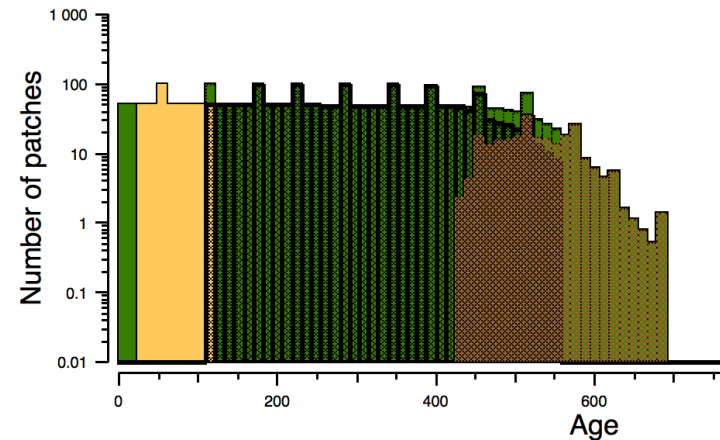


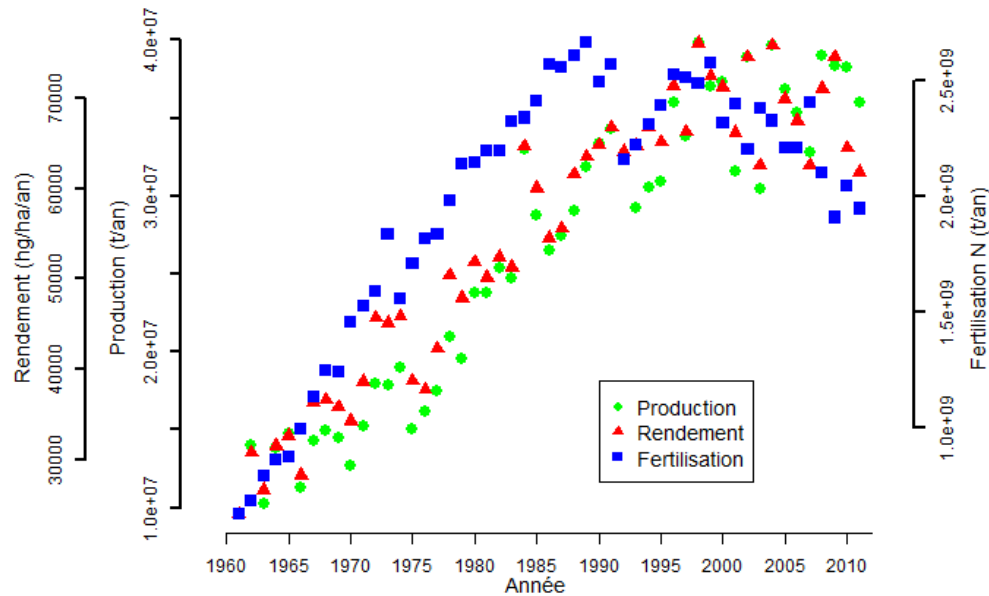
Atelier Modélisation en Agroécologie CERES AA-01-S1

Effets de la quantité de ressources
sur l'épidémiologie et l'évolution des champignons pathogènes
- Application à la fertilisation des grandes cultures -



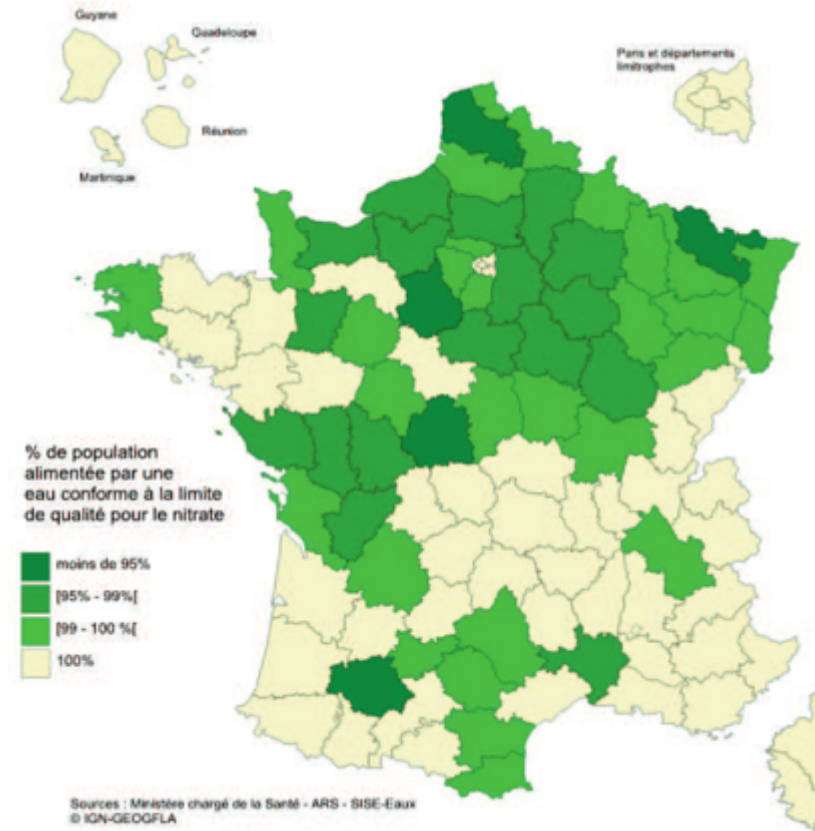
Agriculture intensive et fertilisation des cultures

Une large augmentation des rendements...



Données issues de la FAOSTAT

... au prix environnemental élevé



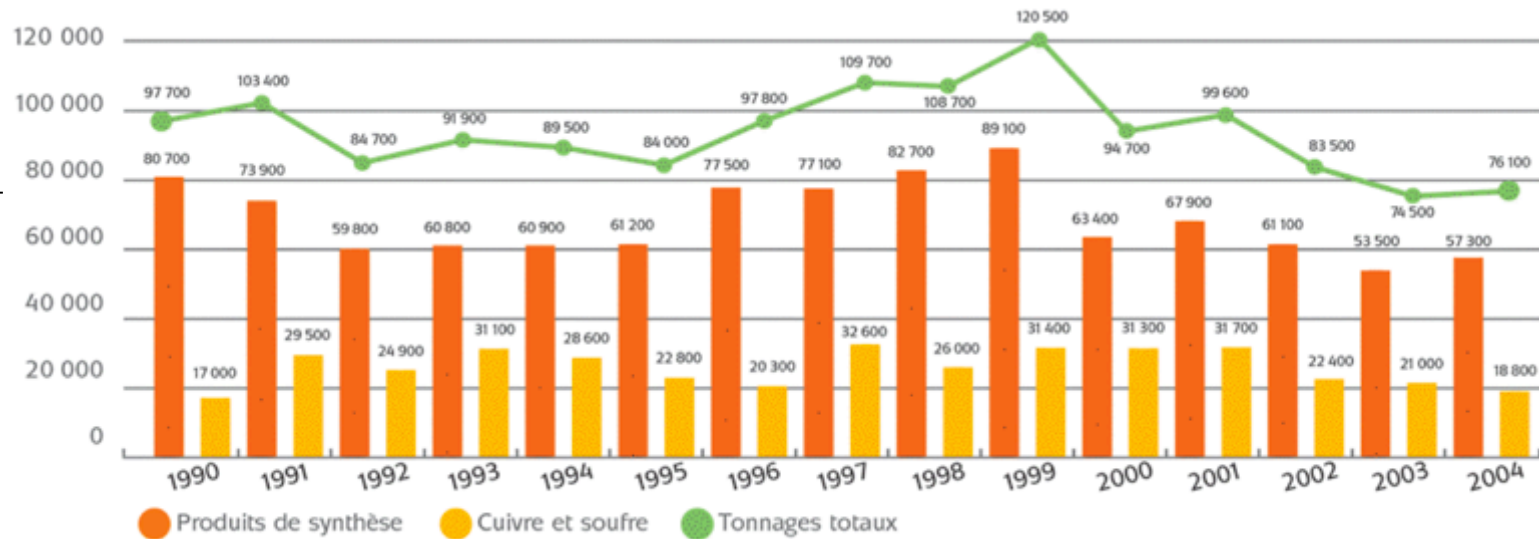
Pourcentage par département de la population desservie par une eau conforme vis-à-vis des concentrations en nitrates

Notice : **La qualité de l'eau du robinet en France (données 2012)**

http://www.eaufrance.fr/IMG/pdf/eaurobinet_qualite_2012_201410.pdf

Agriculture intensive et fongicides

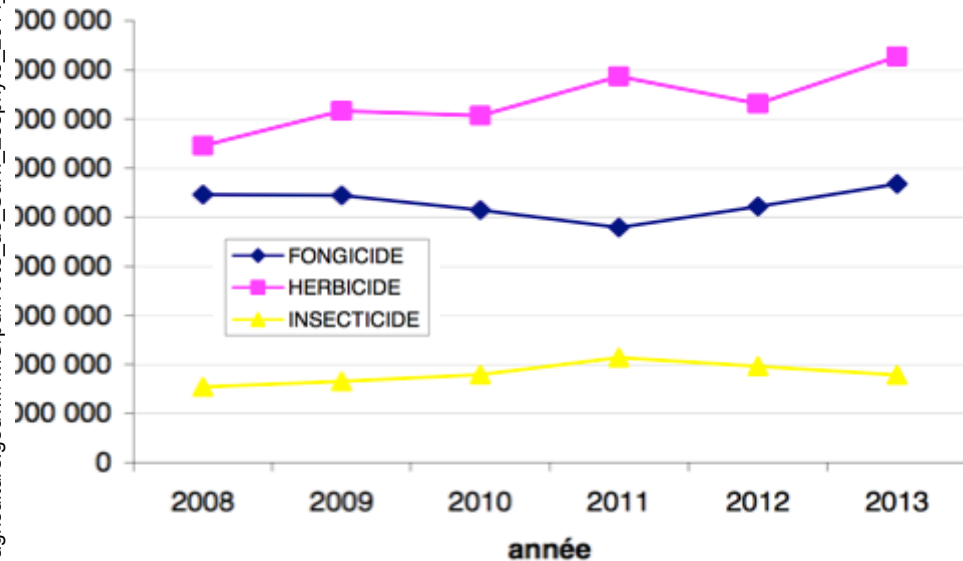
Une longue histoire d'utilisation



Agriculture intensive et fongicides

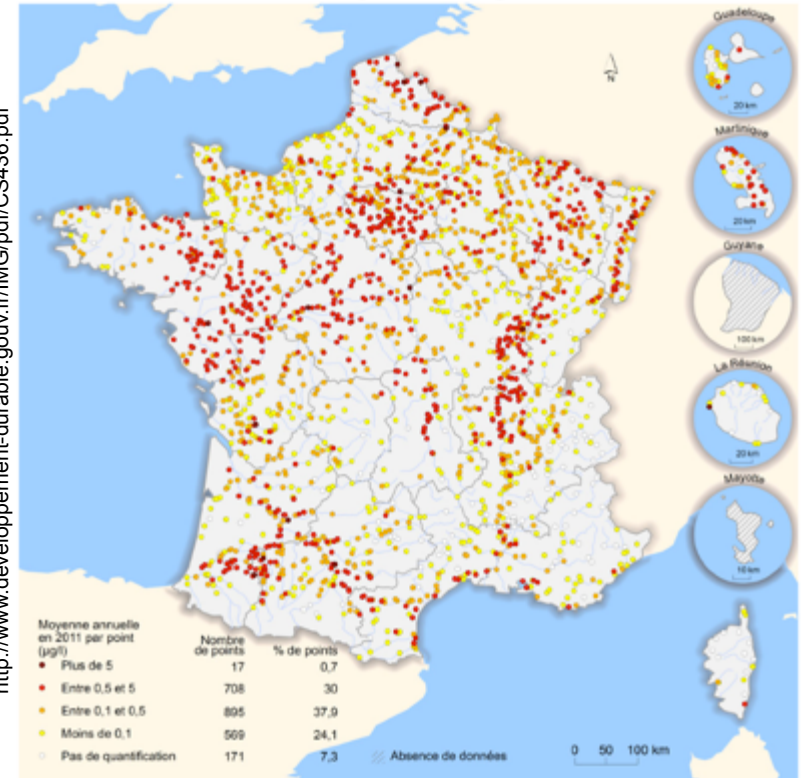
Une longue histoire d'utilisation
et un recours toujours fort aux fongicides
pour maintenir les rendements

Evolution du NODU usage agricole par fonction



... à un prix environnemental élevé

Concentration totale moyenne en pesticides en 2011



<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CS436.pdf>

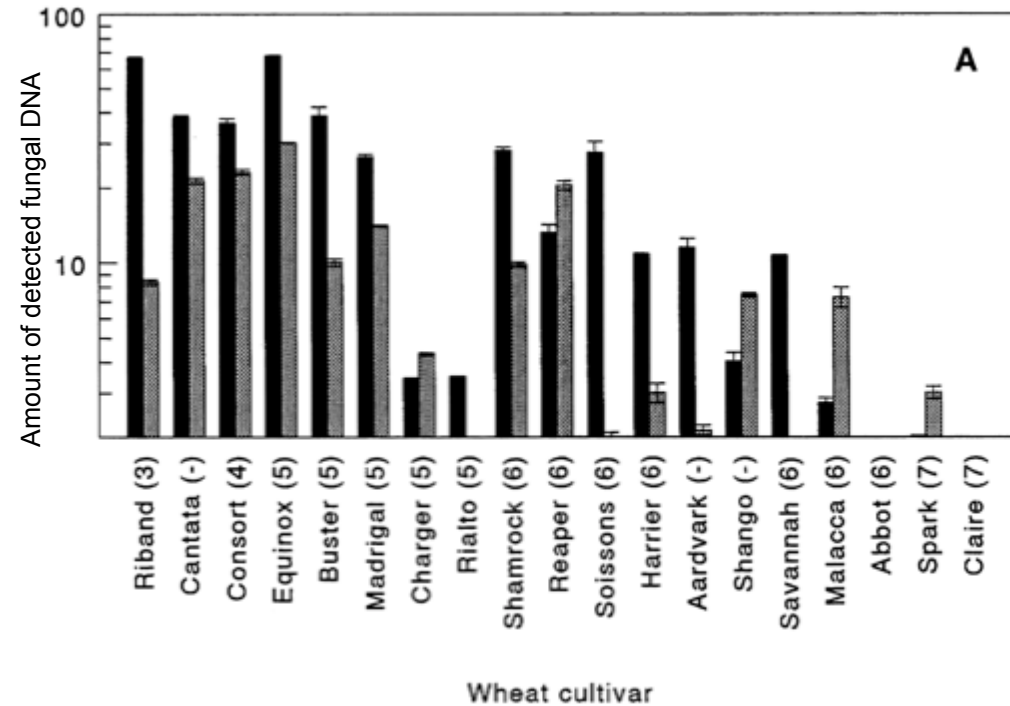
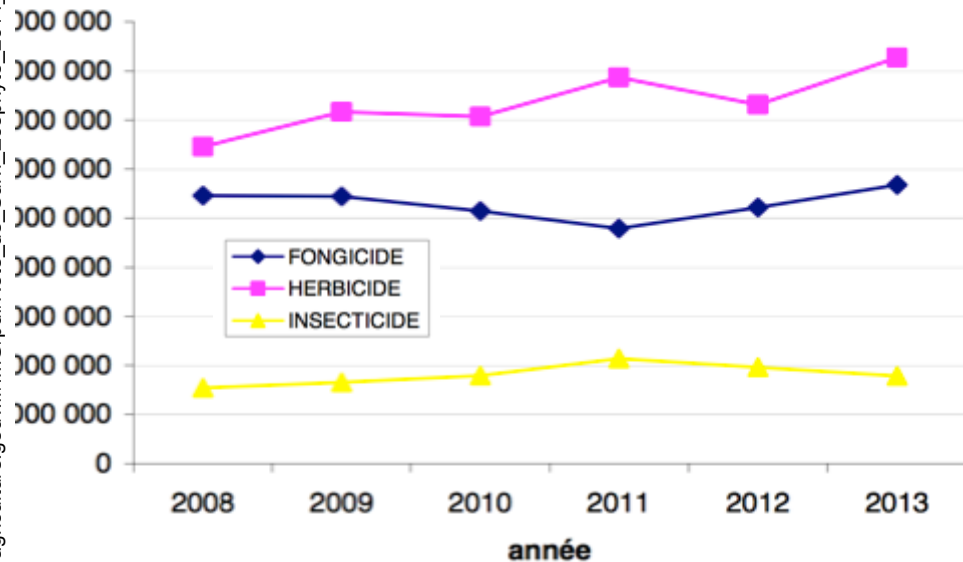
Agriculture intensive et fongicides

Une longue histoire d'utilisation et un recours toujours fort aux fongicides pour maintenir les rendements

... à un prix environnemental élevé et pour une efficacité en baisse

Fraaije et al., 2001

Evolution du NODU usage agricole par fonction



→ Difficultés à réduire l'usage de pesticides de moins en moins efficaces, malgré la promulgation du « [paquet pesticides](#) » en 2009 suivi du [plan Ecophyto 2018](#) en 2011.

Nécessité d'un changement

Quels types d'agricultures pour limiter l'utilisation d'intrants ?

Le pari de l'agroécologie

Voir l'agrosystème comme un écosystème global

Collaboration entre écologues et agronomes

Aspergillus alliaceus	Orobanche cernua	Par. Cult.	Afr.	Aybeke et al., 2013
Fusarium spp				
	Orobanche sp	Par. Cult.	Jord.	Hameed et al., 2001
Alternaria alternata				
Acremonium kiliense	Viscum album	Par.	Turq.	Kotan et al., 2012
Puccinia eupatorii	Campuloclinium macrocephalum	Weed	Afr.	Goodall et al., 2011
Corynespora cassicola sp schinii	Schinus terebinthifolius	Weed	Am. N.	de Macedo et al., 2012
Puccinia punctiformis		Weed	Eur.	Berner et al., 2013
Verticillium dahliae	Cirsium arvense	Inv.	N.Z.	Skipp & al., 2012
Colletotrichum salsolae	Salsola tragus	Inv. Weed	As	Berner et al., 2014
Ramulaeia crupinae	Crupina vulgaris	Inv.	Am. N.	Bruckart III et al., 2014
Pseudocercospora lonicerigena	Lonicera japonica	Inv.	Am. S.	De Miranda et al., 2014
...
Pseudomonas sp		fungus on		
Achromobacter sp	Verticillium dahliae	Olive tree	Afr	Triki et al., 2012
Carmenta sp cf athacae	Parthenium hysterophorus	Weed	Oc.	Trevino et al., 2012

Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

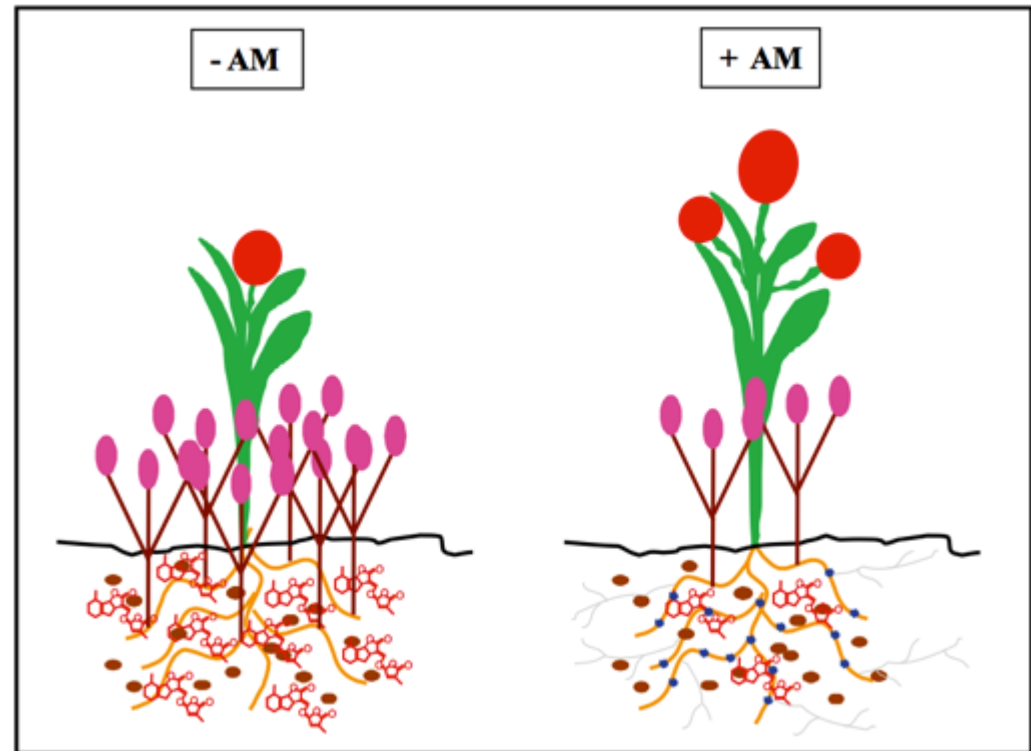
Résultats/Discussion

Le pari de l'agroécologie

Voir l'agrosystème comme un écosystème global

Collaboration entre écologues et agronomes

Aspergillus alliaceus	Orobanche cernua
Fusarium spp	Orobanche sp
Alternaria alternata	Viscum album
Acremonium kiliense	Campuloclinium macrocephalum
Puccinia eupatorii	Schinus terebinthifolius
Corynespora cassicola sp schinii	Cirsium arvense
Puccinia punctiformis	Salsola tragus
Verticillium dahliae	Crupina vulgaris
Colletotrichum salsolae	Lonicera japonica
Ramulaeia crupinae	...
Pseudocercospora lonicigerina	...
...	...
Pseudomonas sp	Verticillium dahliae
Achromobacter sp	Parthenium hysterophorus
Carmenta sp cf athacae	



D'après López-Ráez et al., 2012

→ Mon projet de thèse

Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Effect of resource levels on epidemics and pathogen evolution - Application to crop fertilization -

Contrat Jeune Scientifique INRA
Octobre 2014 – Septembre 2017

Directeurs de thèse : Corinne Robert (INRA-EcoSys) & David Claessen (IBENS)

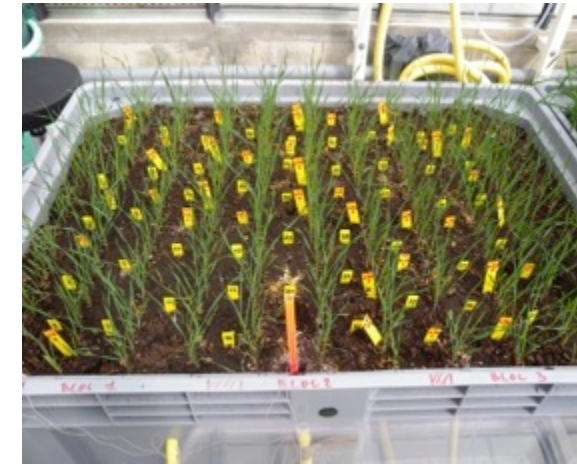
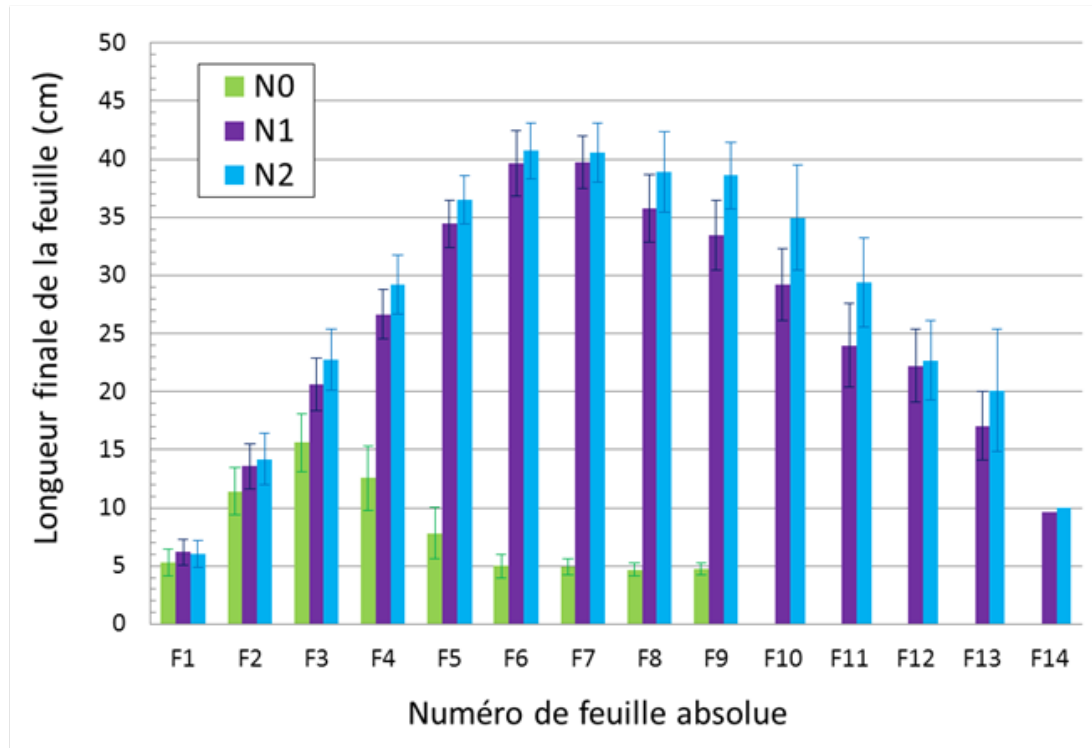
**Utiliser la fertilisation comme levier pour faire émerger des propriétés d'autorégulation
des agrosystèmes via les interactions entre les organismes.**

Approche par la modélisation

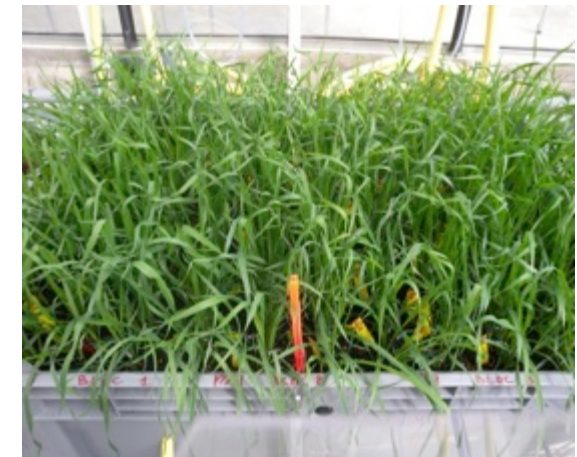
Effet de la fertilisation sur la plante (blé)

Effets sur l'architecture du blé :

- Augmentation de la taille des organes



Fertilisation N0



Fertilisation N2

Expérimentation en serre, Grignon, 2012, Robert et Gautier

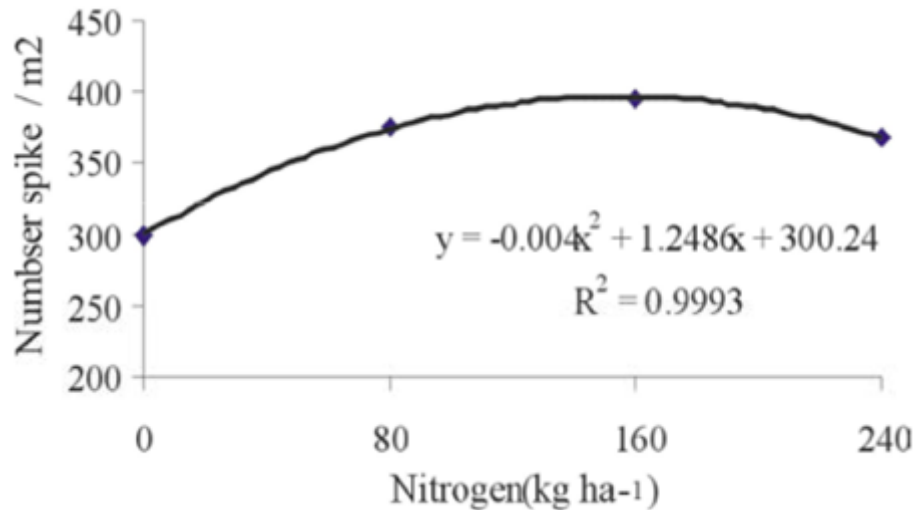
Effet de la fertilisation sur la plante (blé)

Effets sur l'architecture du blé :

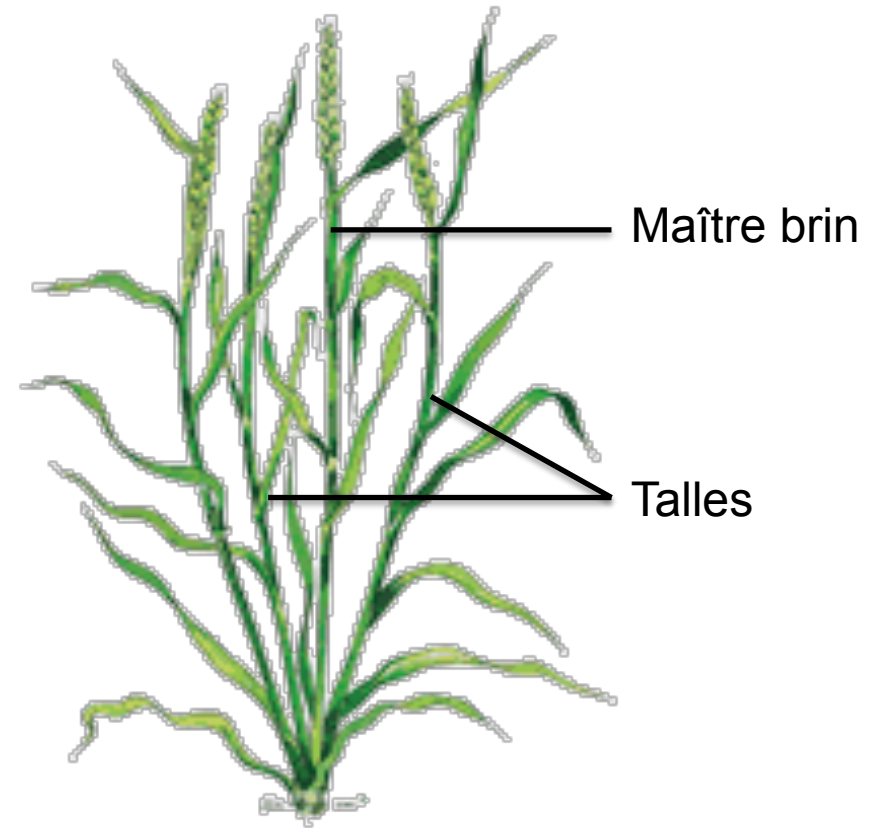
- Augmentation de la taille des organes
- Augmentation du nombre d'organes

Nombre de talles	0	2	3	4
N0	100%	0%	0%	0%
N1	0%	2%	71%	27%
N2	0%	2%	73%	24%

Expérimentation en serre, Grignon, 2012, Robert et Gautier



Naseri et al., 2010



<http://web04.univ-lorraine.fr/ENSAIA>

Effet de la fertilisation sur la plante (blé)

Effets sur l'architecture du blé :

- Augmentation de la taille des organes
- Augmentation du nombre d'organes

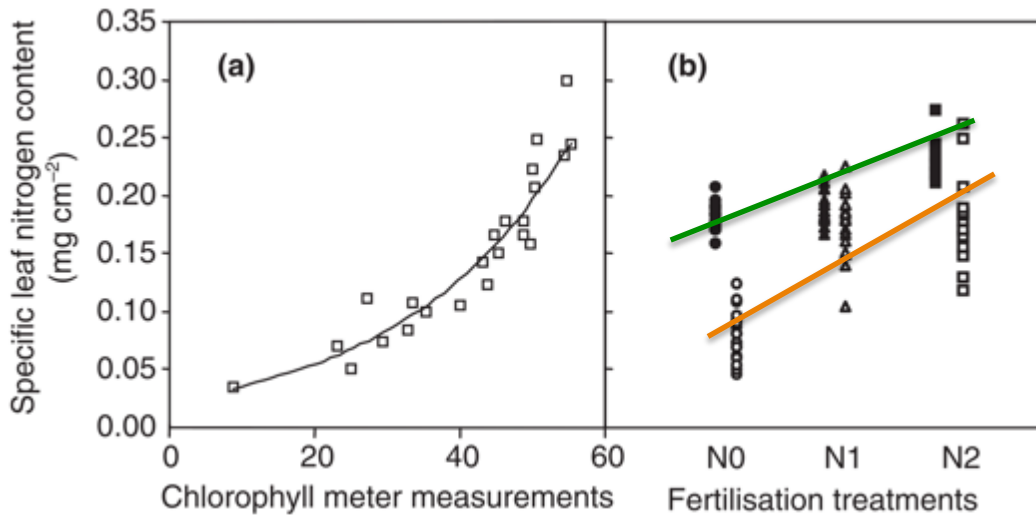
Effet de la fertilisation sur la plante (blé)

Effets sur l'architecture du blé :

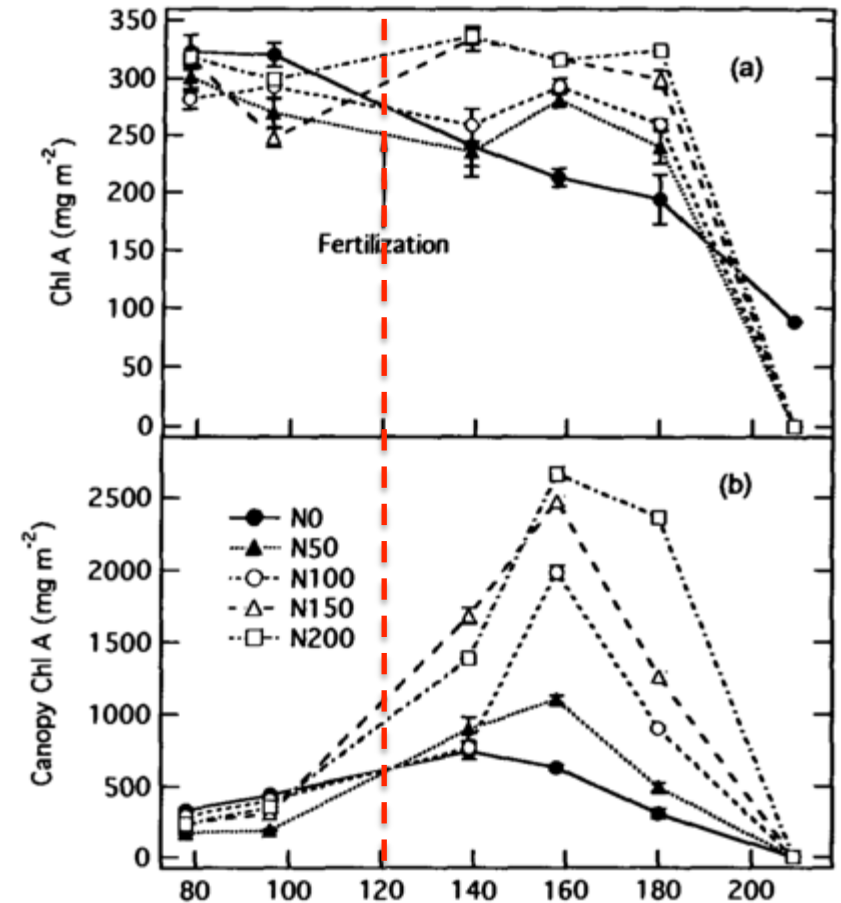
- Augmentation de la taille des organes
- Augmentation du nombre d'organes

Effets sur le contenu en ressource des organes

- Changement des profils de métabolites primaires dans les feuilles



Robert et al., 2005



Filella et al., 1995

Effet de la fertilisation sur la plante (blé)

Effets sur l'architecture du blé :

- Augmentation de la taille des organes
- Augmentation du nombre d'organes

Effets sur le contenu en ressource des organes

- Changement des profils de métabolites primaires dans les feuilles
- Change le timing de sénescence des organes
- Changement des profils de métabolites secondaires

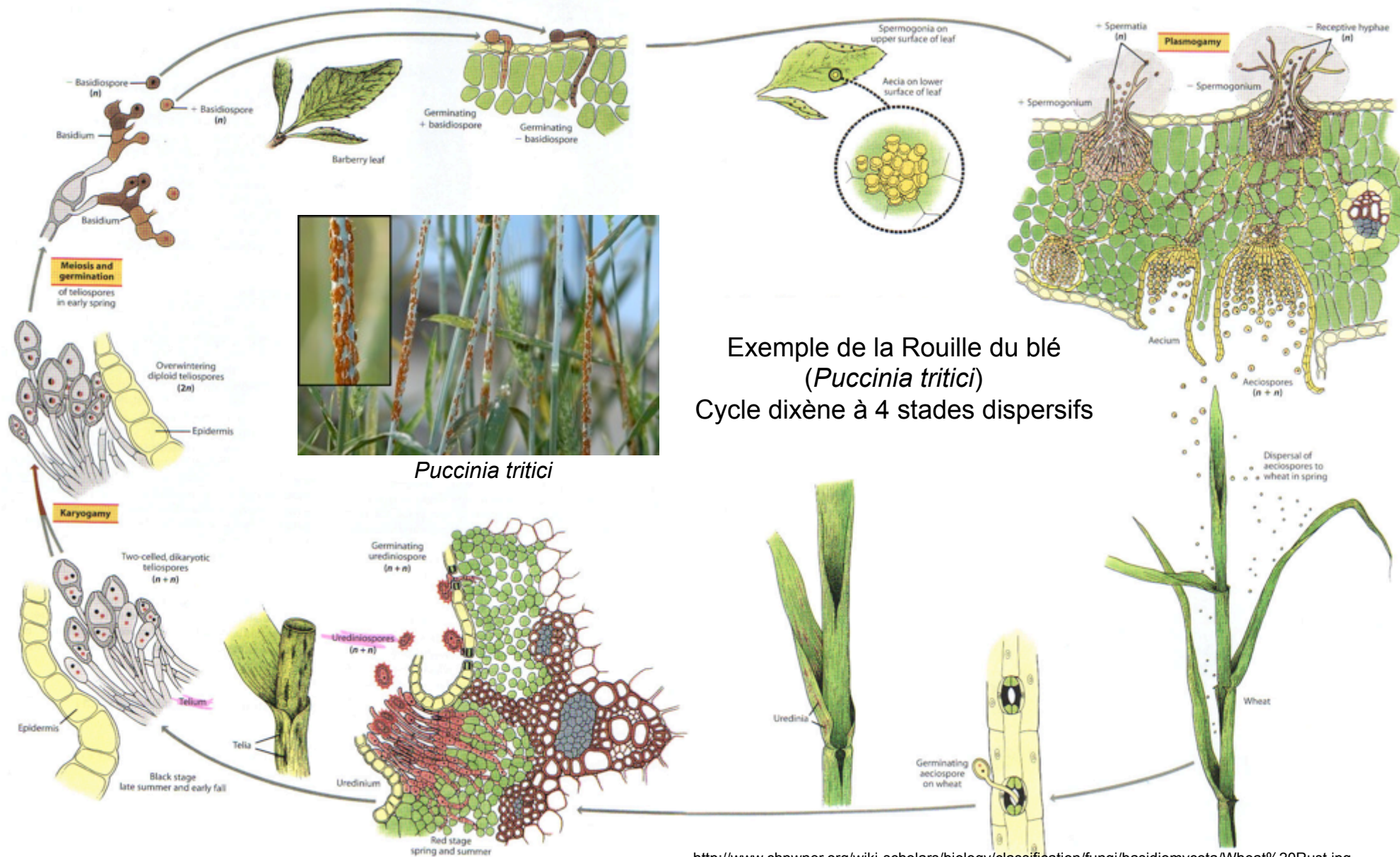
Effets sur la structure des feuilles

- Densité stomatique ?
- Trichomes ?
- Phyllosphère ?

