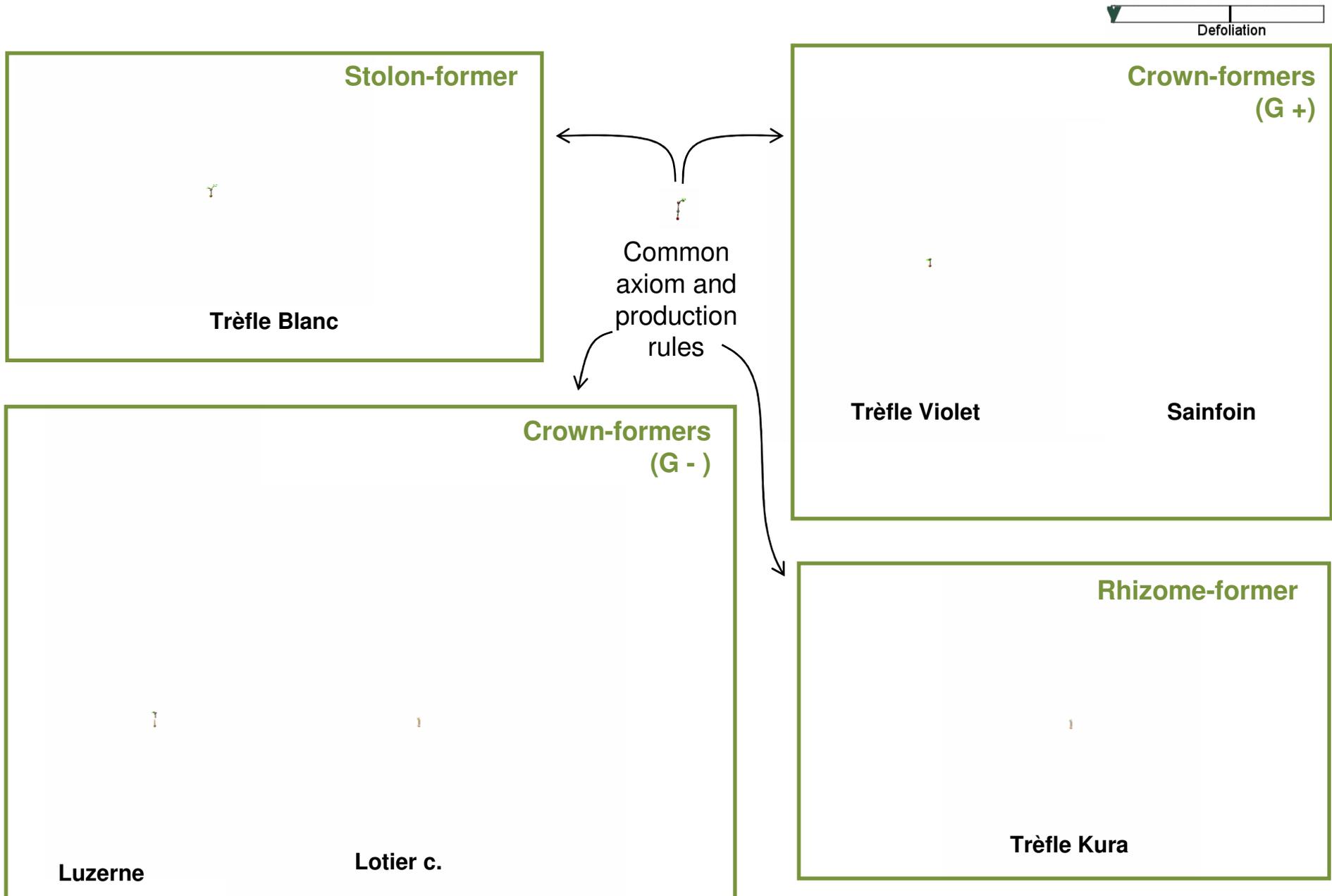
- Nitrogen Nutrition Index (whole-plant state variable)



e.g: $\text{Relative RUE} \sim \text{NNI}$
 $\text{internode length} \sim \text{PAR} \times \text{R:FR}$
 (Gautier *et al.* 2000)
 $\text{Growth} \sim \text{NNI}$
 (Gastal *et al.* 2014)



