



Comment la décomposition microbienne du carbone du sol répond au changement climatique : un modèle mathématique des processus éco-évolutionnaires impliqués.

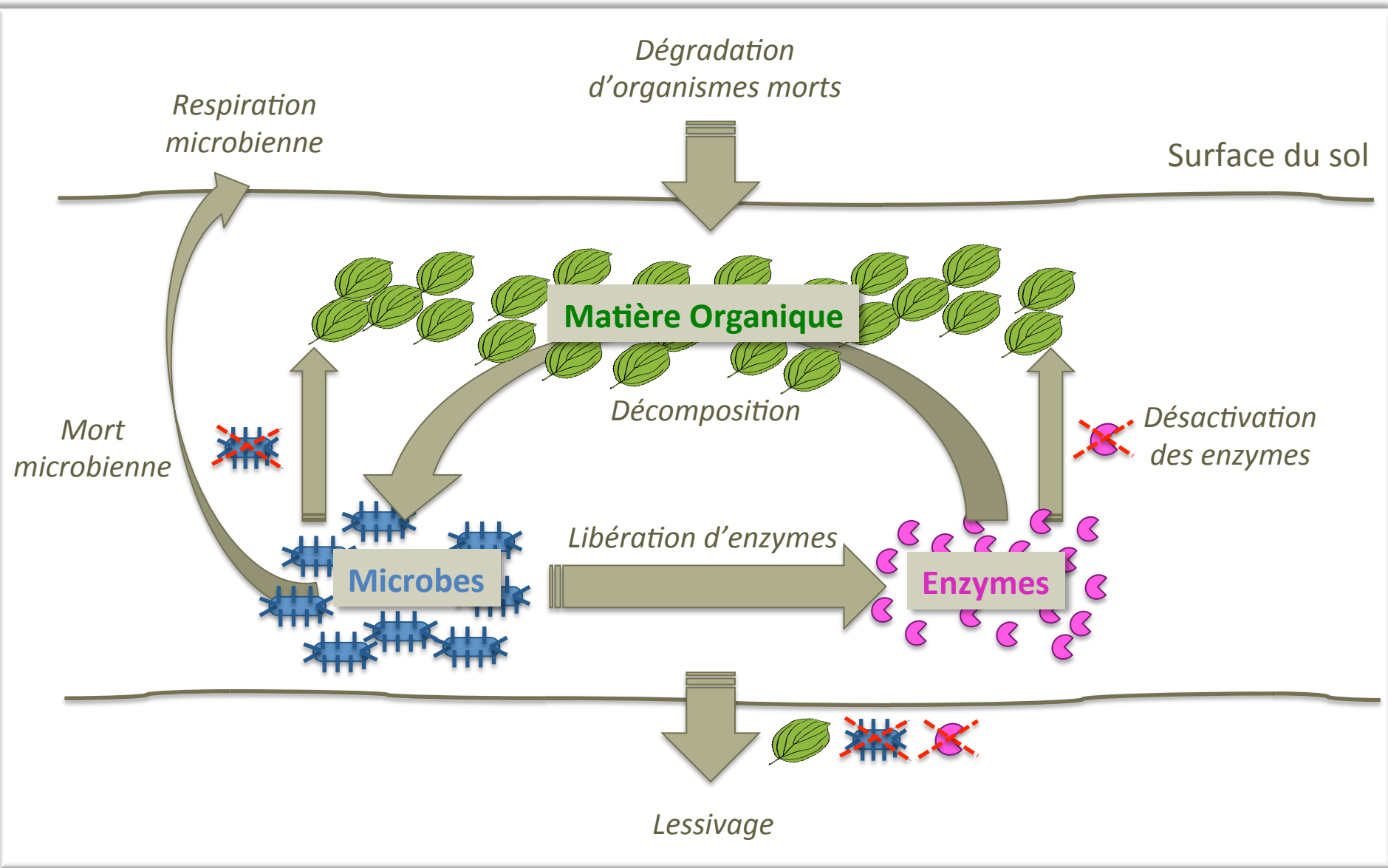
Elsa Abs

Régis Ferrière, Rachel Gallery, Pierre-Henri Gouyon,  
Hélène Leman, Laura Meredith, Scott Saleska