Changements de dynamique
d'utilisation des ressources

Les champignons pathogènes des cultures


L'exemple de la Rouille du blé



Exemple de la Rouille du blé
(*Puccinia tritici*)
Cycle dixène à 4 stades dispersifs

<http://www.chpwner.org/wiki-scholars/biology/classification/fungi/basidiomycota/Wheat%20Rust.jpg>

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques


Emergence
(10)

Time Scale (Zadoks' stages)



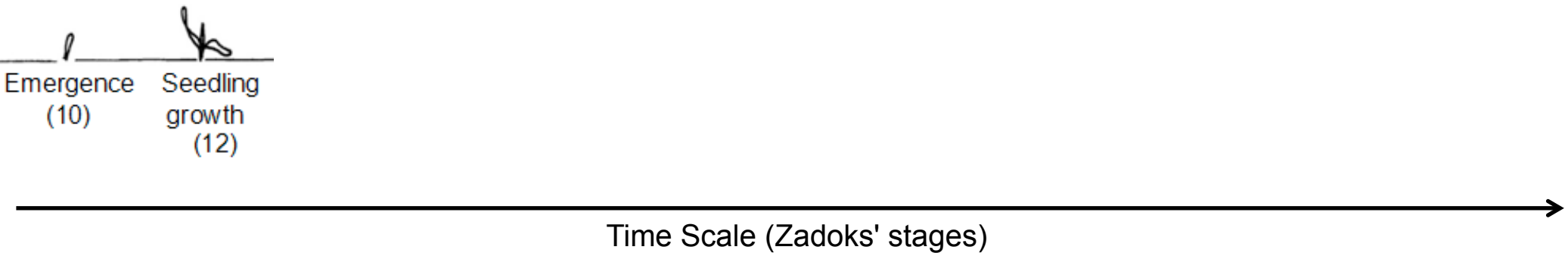
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



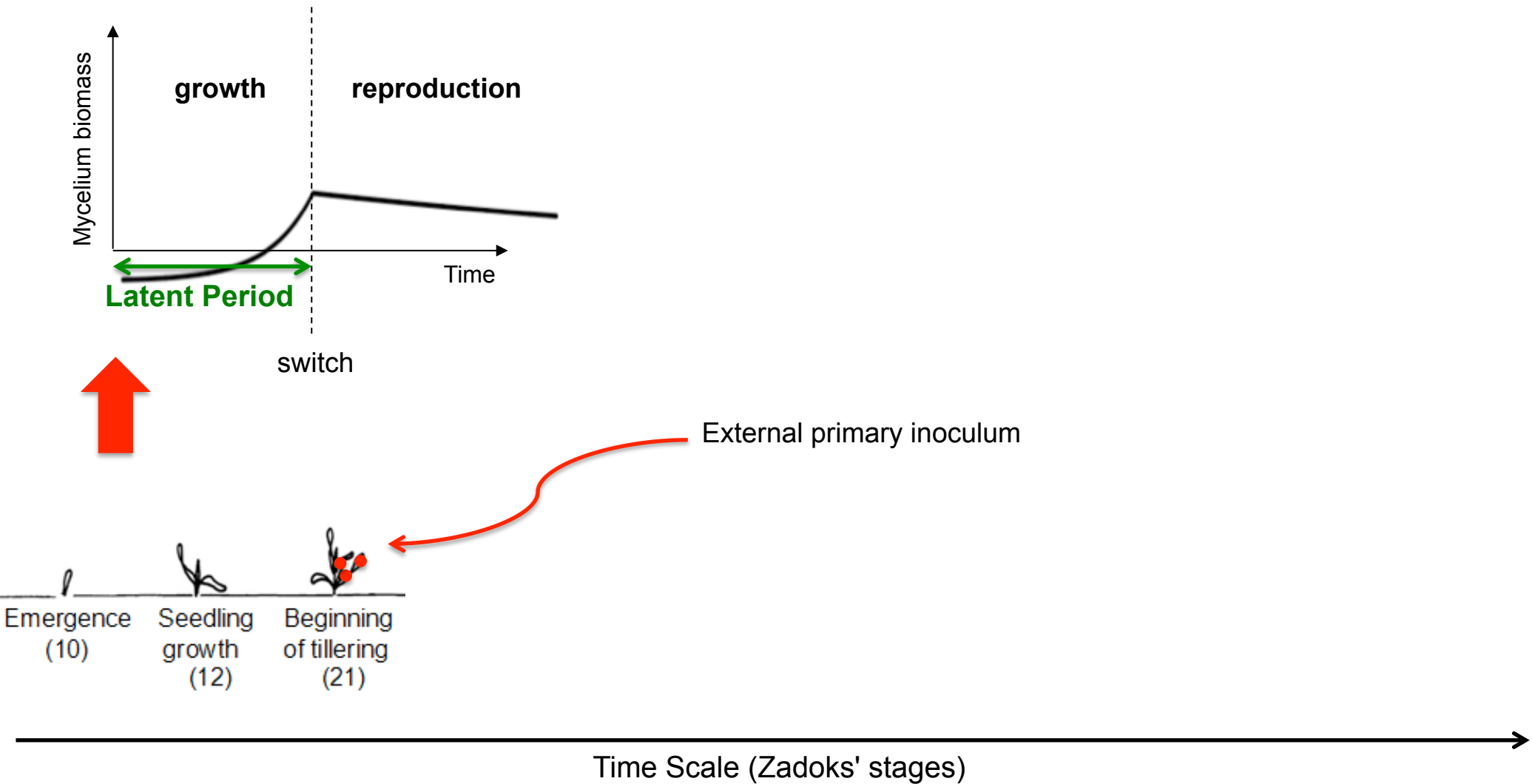
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



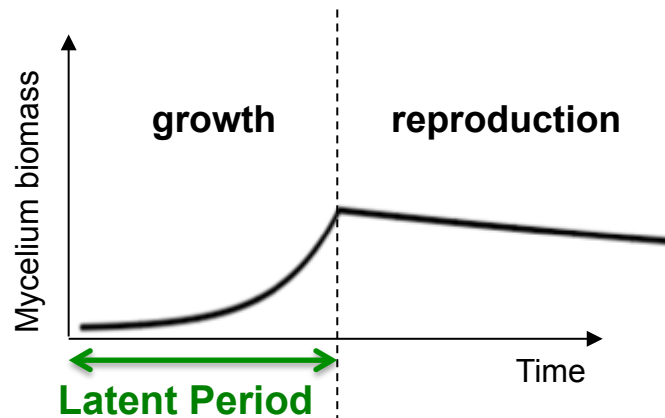
Contexte

Objectifs/Questions

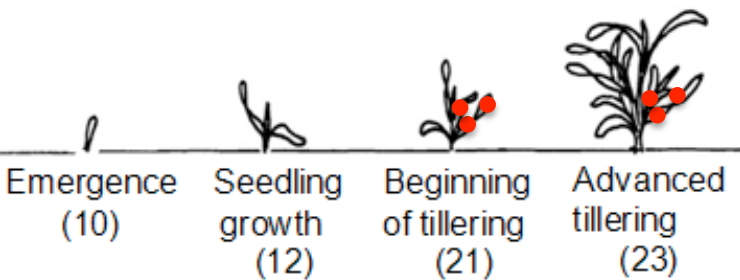
Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



switch



Time Scale (Zadoks' stages)

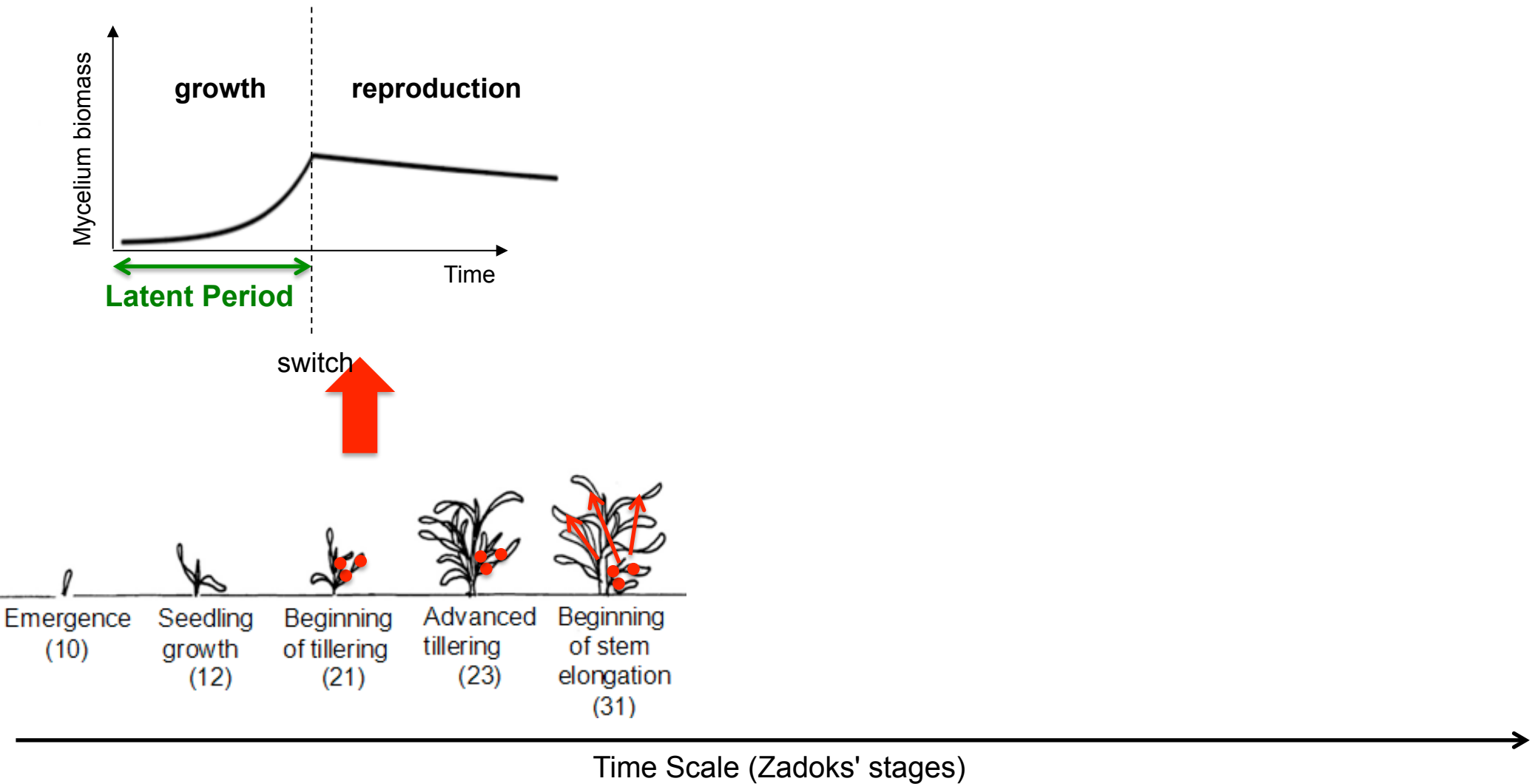
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



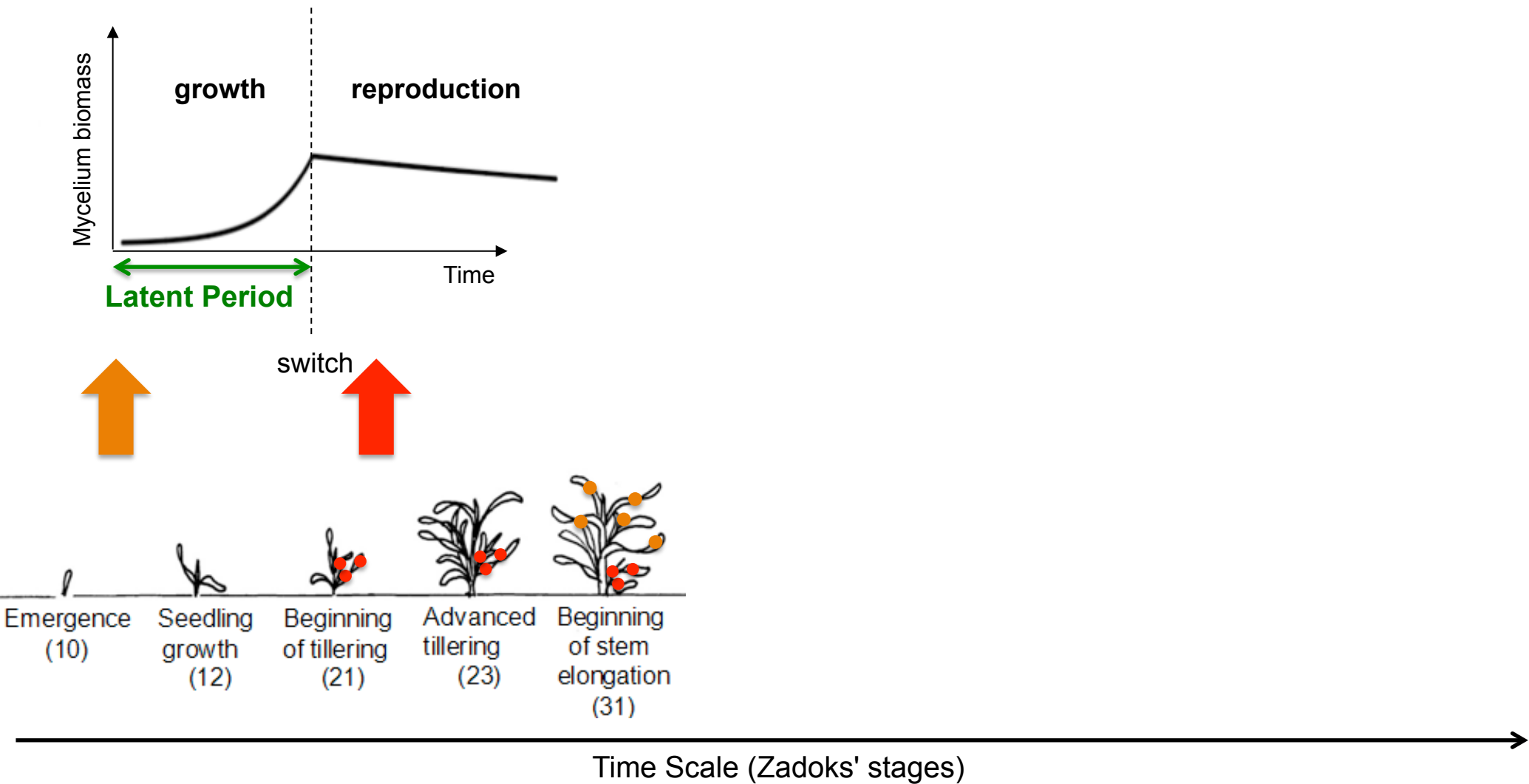
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



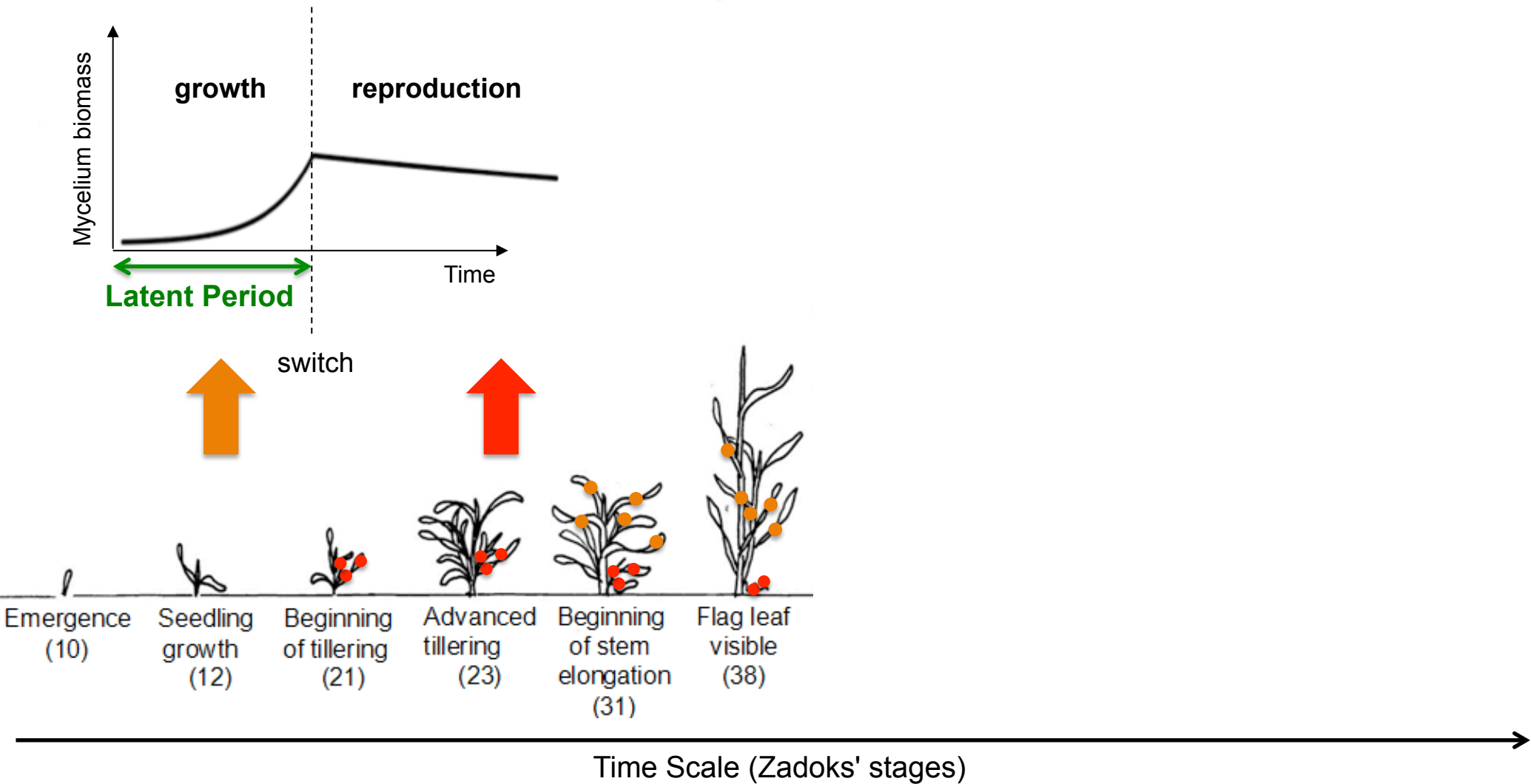
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



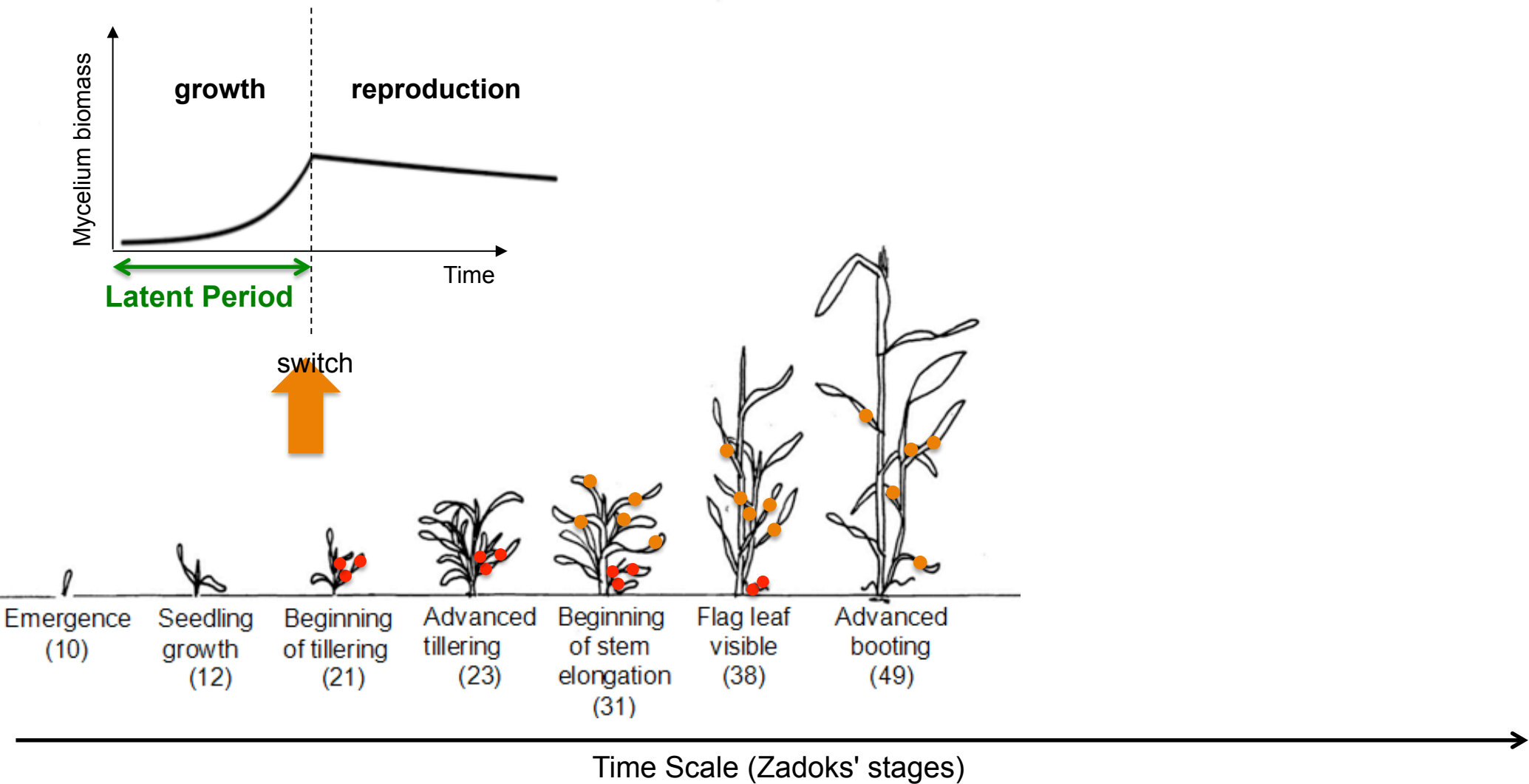
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



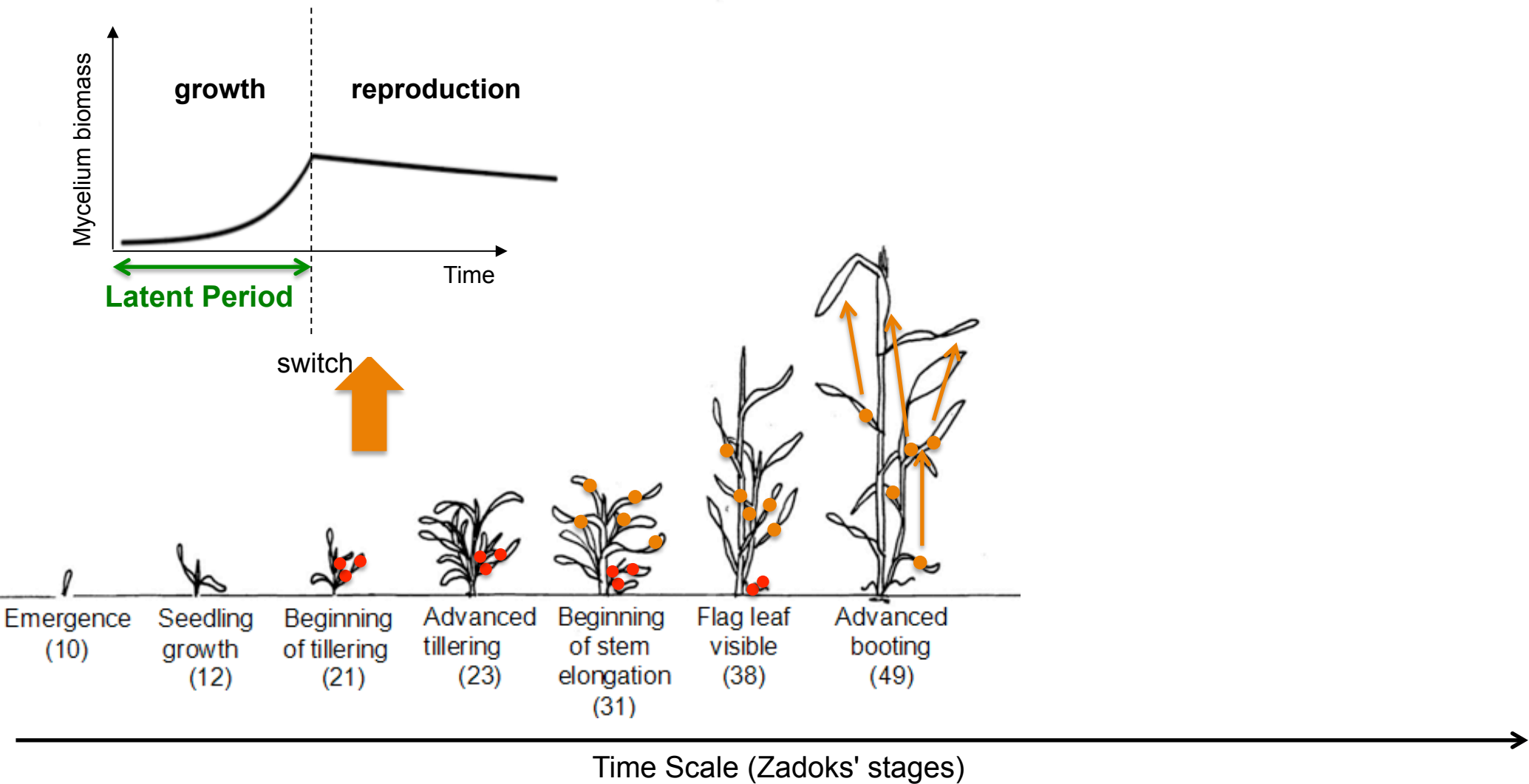
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



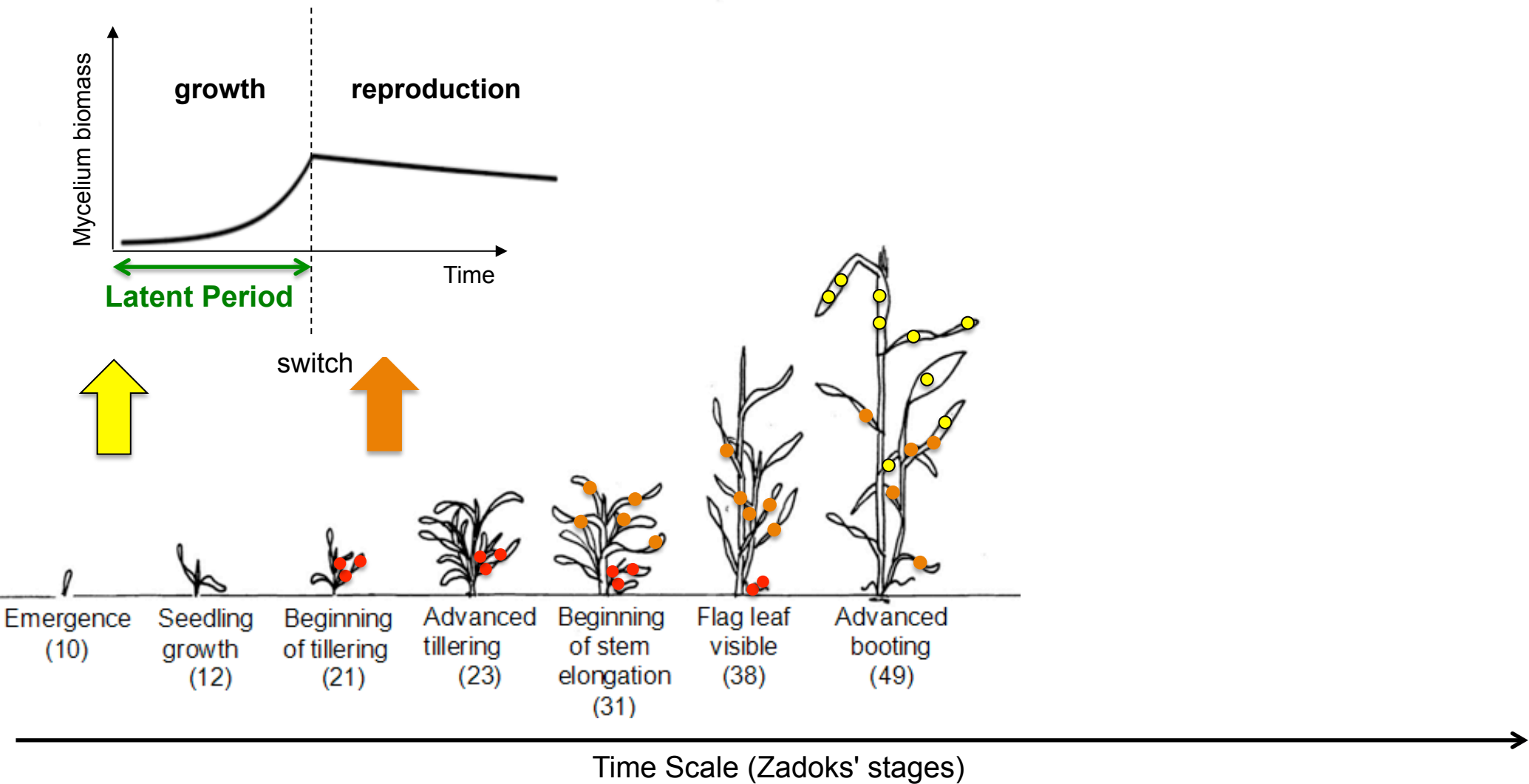
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



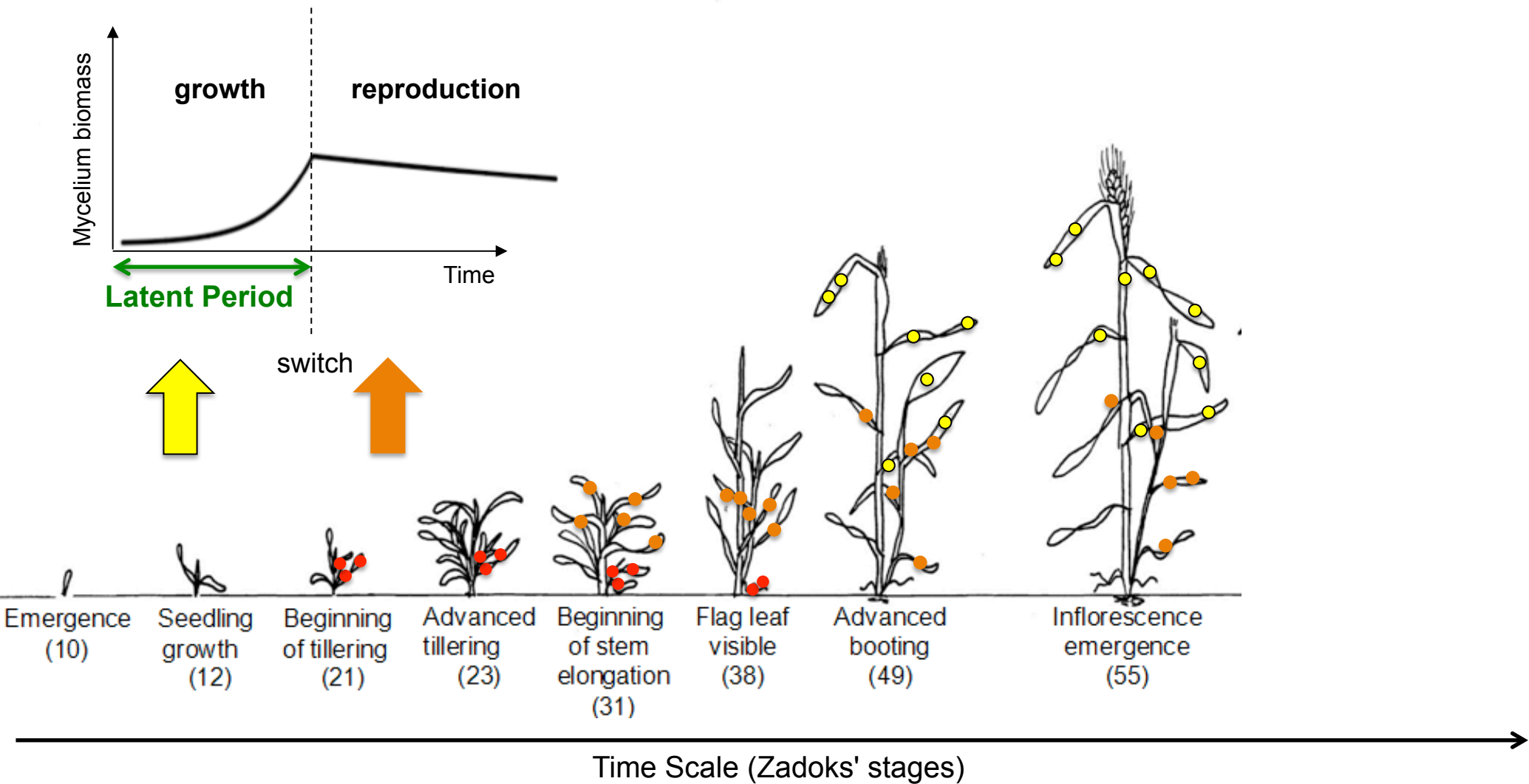
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



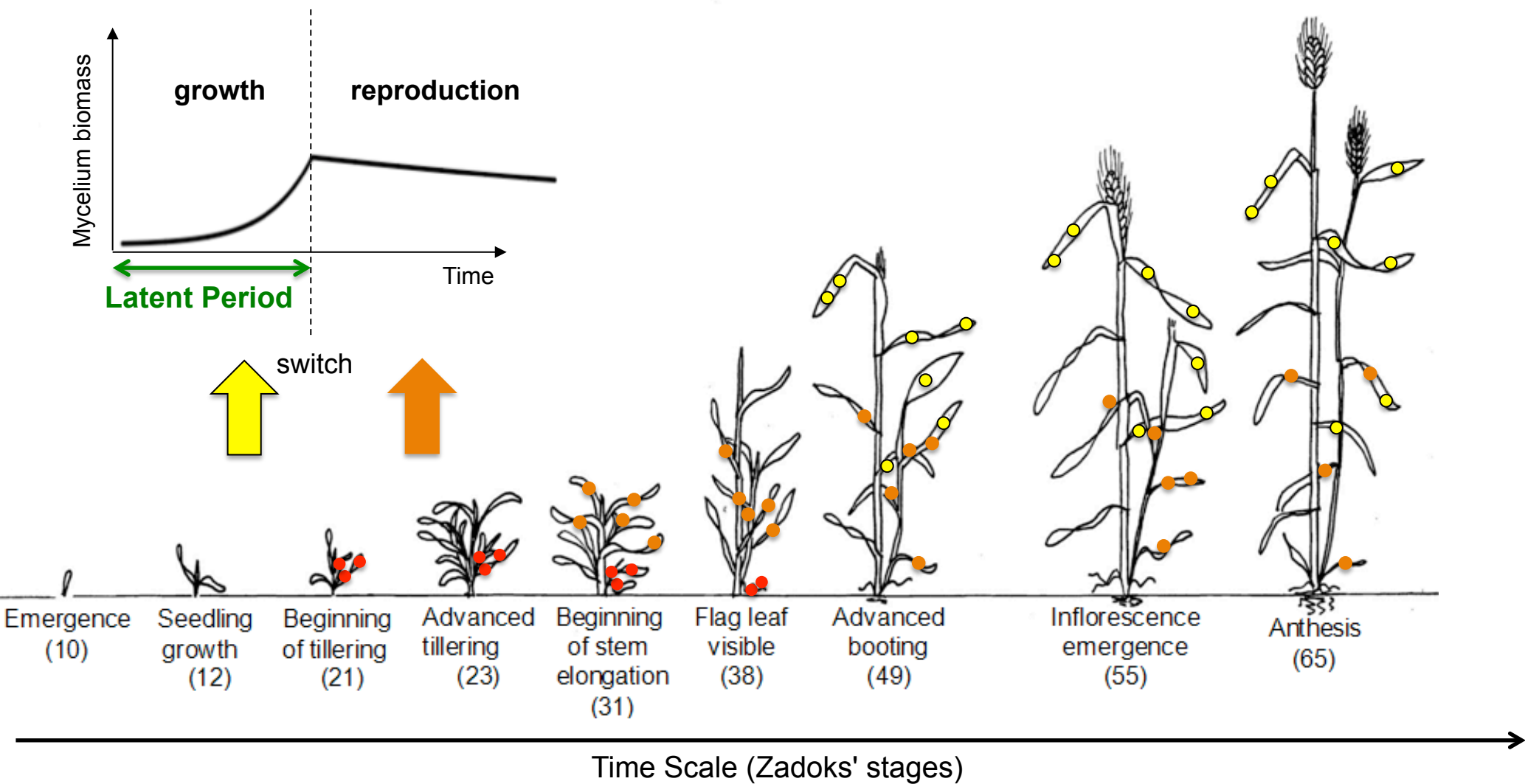
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



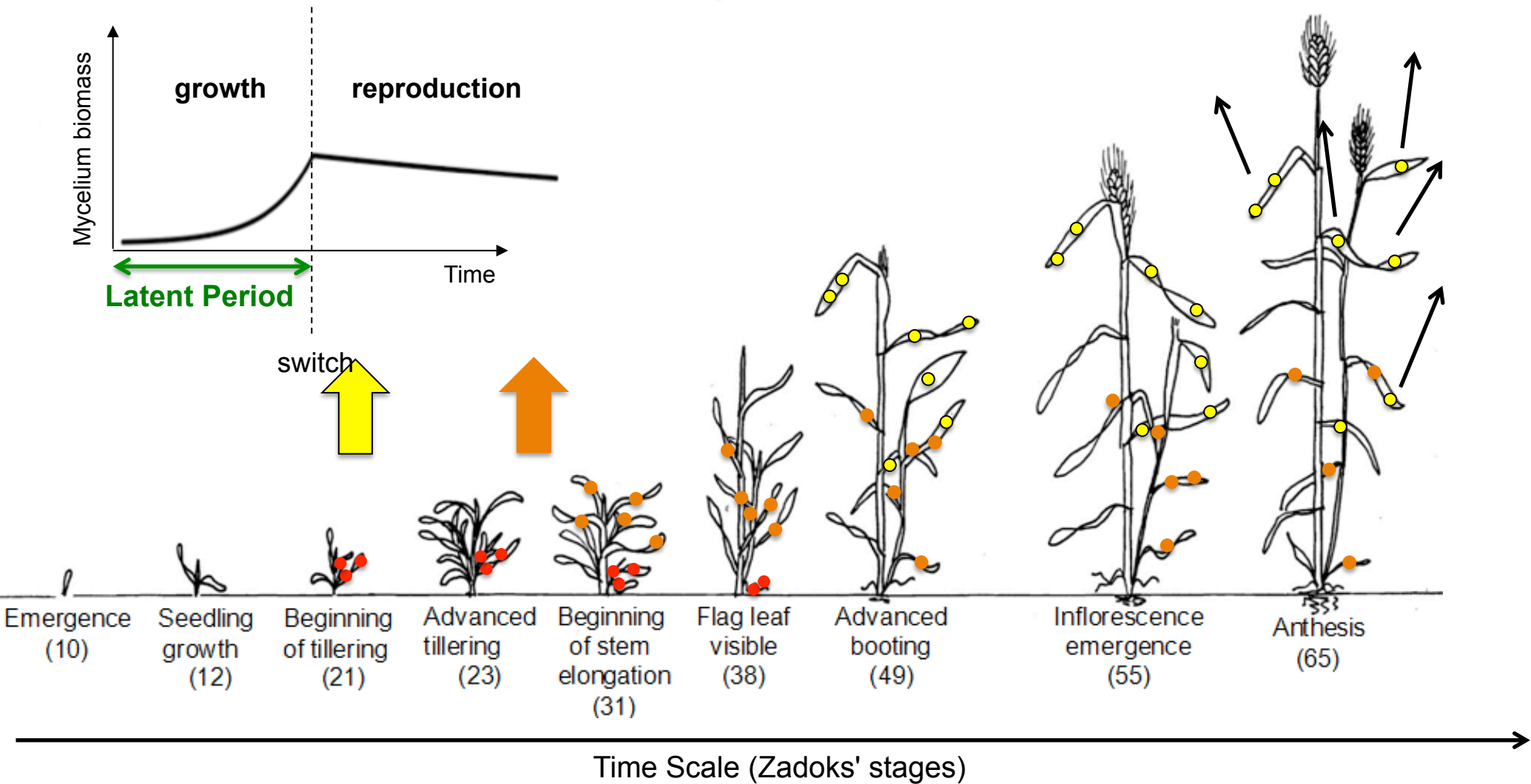
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



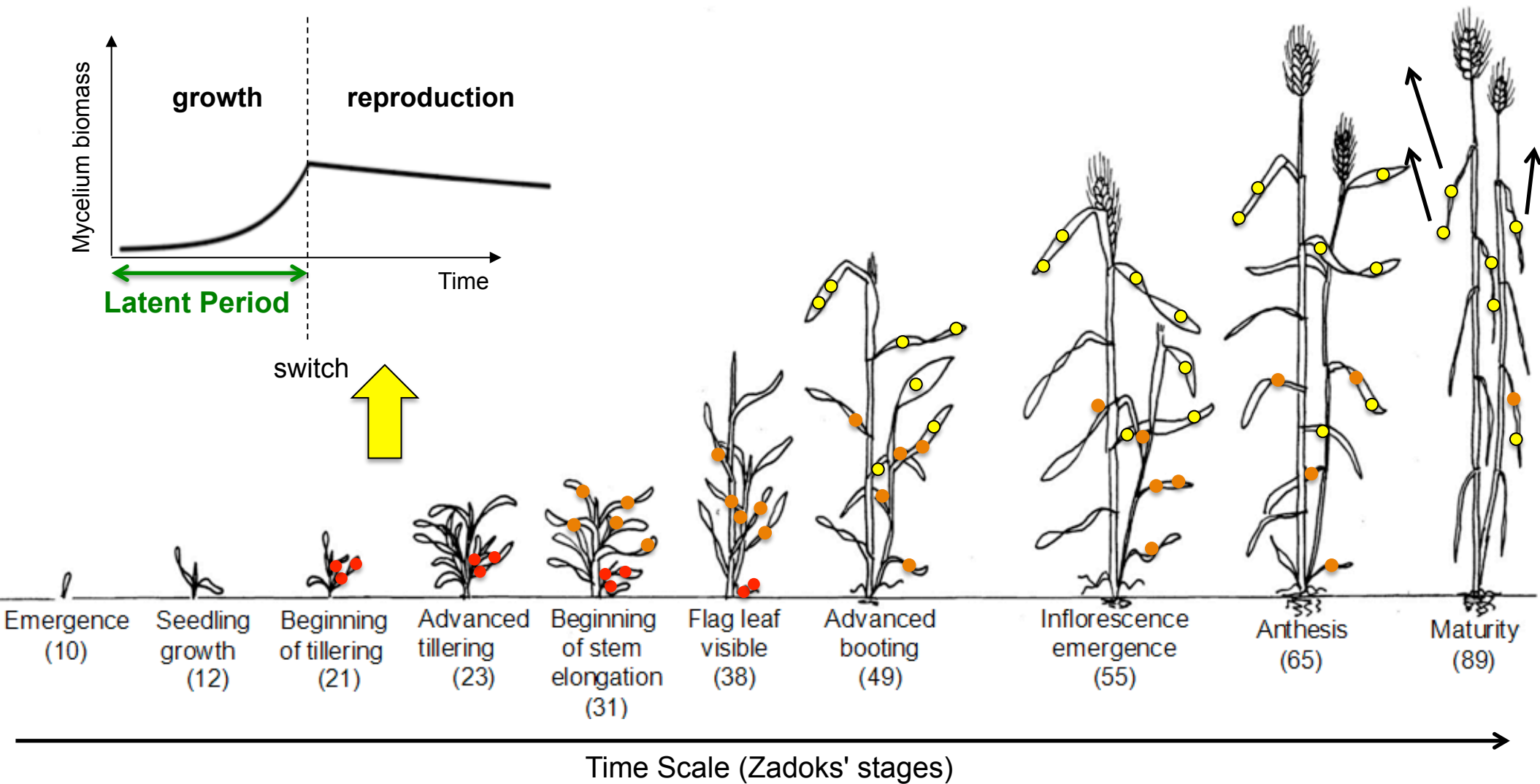
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Spécificités des pathogènes fongiques des cultures : épidémies polycycliques



Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

Résultats/Discussion

Trois grands types trophiques de champignons pathogènes



Ex : *Puccinia tritici*

BIOTROPHE

- infection non létale pour les c. végétales
- croissance intercellulaire puis intracellulaire
- présence d'haustoria (organe très spécialisé → interaction durable)
- dispersion large et anémophile de l'inoculum asexué



Ex : *Mycosphaerella graminicola*

HEMIBIOTROPHE

- phase biotrophe avant de tuer le tissu infecté
- croissance intercellulaire lente (phase biotrophe), intracellulaire et rapide ensuite (phase nécrotrophe)
- dispersion localisée par « splashing » de l'inoculum asexué

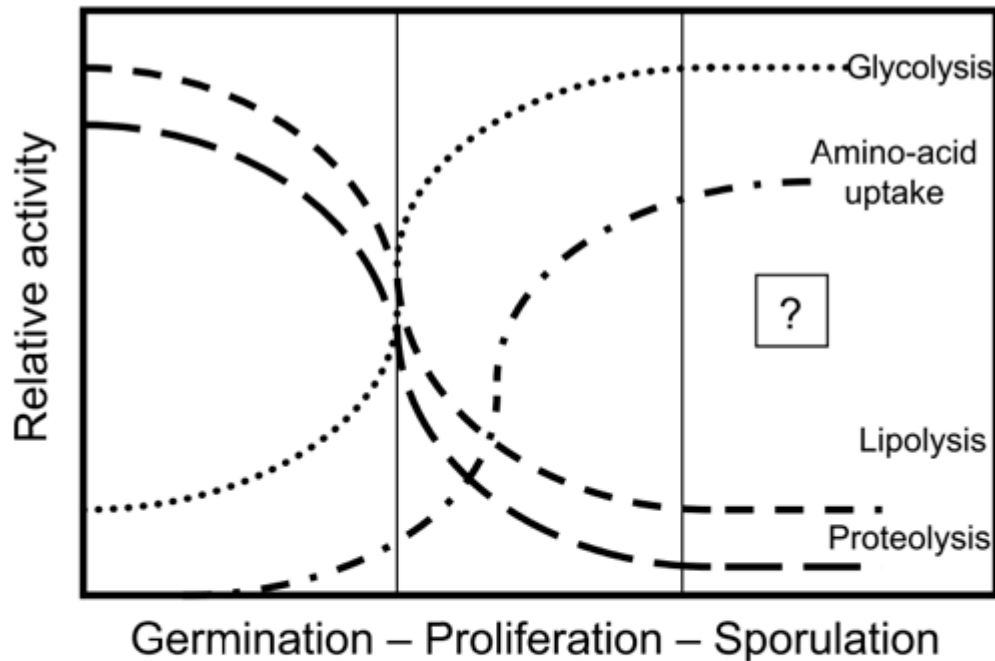


Ex : *Alternaria alternata*

NECROTROPHE

- infection immédiatement létale pour le tissu infecté
- croissance subcuticulaire puis intracellulaire
- croissance très rapide
- dispersion localisée par « splashing » de l'inoculum asexué

Les besoins du pathogène changent au cours du cycle infectieux

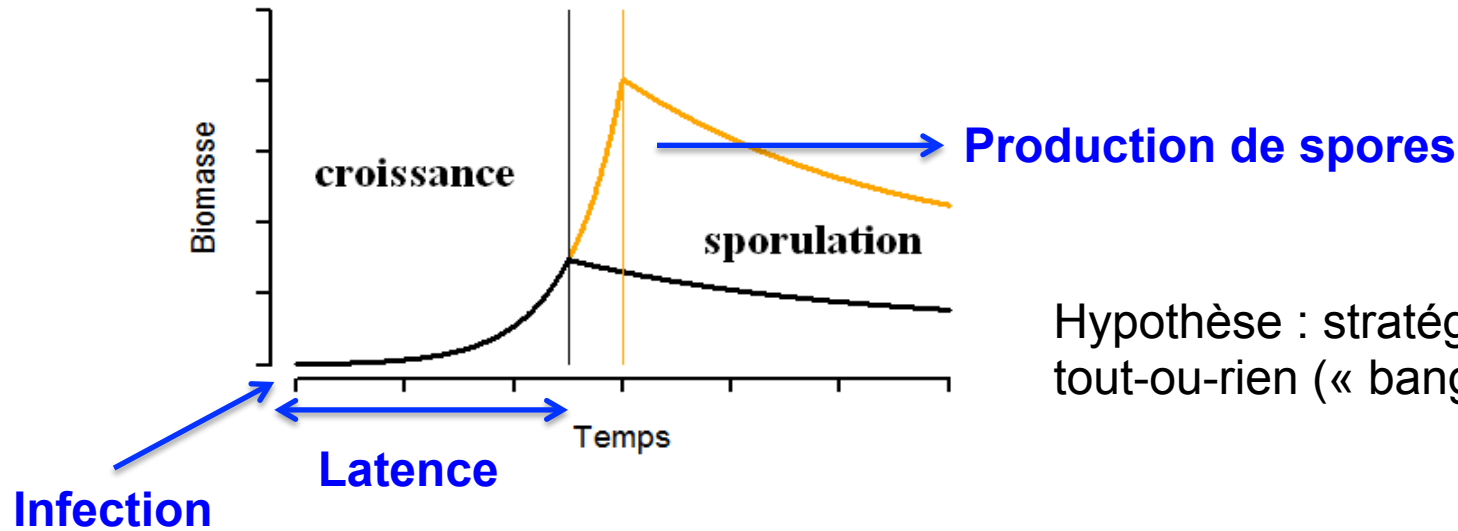


Le développement d'un champignon biotrophe tel que l'agent de la rouille du blé (*Puccinia triticina*) est facilité par l'abondance de nitrates mais ralenti par l'abondance d'ammonium.