→ Différentes espèces appartenant aux principaux groupes morho-génétiques



Contributions de l'UR aux modèles dynamiques

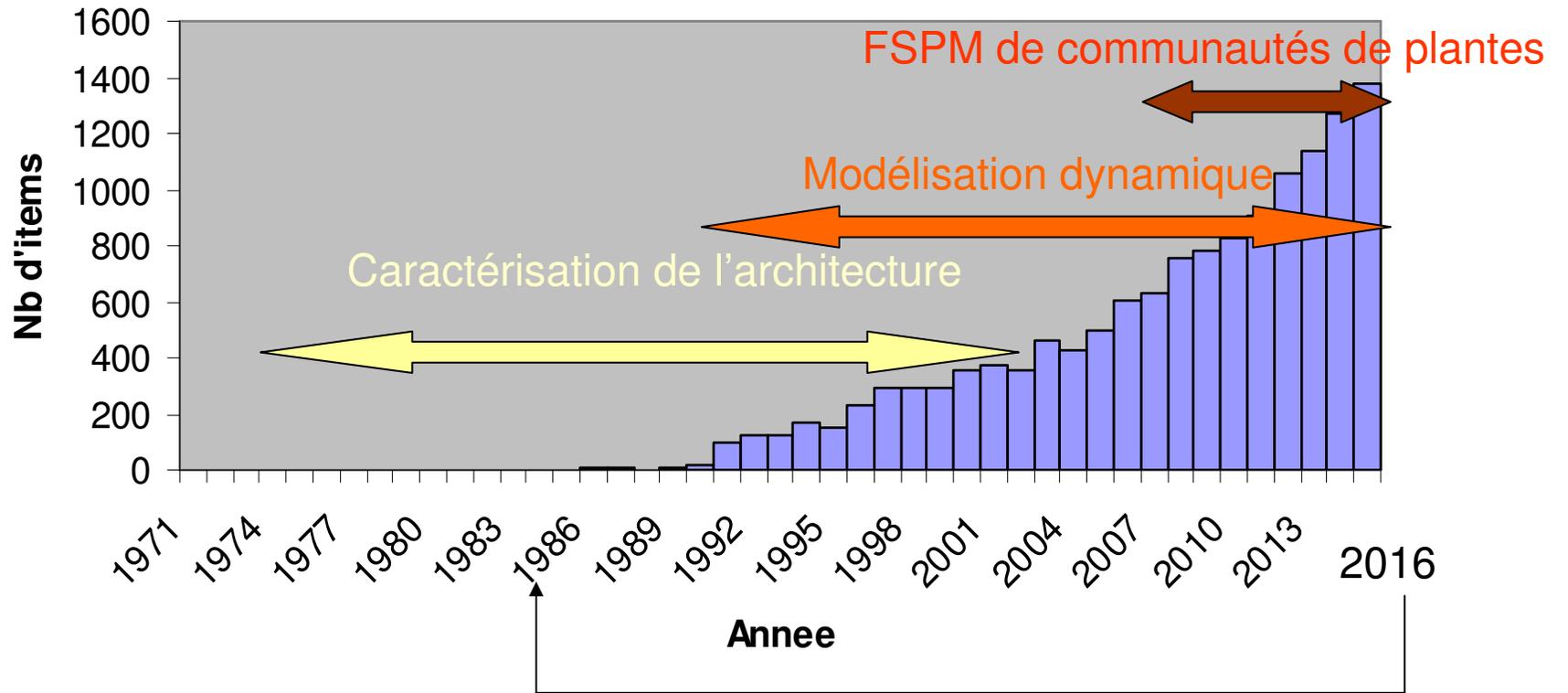
La modélisation dynamique des herbacées pérennes a fait avancer:

-> la compréhension du fonctionnement de la plante entière (plasticité phénotypique en réponse à l'environnement et à l'architecture), dans les peuplements prairiaux, et au delà