Ecole de printemps d'Aussois

29 mai 2017

# Modèle de décomposition microbienne du carbone du sol



# Modèle classique (système Terre)

$$\frac{dC}{dt} = I - k C f_{T^{\circ}} f_{H_2O}$$

cinétique  
de 1<sup>er</sup> ordre

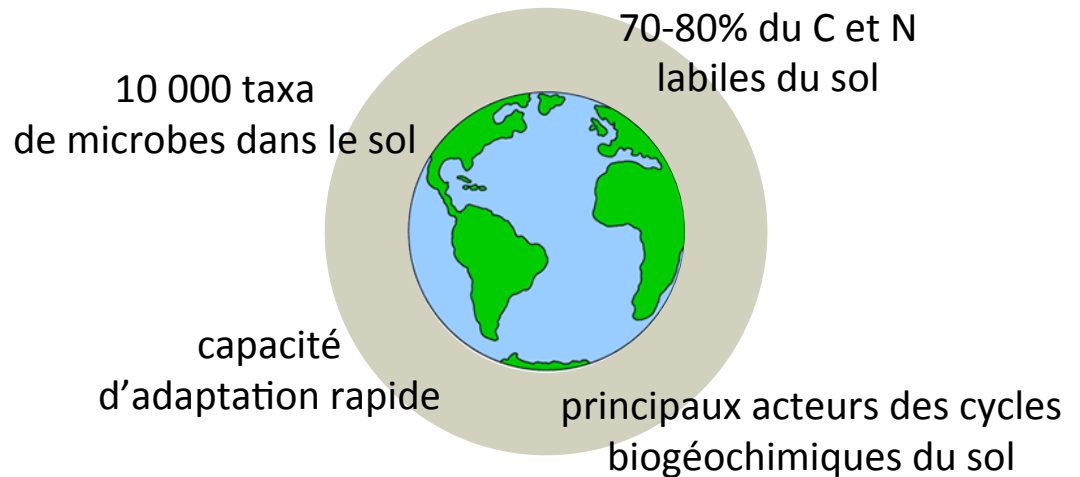
constante  
( $dM/dt = 0$ )

# Modèle classique (système Terre)

$$\frac{dC}{dt} = I - k C f_{T^\circ} f_{H_2O}$$

cinétique  
de 1<sup>er</sup> ordre

constante  
( $dM/dt = 0$ )



## Modèle classique (système Terre)

$$\frac{dC}{dt} = I - k C f_{T^\circ} f_{H_2O}$$

cinétique  
de 1<sup>er</sup> ordre

constante  
( $dM/dt = 0$ )

## Modèle microbien

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = I - \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M \\ \frac{dM}{dt} = ECM \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M - d_M M \end{cases}$$

taille de la population  
microbienne

cinétique de  
Michaelis-Menten  
(réponse  
fonctionnelle type II)