Fig. 1 Schematic diagram of fungal nutrition during infection. The relative importance of various sources of nutrient and/or energy is depicted on the y-axis. The x-axis represents a composite fungal infection arbitrarily divided into three phases: germination of the spores and penetration of the host; proliferation within the host tissue including, in some cases, the elaboration of haustoria; and the generation of spores and/or resting structures. The x-axis can be taken to represent both time and distance in different pathosystems.

Solomon et al., 2003

Cycle de vie simplifié des pathogènes fongiques des cultures



Hypothèse : stratégie d'exploitation de type tout-ou-rien (« bang-bang strategy »)

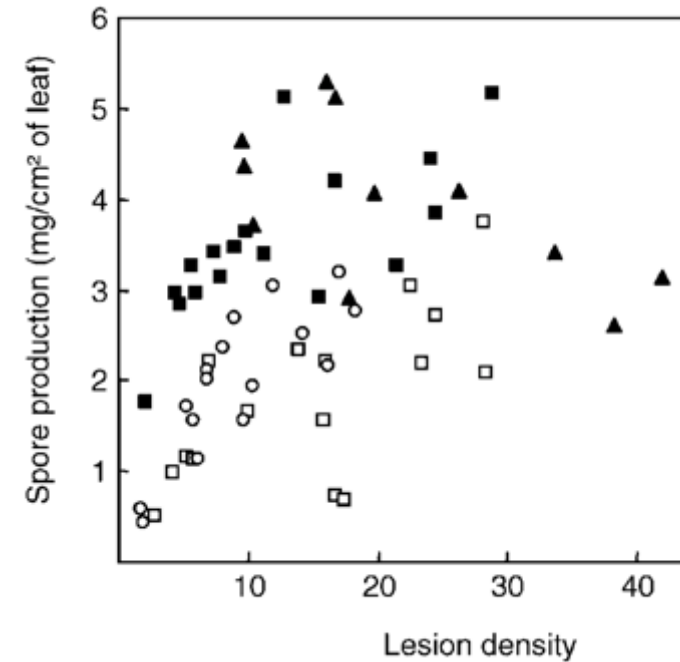
Effet de la fertilisation sur les pathogènes ?



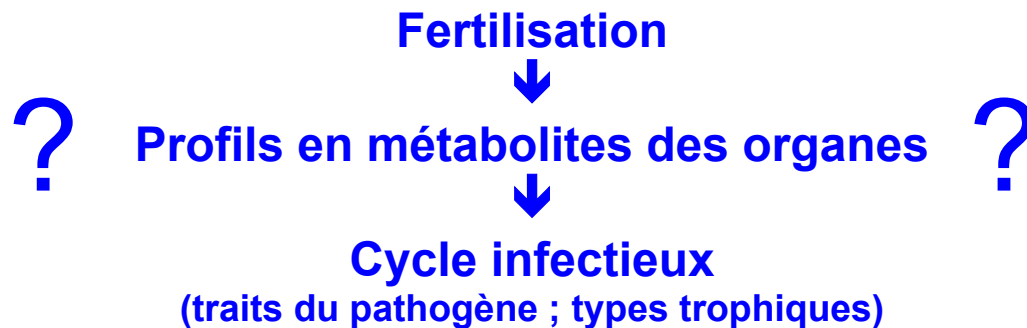
Liens entre fertilisation et cycle infectieux : connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlations entre profils de métabolites primaires et cycle infectieux
(Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2008 ; Lecompte et al., 2012)



Robert et al., 2004



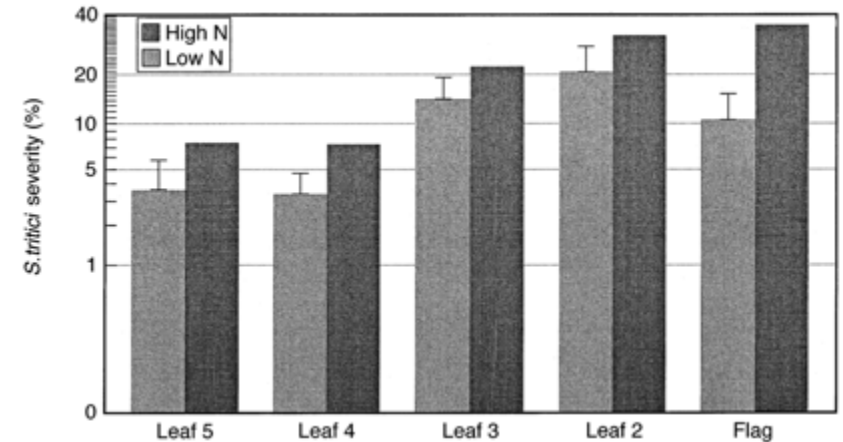
Liens entre fertilisation et cycle infectieux: connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlations entre profils de métabolites primaires et cycle infectieux (Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2008 ; Lecompte et al., 2012)

Echelle du couvert : effets d'architecture

- Total des ressources et leur dynamique spatio-temporelle



Lovell et al., 1997

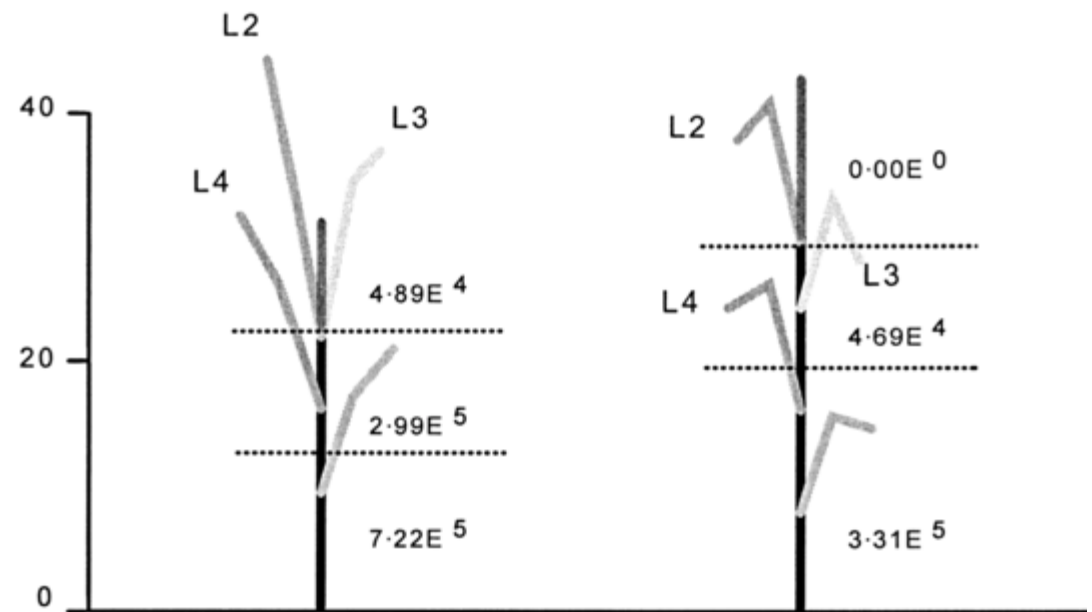
Liens entre fertilisation et cycle infectieux: connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlations entre profils de métabolites primaires et cycle infectieux
(Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2008 ; Lecompte et al., 2012)

Echelle du couvert : effets d'architecture

- Total des ressources et leur dynamique spatio-temporelle
- Effets de dispersion



Lovell et al., 1997

Liens entre fertilisation et cycle infectieux: connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlations entre profils de métabolites primaires et cycle infectieux
(Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2008 ; Lecompte et al., 2012)

Echelle du couvert : effets d'architecture

- Total des ressources et leur dynamique spatio-temporelle
- Effets de dispersion
- Microclimats
(Lovell et al., 1997 ; Robert et al., 2008 ; Baccar et al., 2011)

Liens entre fertilisation et cycle infectieux: connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlations entre profils de métabolites primaires et cycle infectieux
(Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2008 ; Lecompte et al., 2012)

Echelle du couvert : effets d'architecture

- Total des ressources et leur dynamique spatio-temporelle
- Effets de dispersion
- Microclimats
(Lovell et al., 1997 ; Robert et al., 2008 ; Baccar et al., 2011)

Effets dynamiques

date de fertilisation, climat, ...

→ **Difficile de dé-corréler tous ces effets**

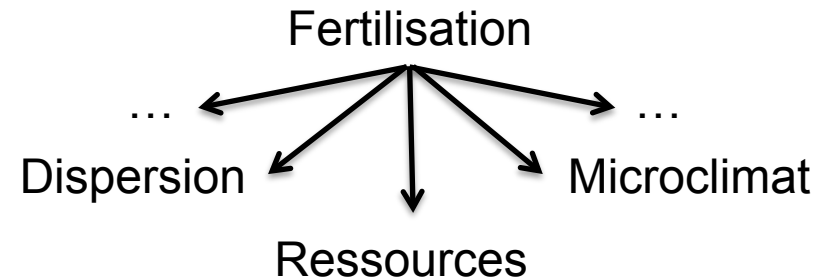
La fertilisation aggrave les épidémies

Shaner & Finney, 1977
Leitch & Jenkins, 1995
Simon et al., 2003
Walter & Bingham, 2007

...

Pas de relation entre fertilisation et épidémies

Buschbell & Hoffman, 1992
Olesen et al., 2000
Hoffland et al., 2000



Liens entre fertilisation et cycle infectieux: connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlations entre profils de métabolites primaires et cycle infectieux
(Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2008 ; Lecompte et al., 2012)

Echelle du couvert : effets d'architecture

- Total des ressources et leur dynamique spatio-temporelle
- Effets de dispersion
- Microclimats
(Lovell et al., 1997 ; Robert et al., 2008 ; Baccar et al., 2011)

Effets dynamiques

date de fertilisation, climat, ...

→ **Difficile de dé-corréler tous ces effets**

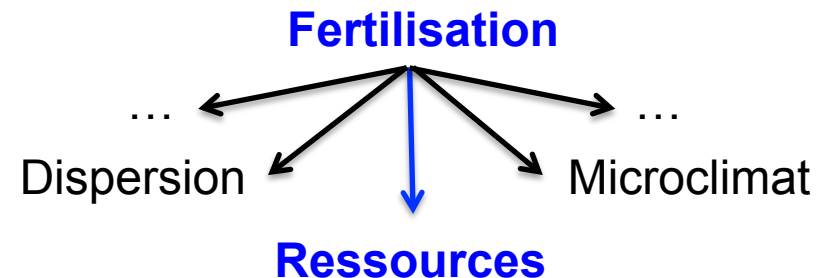
La fertilisation aggrave les épidémies

Shaner & Finney, 1977
Leitch & Jenkins, 1995
Simon et al., 2003
Walter & Bingham, 2007

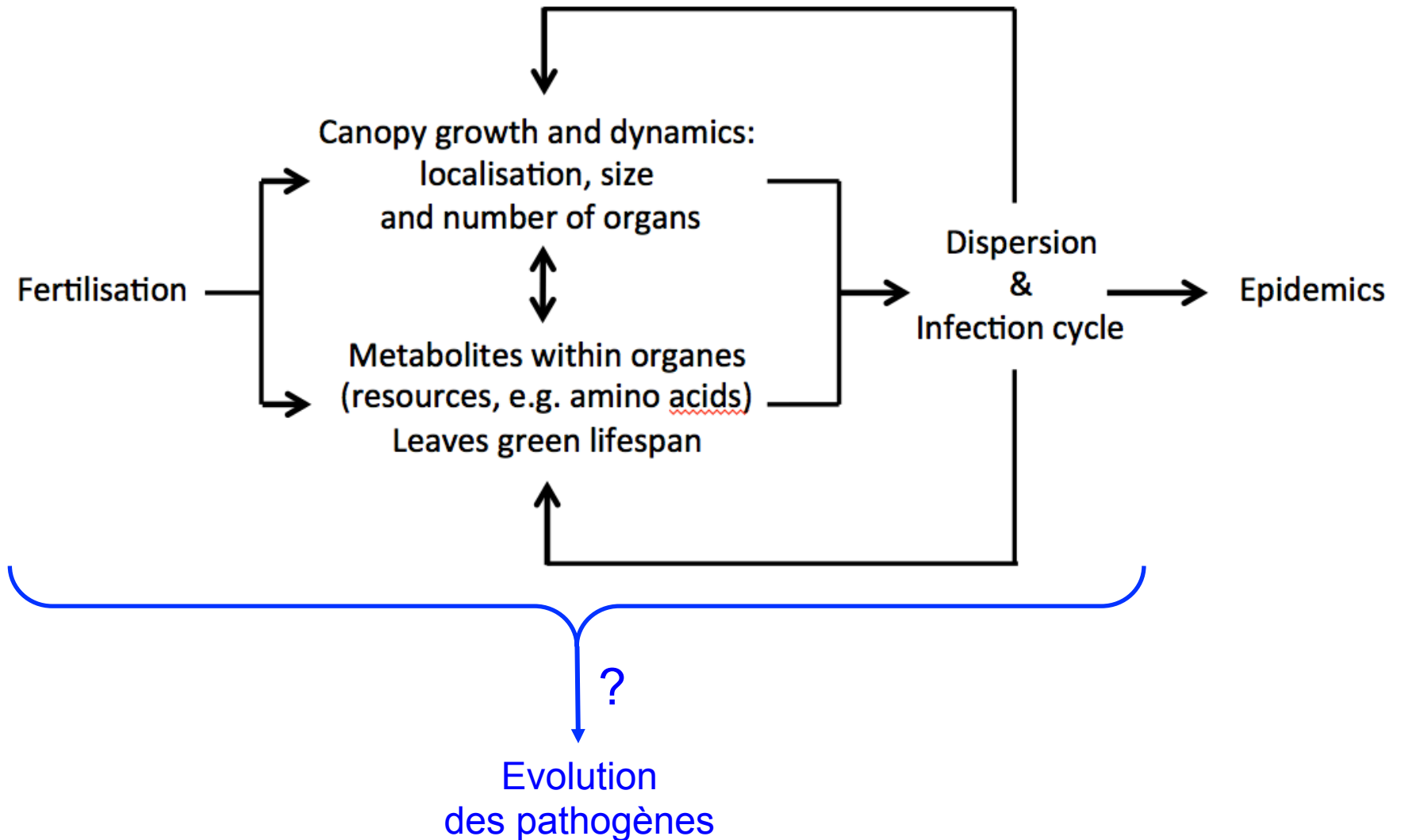
...

Pas de relation entre fertilisation et épidémies

Buschbell & Hoffman, 1992
Olesen et al., 2000
Hoffland et al., 2000



Liens entre fertilisation et épidémies : bilan



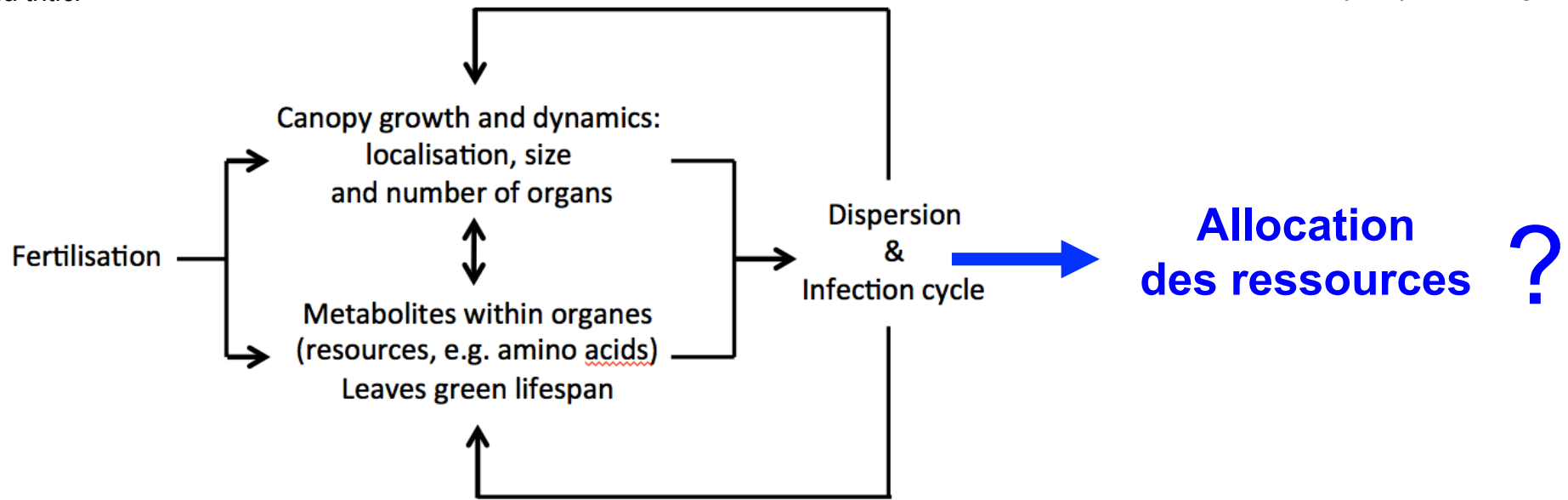
Cadre théorique : « life history theory »



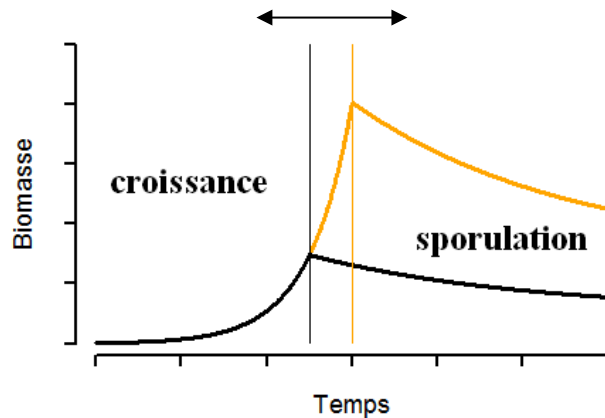
Puccinia tritici



Mycosphaerella graminicola



Adaptation au niveau de ressources → Variabilité de la latence



- Théorie des traits d'histoire de vie
- **évolution de la maturation** (Stearns 1992, Roff 2002)
- **compromis croissance-sporulation**

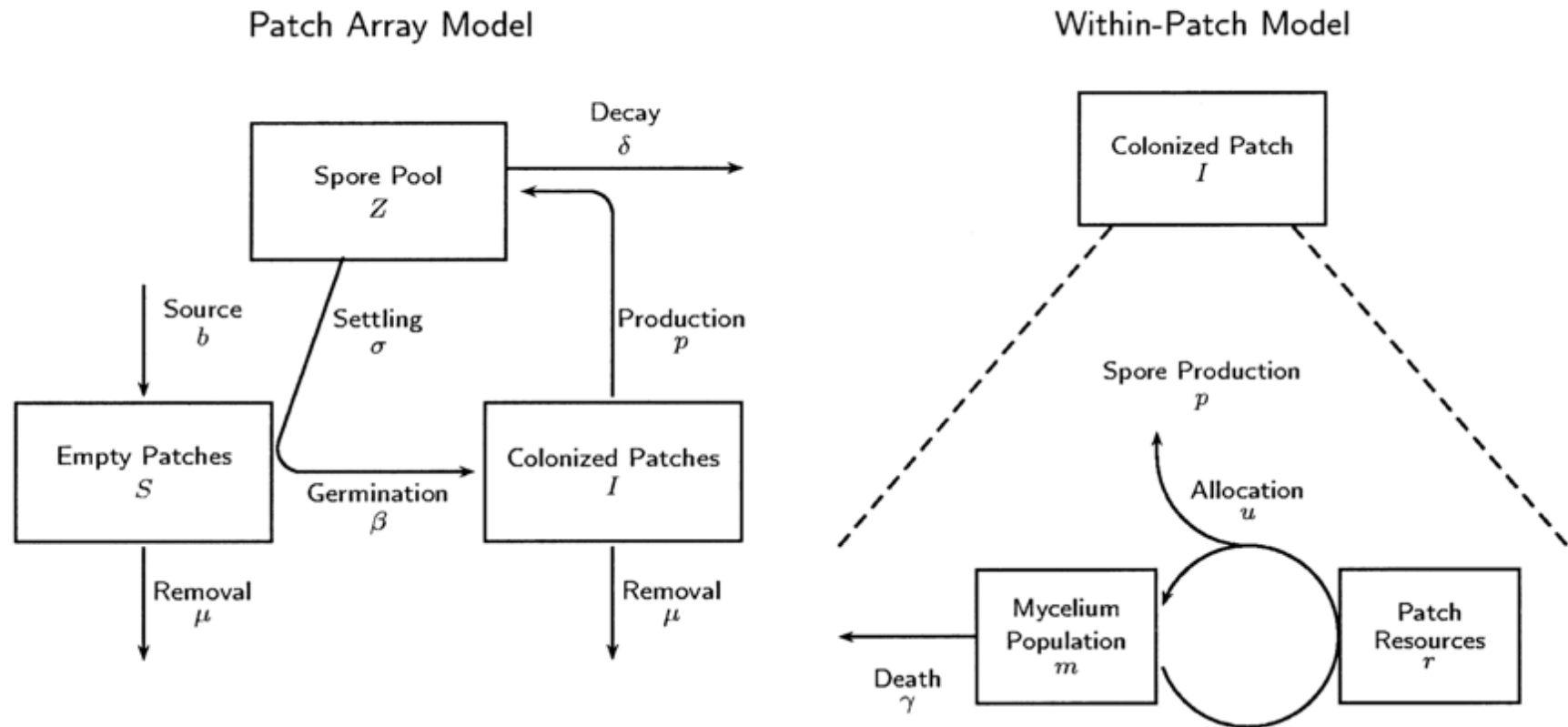
Quelle latence optimale ?

Une étude sur l'adaptation des champignons filamenteux au niveau de ressources

Evolution, 60(5), 2006, pp. 970–979

IDENTIFYING FITNESS AND OPTIMAL LIFE-HISTORY STRATEGIES FOR AN ASEQUAL FILAMENTOUS FUNGUS

MICHAEL A. GILCHRIST,¹ DEBORAH L. SULSKY,² AND ANNE PRINGLE³



Une étude sur l'adaptation des champignons filamenteux au niveau de ressources

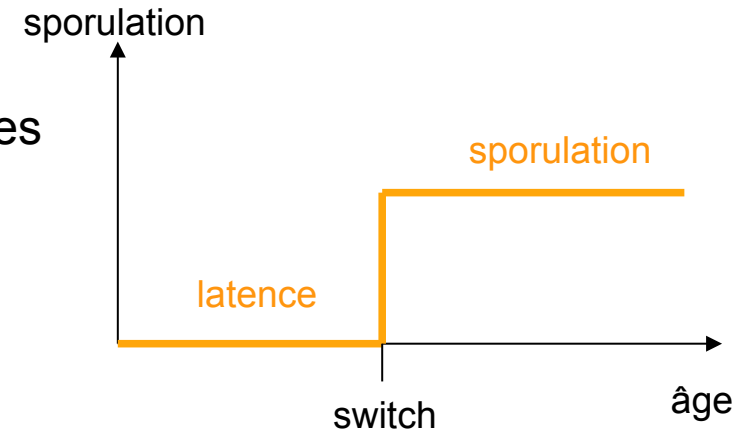
Evolution, 60(5), 2006, pp. 970–979

IDENTIFYING FITNESS AND OPTIMAL LIFE-HISTORY STRATEGIES FOR AN ASEXUAL FILAMENTOUS FUNGUS

MICHAEL A. GILCHRIST,¹ DEBORAH L. SULSKY,² AND ANNE PRINGLE³

Résultats principaux, utilisant la dynamique adaptative :

- « fitness » proportionnelle au nombre de spores produites
- stratégie optimale de type « bang-bang »
- l'évolution maximise le nombre de spores produites



Les conclusions de Gilchrist et al., 2006 s'appliquent-elles aux pathogènes des cultures ?



Chlorociboria halonata : <http://www.kaimaibush.co.nz/Fungi/Chlorociboria.html>

Questions principales de la thèse

Quel est l'effet du niveau de ressource et de sa dynamique :

- **sur les épidémies polycyclique fongiques ?**
 - **sur l'adaptation des pathogènes ?**
- Comment hiérarchiser les effets de la fertilisation liés à la quantité de ressources dans les feuilles et ceux liés à la quantité d'organes dans le couvert
- Les effets de la ressource dépendent-ils du type trophique ? Si oui comment ?
- Comment les traits d'histoire de vie des pathogènes changeront-ils par adaptation à des scénarios de ressources variés ?

Question plus appliquée

Quelle fertilisation optimale pour diminuer les épidémies ?

A quels complexes parasitaires avec quelles caractéristiques de traits peut-on s'attendre pour des scénarios de fertilisation décroissante ?

Approches envisagées

Modélisation :

Utiliser des concepts d'écologie pour adresser les questions précédentes :

- théorie des traits d'histoire de vie appliquée aux pathosystèmes
- adapter des outils de dynamique adaptative à l'étude de leur évolution
- utiliser des modèles de populations structurées (« Physiologically-Structured Population Models » Metz and Dieckmann 1986, De Roos and Persson 2013) adaptés à l'étude des épidémies des grandes cultures
- envisager davantage les épidémies comme des systèmes consommateurs-ressources.

Systemes considérés :

Utiliser des données disponibles dans la littérature (**méta-analyse**) pour explorer la variabilité des traits d'histoire de vie des champignons pathogènes des céréales.

Construction du modèle : faire le point

1. Contours de la question
2. Choix de modélisation
3. Traduction en équations
4. Simulations

Construction du modèle : faire le point

1. Contours de la question

Système d'intérêt : blé/rouille du blé

Système hôte/pathogène vu sous l'angle **consommateur/ressource**

La **ressource est structurée** du fait des propriétés développementales du blé et du **caractère polycyclique** des épidémies causées par un pathogène biotrophe.

2. Choix de modélisation

3. Traduction en équations

4. Simulations

Construction du modèle : faire le point

1. Contours de la question

2. Choix de modélisation

- Que garde-t-on de la bibliographie ? De quel degré de généralité a-t-on besoin ?
 - ✦ Trois principaux effets de la fertilisation sur le pathosystème (nombre et taille des organes, durée de vie des organes, taille et densité du couvert)
 - ✦ Cadre de culture
 - ✦ Céréale à développement semi-déterminé avec remobilisation des réserves
 - ✦ Cycle infectieux et épidémies polycycliques
- Quelles sont nos hypothèses fondamentales ?
 - ✦ Une ressource unique
 - ✦ Stratégie “bang-bang” et maturité à date fixe
 - ✦ Reproduction asexuée
 - ✦ Plus de fertilisation -> plus de ressources pour le pathogène
 - ✦ Pas d’effet du climat
 - ✦ Peu d’effets de virulence (on néglige les défenses)
 - ✦ La production totale de spores à l’échelle épidémique est une bonne mesure de valeur sélective

3. Traduction en équations

4. Simulations

Construction du modèle : cahier des charges

Echelle locale : 1 cm² de feuilles = un patch

- ressources intra-feuille
- cycles infectieux pour nos deux types de pathogènes
- dynamique intra-patch de l'infection
 - structuration en âge d'infection
- sénescence naturelle (contrainte temporelle)

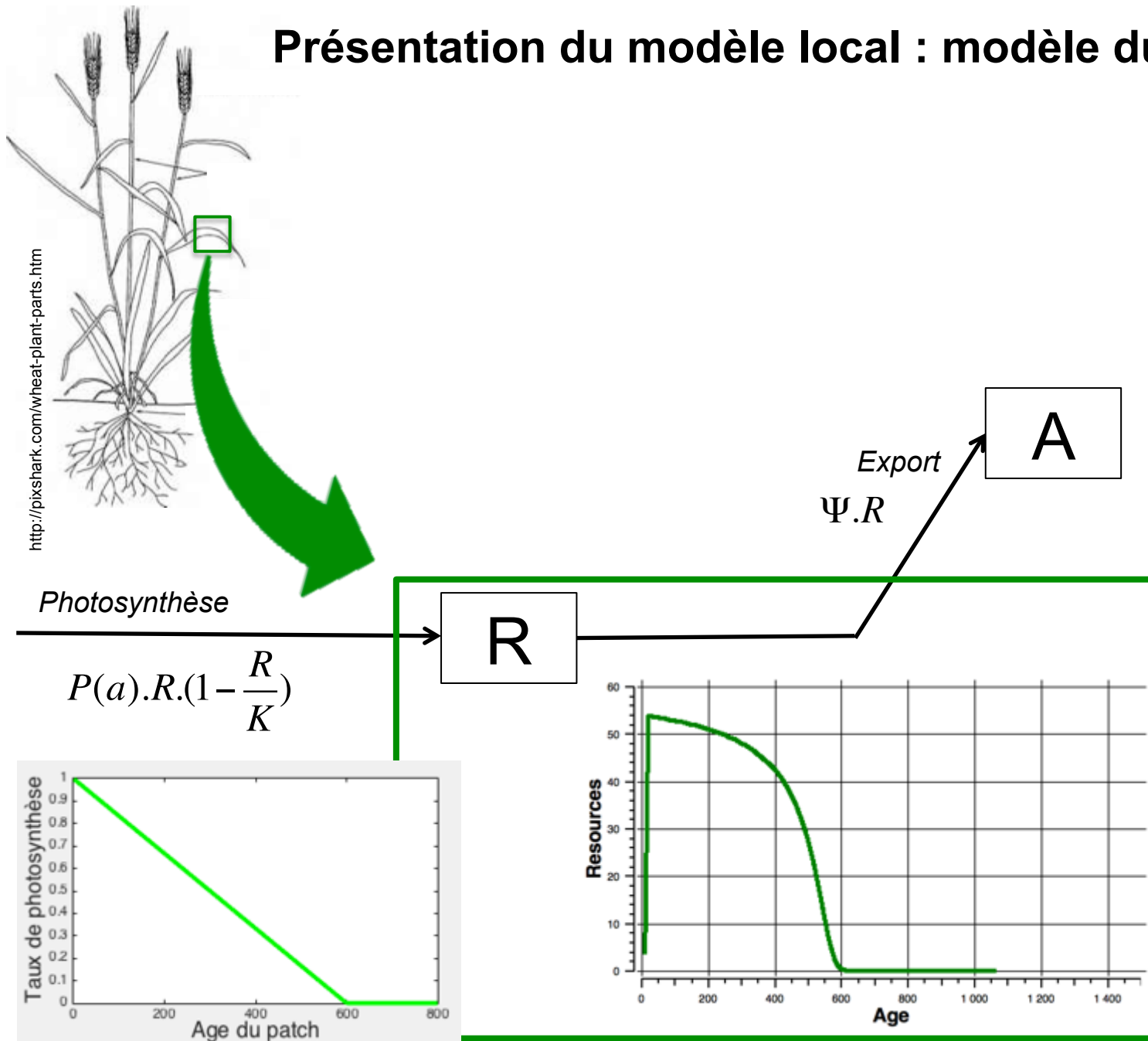
Echelle de l'agrosystème : multi-patches

- croissance et structure du couvert végétal
 - structuration en âge de la plante
- dispersion inter-patch
- épidémies polycycliques
- dynamique inter-annuelle des épidémies

Construction du modèle : faire le point

1. Contours de la question
2. Choix de modélisation
3. Traduction en équations
4. Simulations

Présentation du modèle local : modèle du patch



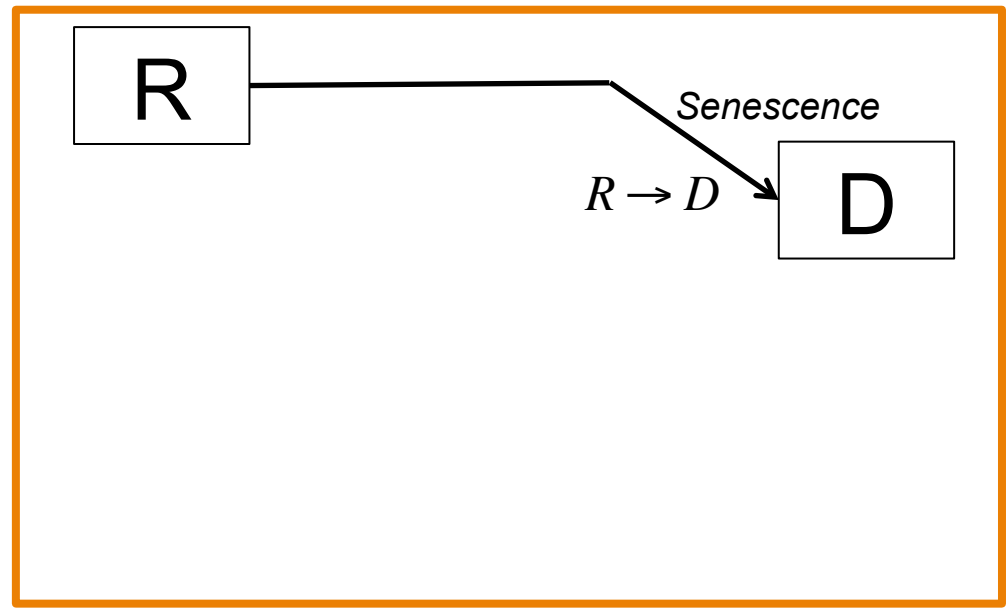
Présentation du modèle local : modèle du patch



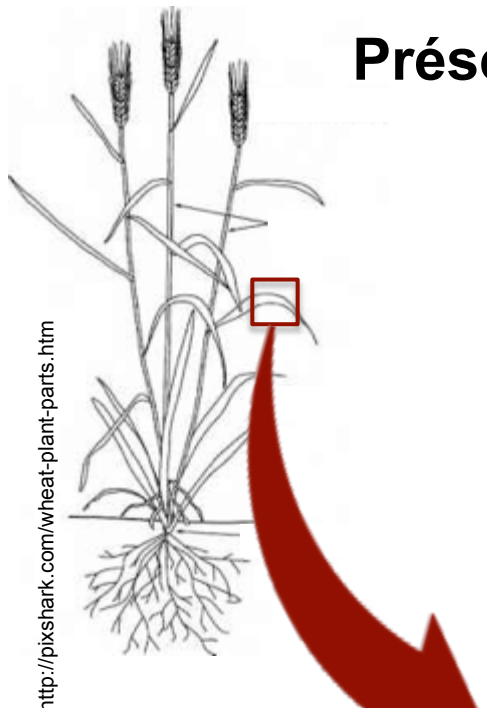
<http://pixshark.com/wheat-plant-parts.htm>