-> Le développement de méthodes de modélisation génériques

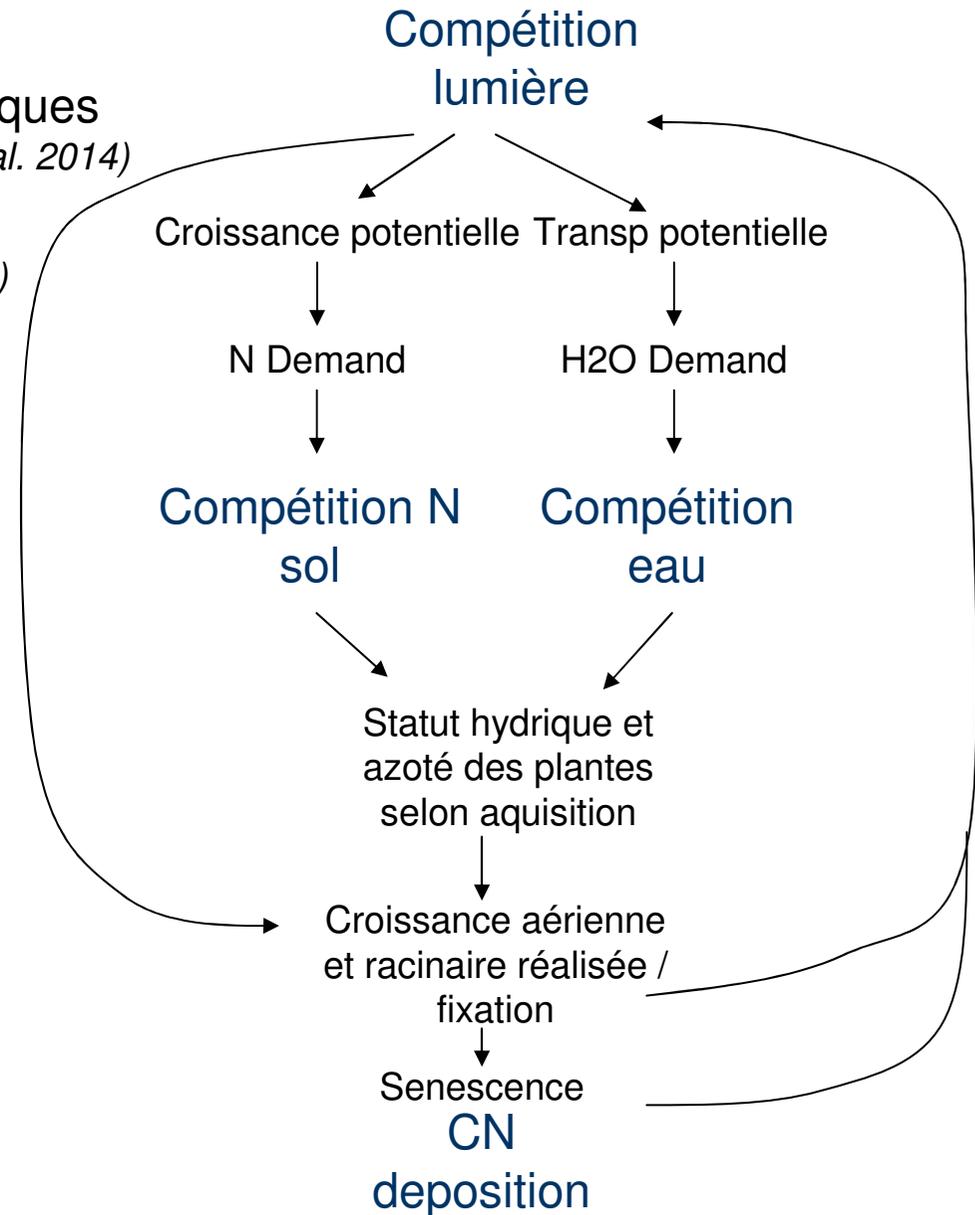
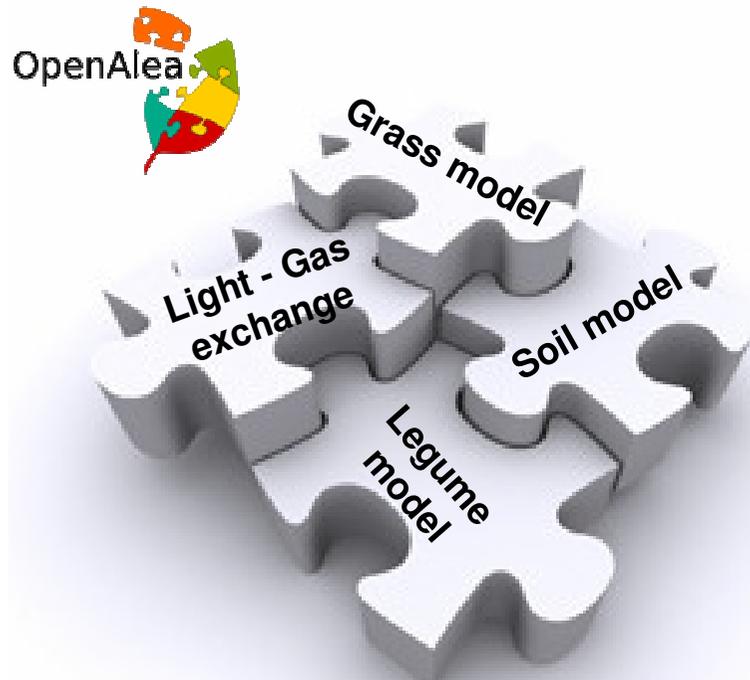
-> le renouvellement des approches pour aborder de nouvelles questions agronomiques: fonctionnement des peuplements génétiquement hétérogènes / fonctionnement des peuplements sous contraintes multiples