## Modèle classique (système Terre)

$$\frac{dC}{dt} = I - k C f_{T^\circ} f_{H_2O}$$

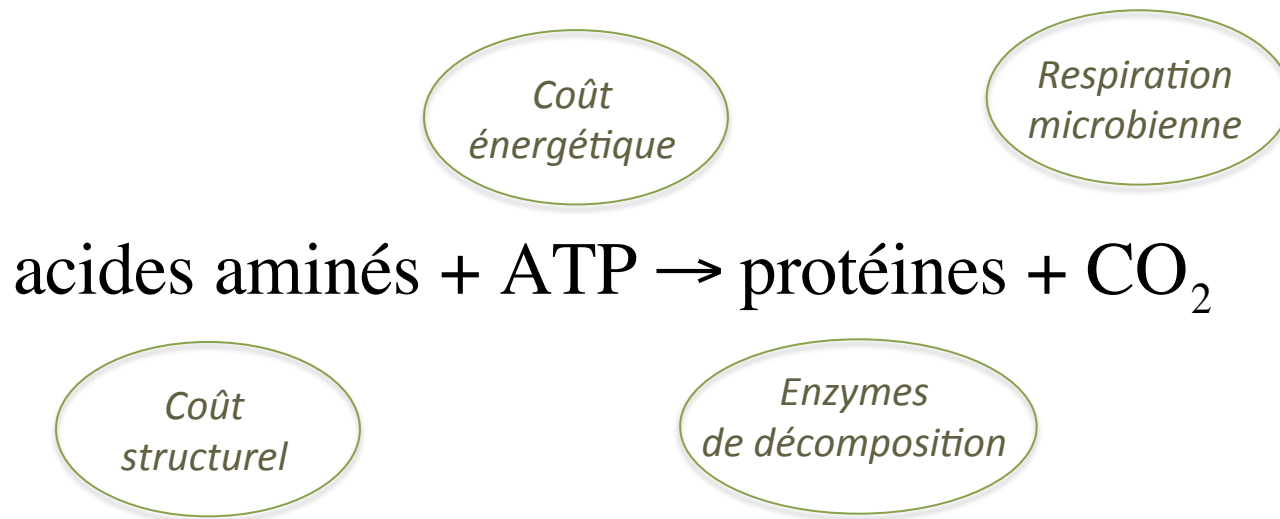
## Modèle microbien

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = I - \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M \\ \frac{dM}{dt} = ECM \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M - d_M M \end{cases}$$

efficacité de croissance  
microbienne  
(ou efficacité de conversion  
des ressources)

taux de mort  
constant

# Respiration microbienne : reflet du coût énergétique de la synthèse de protéines microbiennes



$$\text{Efficacité de la Croissance Microbienne} = \frac{\text{coût structurel}}{\text{coût structurel} + \text{coût énergétique}}$$

## Sensibilité des 2 modèles à la température

$$\frac{dC}{dt} = I - k C f_{T^\circ} f_{H_2O}$$

prend en compte la sensibilité à  $T^\circ$  de :

- efficacité de croissance microbienne
- activité enzymatique

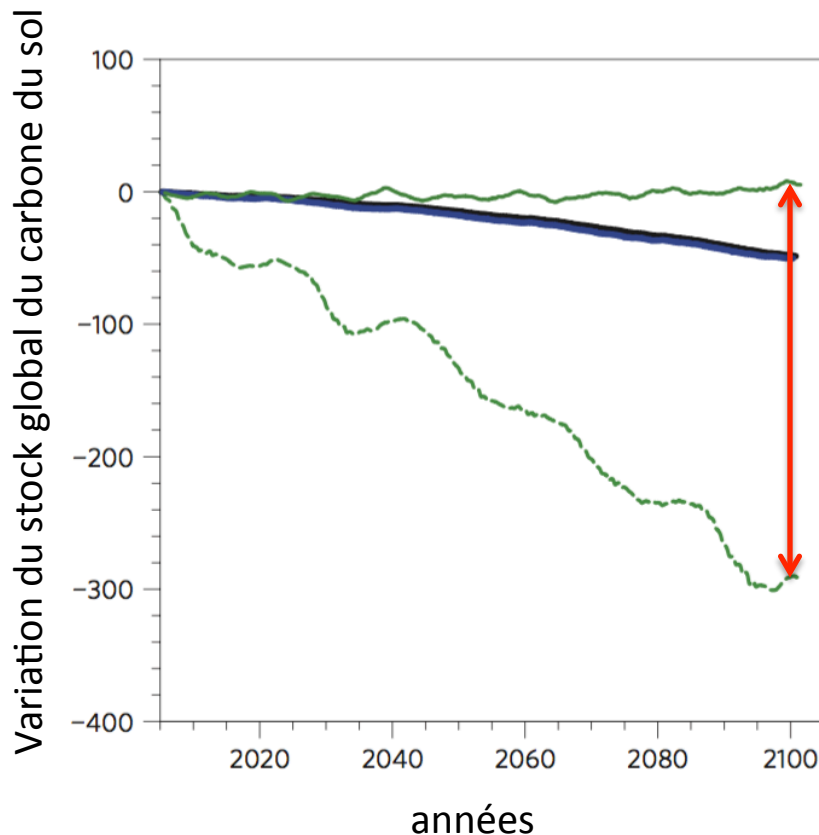
$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = I - \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M \\ \frac{dM}{dt} = ECM \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M - d_M M \end{cases}$$

- ECM diminue avec le réchauffement
- quel délai ? quelle sensibilité ?