~~Photosynthèse~~

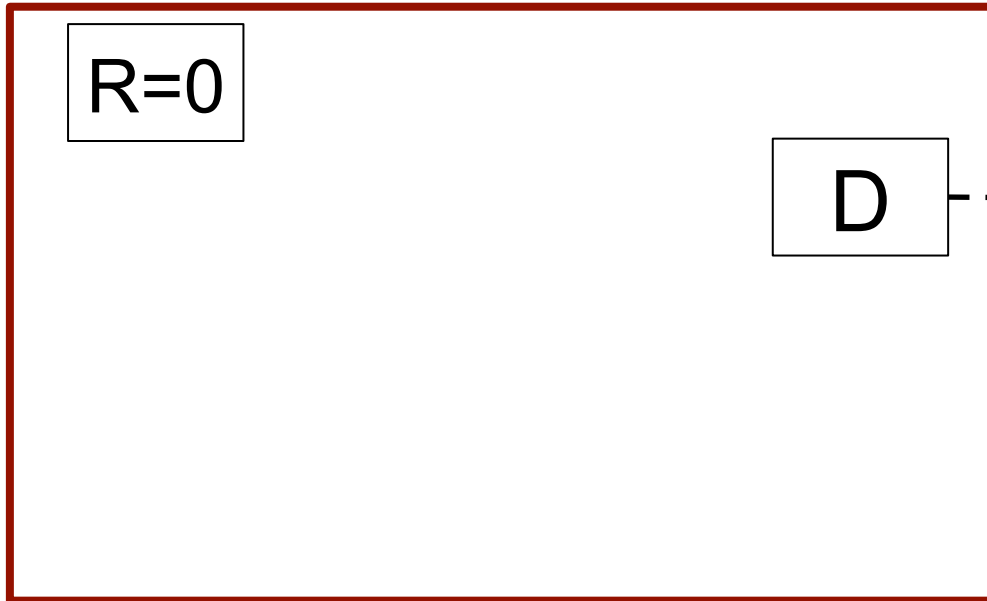
~~Export~~ A



Présentation du modèle local : modèle du patch



<http://pixshark.com/wheat-plant-parts.htm>



A

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial A}{\partial a} da$$

Bilan

D

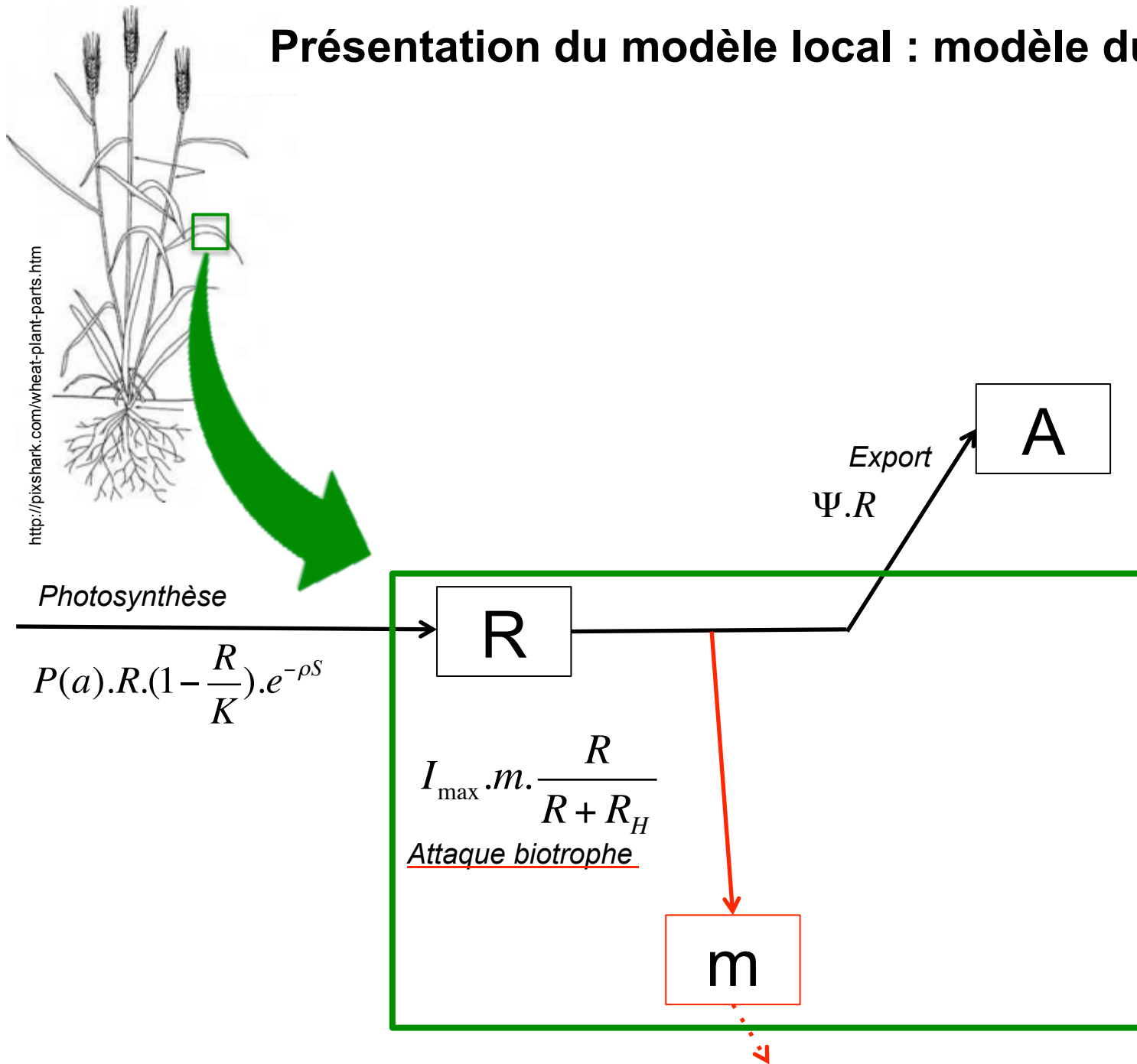
D

Bilan

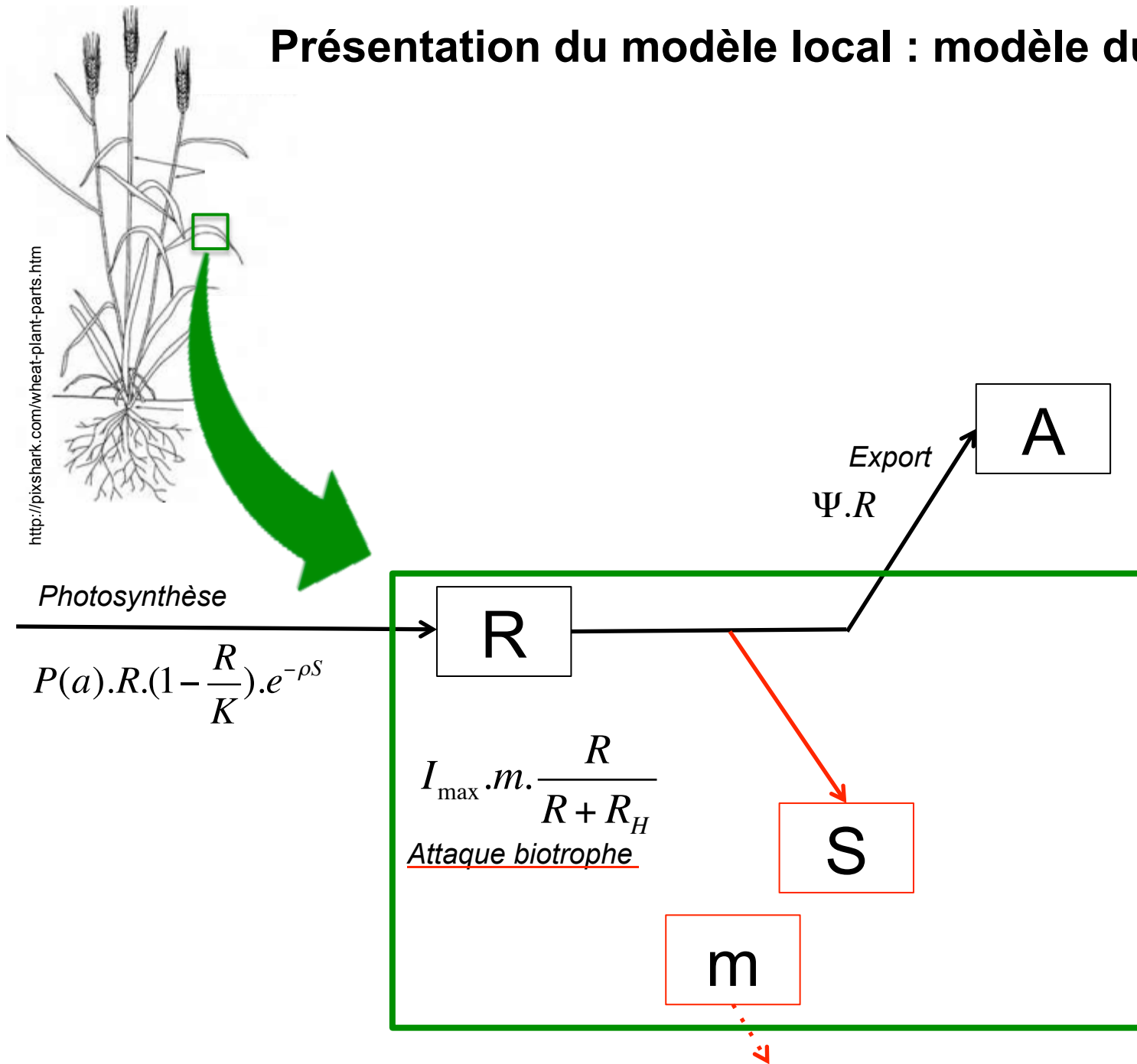
Photosynthèse

$$\int_0^{\infty} P(a) \cdot R \cdot \left(1 - \frac{R}{K}\right) \cdot da$$

Présentation du modèle local : modèle du patch



Présentation du modèle local : modèle du patch

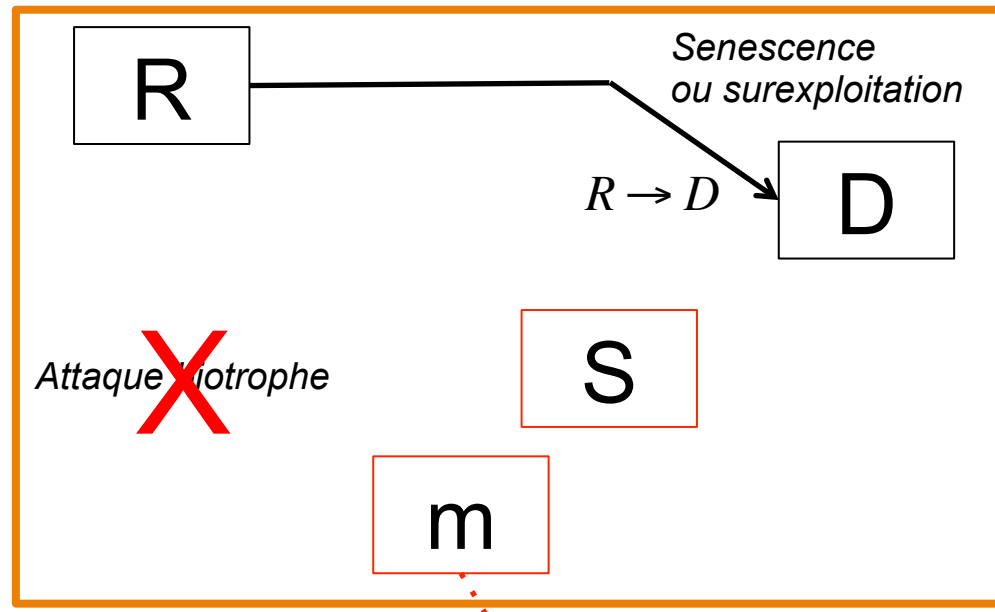


Présentation du modèle local : modèle du patch

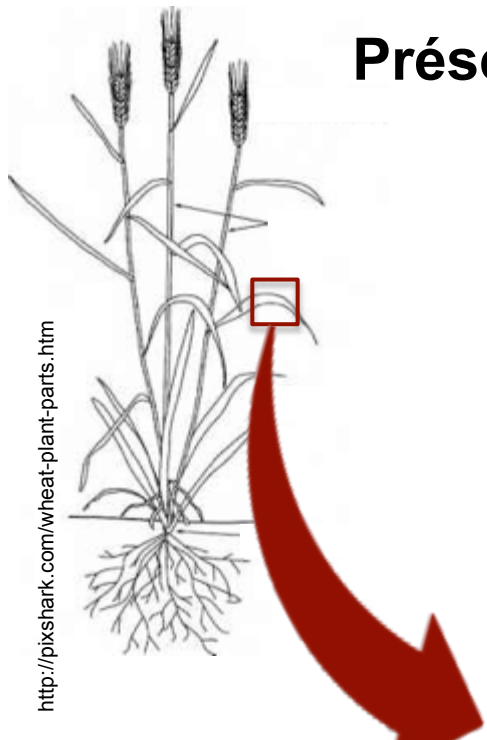


~~Photosynthèse~~

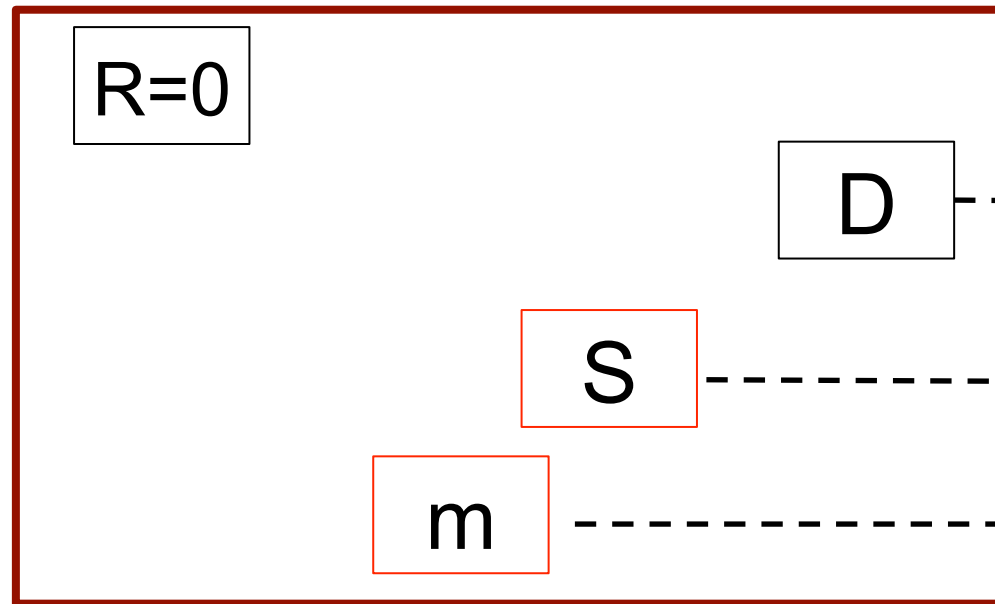
~~Export~~ A



Présentation du modèle local : modèle du patch



<http://pixshark.com/wheat-plant-parts.htm>



A

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial A}{\partial a} da$$

Bilan

R=0

D

D

S

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial S}{\partial a} da$$

m

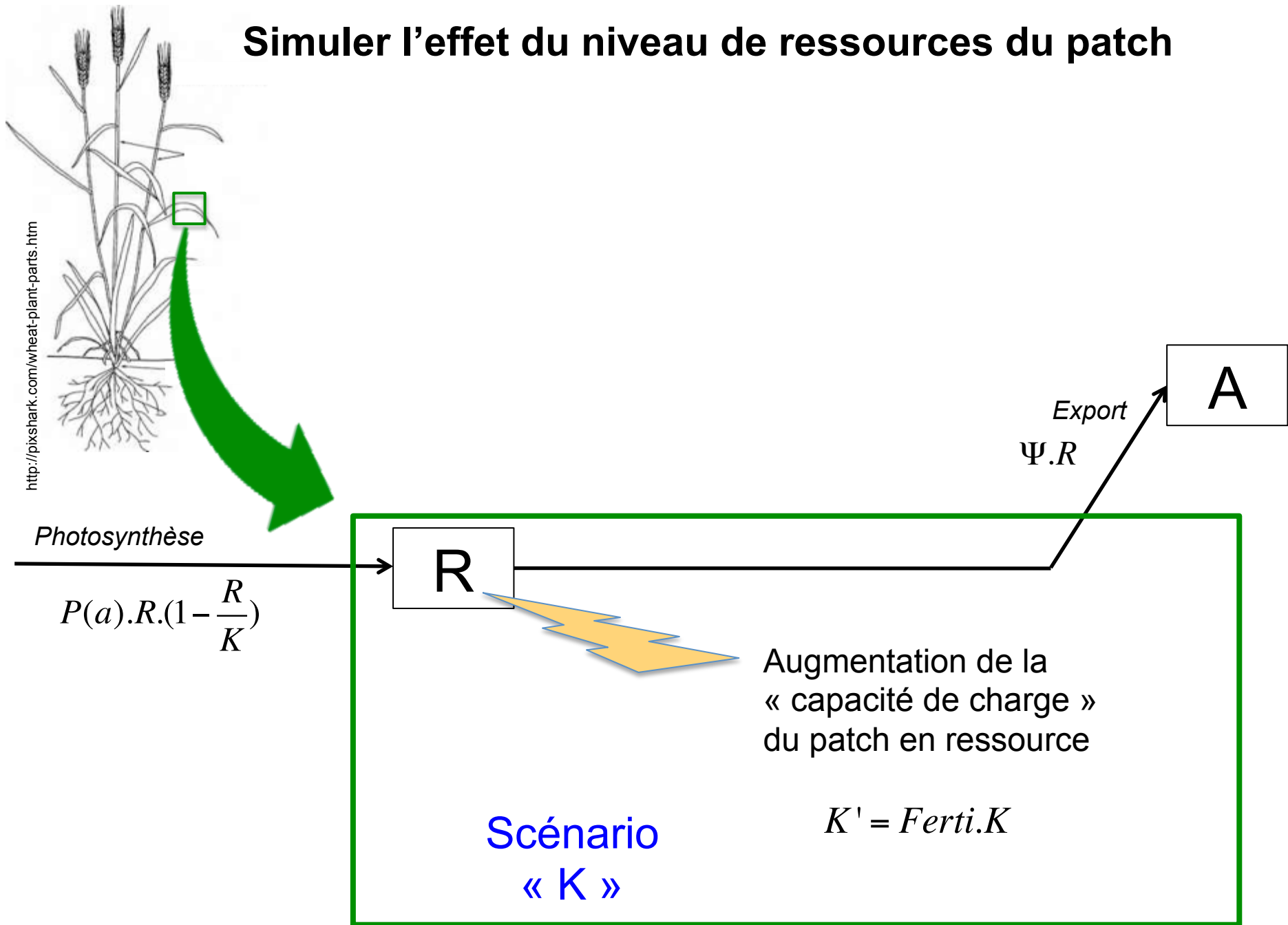
$$\int_0^{\infty} \frac{\partial m}{\partial a} da$$

Bilan

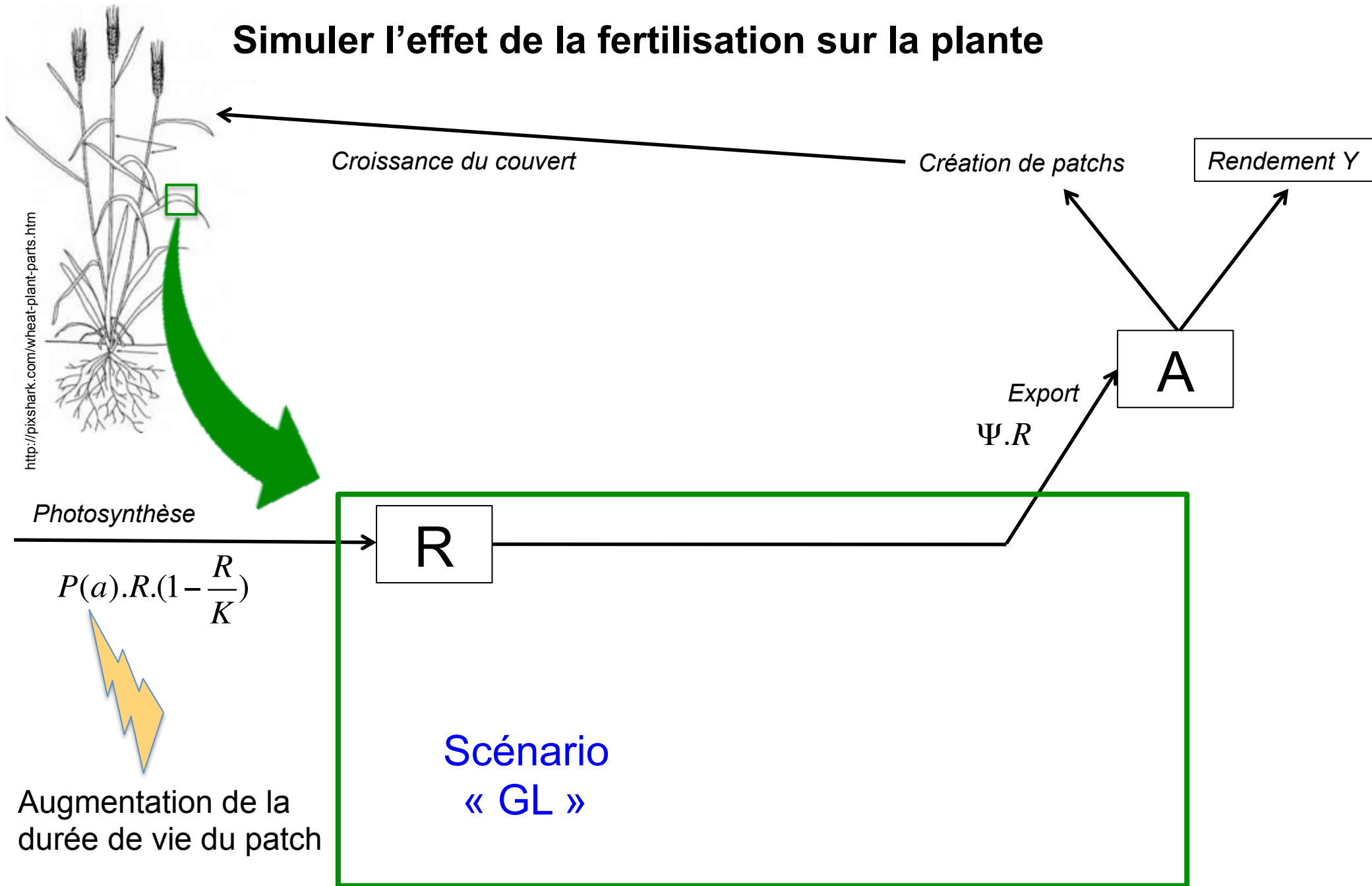
Photosynthèse

$$\int_0^{\infty} P(a) \cdot R \cdot \left(1 - \frac{R}{K}\right) \cdot da$$

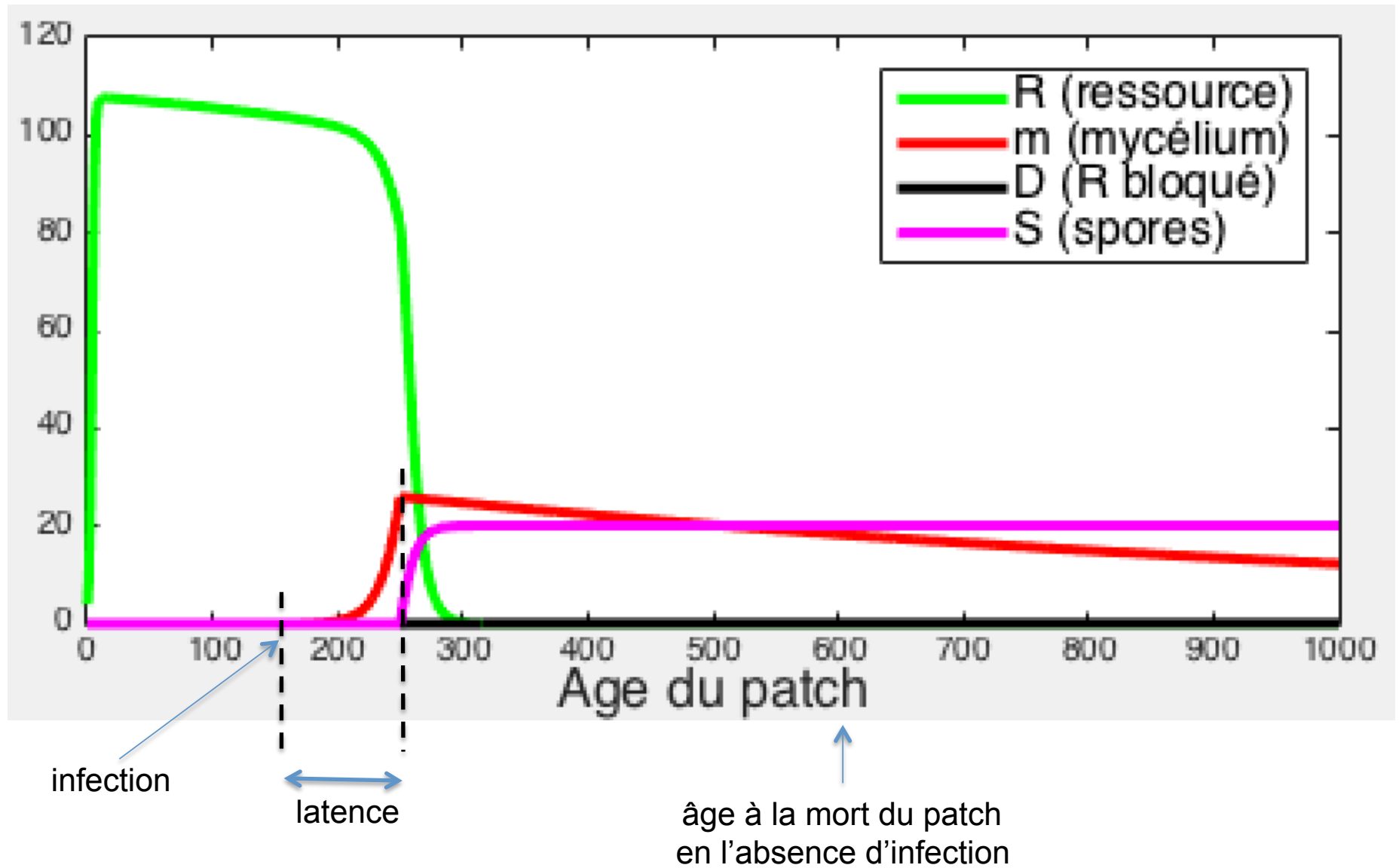
Simuler l'effet du niveau de ressources du patch



Simuler l'effet de la fertilisation sur la plante

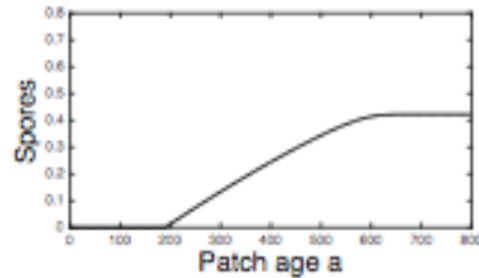
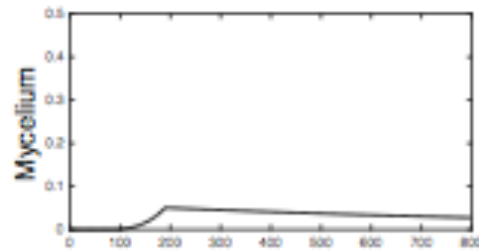
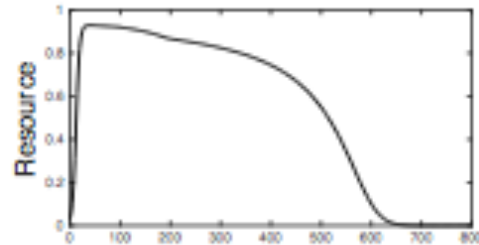


Dynamique des ressources dans le pathosystème au cours de la vie du patch

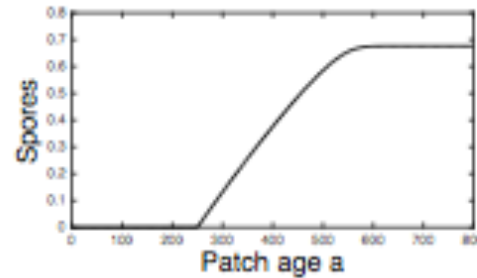
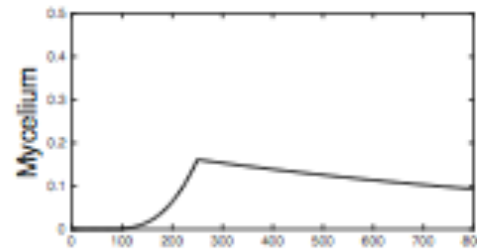
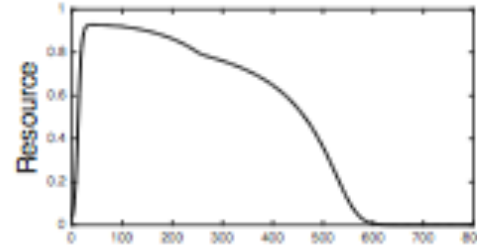


Durée de la période de latence et compromis dans l'allocation des ressources

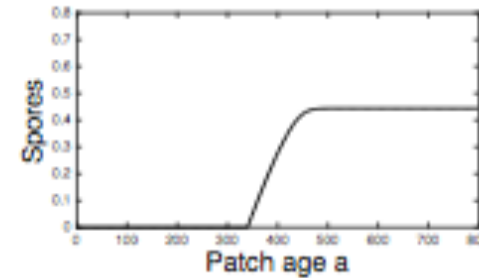
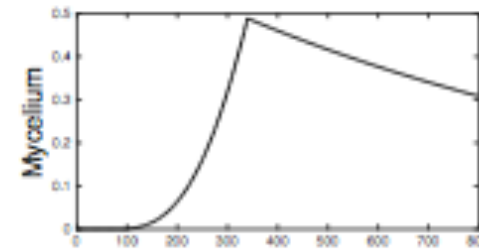
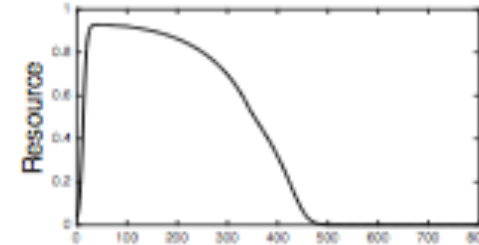
$\lambda = 90$



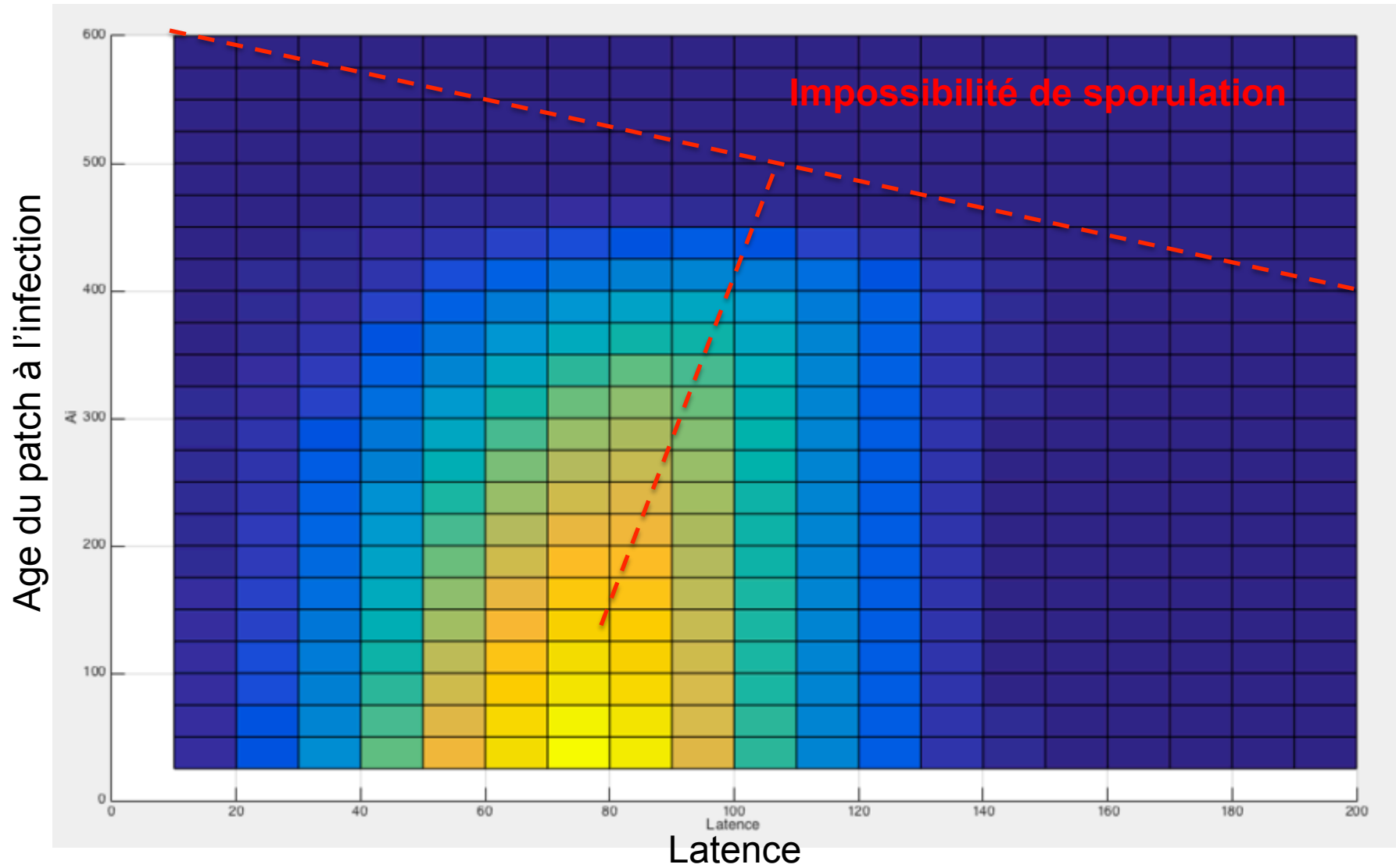
$\lambda = 150$



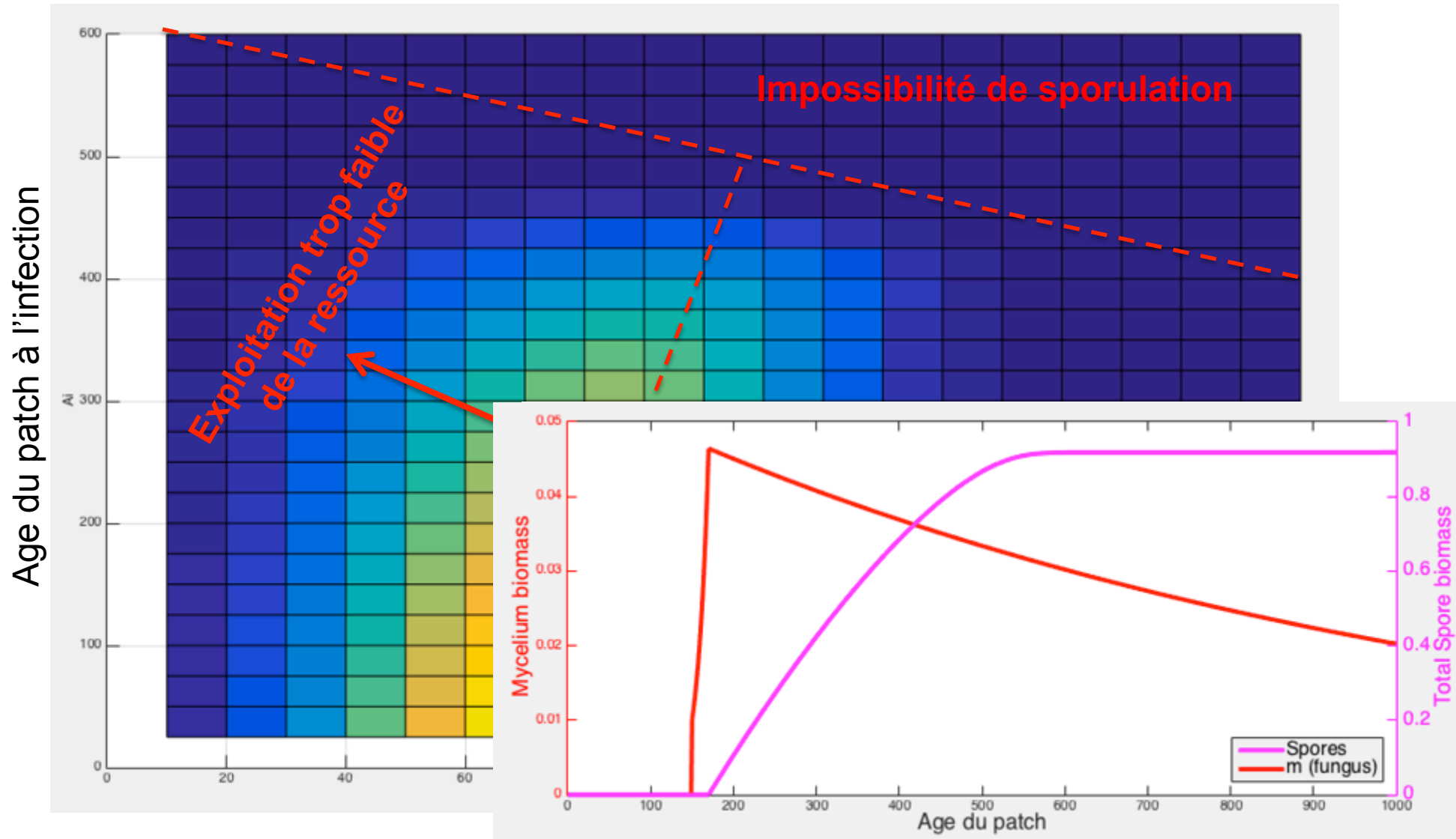
$\lambda = 240$



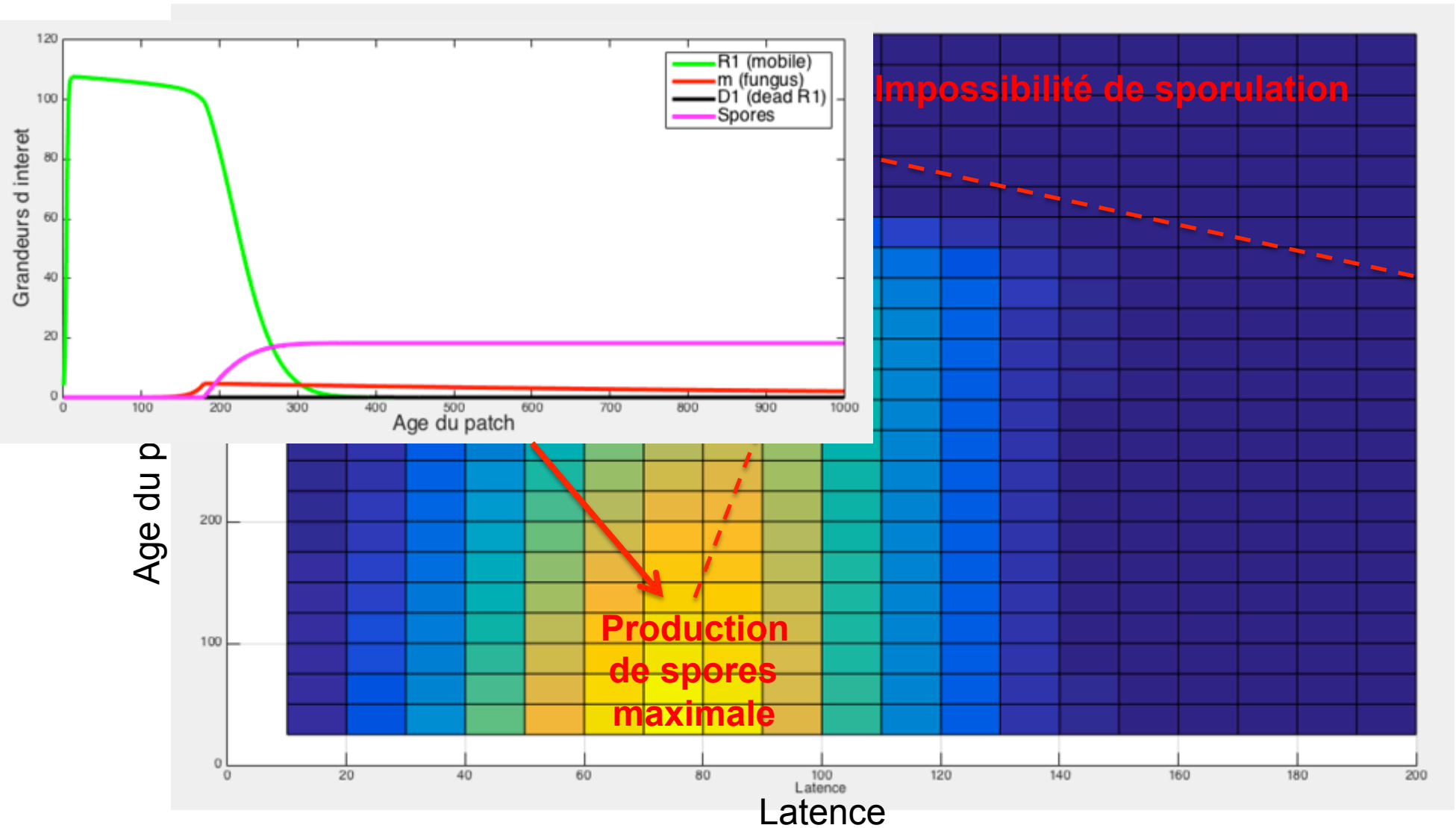
Etude de quelques paramètres liés à la virulence du pathogène



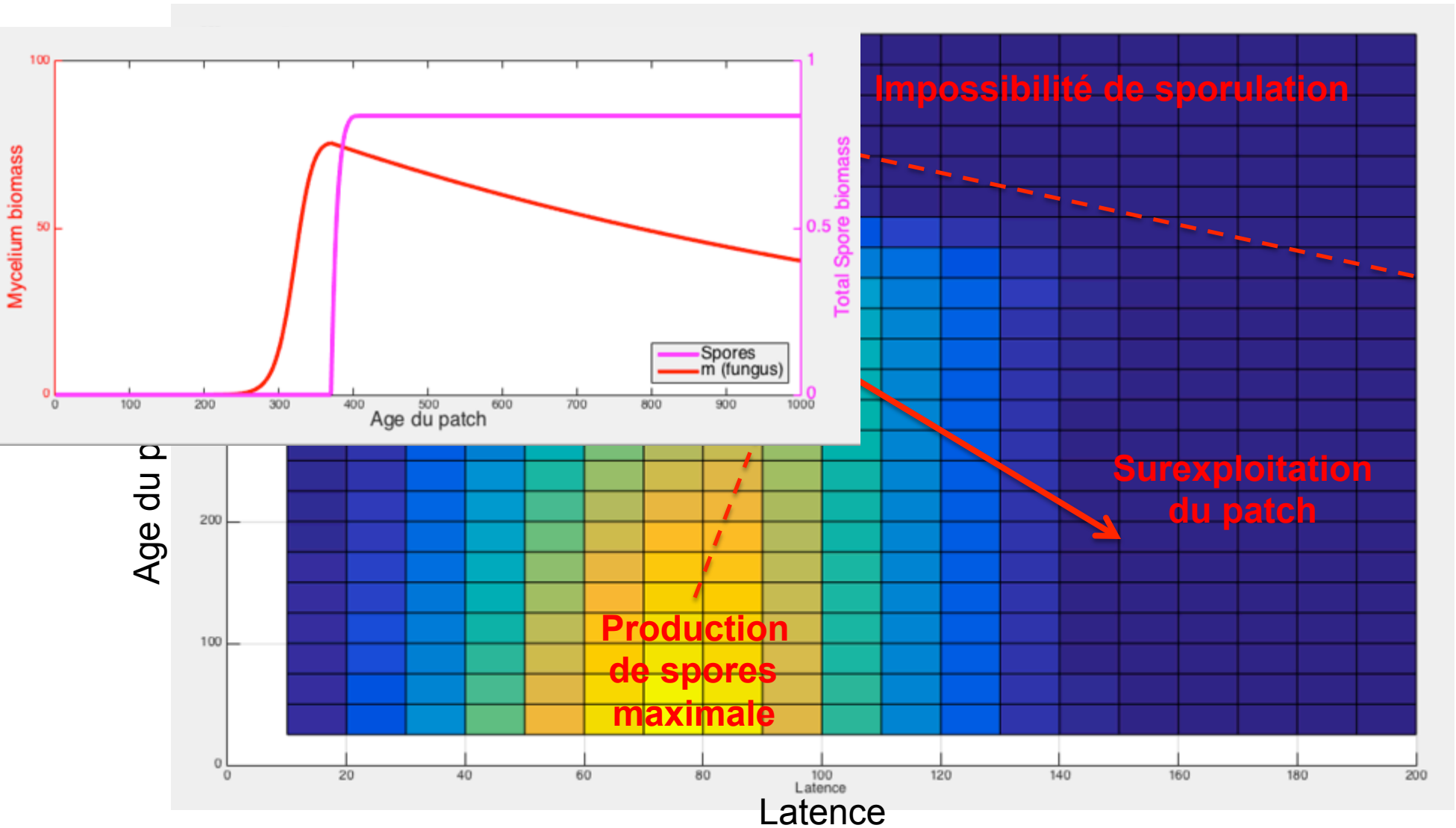
Etude de quelques paramètres liés à la virulence du pathogène



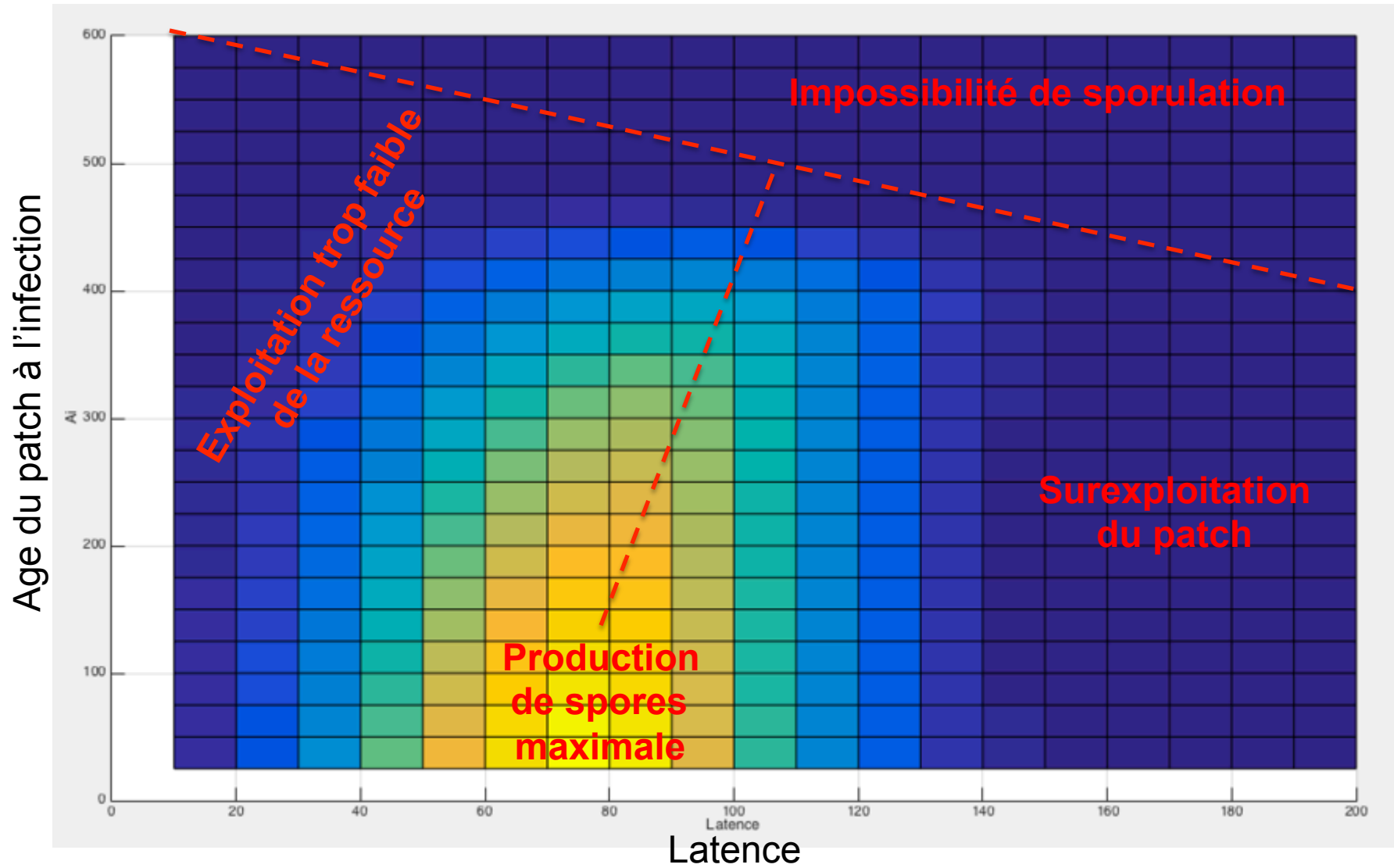
Etude de quelques paramètres liés à la virulence du pathogène



Etude de quelques paramètres liés à la virulence du pathogène



Etude de quelques paramètres liés à la virulence du pathogène



Construction du modèle : contraintes d'échelles

- à minima deux échelles

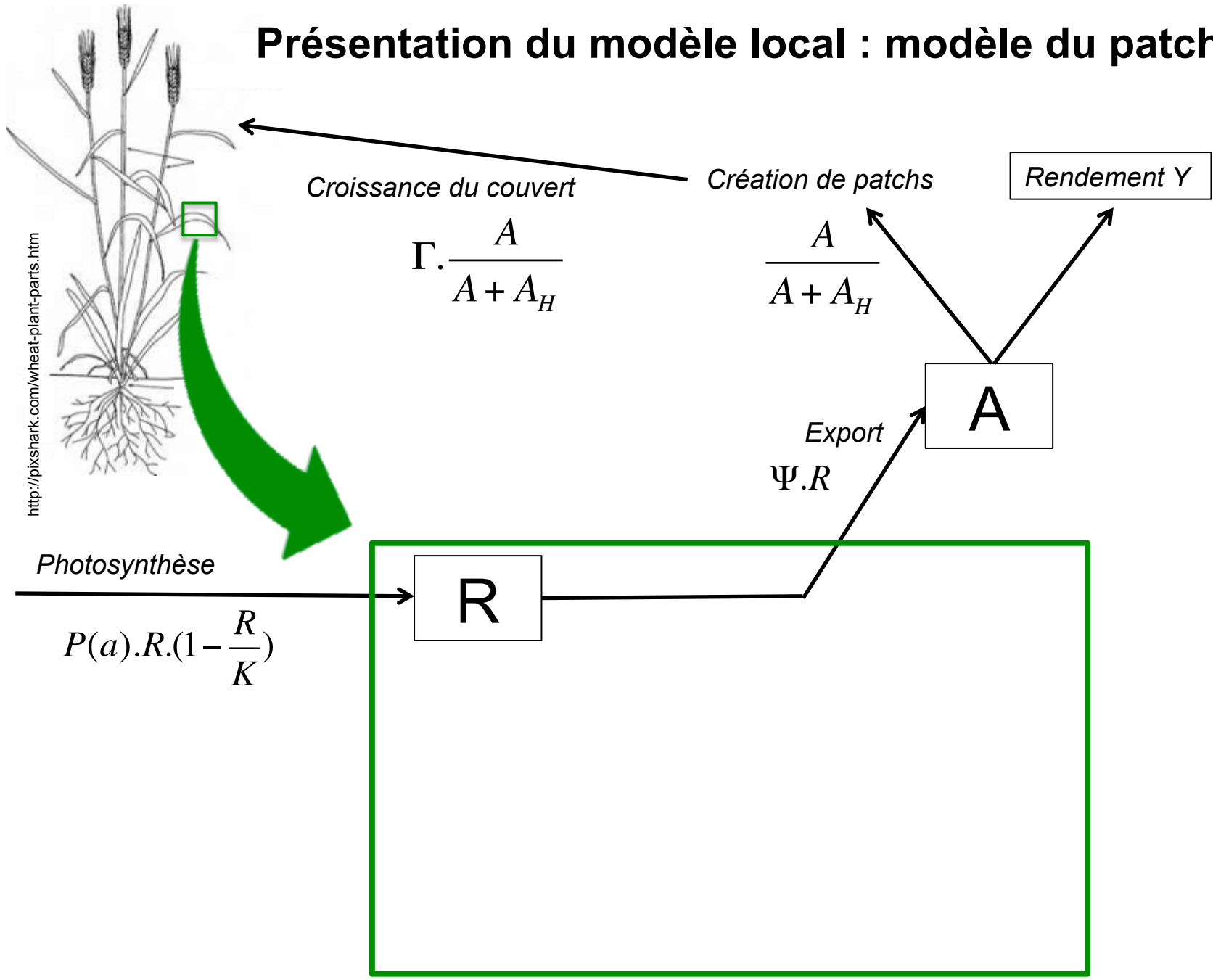
Echelle locale : 1 cm² de feuilles = un patch

- ressources intra-feuille
- cycles infectieux pour nos deux types de pathogènes
- dynamique intra-patch de l'infection
 - structuration en âge d'infection
- sénescence naturelle (contrainte temporelle)

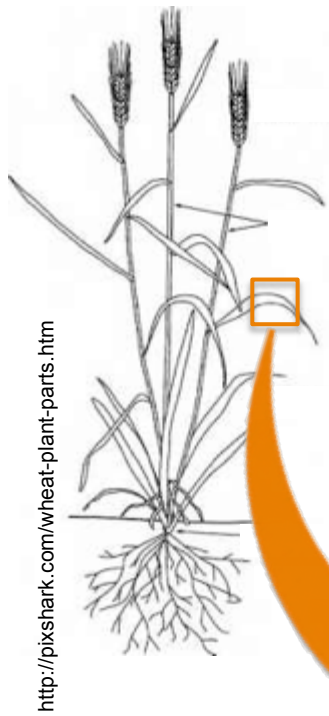
Echelle de l'agrosystème : multi-patches