'plant architecture' dans le WOS

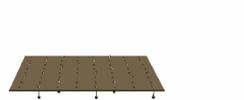
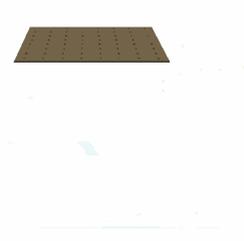
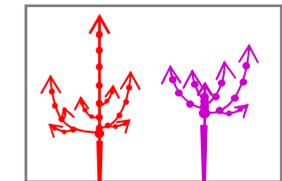
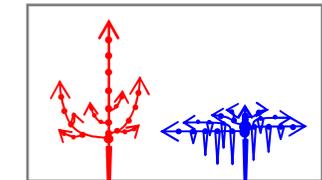
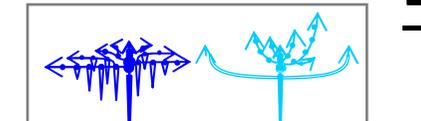


Virtual grassland: vers des prairies virtuelles

- Deux modèles de morphogenèse génériques (Verdenal et al. 2008; Louarn et al. 2010; Migault et al. 2014)
- Transfert Radiatif (RATP, Sinoquet et al. 2000)
- Un modèle de sol (Brisson et al. 2009)

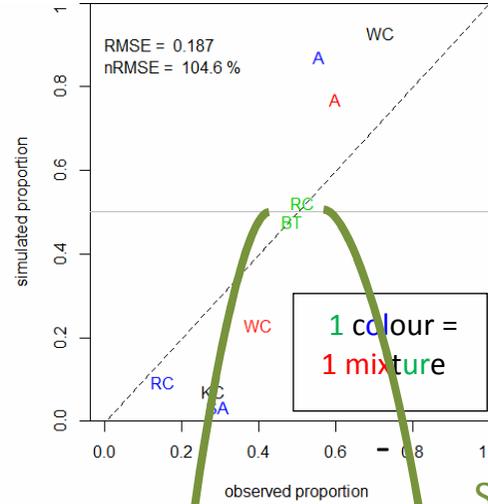


→ **competition**



Proportion des espèces

First harvest