# Effet long terme du réchauffement sur le carbone du sol

- La réponse de l'efficacité de croissance microbienne à une augmentation de température est un point clé pour prédire la réponse du carbone du sol au réchauffement.



modèle microbien - ECM diminue quand T° augmente  
modèle classique

modèle microbien - ECM constant (insensible à T°)

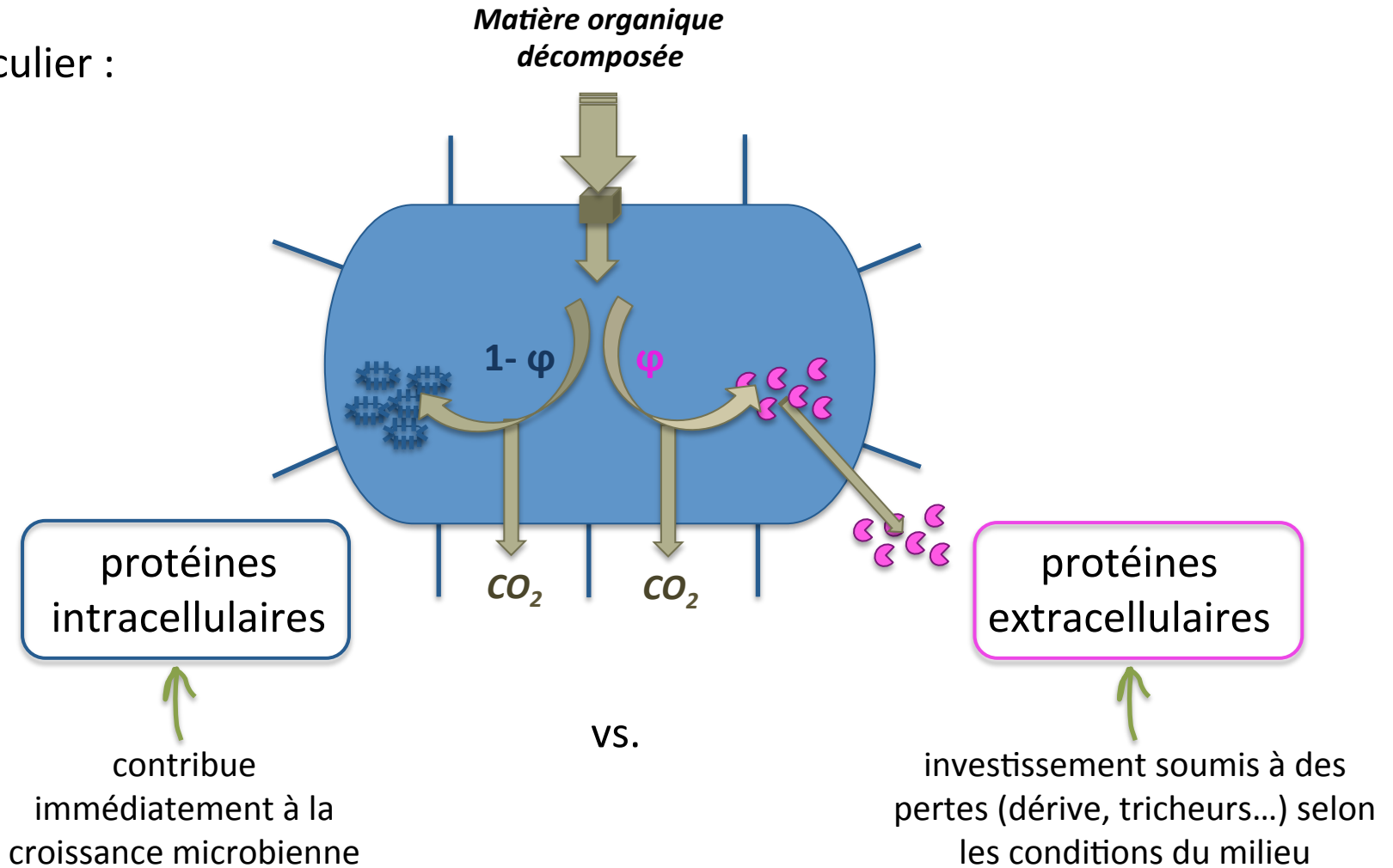
Réponse de l'ECM au réchauffement : approche évolutive

# Efficacité de la croissance microbienne : trait évolutif ?

Efficacité de la Croissance Microbienne = résultante de la stratégie d'allocation des ressources à la production de protéines + ou - coûteuses.