- croissance et structure du couvert végétal
 - structuration en âge de la plante
- dispersion inter-patch
- épidémies polycycliques
- dynamique inter-annuelle des épidémies

Présentation du modèle local : modèle du patch



Présentation du modèle local : modèle du patch



Croissance du couvert

$$\Gamma \cdot \frac{A}{A + A_H}$$

Création de patches

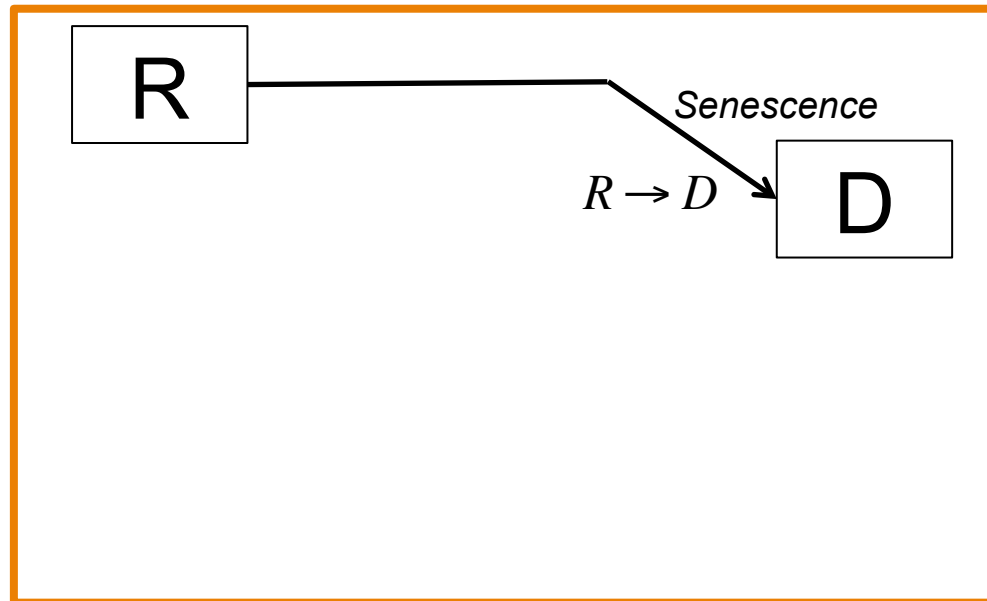
$$\frac{A}{A + A_H}$$

Rendement Y

~~Export~~

A

~~Photosynthèse~~



Présentation du modèle local : modèle du patch

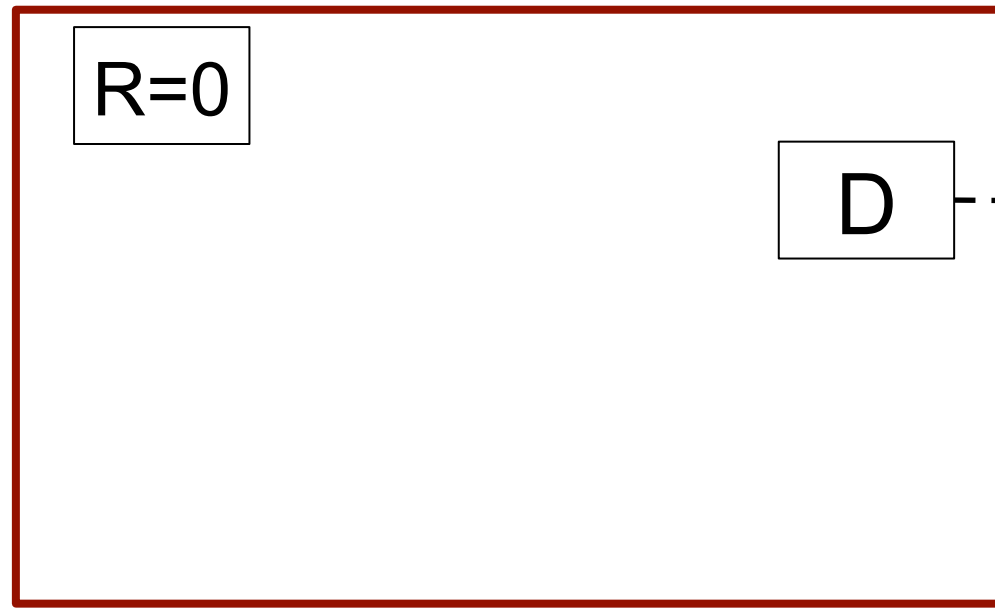


Rendement Y $\int_{start}^{end} (\Psi \cdot R) \cdot da - I$

$I = \int_{start}^{end} \Gamma \cdot \frac{A}{A + A_H} da$

A

Bilan



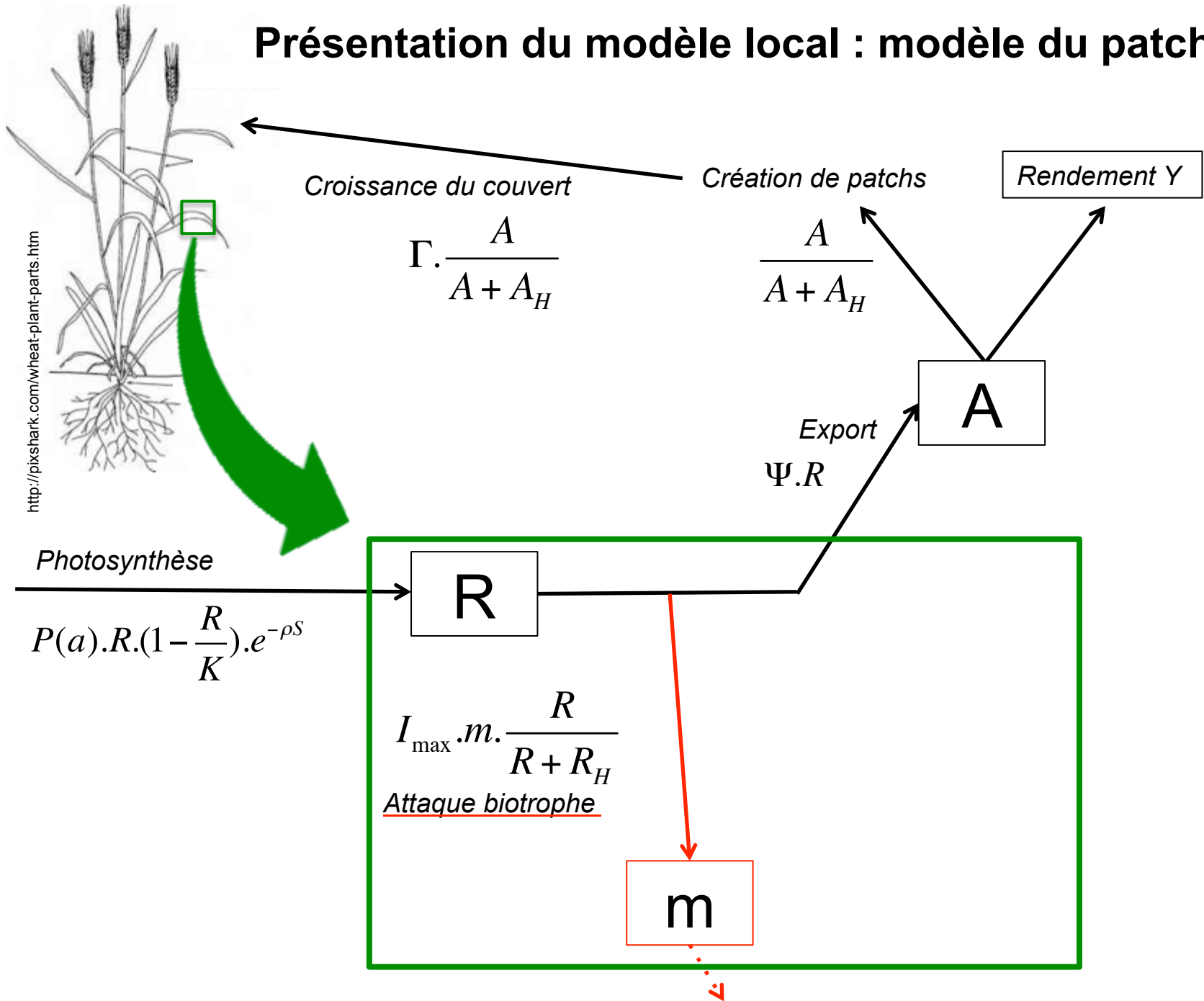
Bilan

Photosynthèse

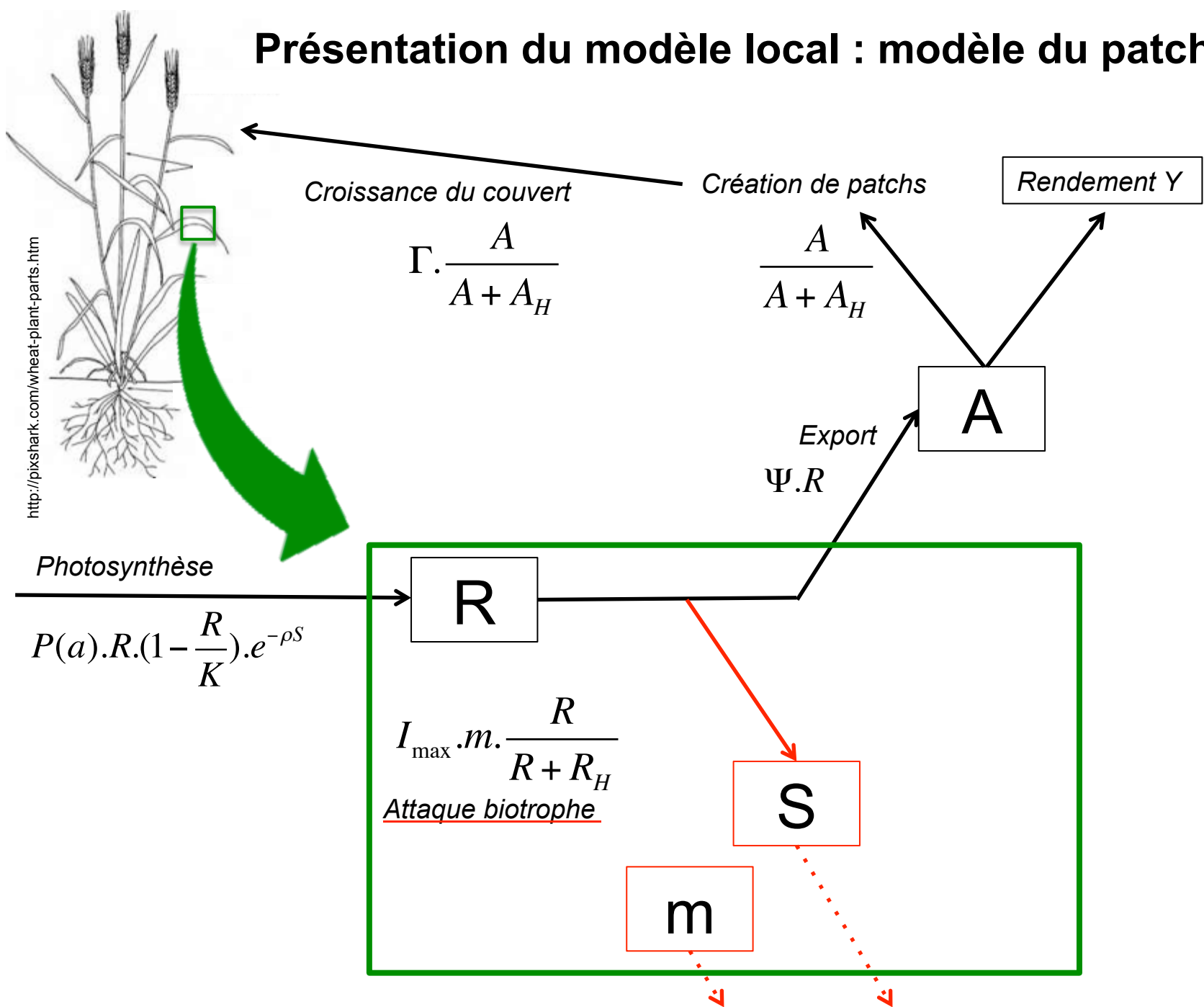
$$\sum_{patches} \int_{start}^{end} P(a) \cdot R \cdot \left(1 - \frac{R}{K}\right) \cdot da$$

$\sum_{patches} D_{patches}$

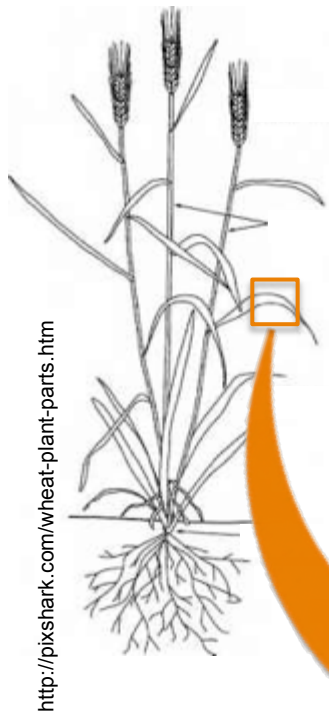
Présentation du modèle local : modèle du patch



Présentation du modèle local : modèle du patch



Présentation du modèle local : modèle du patch



<http://pixshark.com/wheat-plant-parts.htm>

Croissance du couvert

$$\Gamma \cdot \frac{A}{A + A_H}$$

Création de patches

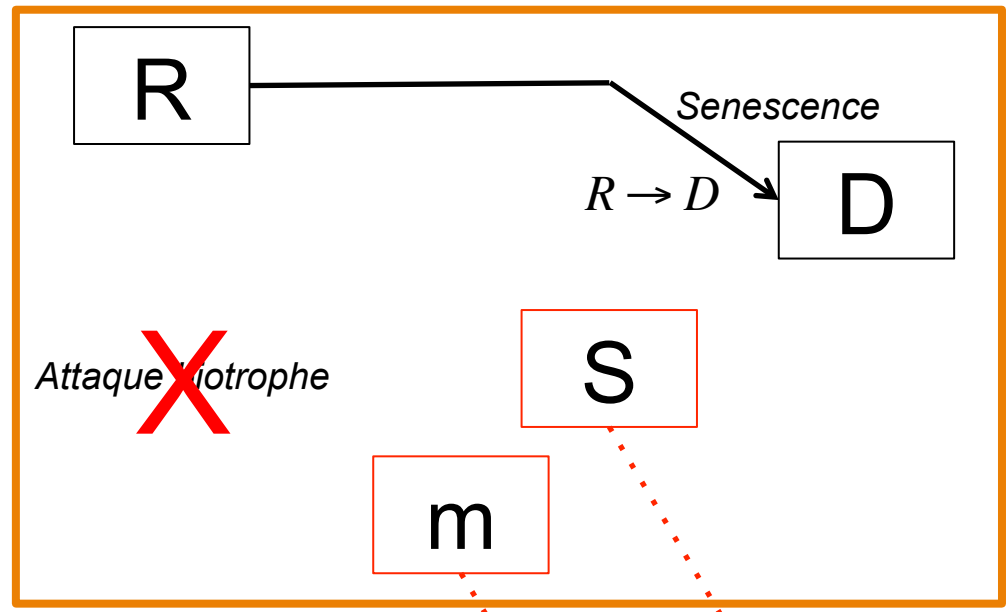
$$\frac{A}{A + A_H}$$

Rendement *Y*

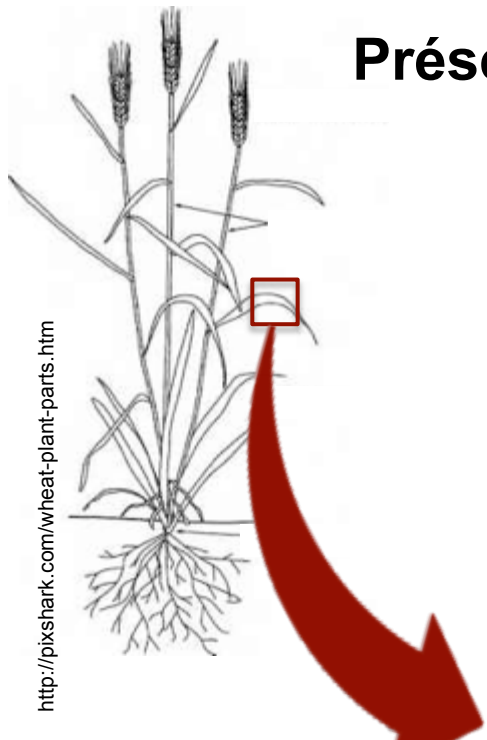
A

~~Export~~

~~Photosynthèse~~



Présentation du modèle local : modèle du patch

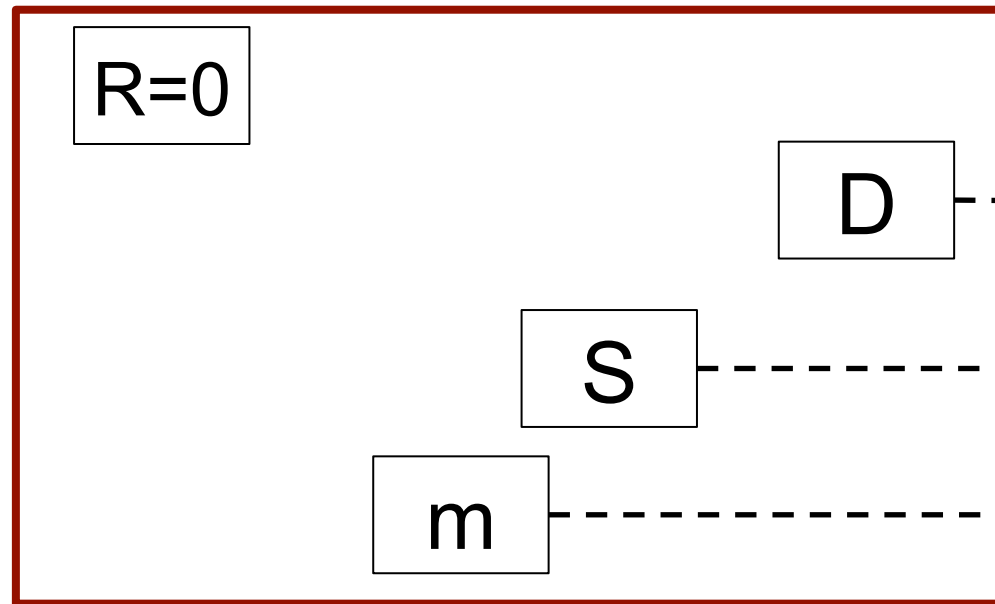


Rendement $Y \int_{start}^{end} (\Psi \cdot R) \cdot da - I$

$I = \int_{start}^{end} \Gamma \cdot \frac{A}{A + A_H} da$

A

Bilan



$\sum_{patches} D_{patches}$

$\sum_{patches} \int_{a_i+\lambda}^{end} dS \cdot da$

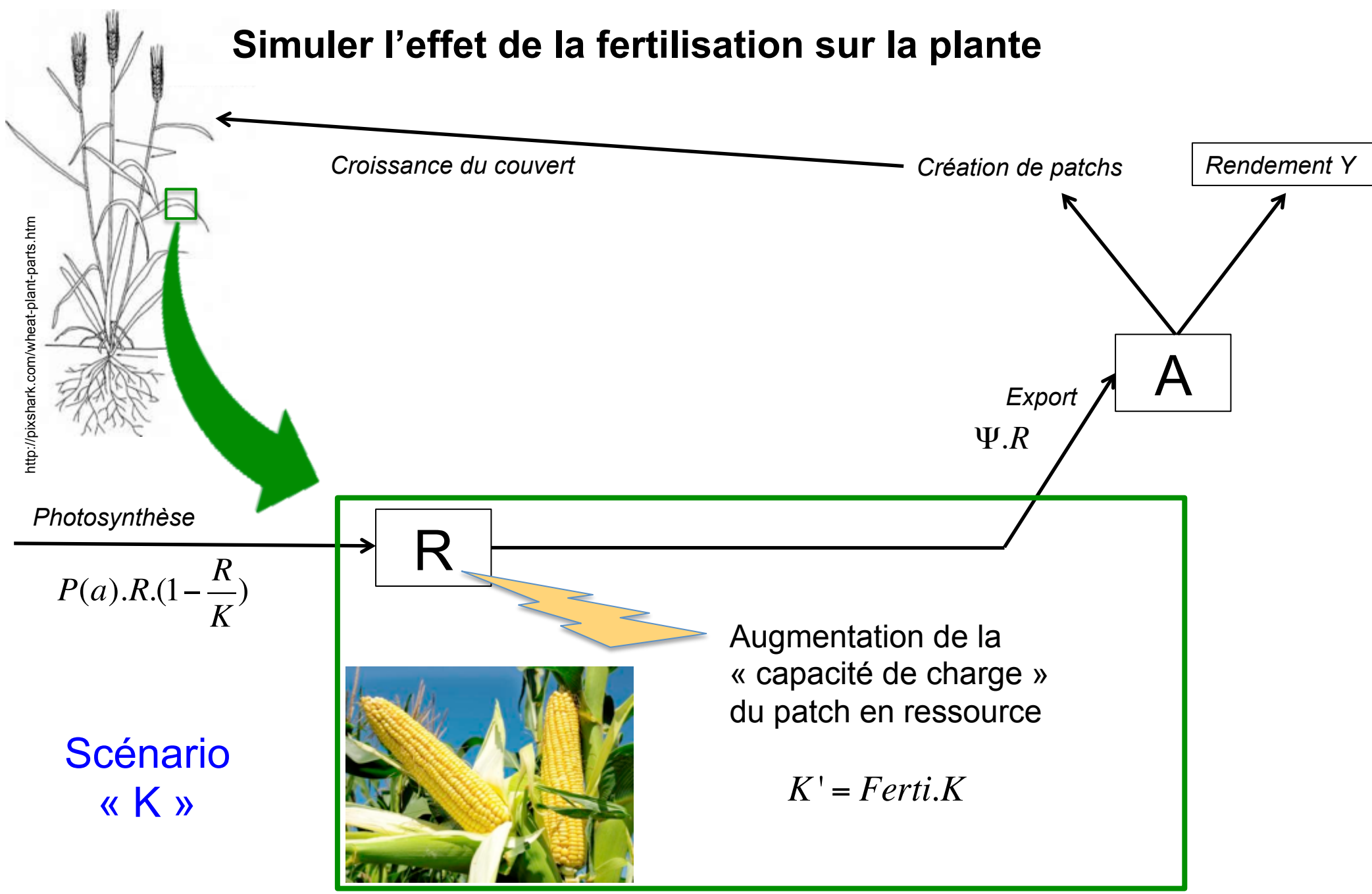
$\sum_{patches} \int_{a_i}^{a_i+\lambda} dm \cdot da$

Bilan

Photosynthèse

$\sum_{patches} \int_{start}^{end} P(a) \cdot R \cdot (1 - \frac{R}{K}) \cdot e^{-\rho S} \cdot da$

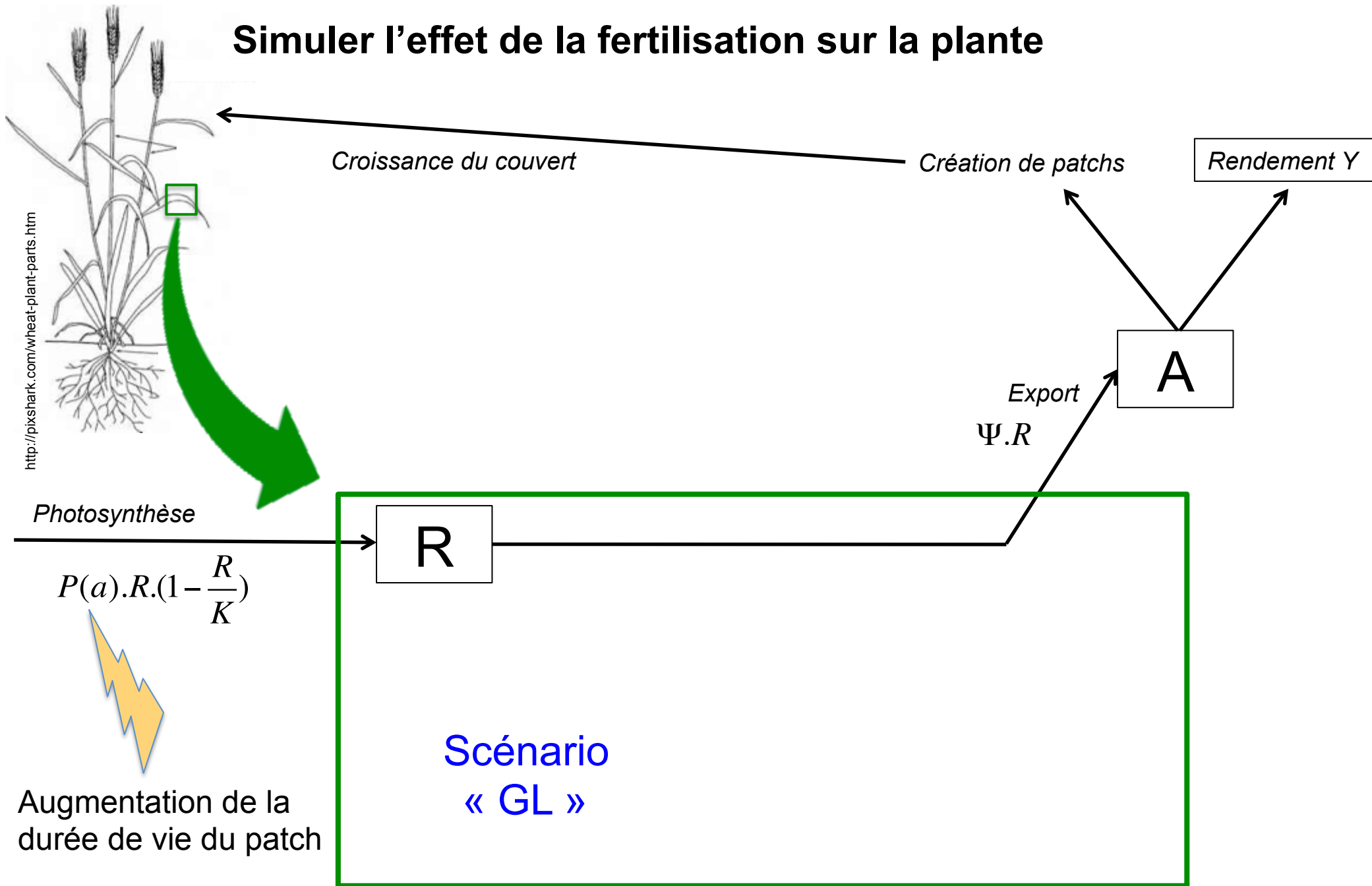
Simuler l'effet de la fertilisation sur la plante



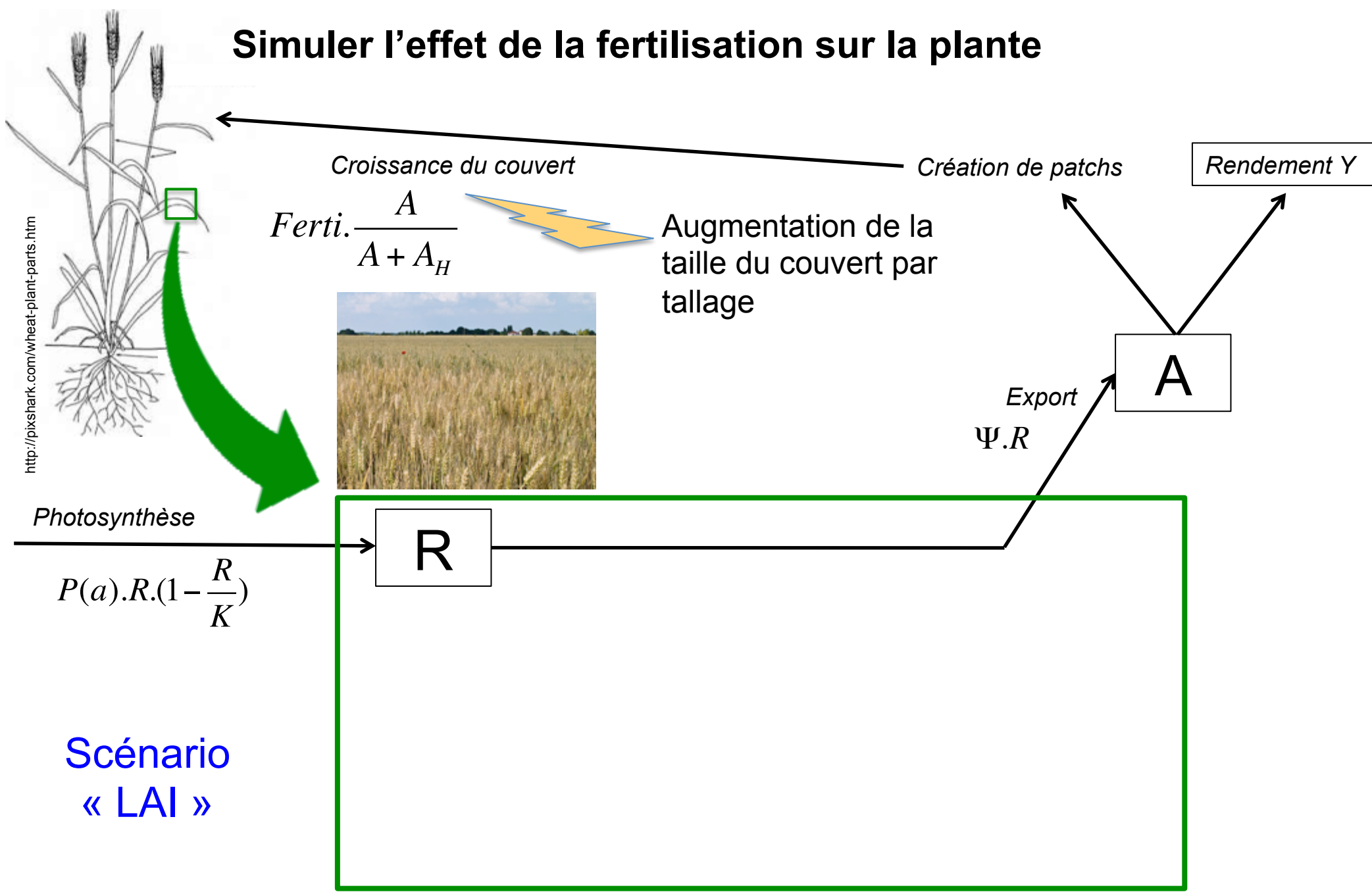
<http://pixshark.com/wheat-plant-parts.htm>

Scénario
« K »

Simuler l'effet de la fertilisation sur la plante

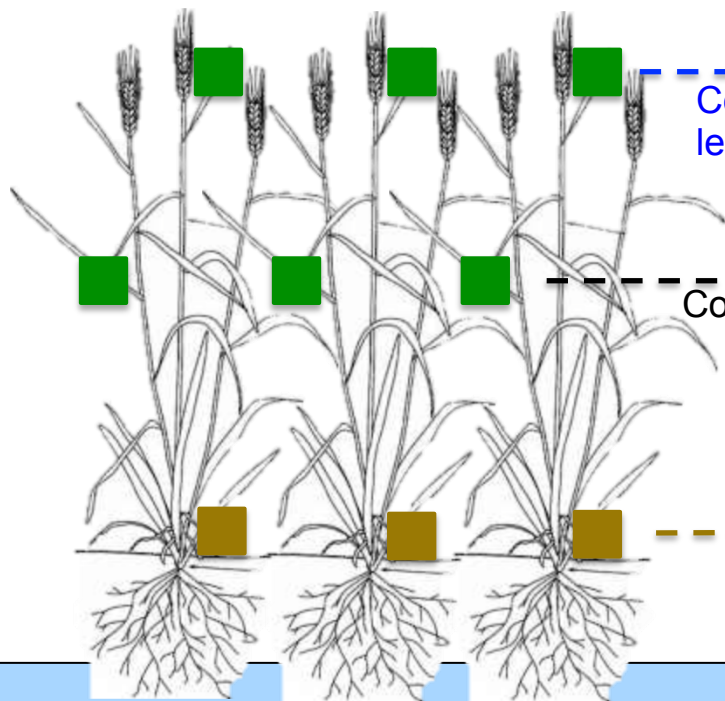
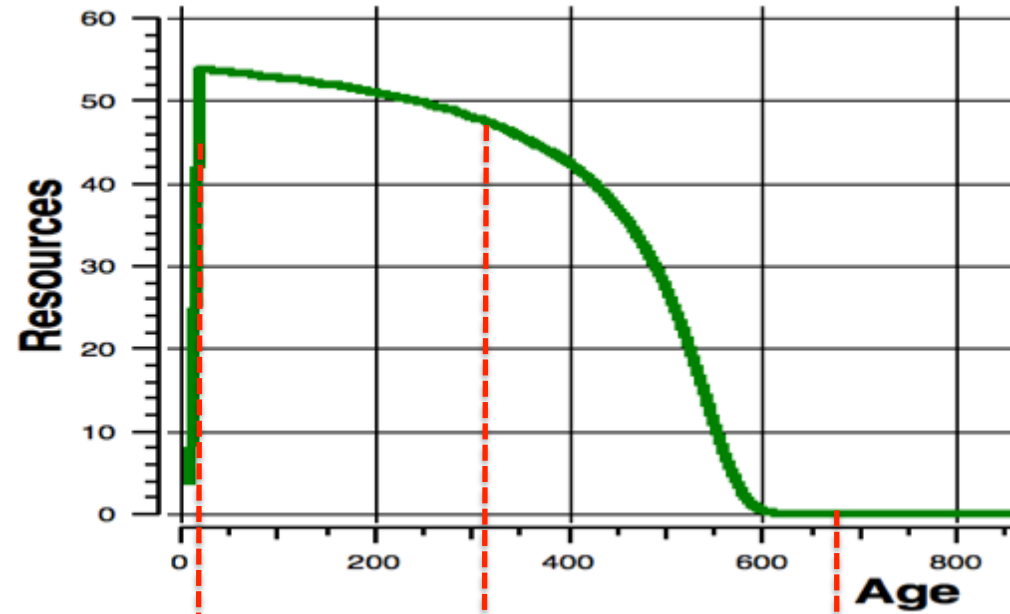


Simuler l'effet de la fertilisation sur la plante



Présentation du modèle multi-patch

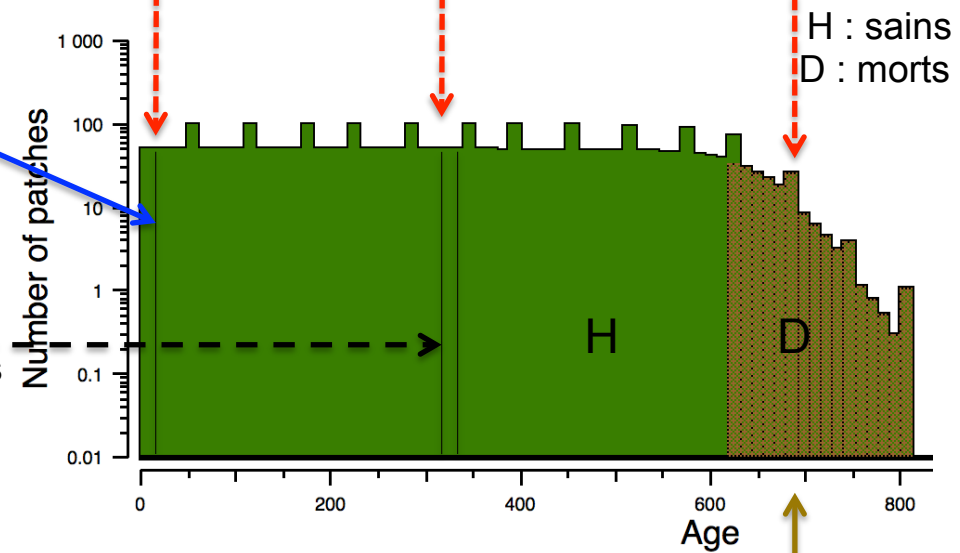
Cohorte saine : patches ~ de même âge
~ position
~ niveau de R



Cohortes des patches les plus jeunes

Cohortes de patches verts

Classe d'âge des cohortes de patches âgés, déjà « morts »



H : sains
D : morts

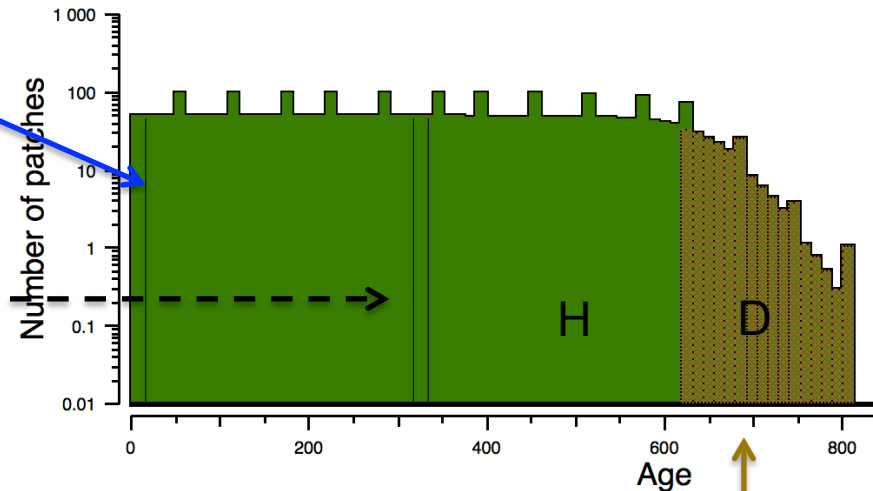
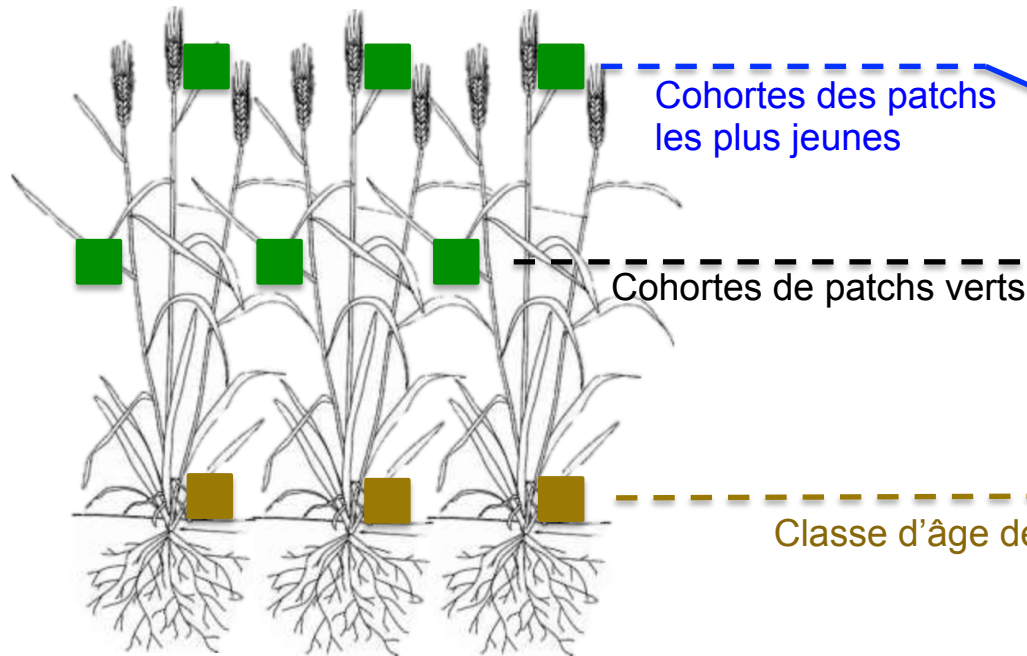
Contexte

Objectifs/Questions

Construction du modèle

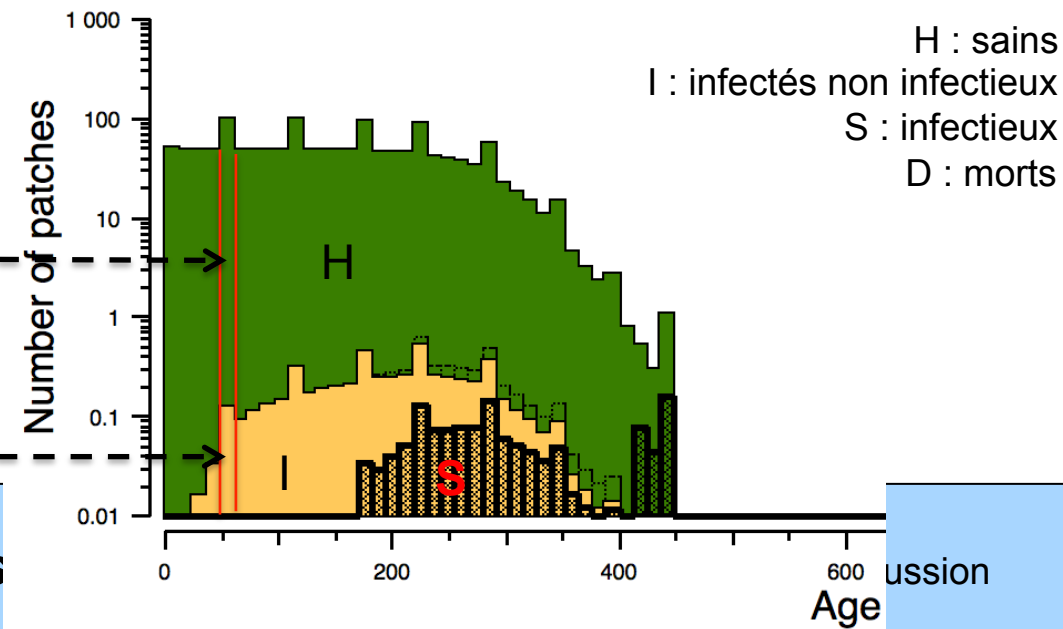
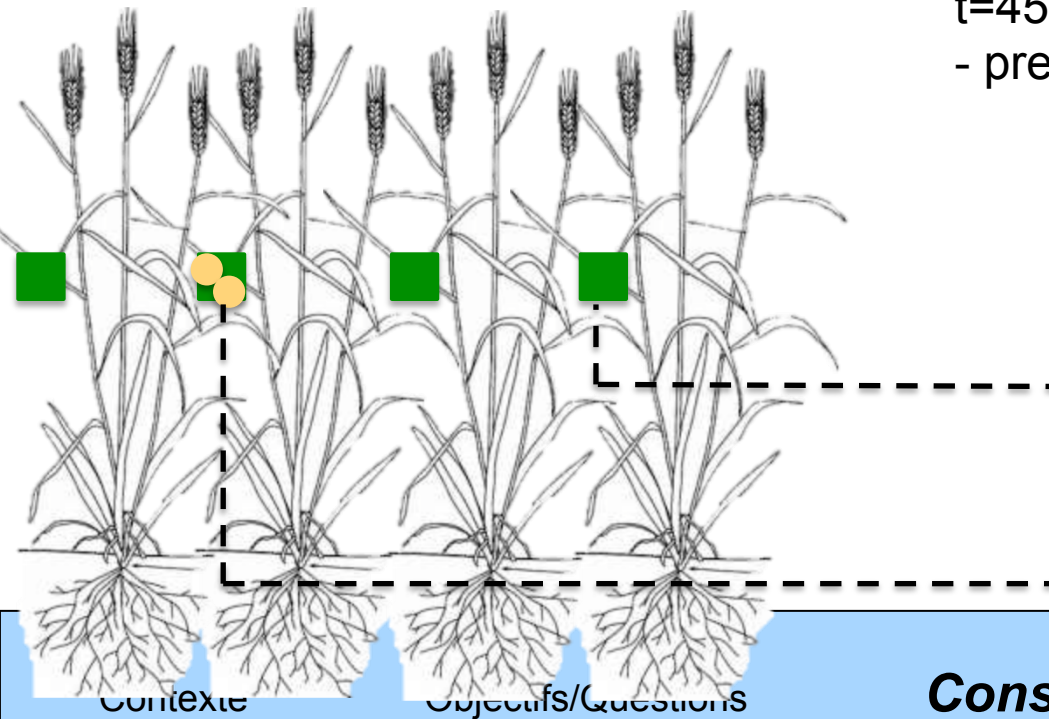
Résultats/Discussion