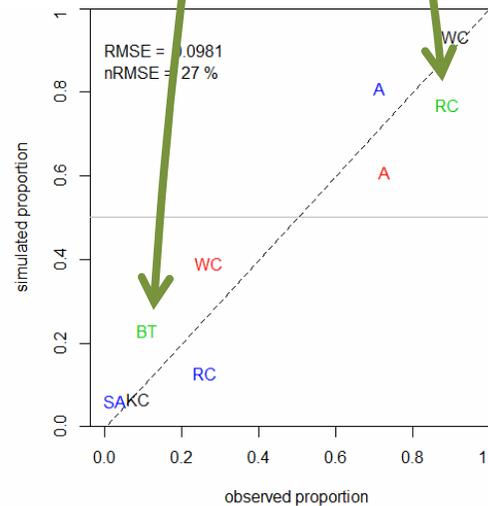


- A = alfalfa
- WC = white clover
- RC = red clover
- SA = sainfoin
- BT = birdsfoot trefoil
- KC = kura clover

Prediction des effets de compétition pour la lumière sur l'équilibre entre espèces

Shifts in dominance

Second harvest



Prédiction des shifts de dominance en réponse à la coupe

Diapositive 36

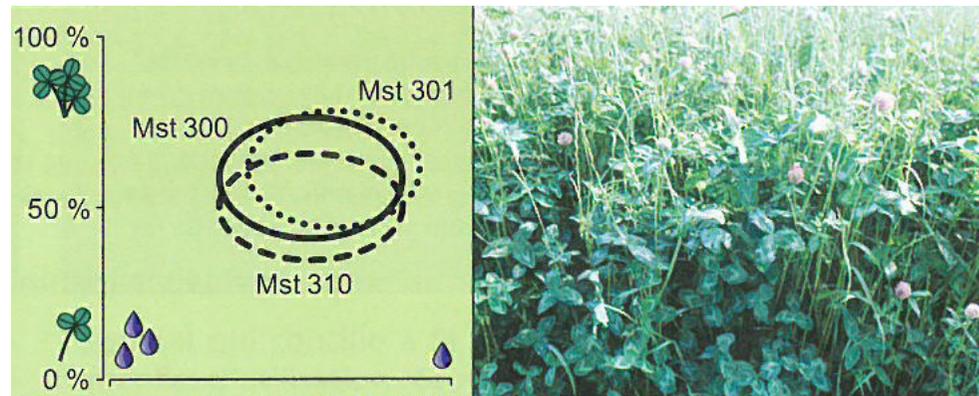
s1

Trop petit
stella; 18/11/2016

Et pour la suite?

-Quelles règles d'assemblage pour quels milieux?

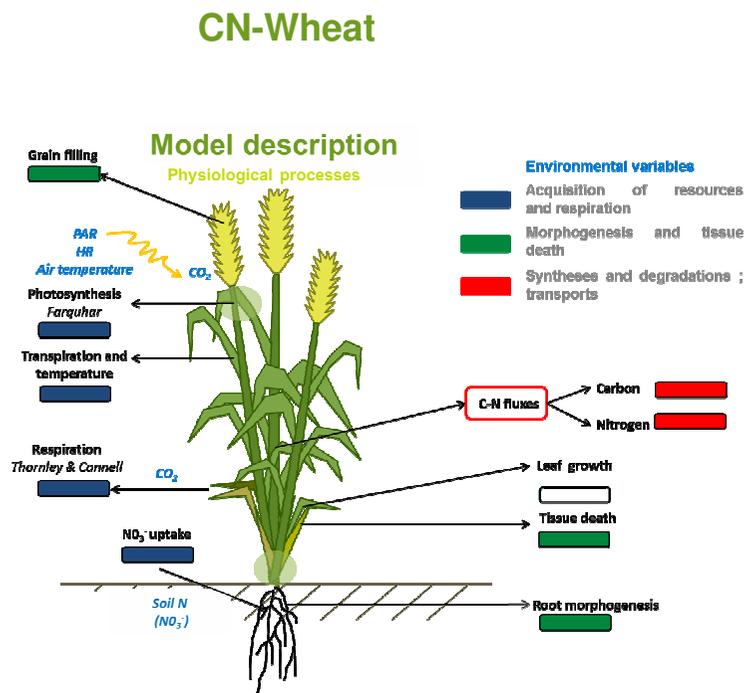
-> Aide à la définition
d'assemblage d'espèces
- Combinaisons de traits
favorables