# Allocation microbienne des ressources à la synthèse de protéines

en particulier :



Trait évolutif = stratégie d'allocation des ressources à la production d'enzymes extracellulaires de décomposition



## Modèle classique (système Terre)

$$\frac{dC}{dt} = I - k C f_{T^\circ} f_{H_2O}$$

## Modèle microbien

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = I - \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M \\ \frac{dM}{dt} = ECM \frac{V_{\max} C}{K_m + C} M - d_M M \end{cases}$$

## Modèle CMZ

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = I - \frac{V_{\max} CZ}{K_m + CZ} M + (1 - \varepsilon)(d_M M + d_Z Z) - \varepsilon C \\ \frac{dM}{dt} = (1 - \varphi) \gamma_M \frac{V_{\max} CZ}{K_m + CZ} M - d_M M \\ \frac{dZ}{dt} = \varphi \gamma_Z \frac{V_{\max} CZ}{K_m + CZ} M - d_Z Z \end{cases}$$

### Equations d'Arrhenius

$$V_{\max}(T) = V_0 e^{-\frac{E_v}{R(T+273)}}$$

$$K_m(T) = \frac{K_s}{\lambda_0} e^{\frac{E_\lambda}{R(T+273)}}$$

# Dynamique évolutive : approche de la dynamique adaptative

Trait microbien adaptatif [ $\varphi$ ]

= stratégie d'allocation des ressources à la production d'enzymes extracellulaires

- ▶ Ce qu'on peut prédire :
  - ▶ stratégie évolutivement stable
  - ▶ conditions de diversification
  - ▶ effet long terme d'une augmentation de la température
- ▶ Ce qu'on ne peut pas prédire :
  - ▶ vitesse d'évolution
  - ▶ effet à court terme d'une augmentation de la température

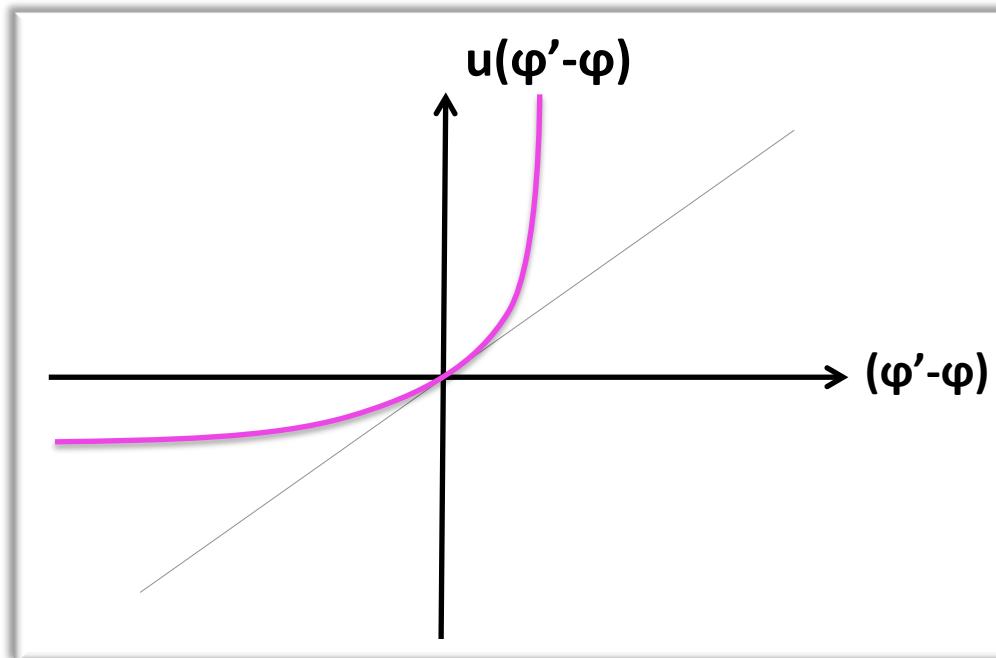
# Effet spatial : reflet de la structure hétérogène du sol

Trait microbien adaptatif [ $\varphi$ ]

= stratégie d'allocation des ressources à la production d'enzymes extracellulaires

Effet spatial [fonction  $u(\varphi' - \varphi)$ ]

- les mutants coopérateurs ( $\varphi' > \varphi$ ) voient un peu plus de CZ que la moyenne
- les mutants tricheurs ( $\varphi' < \varphi$ ) voient un peu moins de CZ que la moyenne (fonction croissante passant par 0)



- $u(0) = 0$
- $\begin{cases} u(x) > 0 & \text{quand } x > 0 \\ u(x) < 0 & \text{quand } x < 0 \end{cases}$
- $u'(x) > 0 \quad \forall x$



# Effet local : mécanisme de maintien évolutif d'un système de construction de niche

Trait microbien adaptatif [ $\varphi$ ]

= stratégie d'allocation des ressources à la production d'enzymes extracellulaires