Présentation du modèle multi-patch

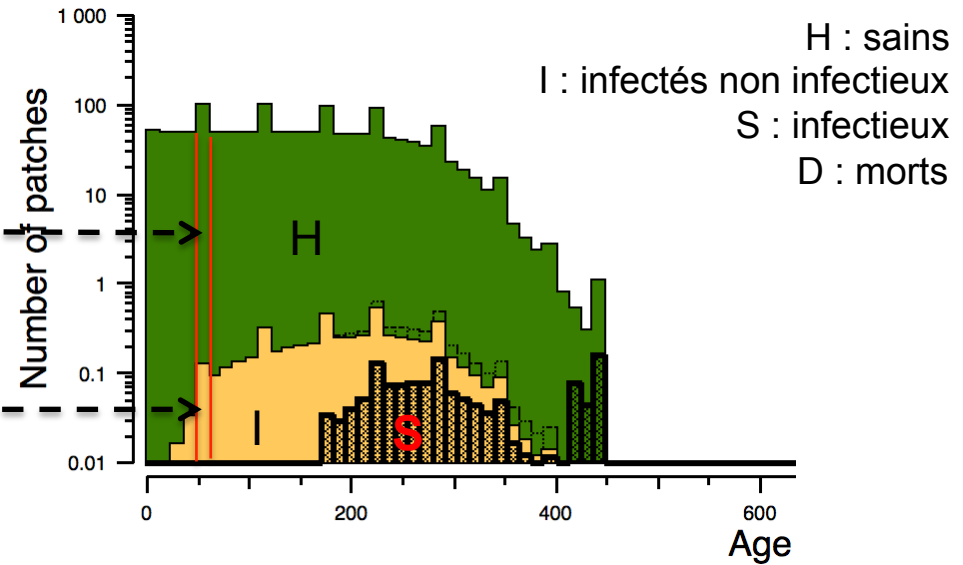
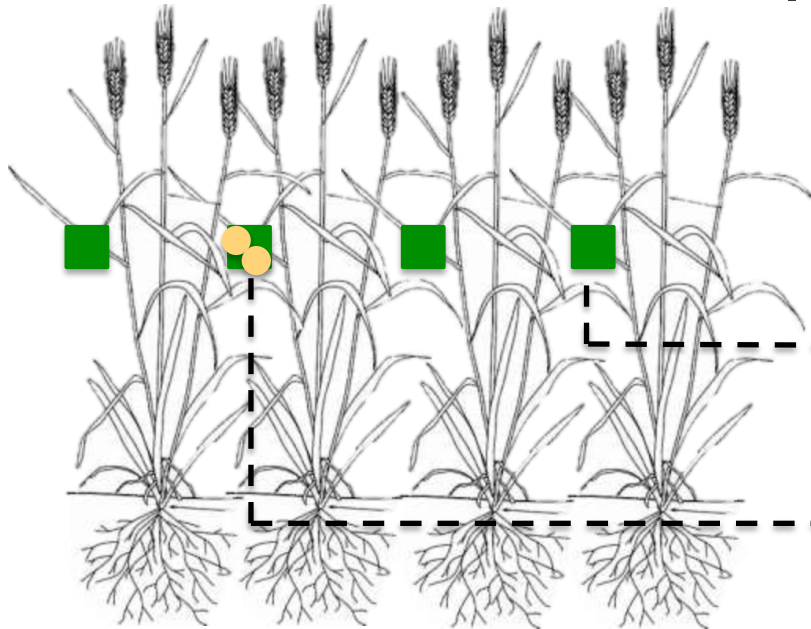


$t=450$

- première infection sur certains patches

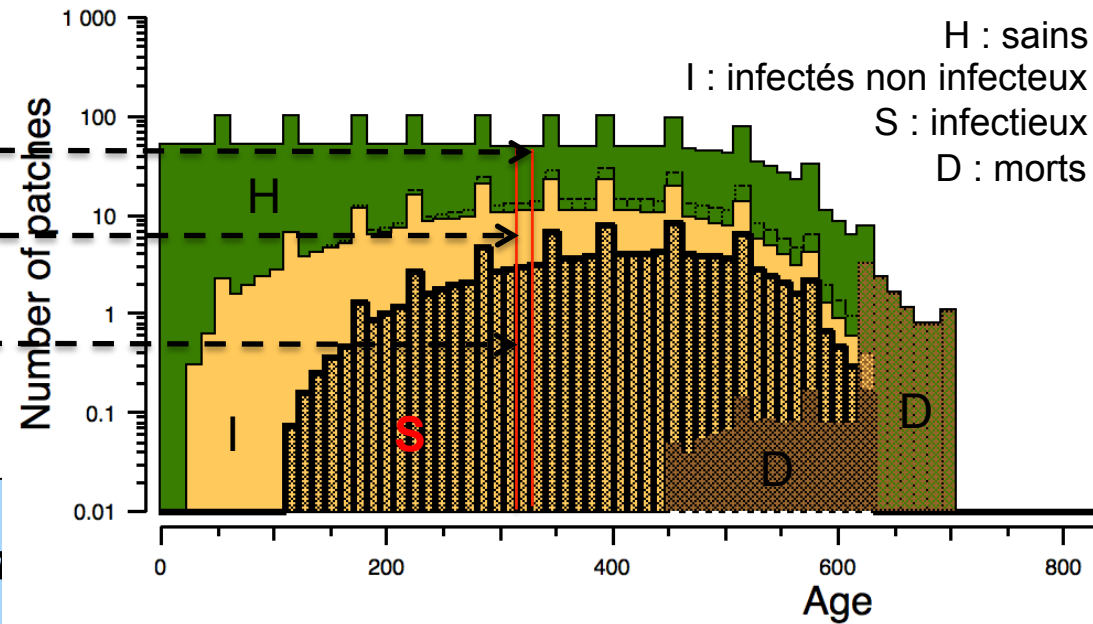
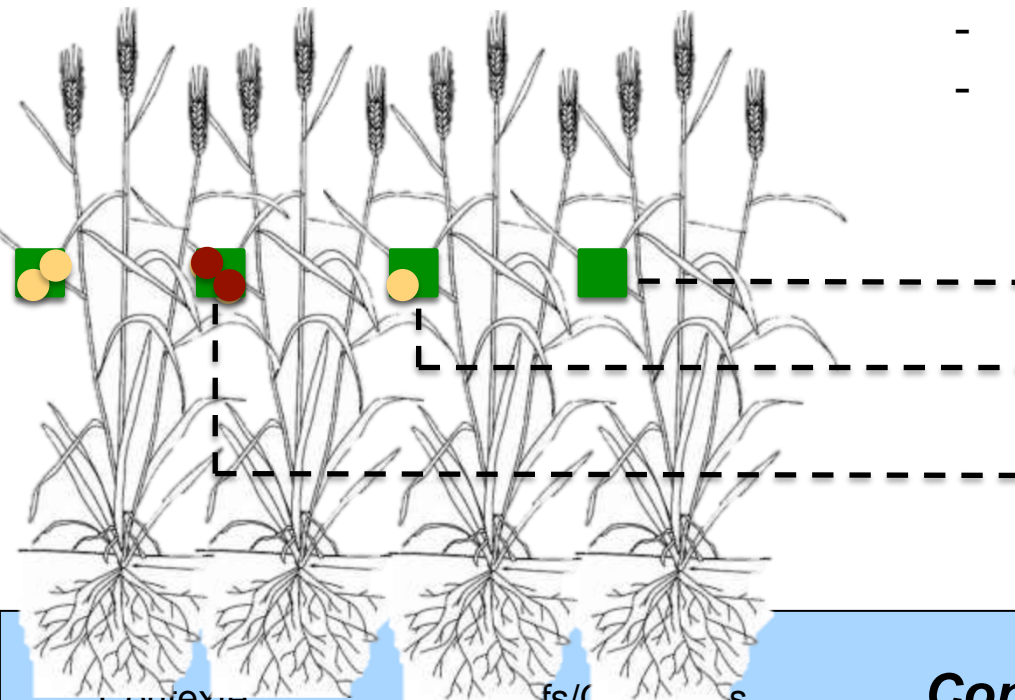


Présentation du modèle multi-patch



t=700

- les anciens infectés sporulent
- nouvelle infection sur d'autres patches



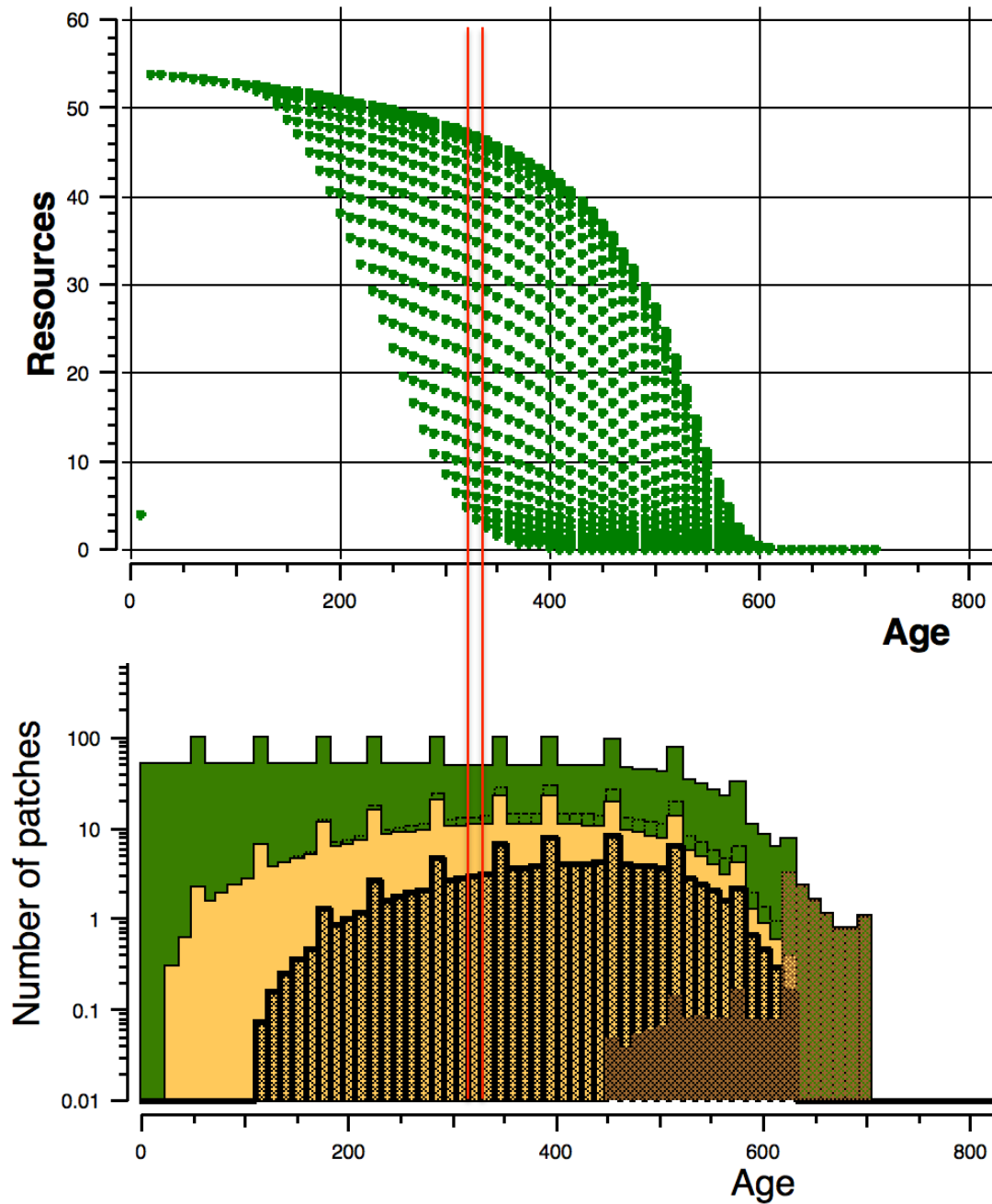
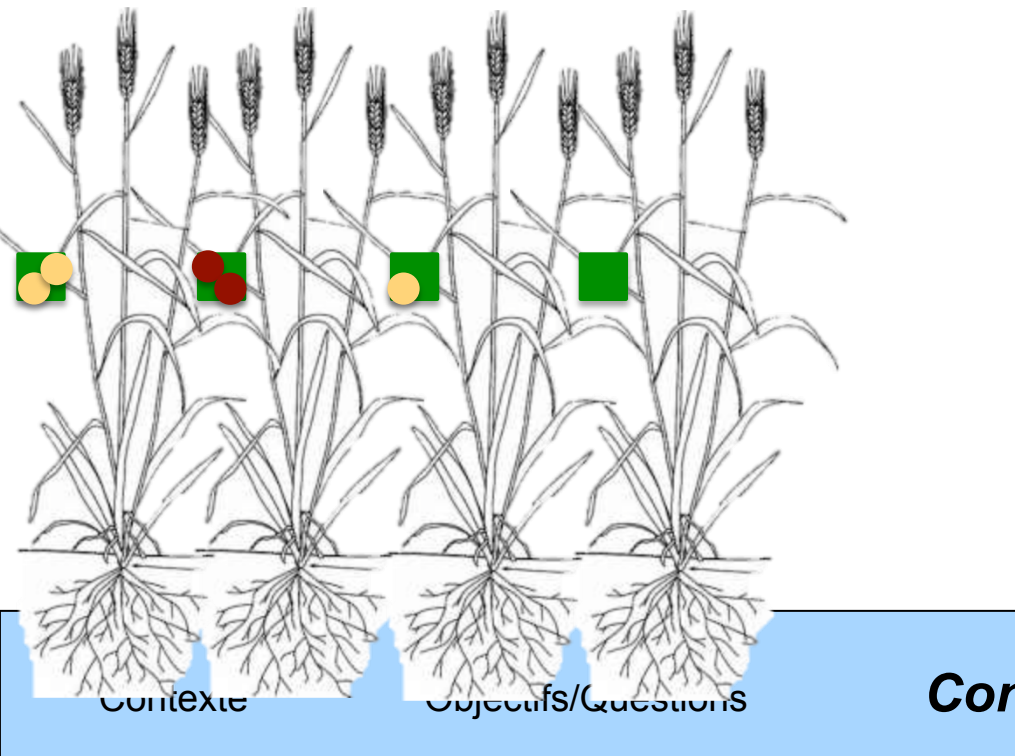
Contexte

Objectifs/Questions

Con

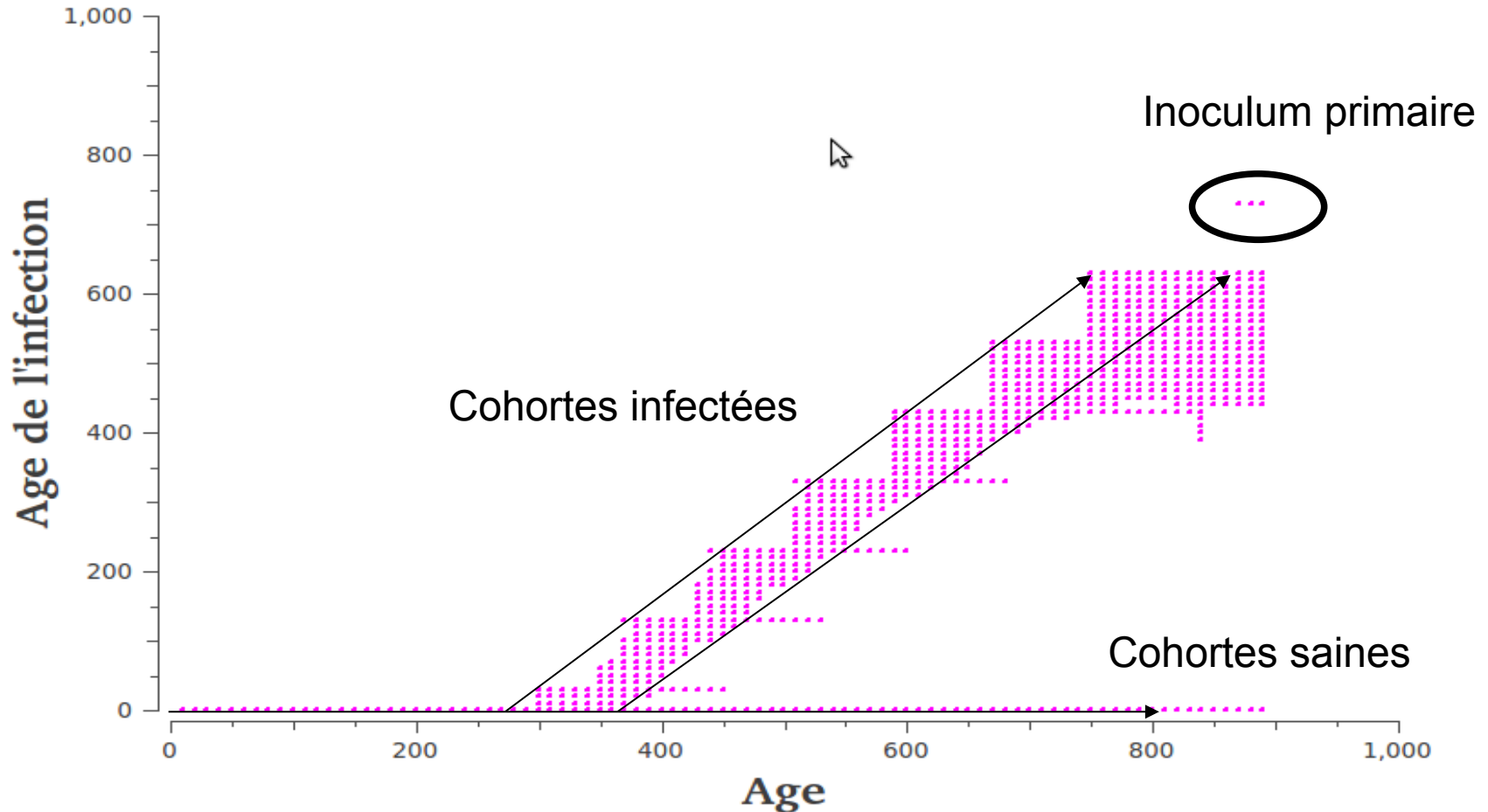
Présentation du modèle multi-patch

Cohorte infectée :
patches ~ de même âge
~ de même âge d'infection
~ position
~ niveau de R



Modèle inter-patch : double structuration en âge

→ double structuration en âges



Un point = une cohorte

*Représentation instantanée
de la population à $t=900$ dj*

Modèle inter-patch : double structuration en âge

$$\frac{\partial h(t,a)}{\partial t} + \frac{\partial h(t,a)}{\partial a} = -F(t,a) h(t,a)$$

infection

$$h(t,0) = c_p A$$

naissance

patches sains (h)

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n}{\partial a} + \frac{\partial n}{\partial b} = 0$$

conservation

$$n(t,a,0) = F(t,a) h(t,a)$$

infection

$$n(t,0,0) = 0$$

pas d'infection initiale

Patches infectés (n)

Rendement (A)

$$\frac{dA}{dt} = \int_0^\infty \int_0^\infty (\text{Export}(t,a,b) - \text{Influx}(t,a,b)) n(t,a,b) db da - \int_0^\infty (\text{Export}(t,a) - \text{Influx}(t,a)) h(t,a) da$$

$$\frac{dP}{dt} = \int_0^\infty \int_0^\infty \sigma(t,a,b) n(t,a,b) db da - \gamma_S P$$

Production de spores (P)

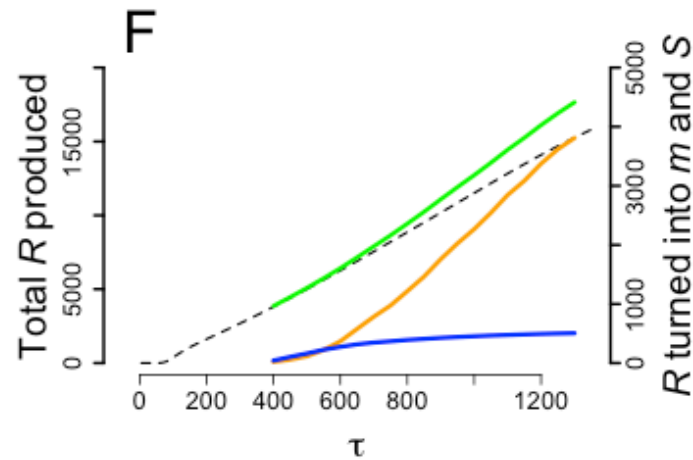
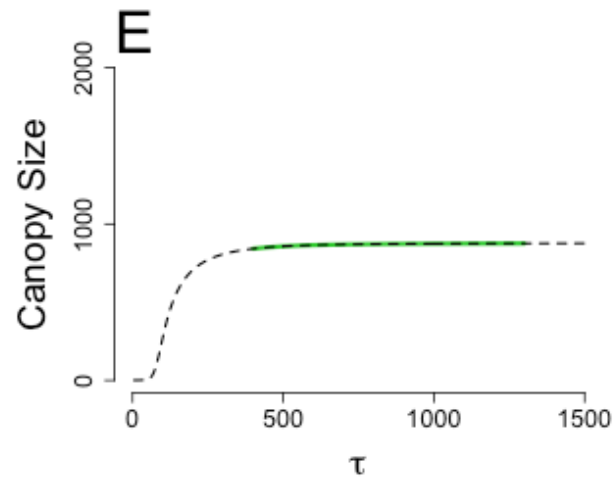
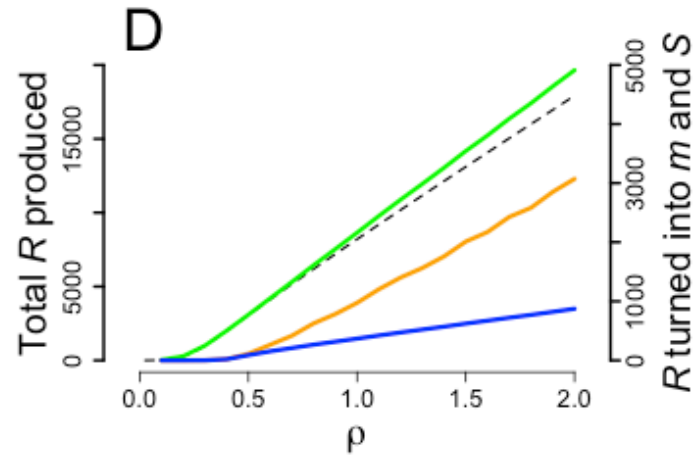
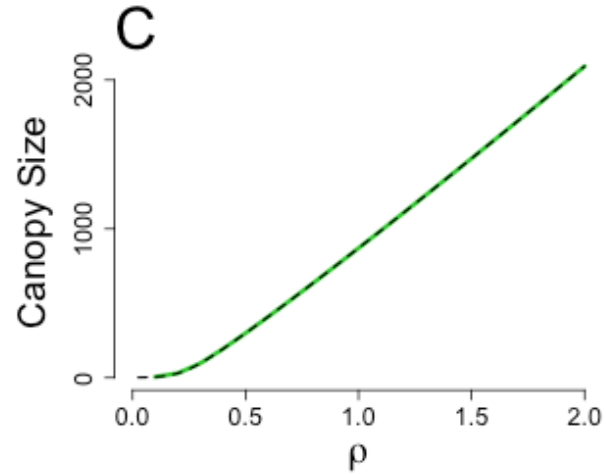
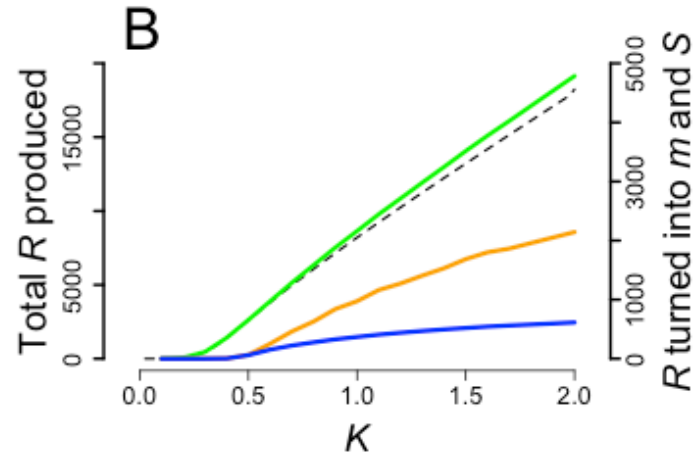
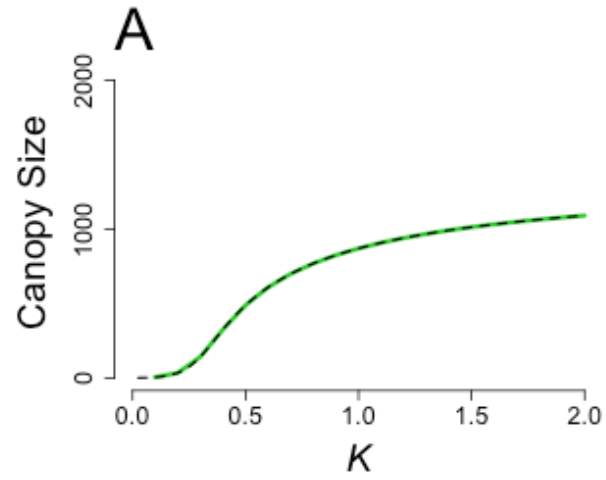
Questions

Peut-on déterminer l'optimum de latence théoriquement envisagé ?

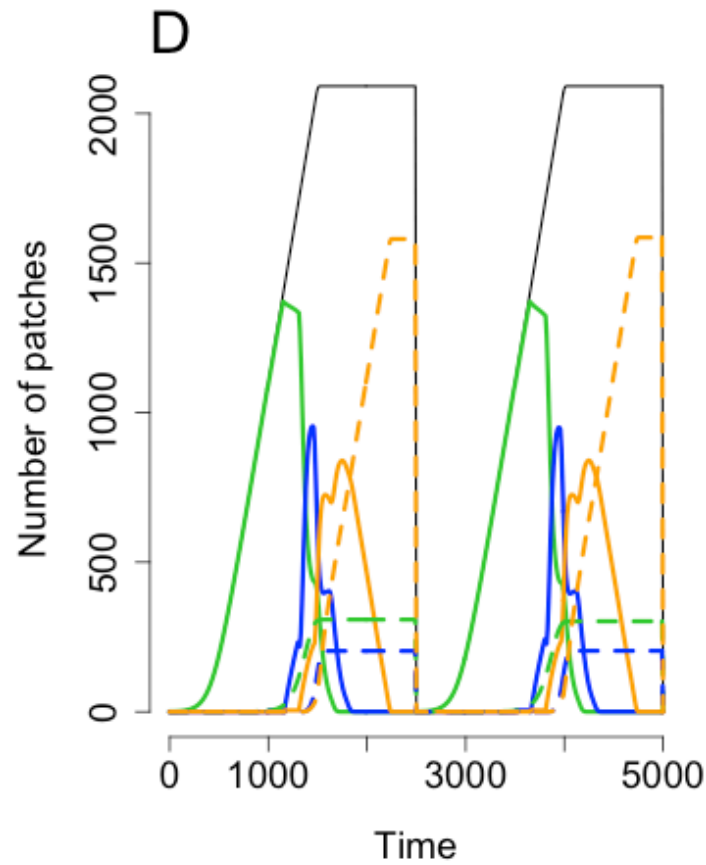
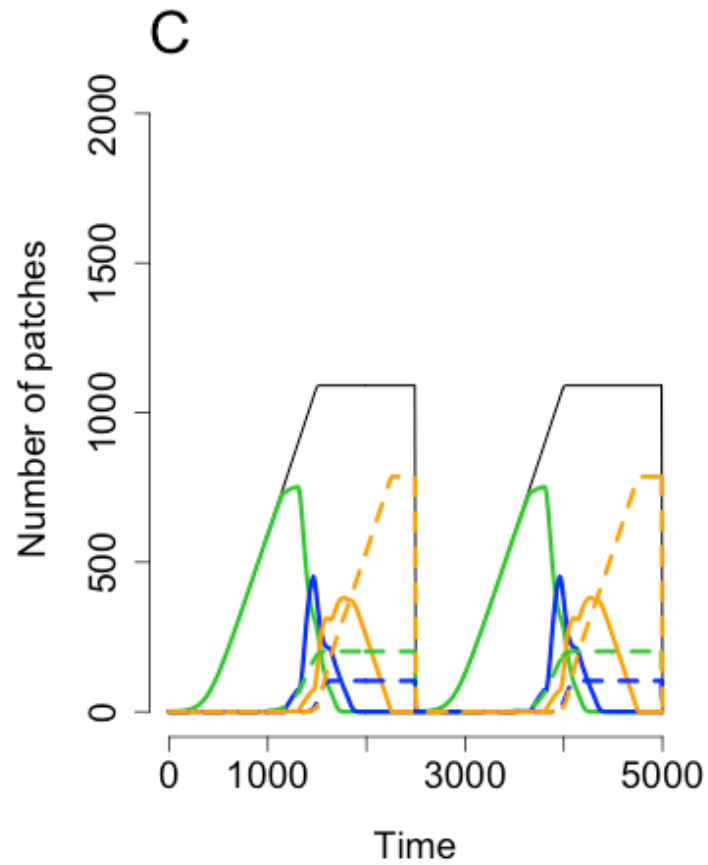
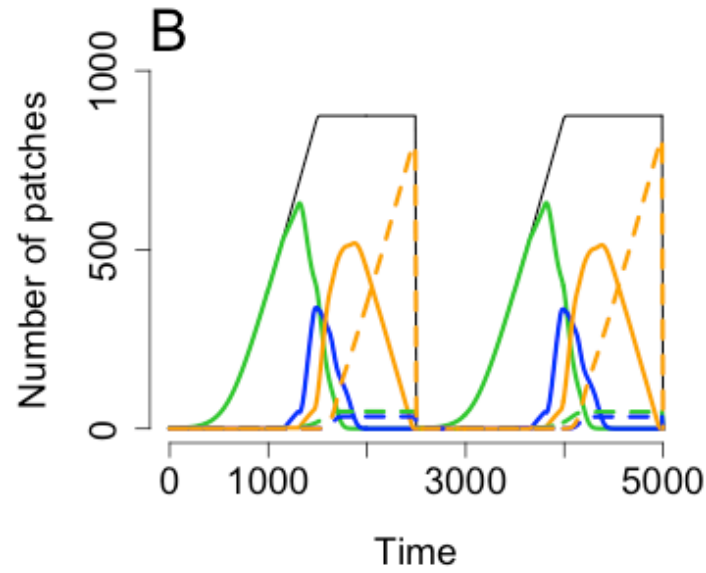
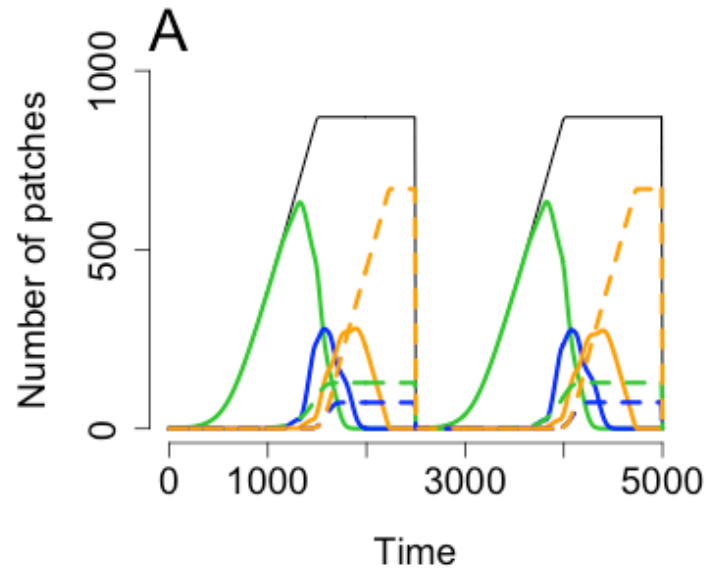
L'optimum est-il sensible à la quantité de ressources ?

Les valeurs et variations de l'optimum dépendent-elles du scénario de changement du niveau de ressources ?

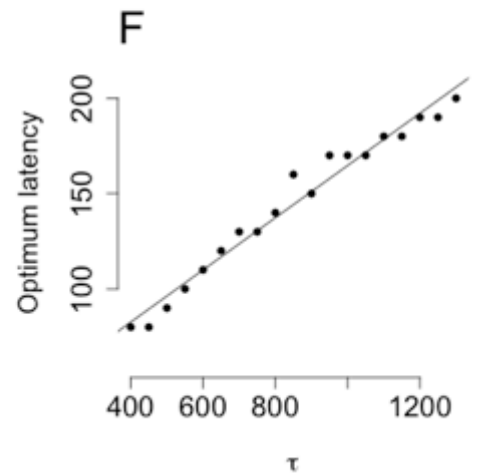
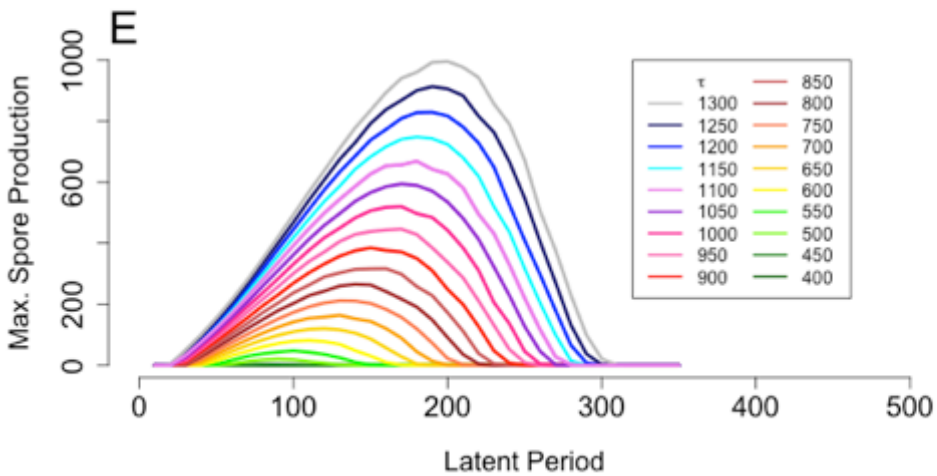
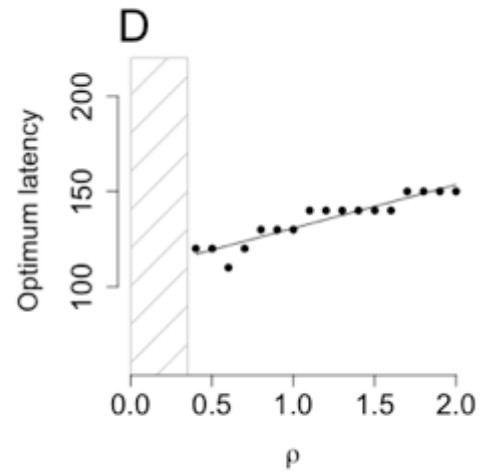
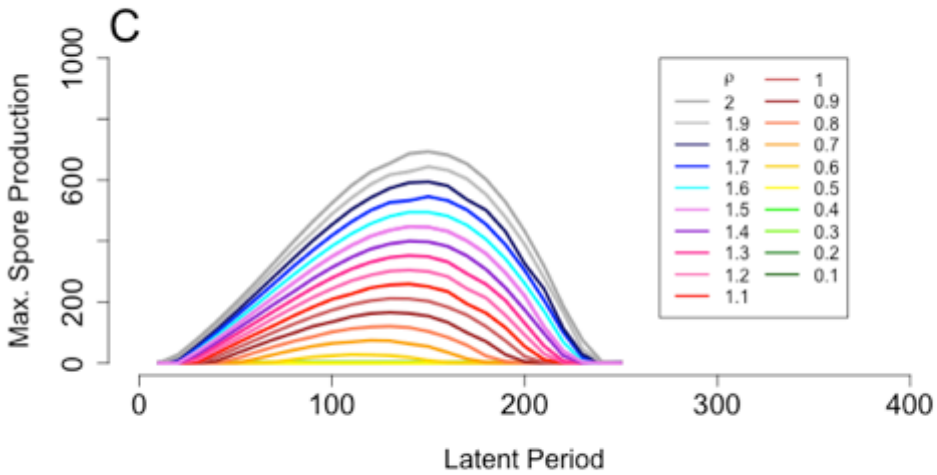
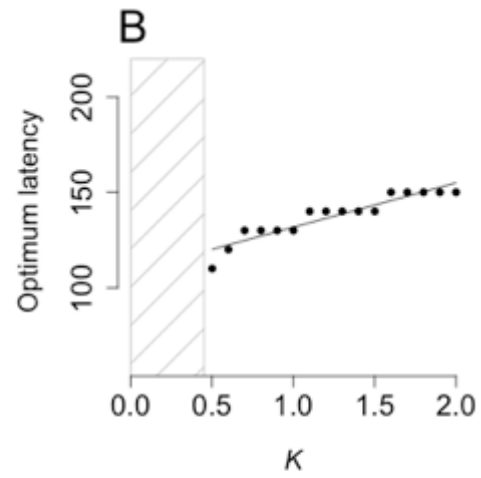
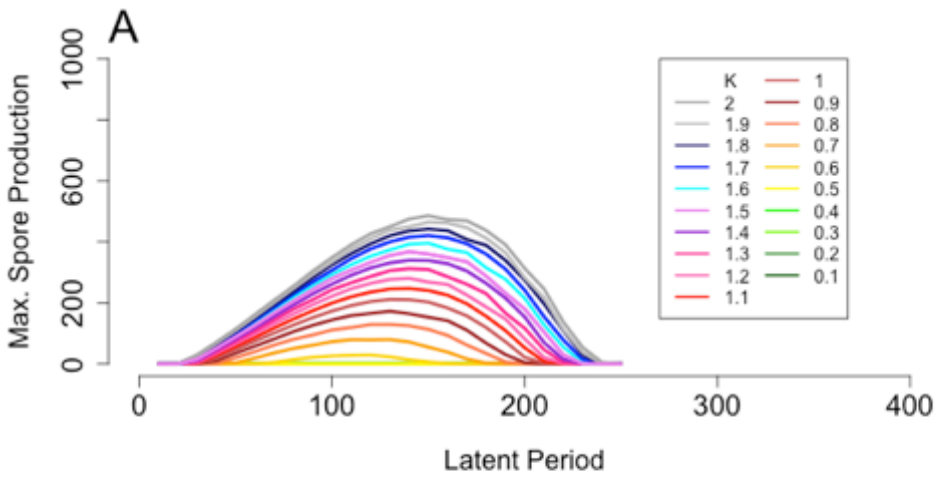
Impact du niveau de ressources sur les épidémies à l'échelle du couvert



Impact du niveau de ressource sur la dynamique des épidémies



Latence optimale pour différents niveaux de ressource



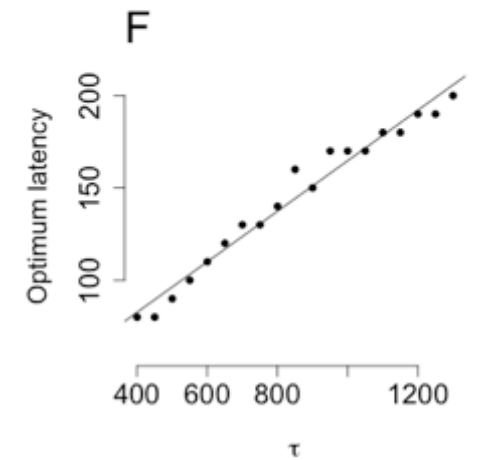
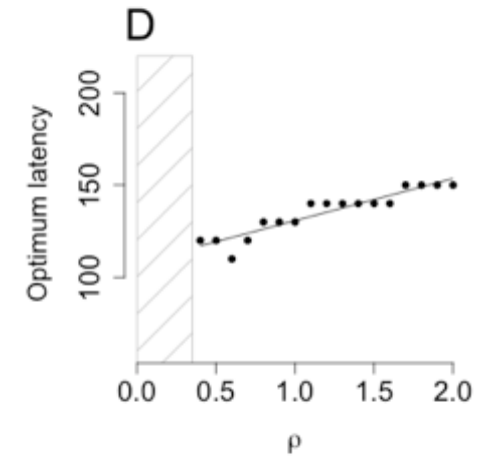
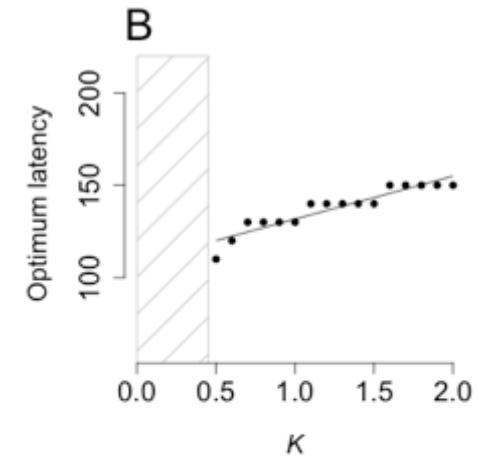
Conclusions - Perspectives

Peut-on déterminer l'optimum de latence théoriquement envisagé ?

L'optimum est-il sensible à la quantité de ressources ?

Les valeurs et variations de l'optimum dépendent-elles du scénario de changement du niveau de ressources ?

- ❖ Pour tous les scénarios testés, la production de spores augmente avec la latence et la quantité de ressources.
- ❖ Pour tous les scénarios testés, la latence optimale augmente avec le niveau de ressources.



Conclusions - Perspectives

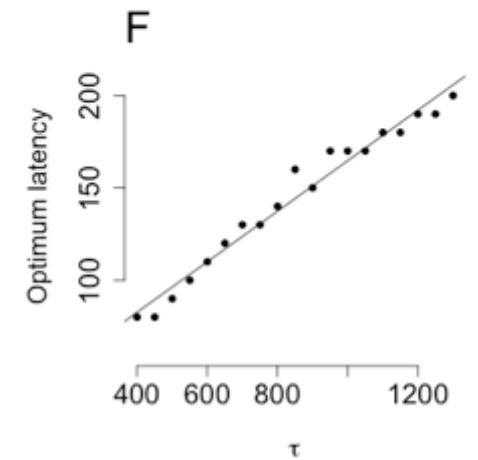
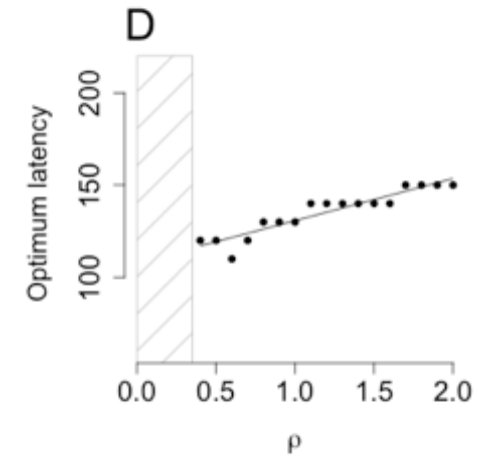
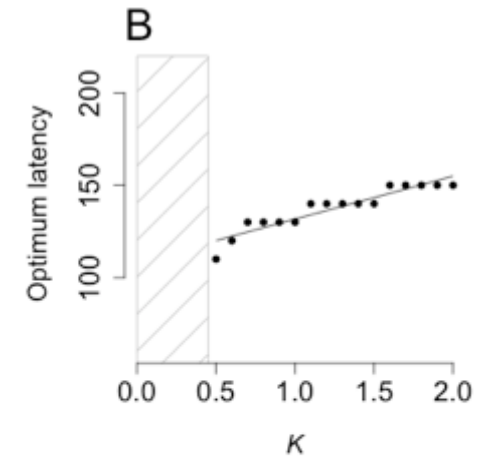
Latence optimale : valeur du paramètre « latence » maximisant la production totale de spores à l'échelle épidémique.