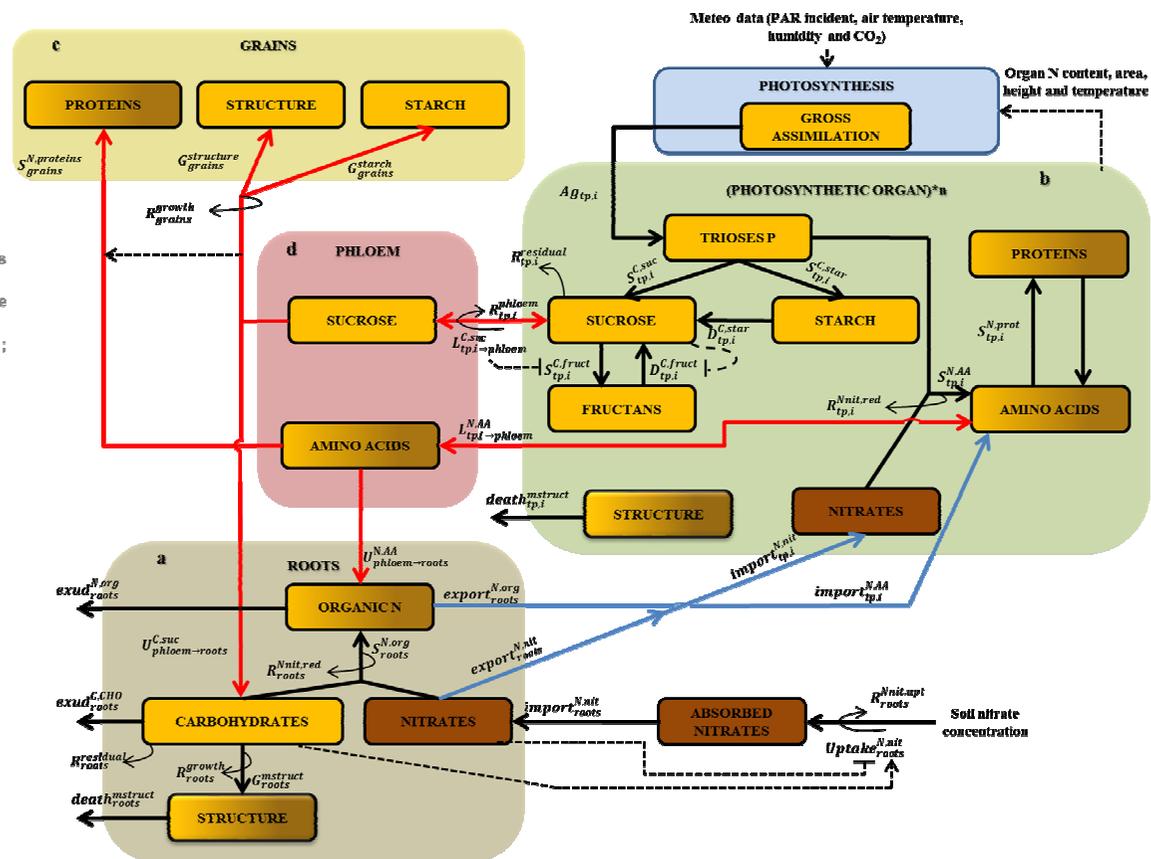
Et pour la suite?

-Quelles règles d'assemblage pour quels milieux?

-Quels idéotypes dans le futur?