► Il existe une singularité évolutive pour  $u'(0) > \frac{1}{1 - \frac{d_M}{V_{\max}\gamma_M}}$  :  $\varphi^* = 1 - \frac{1}{u'(0)} - \frac{d_M}{V_{\max}\gamma_M}$

► attracteur  $\forall$  valeurs de paramètres

►  $\left\{ \begin{array}{l} \text{stable (CSS)} \Leftrightarrow u''(0) < 2(u'(0))^2 \\ \text{sinon c'est un point de branchement évolutif (diversification)} \end{array} \right.$

## Résultats:

- l'effet local rend l'externalisation de la production de ressources viable évolutivement
- cas de diversification de la population microbienne

# Réponse de la stratégie évolutive stable au réchauffement

Résultat: ce modèle éco-évo prédit que la réponse évolutive à un réchauffement est **une augmentation de l'investissement dans la production d'enzymes** (et donc une **diminution de l'ECM**), quelque soit les valeurs de paramètres choisies.

$$\varphi^* = 1 - \frac{1}{u'(0)} - \frac{d_M}{V_{\max} \gamma_M}$$

▶ attracteur  $\forall$  valeurs de paramètres

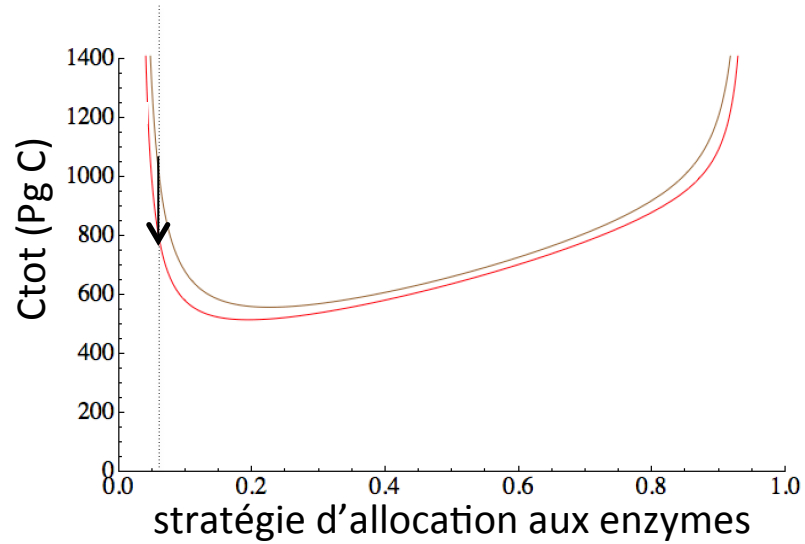
▶  $\left\{ \begin{array}{l} \text{stable (CSS)} \Leftrightarrow u''(0) < 2(u'(0))^2 \\ \text{sinon c'est un point de branchement évolutif (diversification)} \end{array} \right.$

$$V_{\max}(T) = V_0 e^{-\frac{E_v}{R(T+273)}} \Rightarrow \Delta \varphi^*(T) > 0 \quad \forall \text{ paramètres}$$

$$ECM = (1 - \varphi) \gamma_M \Rightarrow ECM \text{ diminue avec le réchauffement}$$