Latence optimale = direction possible d'évolution des pathogènes

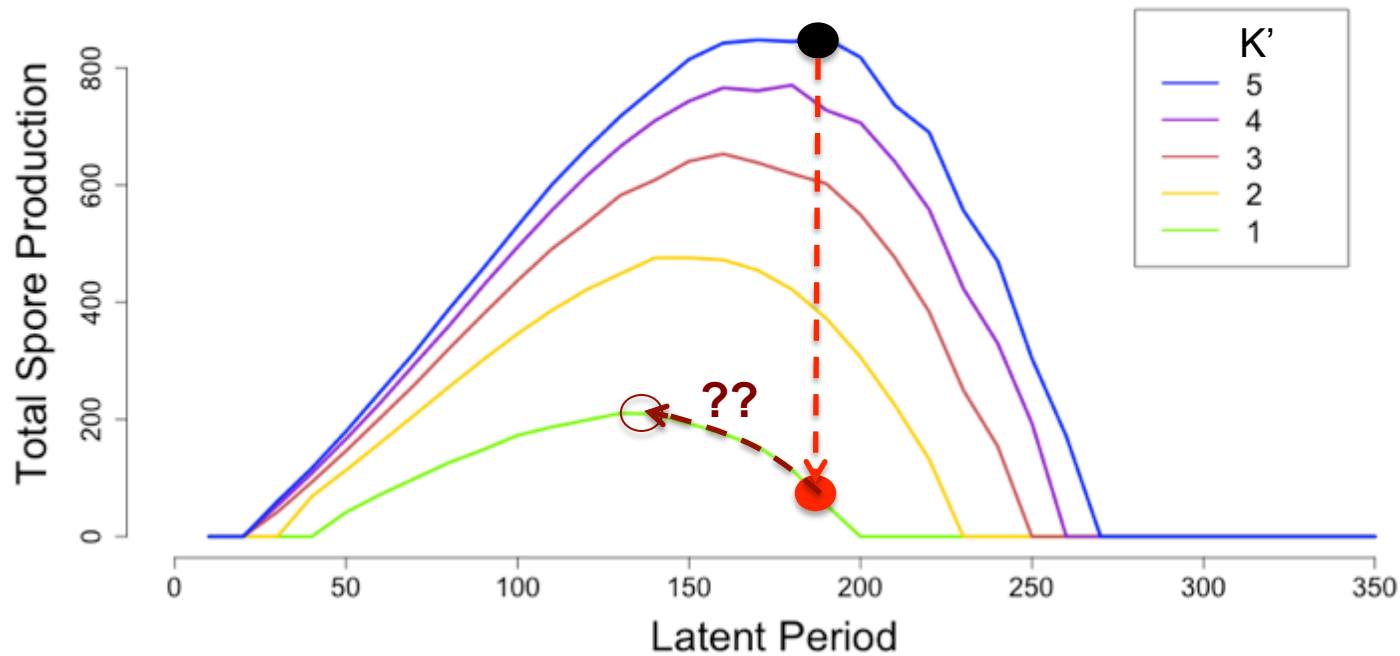
Dans un contexte d'agroécologie :

Diminuer la fertilisation -> favoriser les pathogènes à latences courtes ?

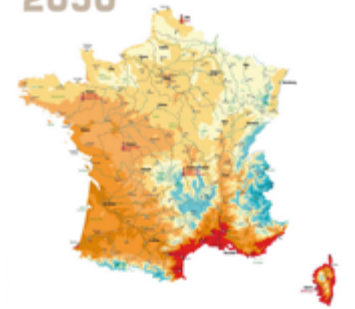
- Progression dans le couvert plus rapide ?
- Production de spores plus faible ?
- Changement des profils d'agresseurs ?
- Compétition accrue entre pathogènes ?



Conclusions - Perspectives

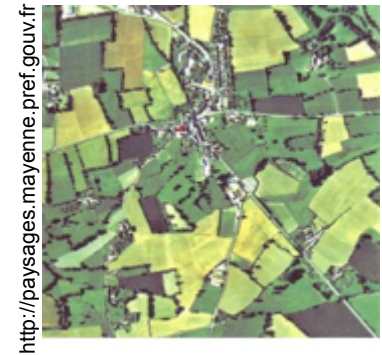


2050



La fertilisation comme levier de commande pour atteindre des propriétés d'autorégulation des agroécosystèmes :

Quelle efficacité d'une mosaïque de parcelles différemment fertilisées ?



<http://paysages.mayenne.pref.gouv.fr>

Merci de votre attention !



Bibliographie :

<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>

Baccar, R. et al. Modelling the effect of wheat canopy architecture as affected by sowing density on Septoria tritici epidemics using a coupled epidemic virtual plant model. *Annals of Botany* **108**, 1179-1194 (2011)

Büschbell T., Hoffmann G.M. The effects of different nitrogen regimes on the epidemiologic development of pathogens on winter- wheat and their control. *Journal of Plant Diseases and Protection*, **99**: 381–403 (1992)

De Roos, AM & L Persson (2013). Population and community ecology of ontogenetic development. Vol. 51. Princeton University Press.

Filella, I., Serrano, L., Serra, J. & Penuelas, J. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Science* **35**, 1400-1405 (1995)

Fraaije, B.A., Lovell, D.J., Coelho, J.M., Baldwin, S. & Hollomon, D.W. PCR-based assays to assess wheat varietal resistance to blotch (*Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum*) and rust (*Puccinia striiformis* and *Puccinia recondita*) diseases. *European Journal of Plant Pathology* **107**, 905-917 (2001)

Gilchrist, M.A., D.L. Sulsky, and A. Pringle. “Identifying Fitness and Optimal Life-History Strategies for an Asexual Filamentous Fungus”. *Evolution* **60**: 970-979 (2006)

Hoffland, E., Jeger, M.J. & Beusichem, M.L. van Effect of nitrogen supply rate on disease resistance in tomato depends on the pathogen. *Plant and Soil* **218**, 239–247 (2000)

Lecompte, F., Abro, M. A. & Nicot, P. C. Can plant sugars mediate the effect of nitrogen fertilization on lettuce susceptibility to two necrotrophic pathogens : *Botrytis cinerea* and *Sclerotinia sclerotiorum* ? *Plant and Soil* **369**, 387-401 (2013)

Lopez-Raez, J. A., Bouwmeester, H. Communication in the Rhizosphere, a Target for Pest Management. *Agroecology and Strategies for Climate Change, Sustainable Agriculture Reviews* **8**: 109-133 (2012)

Lovell, D.J., Parker, S.R., Hunter, T., Royle, D.J. & Coker, R.R. Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant Pathology* **46**, 126-138 (1997)

Metz, J.A.J. & O. Diekmann (1986) The dynamics of physiologically structured populations. Springer Verlag, Lecture Notes in *Biomathematics*, **68**, XII+511 p

Bibliographie, suite:



Naseri, R., Mirzaei, A., Soleimani, R. & Nazarbeygi, E. Response of bread wheat to nitrogen application in calcareous soils of western Iran. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science* **9**, 79-85 (2010)

OLESEN, J.E., MORTENSEN, J.V., JØRGENSEN, L.N. & ANDERSEN, M.N. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield, yield components and nitrogen uptake. *The Journal of Agricultural Science* **134**, 1-11 (2000)

OLESEN, J.E., JØRGENSEN, L.N., PETERSEN, J. & MORTENSEN, J.V. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *Journal of Agricultural Science* **140**, 1-13 (2003)

Pringle, A. & Taylor, J.W. The fitness of filamentous fungi. *Trends in Microbiology* **10**, 474-481 (2002)

Robert, C., Bancal, M.-O. & Lannou, C. Wheat Leaf Rust Uredospore Production on Adult Plants: Influence of Leaf Nitrogen Content and Septoria tritici Blotch. *Phytopathology* **94**, 712-721 (2004)

Robert, C., Bancal, M.-O., Ney, B. & Lannou, C. Wheat leaf photosynthesis loss due to leaf rust, with respect to lesion development and leaf nitrogen status. *The New phytologist* **165**, 227-241 (2005)

Robert, C., Fournier, C., Andrieu, B. & Ney, B. Coupling a 3D virtual wheat (*Triticum aestivum*) plant model with a *Septoria tritici* epidemic model (Septo3D) : A new approach to investigate plant-pathogen interactions linked to canopy architecture. *Functional Plant Biology* **35**, 997-1013 (2008)

Roff. Life History Evolution. (2002) Riverside SINAUER ASSOCIATES, INC. • Publishers Sunderland, Massachusetts USA © Sinauer Associates

Shaner, G. and Finney, R. E. The Effect of Nitrogen Fertilization on the Expression of Slow-Mildewing Resistance in Knox Wheat. *The American Phytopathological Society* **67**, 1051-1056 (1977)

Simon, M. R., Cordo, C. A., Perello, A. E. & Struik, P. C. Influence of nitrogen supply on the susceptibility of wheat to *Septoria tritici*. *Journal of Phytopathology* **151**, 283-289 (2003)

Stearns, S.C. Life history evolution: Successes, limitations, and prospects. *Naturwissenschaften* **87**, 476-486 (2000)

Walters, D.R. & Bingham, I.J. Influence of nutrition on disease development caused by fungal pathogens : implications for plant disease control. *Annals of Applied Biology* **151**, 307-324 (2007)



Berner D., Lagopodi A. L., Kashefi J., Mukhina Z., Kolomiets T., Pankratova L., Kassanelly D., Cavin C., Smallwood E. Field assessment, in Greece and Russia, of the facultative saprophytic fungus, *Colletotrichum salsolae*, for biological control of Russian thistle (*Salsola tragus*). *Biological Control* **76**, 114-123 (2014)

Bruckart, W.L., Eskandari, F.M. & Berner, D.K. Characterization and evaluation of *Ramularia crupinae*, a candidate for biological control, and of its host, two varieties of *Crupina vulgaris* in the United States. *Biological Control* **71**, 40-48 (2014).

De Miranda B. E. C., Ferreira B. W., Alves J. L., De Macedo D. M., Barreto R. W. *Pseudocercospora lonicerigena* a leaf spot fungus on the invasive weed *Lonicera japonica* in Brazil. *Australasian Plant Pathology* **43** (3), 339-345 (2014)

Dhileepan, K. et al. Introduction, Establishment, and Potential Geographic Range of *Carmenta* sp. nr *ithacae* (Lepidoptera: Sesiidae), a Biological Control Agent for *Parthenium hysterophorus* (Asteraceae) in Australia. *Environmental Entomology* **41**, 317-325 (2012).

Goodall J., Witkowski E. T. F., Andrew J. McConnachie and Keen C. Altered growth, population structure and realised niche of the weed *Campuloclinium macrocephalum* (Asteraceae) after exposure to the naturalised rust *Puccinia eupatorii* (Pucciniaceae). *Biological Invasions* **14** (205) (2012)

Hameed, K. M., Saadoun, I. M., Al-Shyab, Z. Potential Biological Control of Orobanche by Fungi Isolated from Diseased Specimens in Jordan. *The Plant Pathology Journal* **17** (4), 257-263 (2001)

Kotan, R., Okutucu, A., Ala Görmez, A., Karagoz, K., Dadasoglu, F., Karaman, İ., Hasanekoglu, İ. and Kordali, Ş. Parasitic Bacteria and Fungi on Common Mistletoe (*Viscum album* L.) and Their Potential Application in Biocontrol. *Journal of Phytopathology*, **161**, 165–171 (2013)

De Macedo, D.M. de, Pereira, O.L., Wheeler, G.S. & Barreto, R.W. *Corynespora cassicola* f. sp. *schinii*, a Potential Biocontrol Agent for the Weed *Schinus terebinthifolius* in the United States. *Plant Disease* **97**, 496-500 (2013).

Skipp R. A., Bourdôt G. W., Hurrell G. A., Chen L. Y., Wilson D. J., Saville D. J.. *Verticillium dahliae* and other pathogenic fungi in *Cirsium arvense* from New Zealand pastures: occurrence, pathogenicity and biological control potential. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **56** (1) (2013)

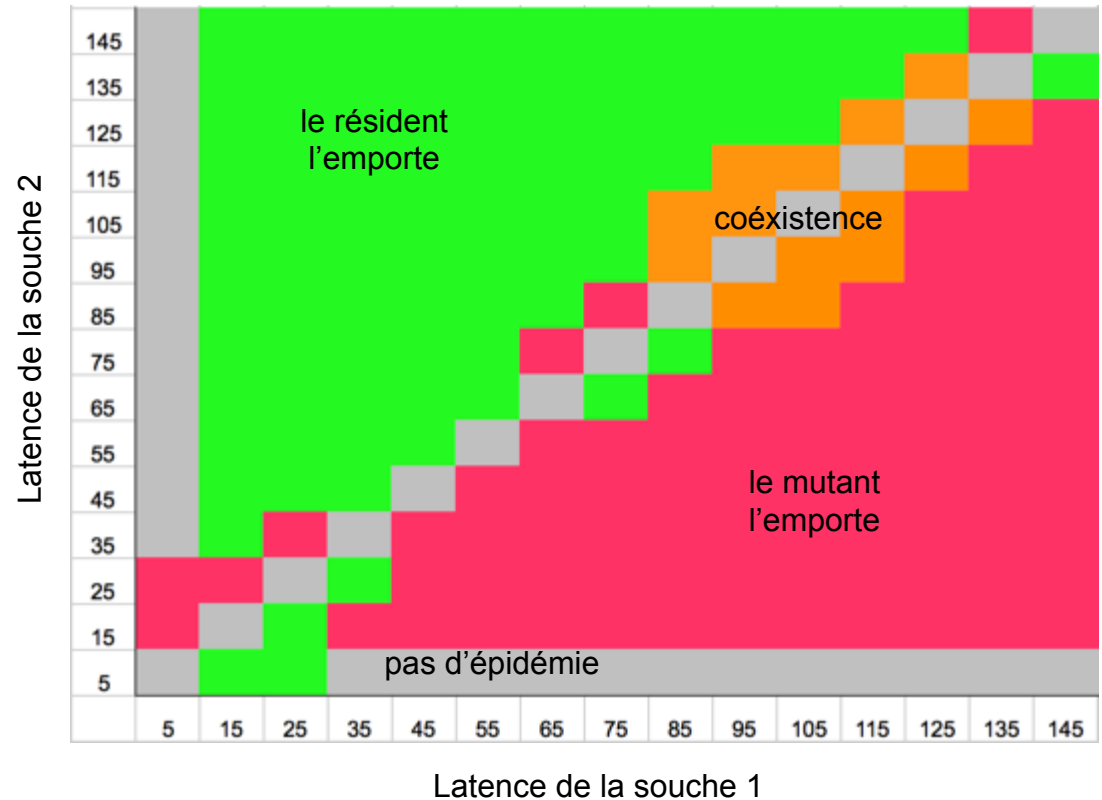
Triki M. A., Hadj-Taieb S. K., Mellouli I. H., Rhouma A., Gdoura R., Hassaïri A. Identification and screening of bacterial isolates from Saharan weeds for *Verticillium dahliae* control. *Journal of Plant Pathology* **94** (2), 305-311 (2012)

Définition de la fitness pour nos pathogènes

- Utilisation des outils de la dynamique adaptative

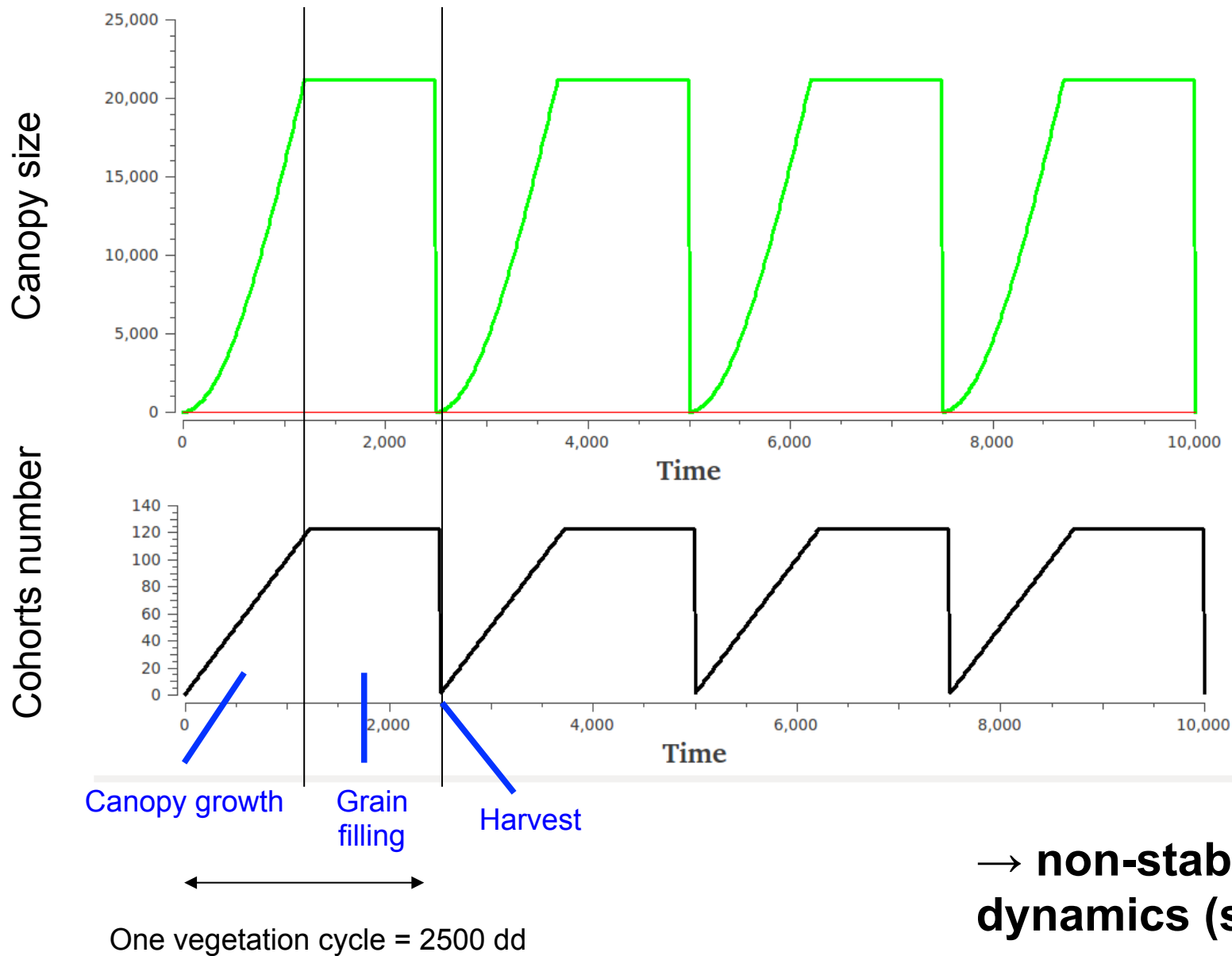
La latence optimale déterminée précédemment permet-elle l'invasion ?

- Compétition entre deux biotrophes
- Seule différence = durée de latence (fertilisation = 2)
- Pas d'infection multiple d'un patch
- « pairwise invasibility plots » (PIPs)

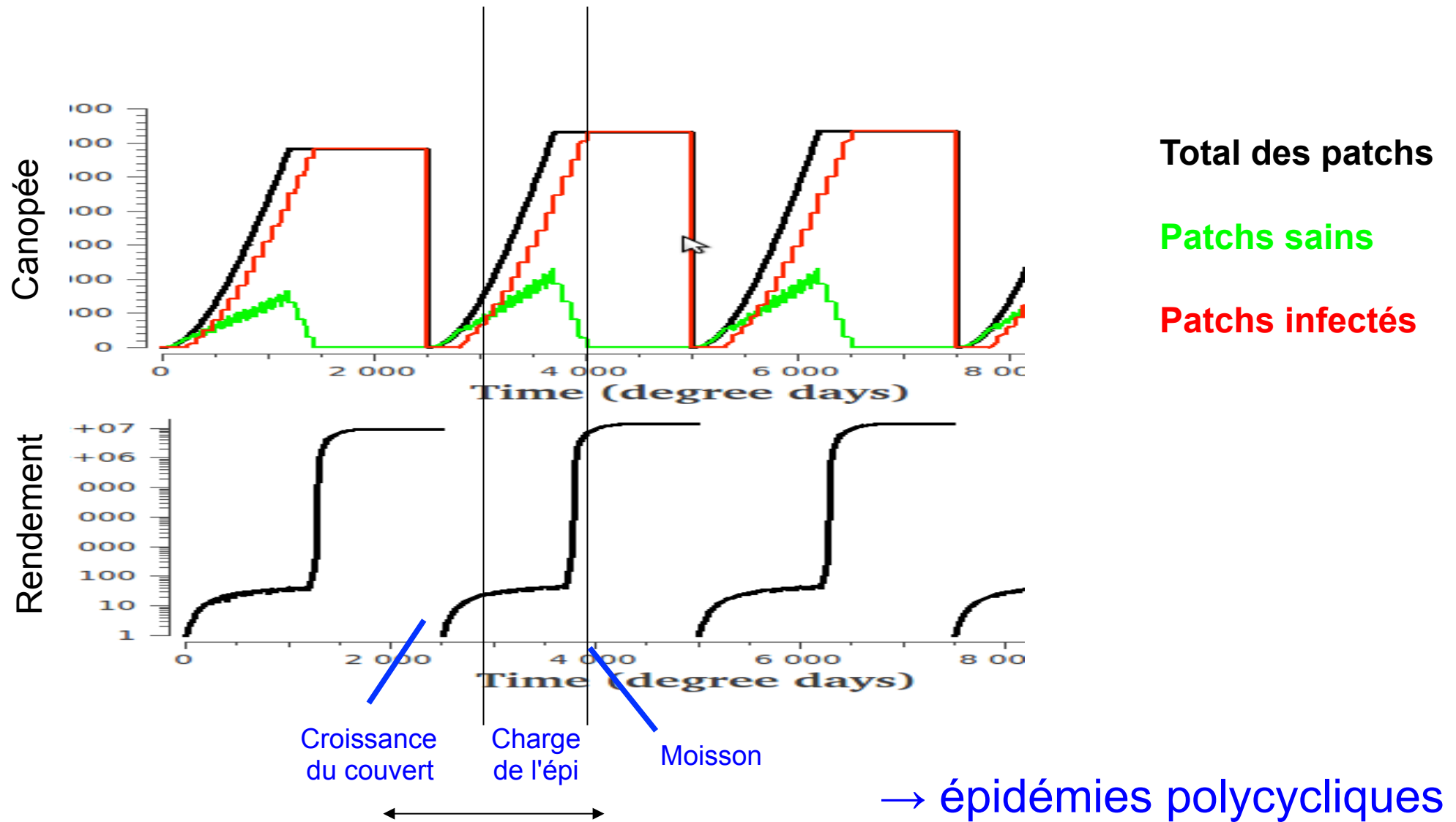


→ **compétitions multiples pour repérer d'éventuelles Stratégies Evolutivement Stables (ESS) ou étudier la compétition inter-spécifique**

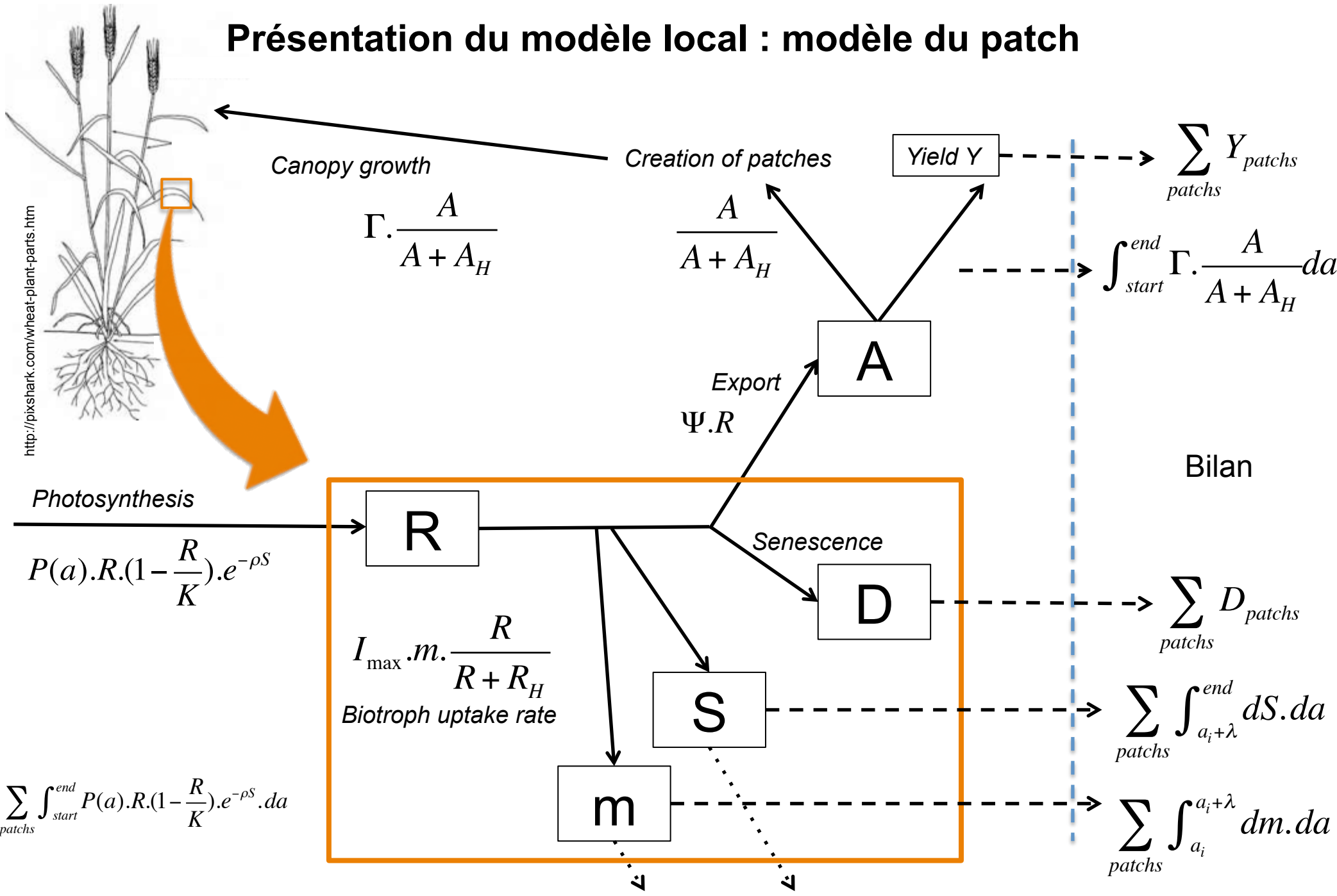
Simulation outputs for healthy plants

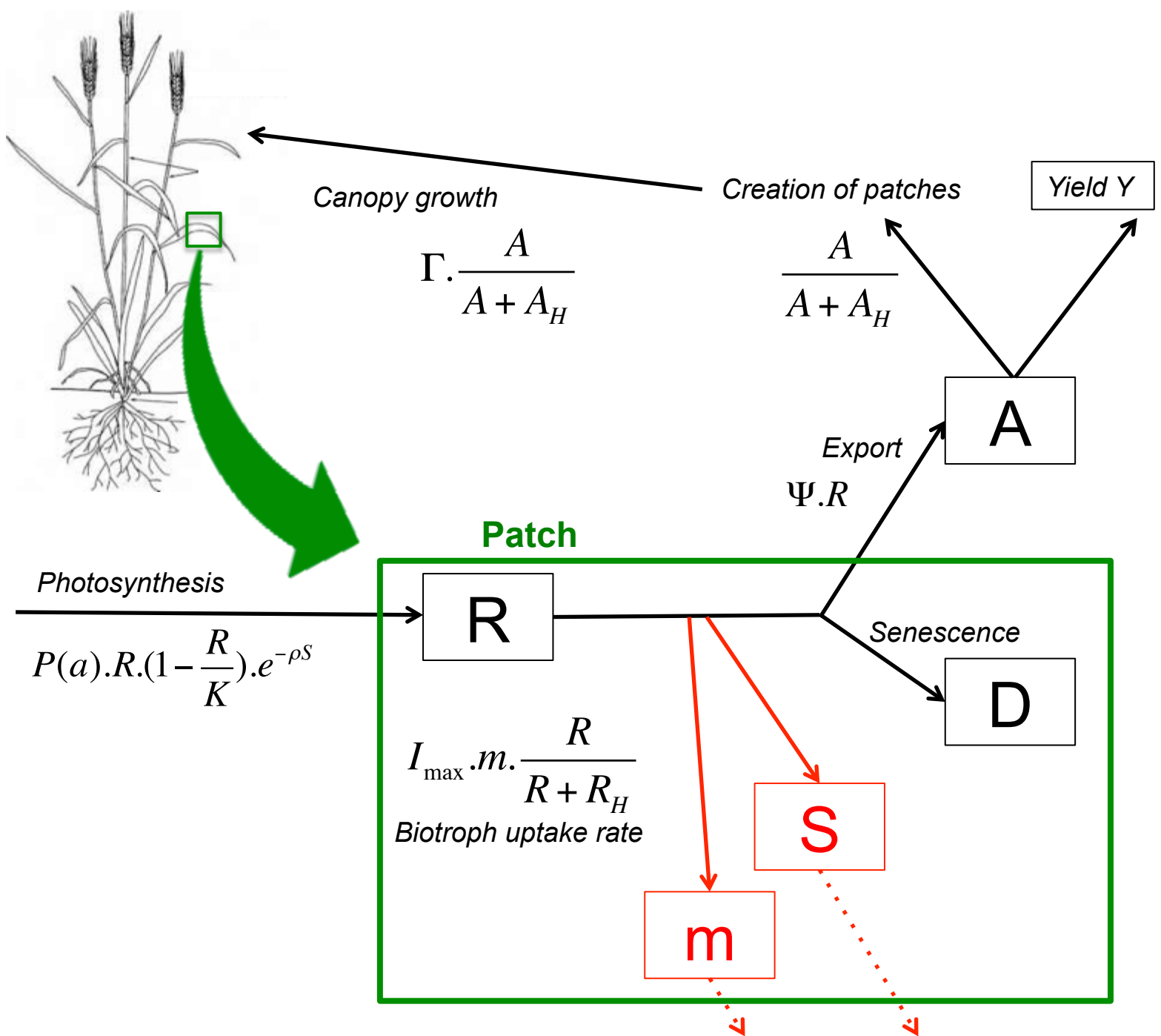


Résultats des simulations pour une plante infectée



Présentation du modèle local : modèle du patch





Un exemple de biotrophes : la rouille des céréales

Le Rouille des céréales

(*Puccinia graminis*, Basidiomycètes Pucciniomycètes)

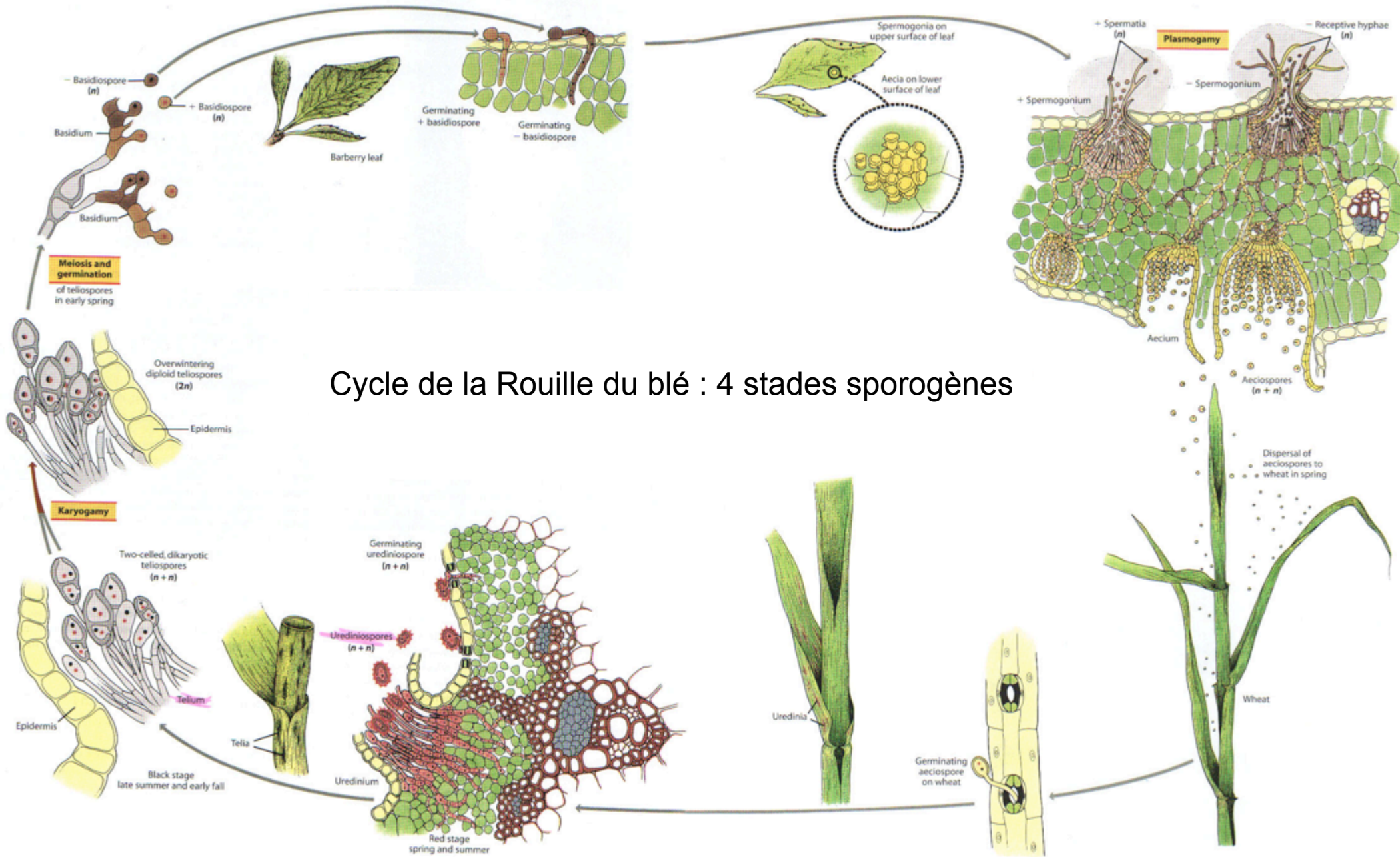
Cycle dixène (blé/Epine-vinette), à quatre stades sporogènes différents

Entraine une diminution de la surface foliaire photosynthétique, donc une perte de rendement.

Problème actuel : émergence de nouvelles souches virulentes



Un exemple de biotrophes : la rouille des céréales



Cycle de la Rouille du blé : 4 stades sporogènes

<http://www.chpwner.org/wiki-scholars/biology/classification/fungi/basidiomycota/Wheat%20Rust.jpg>

Contexte

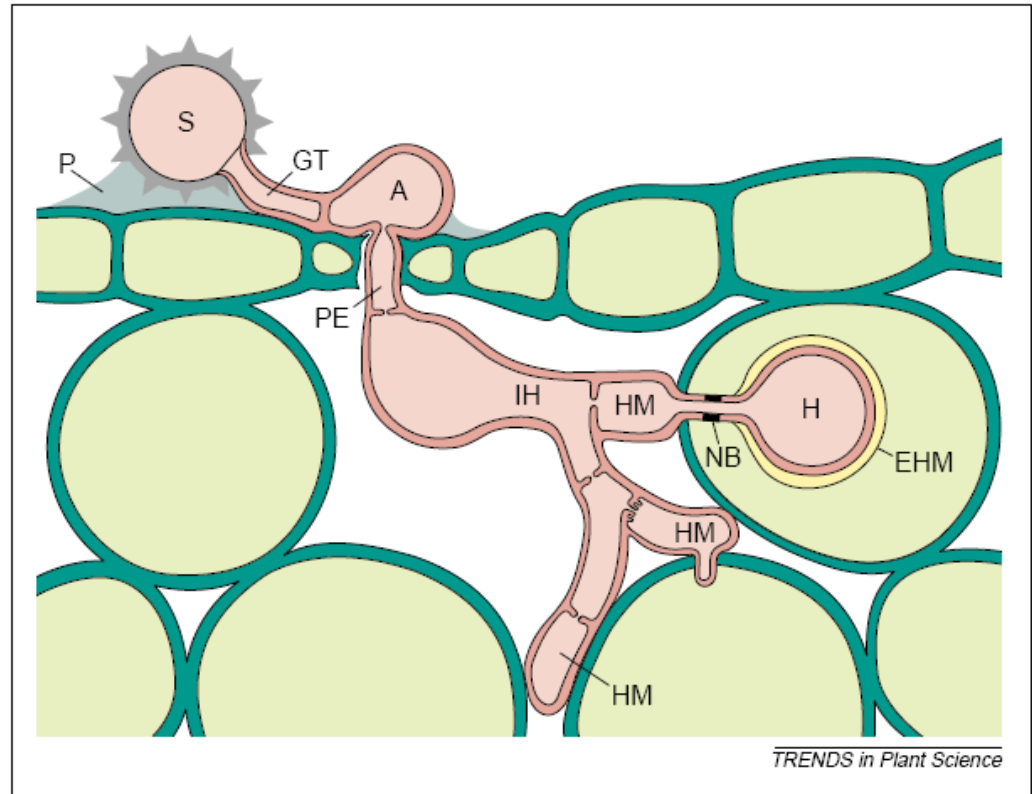
Objectifs/Questions

Première année

Perspectives

Caractéristiques de l'infection biotrophe

Biotrophic infection by *Uromyces fabae* (dicaryon). A germ tube (GT) emerges from an urediospore (S) attached to the host by an adhesion pad (P). After recognition of the guard cell lip, an appressorium (A) develops over the stomatal pore. The penetration hyphae (PE) penetrates into the substomatal chamber and elongates into an infection hyphae (IH). When the tip of the infection hyphae contacts a host cell wall, a haustorial mother cell (HM) is formed from which the haustorium (H) invades the host cell. Unique feature of the dikaryotic haustorium are the dark-staining neckband (NB) around the haustorial neck and the interfacial, extra-haustorial matrix (yellow) surrounded by the extra-haustorial membrane (EHM). After forming the first haustorium, the infection hypha branches and further intercellular hyphae, haustorial mother cells (HM) and haustoria are formed.



D'après Mendgen & Hahn (2002)

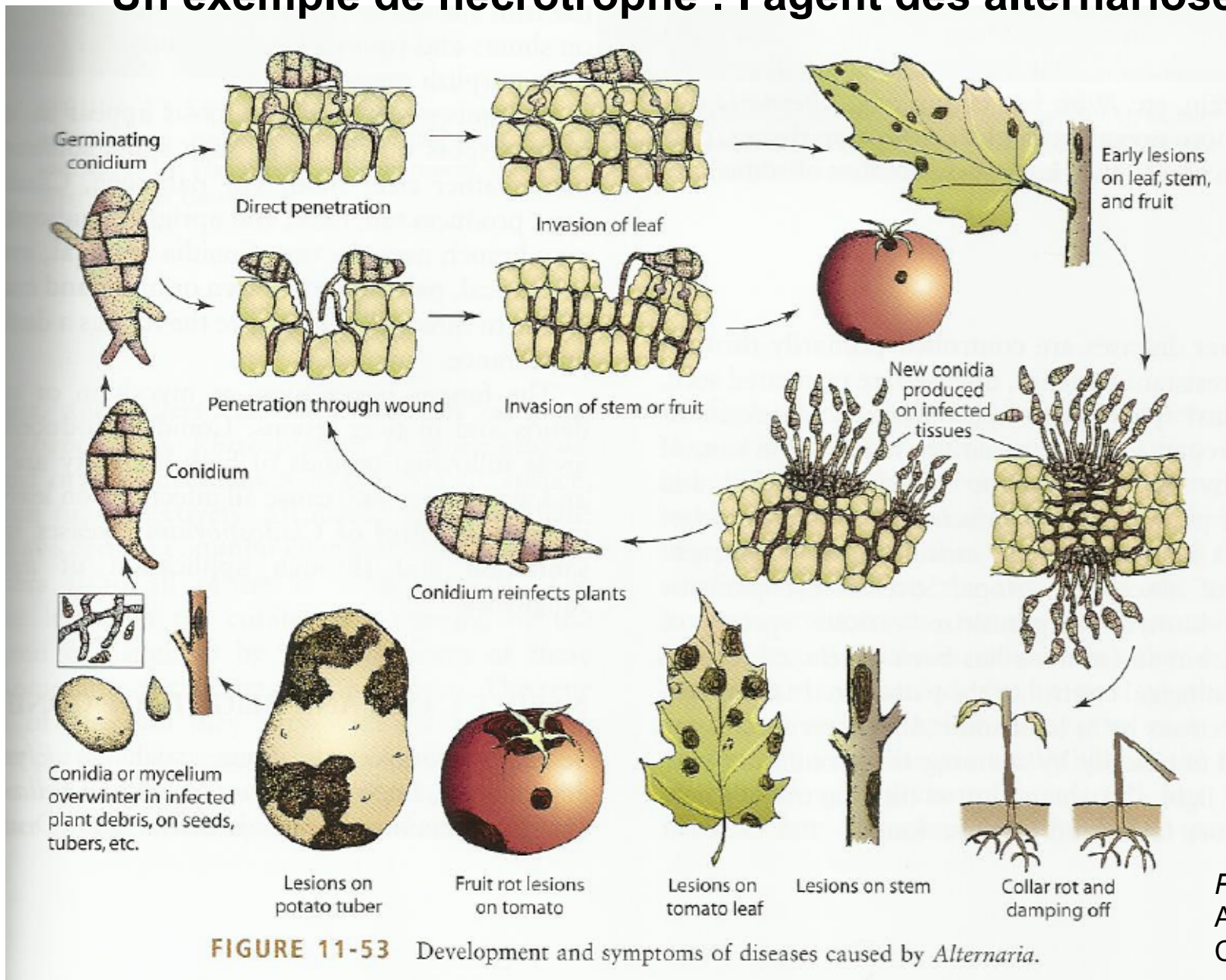
Un exemple de nécrotrophe : l'agent des alternarioses

L'agent des alternarioses

(*Alternaria alternata*, Ascomycète, Pleosporacés)

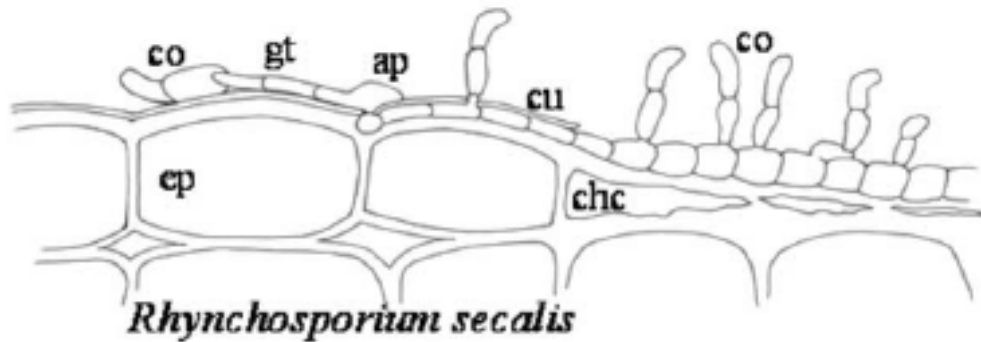


Un exemple de nécrotrophe : l'agent des alternarioses



Plant pathology
 Agrios
 Cinquième édition

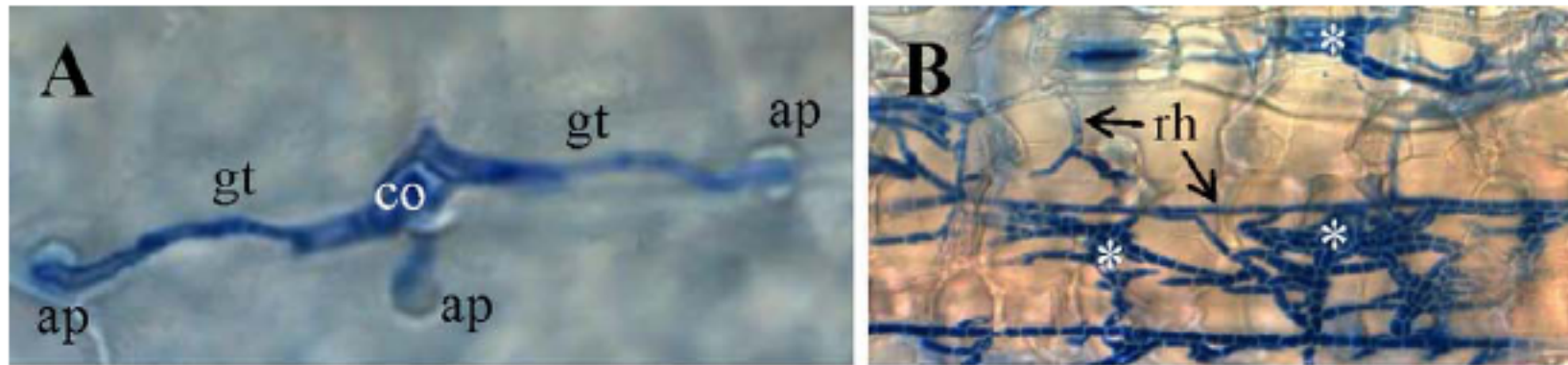
Caractéristiques de l'infection nécrotrophe



The two-celled-conidium (co) of the necrotroph *Rhynchosporium secalis* forms a germ tube (gt) and an appressorium (ap) on the surface of its host plant. After penetration through the cuticle (cu), thin hyphae with distant septae grow subcuticularly, followed by thick hyphae with short cells, which grow on the leaf surface and form conidia.

Croissance subcuticulaire du nécrotrophe avec émission de phytotoxines = attaque cytotoxique qui provoque la mort des cellules environnantes.

D'après
Horbach & coll., 2011



(A and B), *R. secalis*. On the host cuticle (A), the conidium (co) germinates with a germ tube (gt) to form an appressoria (ap). At later stages (B) the leaf is colonized by runner hyphae (rh) and hyphal associations called stroma (asterisk) are formed, where new conidia are produced.