Modèle mécaniste de fonctionnement et réponse aux contraintes multiples

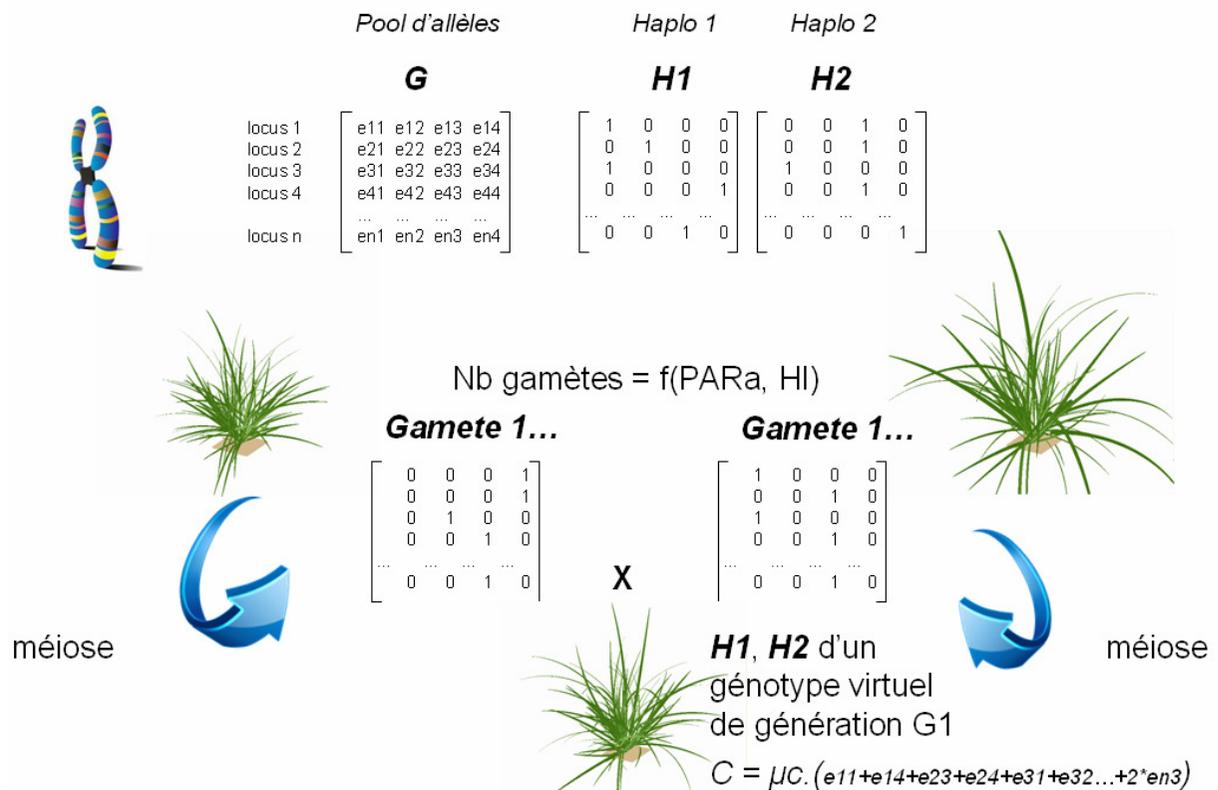


Barillot R, Chambon C, Andrieu B. 2016a. *Annals of Botany*.
Barillot R, Chambon C, Andrieu B. 2016b. *Annals of Botany*.

Et pour la suite?

- Quelles règles d'assemblage pour quels milieux?
- Quels idéotypes dans le futur?
- Quelle composition génétique intra- et inter-?

Modèle FSPM couplé avec de modèle génétique et évolution génétique



Merci à tous les contributeurs!

M. Agnusdei, R. Barillot, S. Carré, A. Christophe, D. Combes, L. Cousson, C. De Béranger, F. Duguet, JL Durand, A. Eprinchard, H Gautier, A. Escobar-Gutierrez, L. Faverjon, C. Fournier, E. Frak, F. Gastal, G. Lemaire, G. Louarn, G. Millet, B. Moulia, V. Migault, C. Perrot, A. Philliponneau, M. Poupa, P. Poussot, M. Rakocevic, E. Rivault, E. Roy, R. Schäeufele, F. Tabourel, JP Terrasson, C. Varlet-Grancher, A. Verdenal