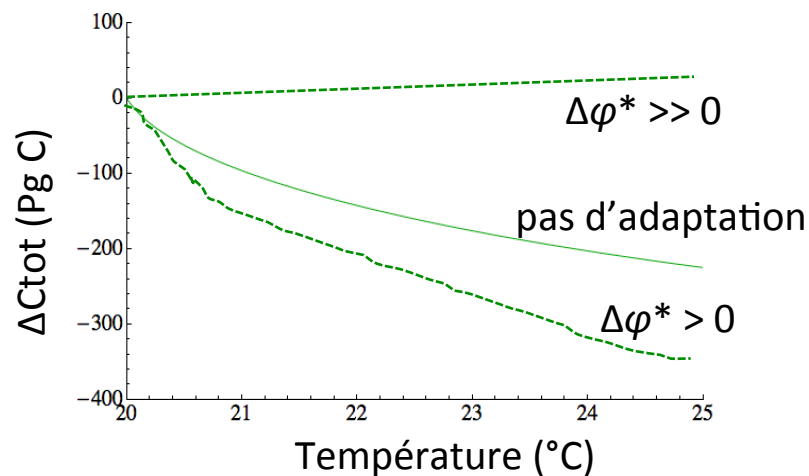
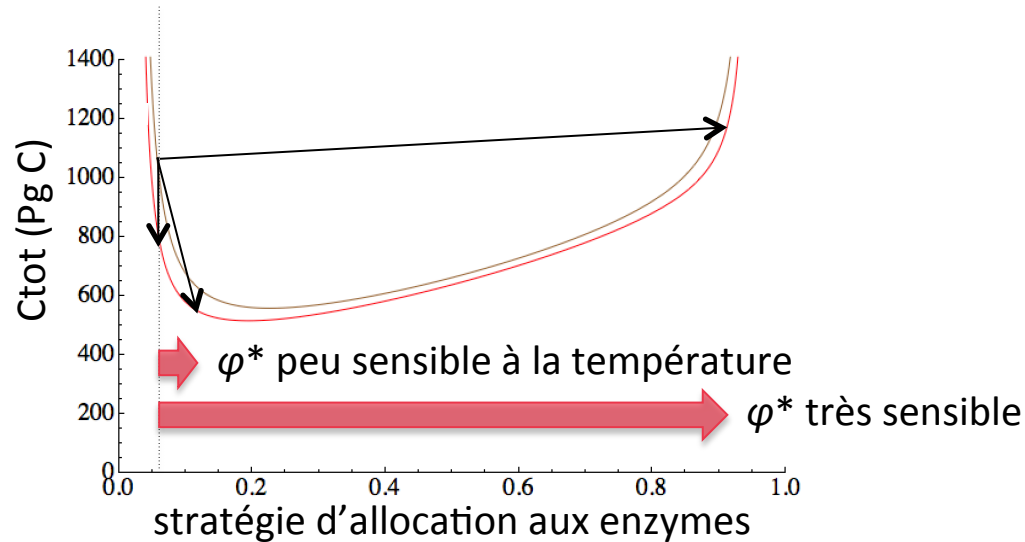
# Effet long terme du réchauffement sur le carbone du sol : comparaison sans/avec adaptation évolutive

## Faible lessivage



# Effet long terme du réchauffement sur le carbone du sol : comparaison sans/avec adaptation évolutive

## Faible lessivage



# Effet long terme du réchauffement sur le carbone du sol : comparaison avec le modèle de Wieder et al. 2013

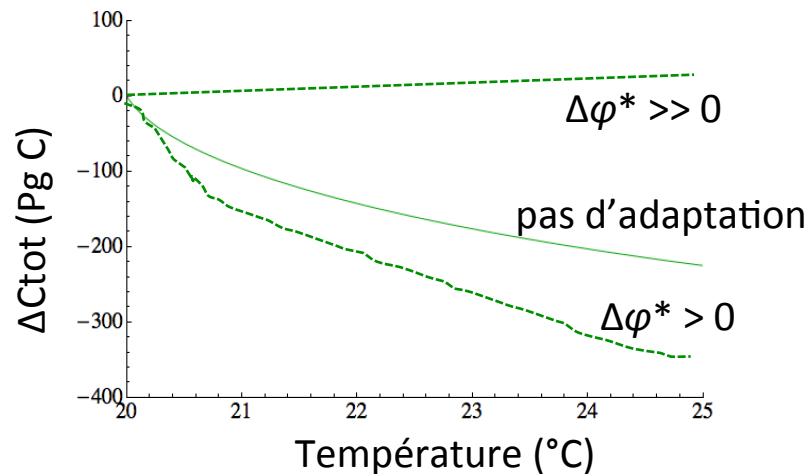
On retrouve :

- diminution de l'ECM avec réchauffement
- forte sensibilité de la réponse du carbone du sol au réchauffement à l'ECM

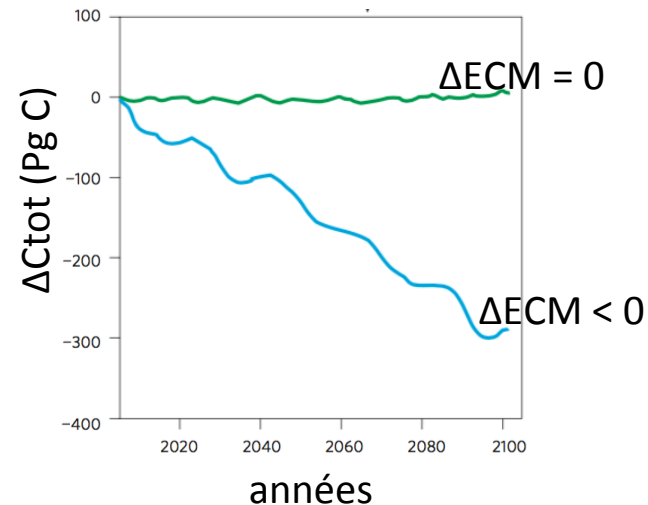
Ce qu'on apprend avec le modèle CMZ éco-évo :