Un exemple d'hémibiotrophe: l'agent de la septoriose du blé

L'agent de la septoriose du blé

(*Septoria tritici*, Ascomycètes Pezizomycètes Dothidéales)

syn : *Mycosphaerella graminicola*

Cycle dixène (blé/érable), à trois stades sporogènes différents

Entraine une diminution forte de la surface foliaire photosynthétique, donc une perte de rendement.

Principal pathogène du blé en France actuellement



<http://www.bbsrc.ac.uk/news/food-security/2011/110609-pr-genome-sequence-reveal-achilles-heels.aspx>

Un exemple d'hémibiotrophe: l'agent de la septoriose du blé

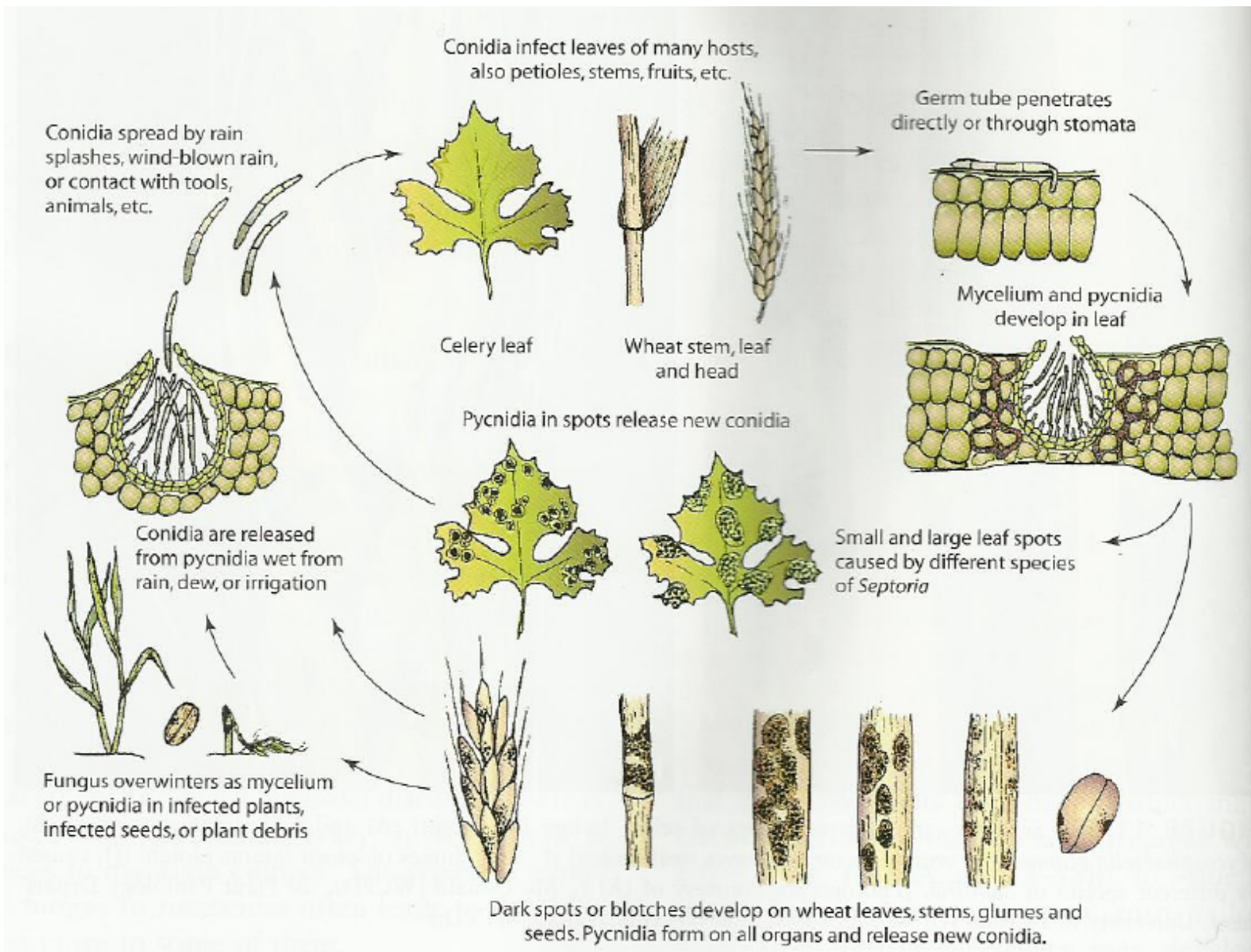
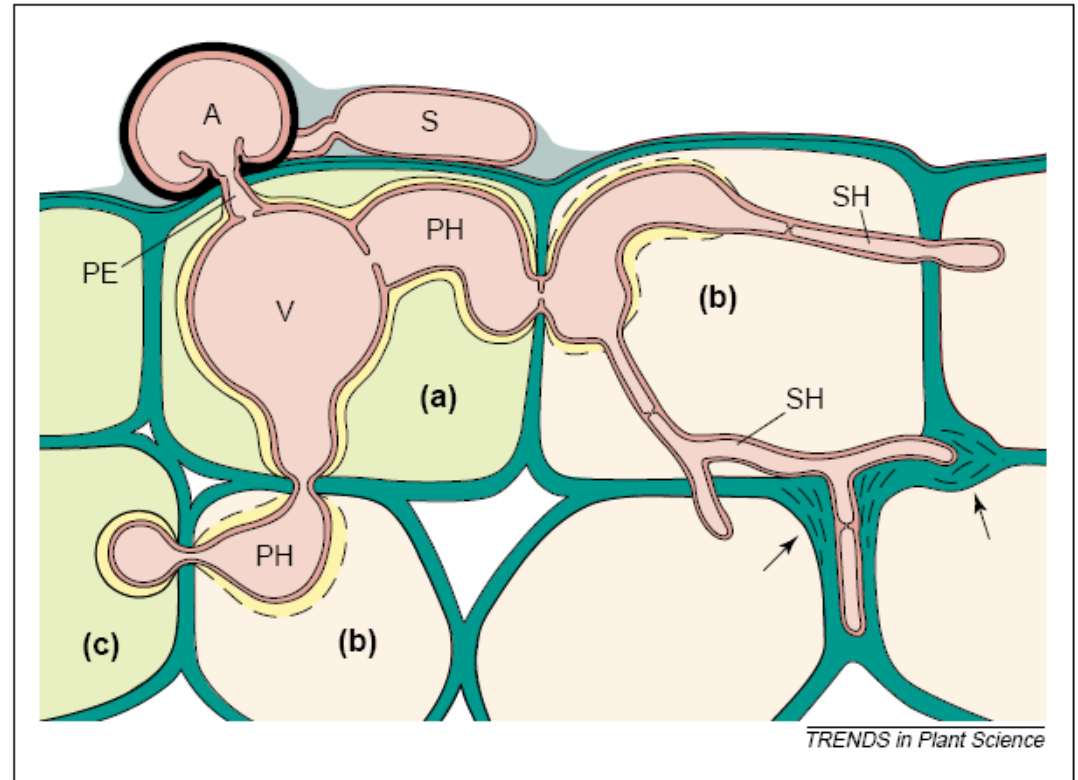


FIGURE 11-59 Development of diseases caused by *Mycosphaerella graminicola* and *Septoria* spp.

Plant pathology
 Agrios
 Cinquième édition

Caractéristiques de l'infection hémibiotrophe

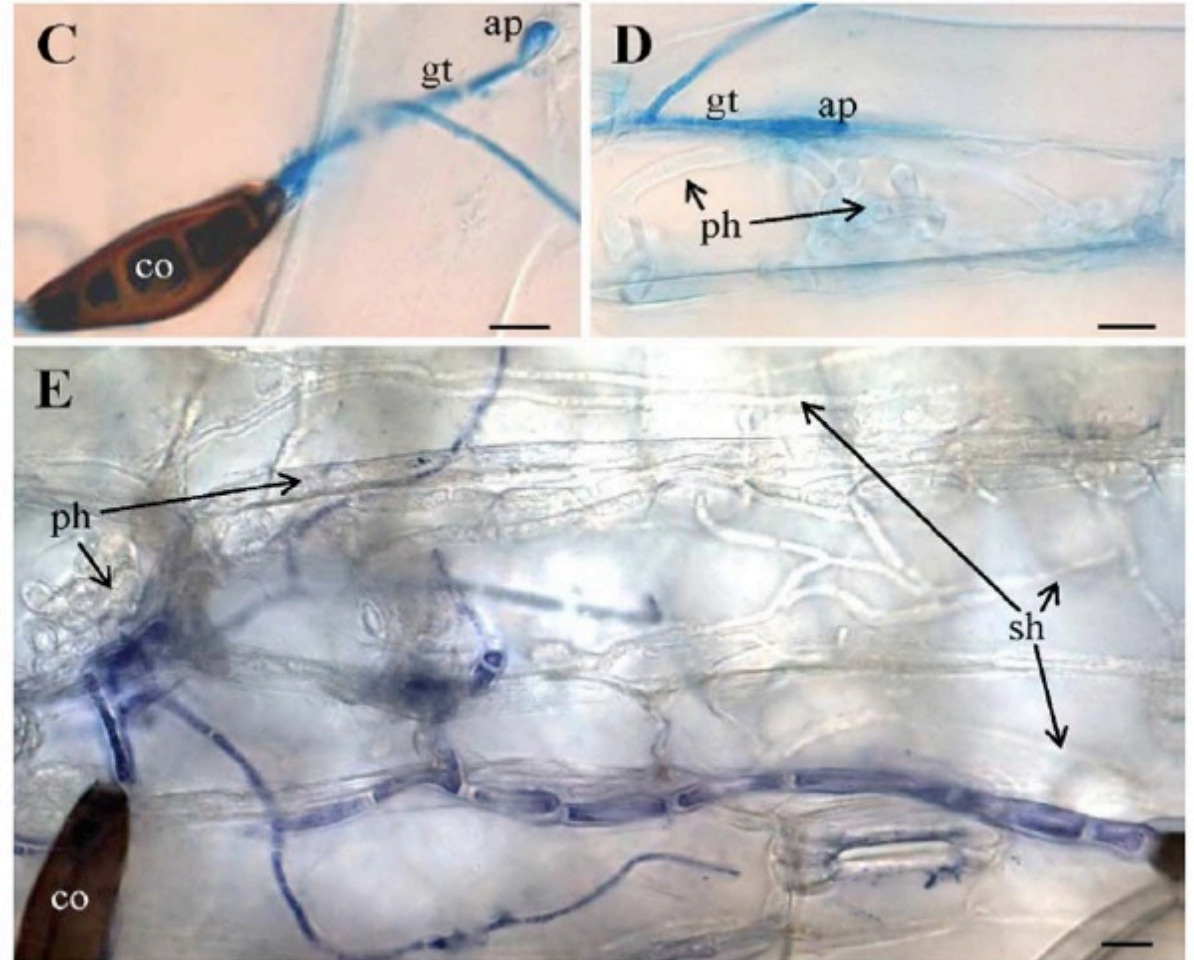
Hemibiotrophic infections by *Colletotrichum lindemuthianum*. A spore (S) attached to the host surface germinates to form a short germ tube, which differentiates into a domed, melanized appressorium (A). The penetration hyphae (PE) develops on the appressorium base, transforming internal pressure into mechanical force to pierce the cuticle and the cell wall. The penetration hypha swells within the epidermal cell to form a vesicle (V) and broad primary hyphae (PH), which are surrounded by the invaginated plant plasma membrane. The host protoplast remains alive during the biotrophic stage (a) and an interfacial matrix separates the protoplasts of fungus and host (yellow). One or two days after penetration, plant plasma membrane desintegration starts, leading to host cell death (b). As new host cells are colonized by primary hyphae, the sequence of a transient biotrophic phase followed by cell killing is repeated (c). The relationship ends as soon as narrow secondary hyphae (SH) develop, which are not surrounded by the host membrane and lack an interfacial matrix. Host walls break down because of the secretion of large amounts of cell-wall-degrading enzymes by secondary hyphae (arrows).



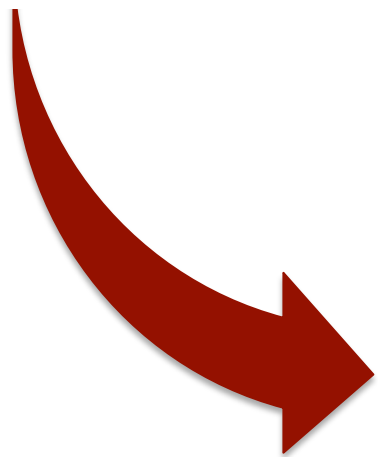
D'après Mendgen & Hahn (2002)

Caractéristiques de l'infection hémibiotrophe

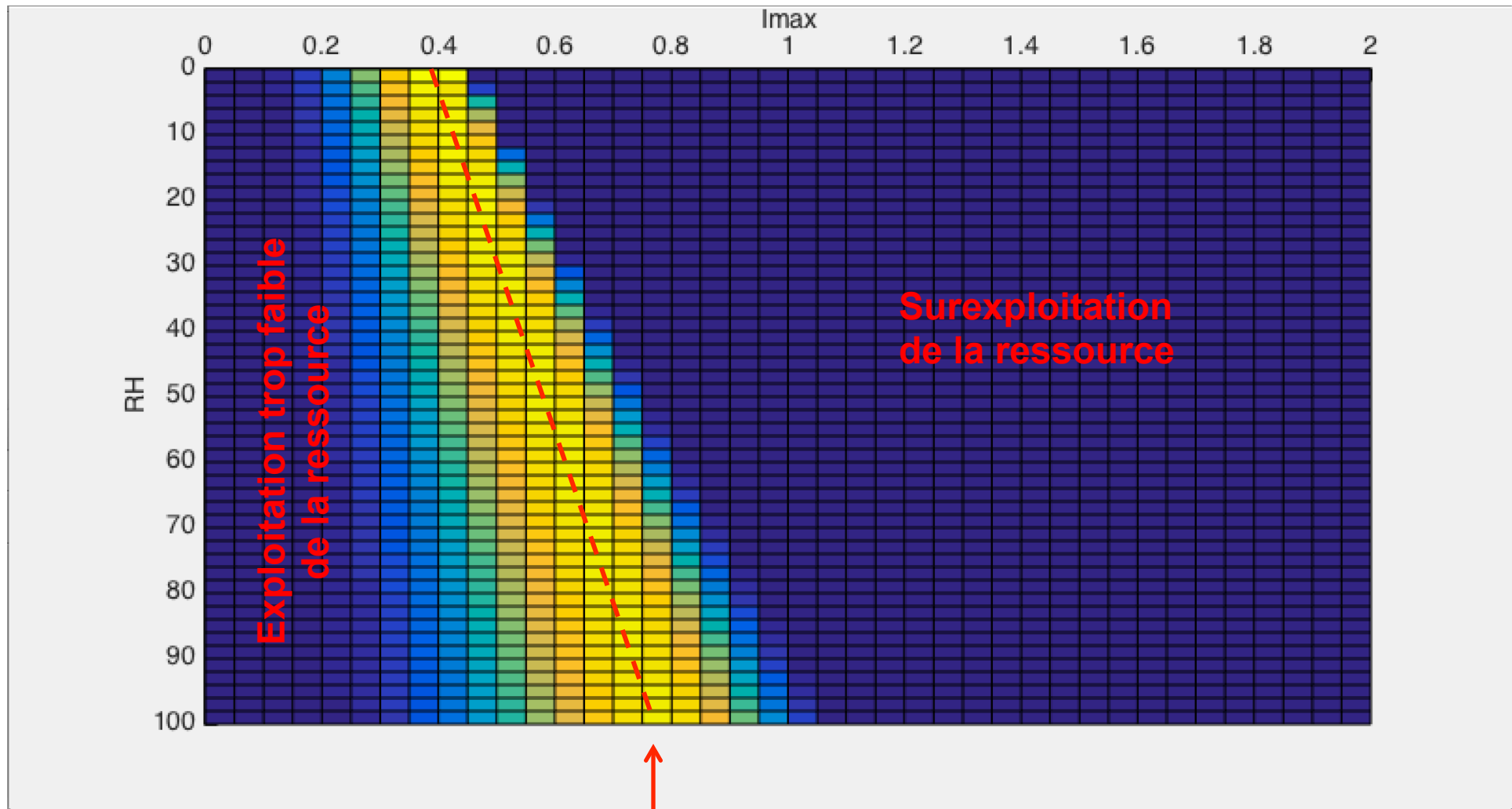
(C-E) *B. sorokiniana*. Multi-celled conidia (co) form germ tubes (gt) and appressoria (ap) (C), and invade the leaf to differentiate thick biotrophic primary hyphae (ph). At later stages (E), primary hyphae grow out to form necrotrophic secondary hyphae (sh), which efficiently kill the host cell.



D'après Horbach & coll., 2011



Etude de quelques paramètres liés à la virulence du pathogène



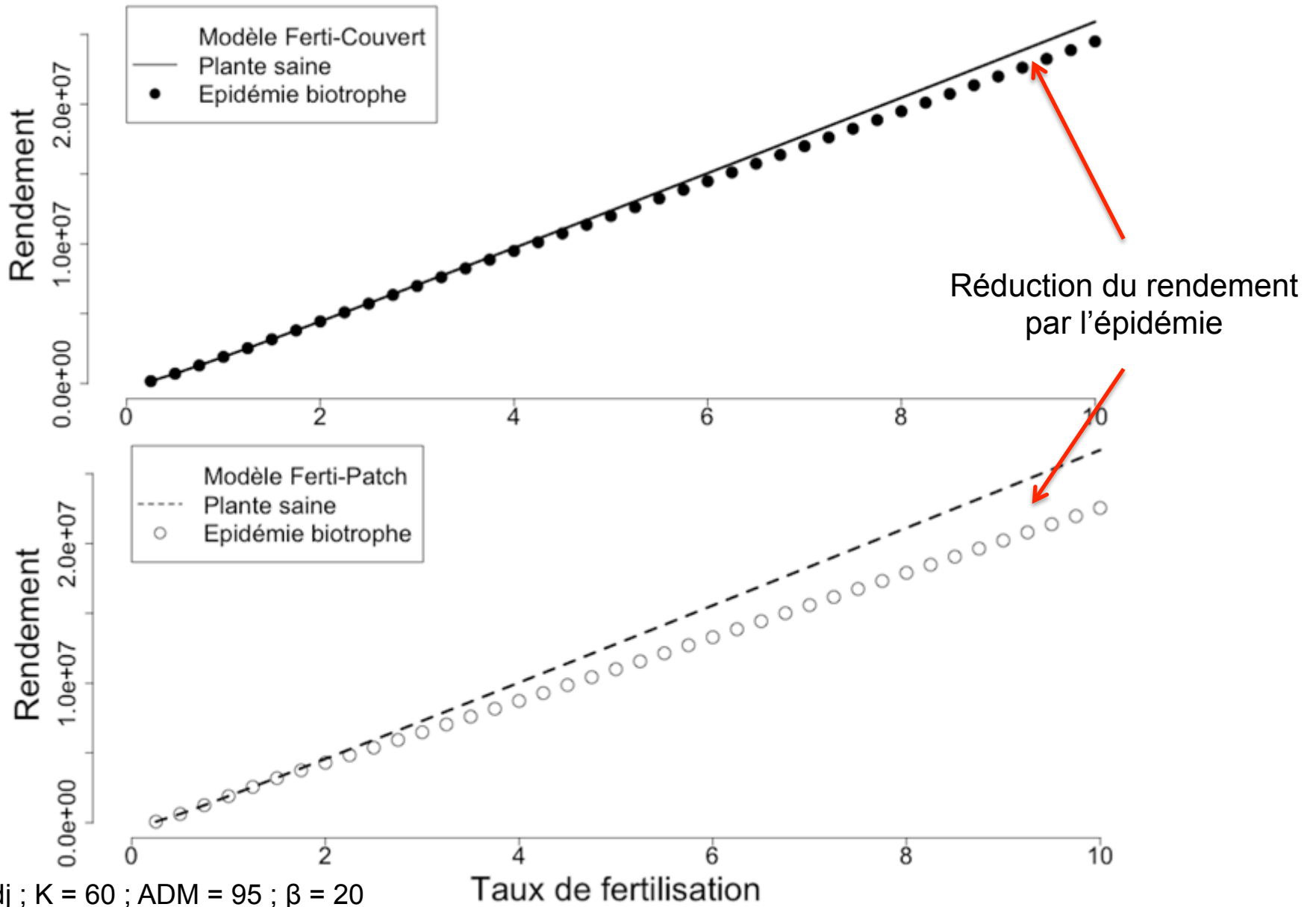
Exploitation trop faible
de la ressource

Surexploitation
de la ressource

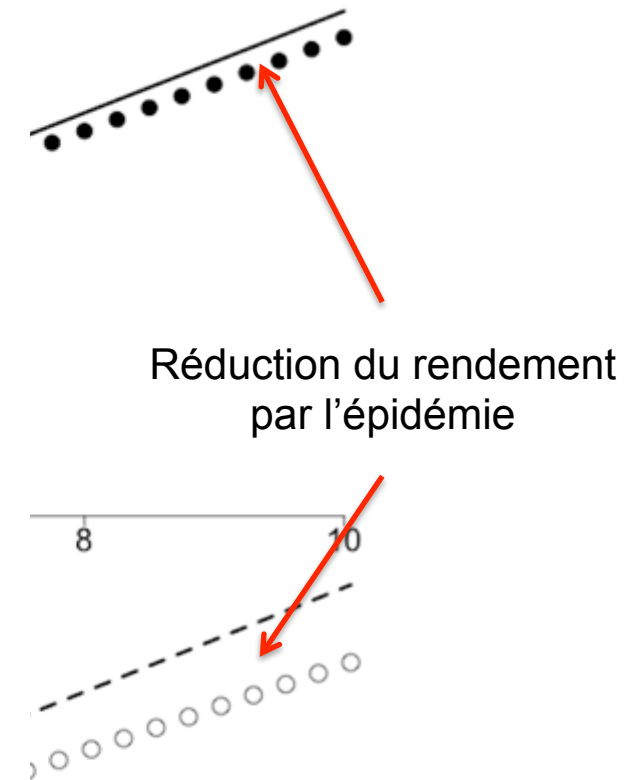
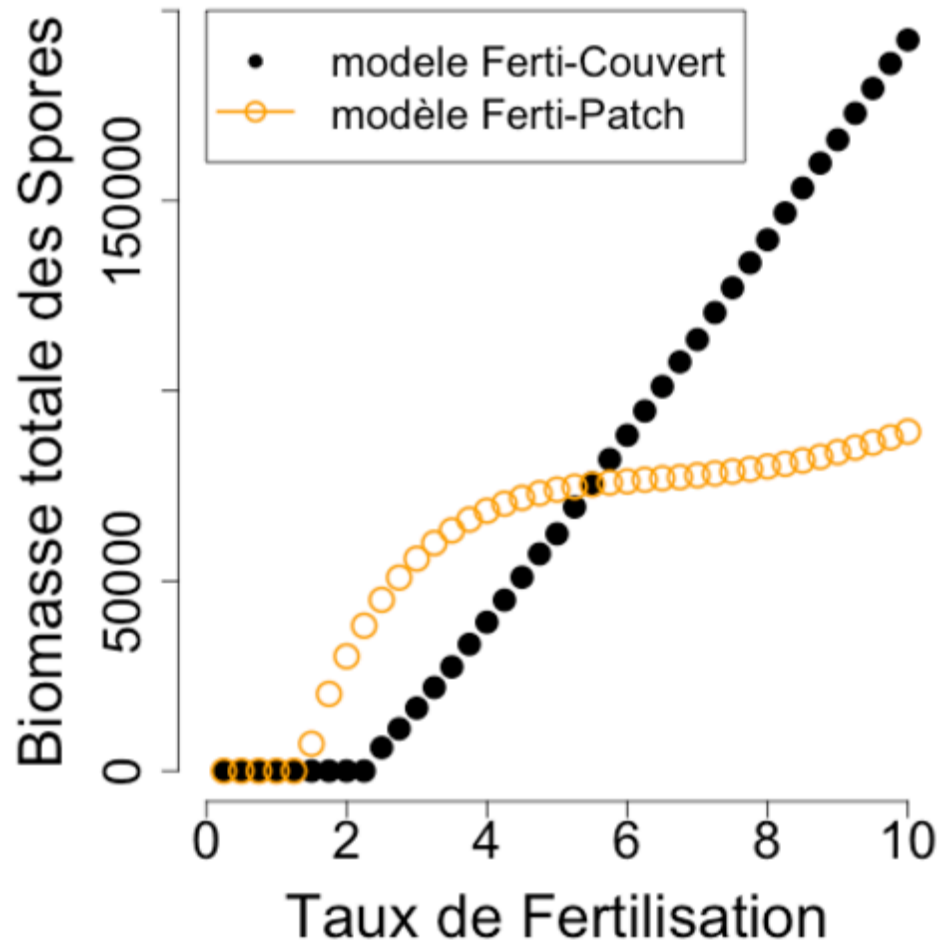
« ligne de crête » de la biomasse
maximale de spores produite

RH et Imax sont les paramètres de forme de la
réponse fonctionnelle de type 2 déterminant la
croissance du mycélium

Impact de la fertilisation sur le pathosystème



Impact de la fertilisation sur le pathosystème



Le biotrophe produit moins de spores pour une épidémie plus virulente dans le modèle Ferti-Patch que dans le modèle Ferti-Couvert. Comment l'expliquer ?

Latence = 100 dj ; K = 60 ; ADM = 95 ; β = 20

On a montré que le modèle Ferti-Patch a un comportement plus abrupt que le modèle Ferti-Couvert à fertilisation élevée.

Les simulations montrées précédemment étaient réalisées à Latence=100

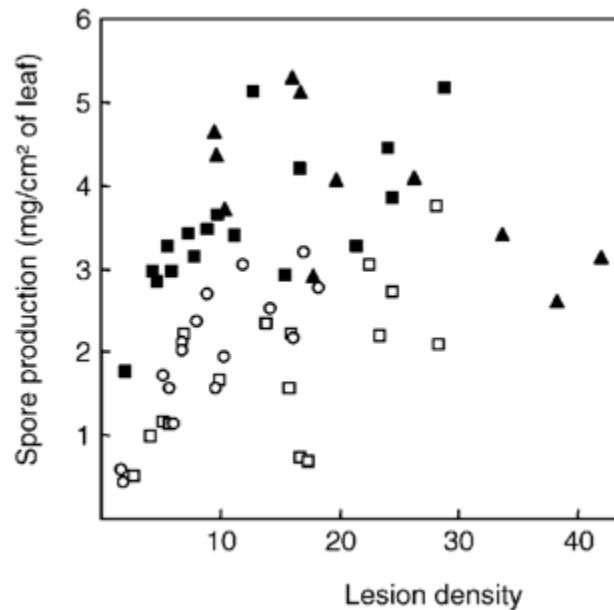
De plus, on a vu qu'à cette valeur de Latence, il y a beaucoup de production de mycélium (donc exploitation forte de la ressource avant sporulation) par le biotrophe dans le modèle Ferti-Patch.

Maintenant qu'on a compris ce qu'on fait, remonter un ES et les histogrammes pour une latence plus basse : environ 50

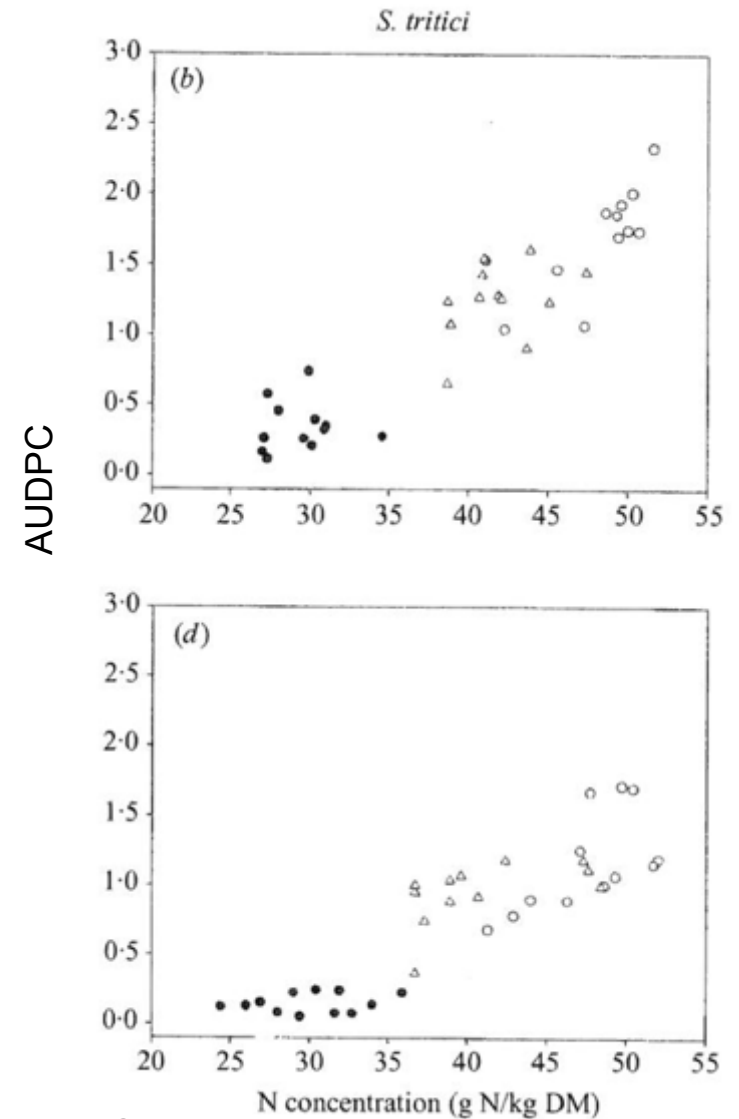
Liens entre fertilisation et cycle infectieux : connaissances actuelles

Echelle de l'organe :

- Correlation + entre concentration en nutriments et épidémies (Olesen et al., 2003 ; Robert et al., 2004, 2005 ; Lecompte et al., 2012)



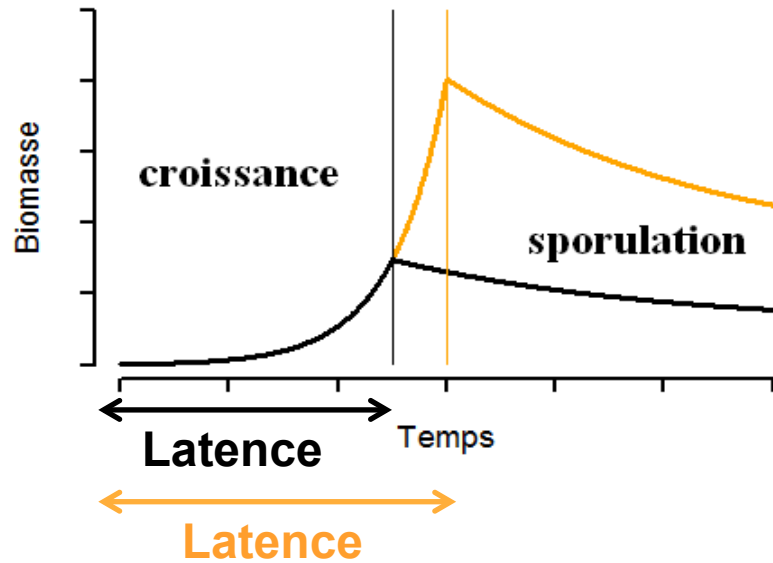
Robert et al., 2004



Olesen et al., 2003

s d'histoire de vie réagissent à différents profils de métabolites ?
-> nutriments -> traits

Cycle de vie simplifié des pathogènes fongiques des cultures



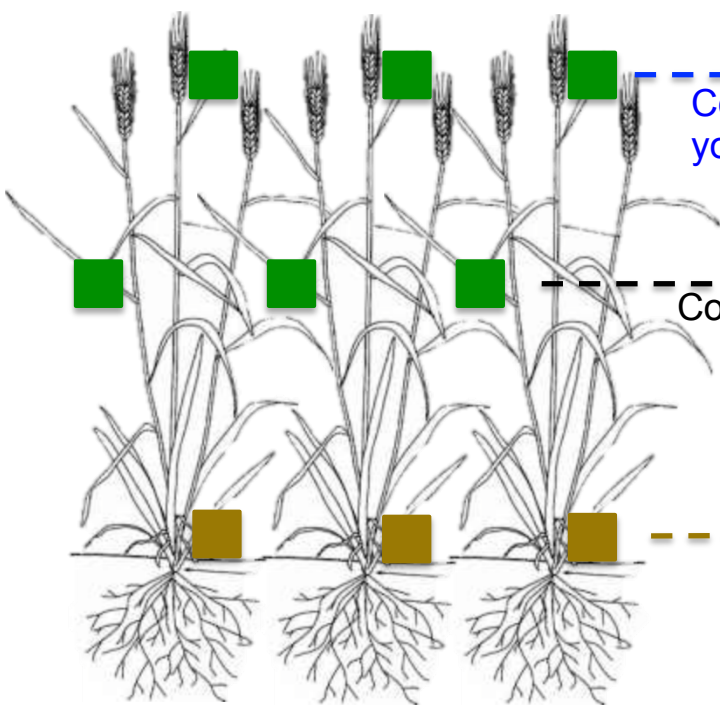
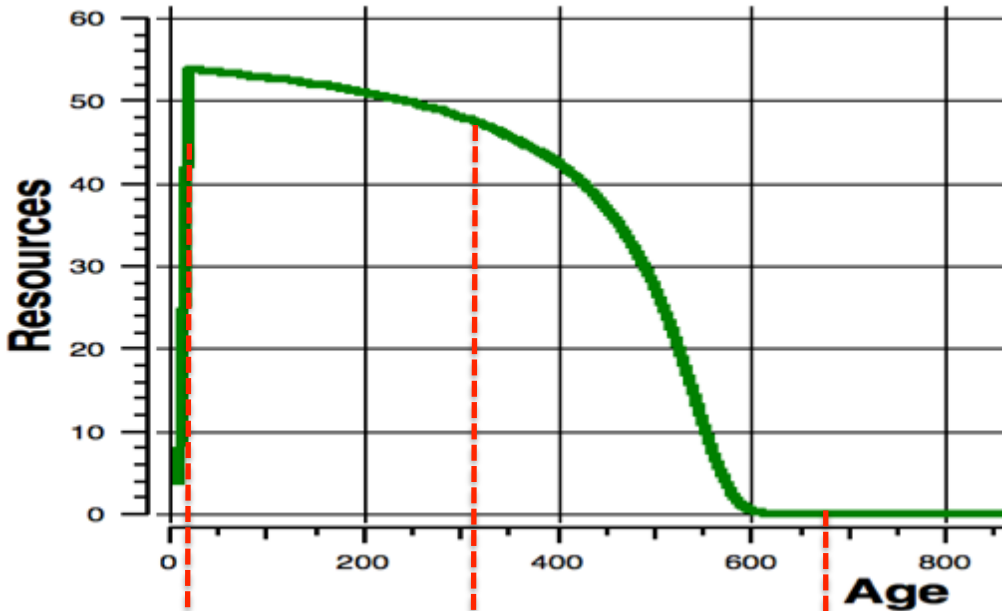
Hypothèse : stratégie d'exploitation de type tout-ou-rien (« bang-bang strategy »)

Effet de la fertilisation sur les pathogènes ?



Within healthy cohorts, patches with:

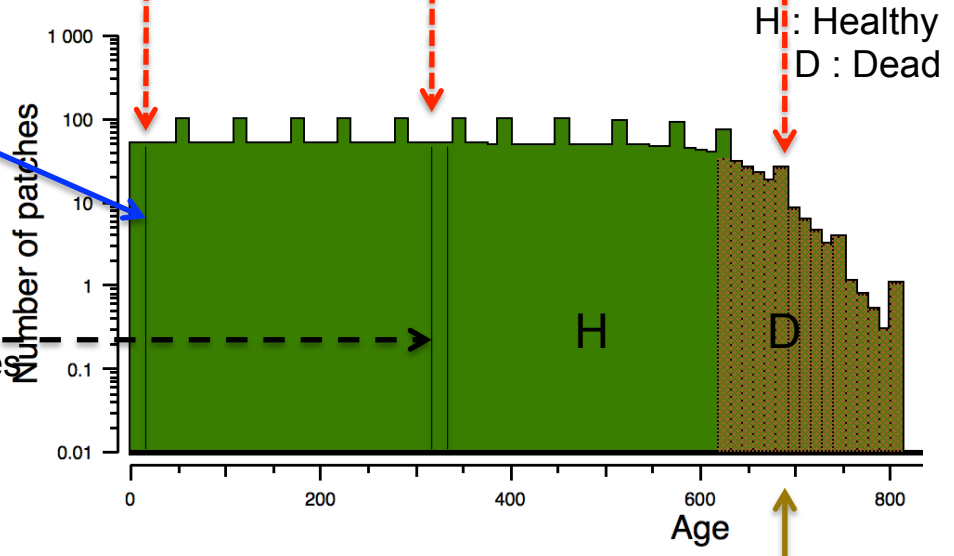
- ~ same age
- ~ same position within canopy
- ~ same resource level



Cohorts containing the youngest patches

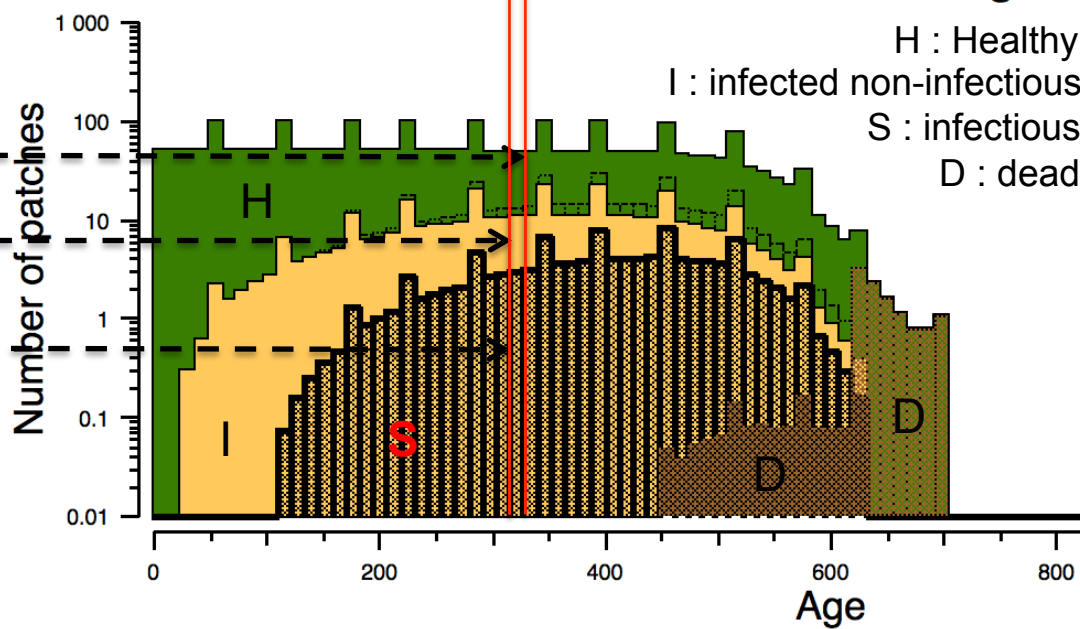
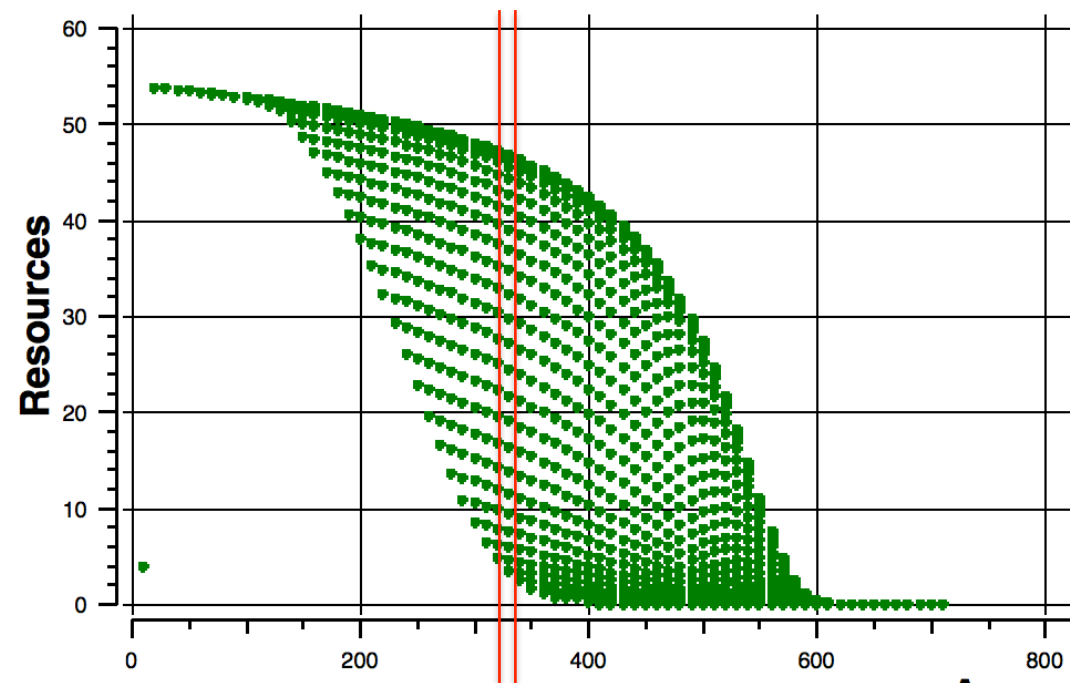
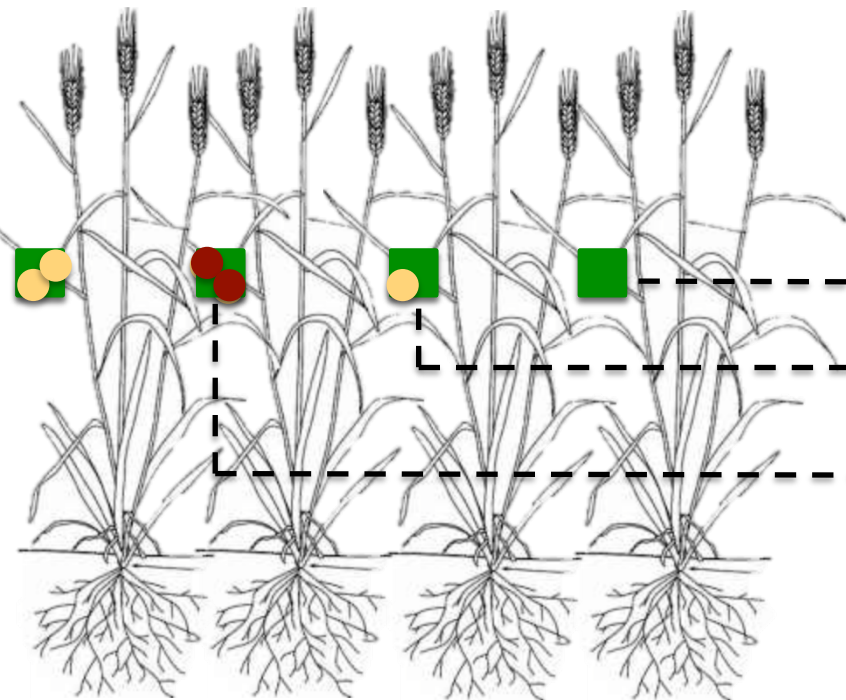
Cohorts of healthy patches

Age-class composed of dead-patches cohorts



Within infected cohorts, patches with:

- ~ same age
- ~ same infection age
- ~ same position within canopy
- ~ same resource level



$$\frac{\partial h(t,a)}{\partial t} + \frac{\partial h(t,a)}{\partial a} = -F(t,a) h(t,a) \quad \text{infection}$$

$$h(t,0) = c_p A \quad \text{birth}$$

Healthy patches (h)

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n}{\partial a} + \frac{\partial n}{\partial b} = 0 \quad \text{conservation}$$

$$n(t,a,0) = F(t,a) h(t,a) \quad \text{infection}$$

$$n(t,0,0) = 0 \quad \text{no initial infection}$$

Infected patches (n)

Yield (A)

$$\frac{dA}{dt} = \int_0^\infty \int_0^\infty (\text{Export}(t,a,b) - \text{Influx}(t,a,b)) n(t,a,b) db da - \int_0^\infty (\text{Export}(t,a) - \text{Influx}(t,a)) h(t,a) da$$

$$\frac{dP}{dt} = \int_0^\infty \int_0^\infty \sigma(t,a,b) n(t,a,b) db da - \gamma_S P \quad \text{Spore Production (P)}$$