- explication mécanistique de la diminution de l'ECM avec réchauffement

Modèle CMZ éco-évo

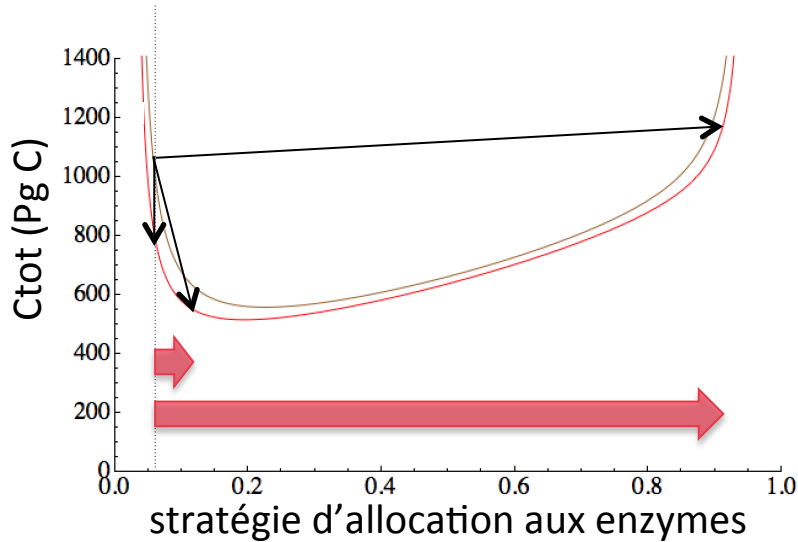


Wieder et al 2013

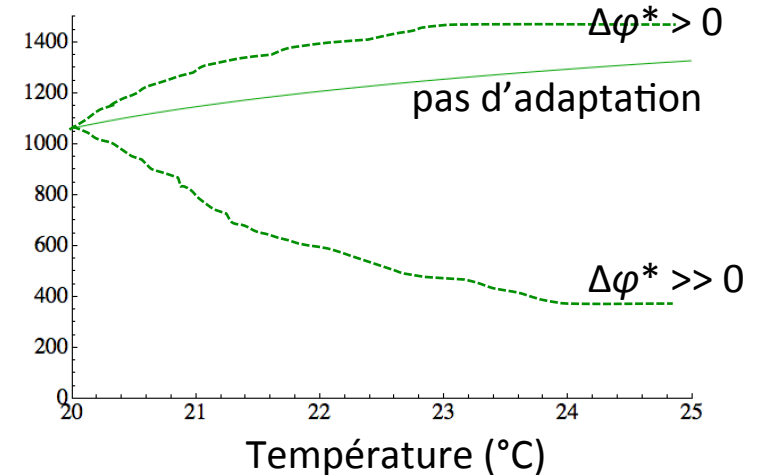
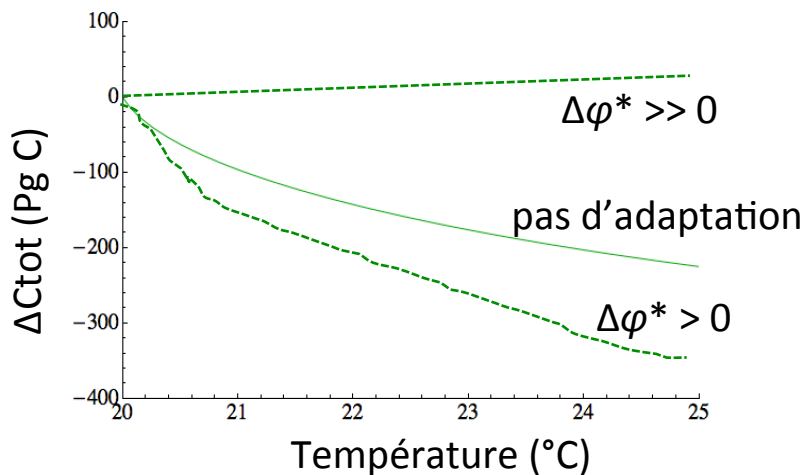
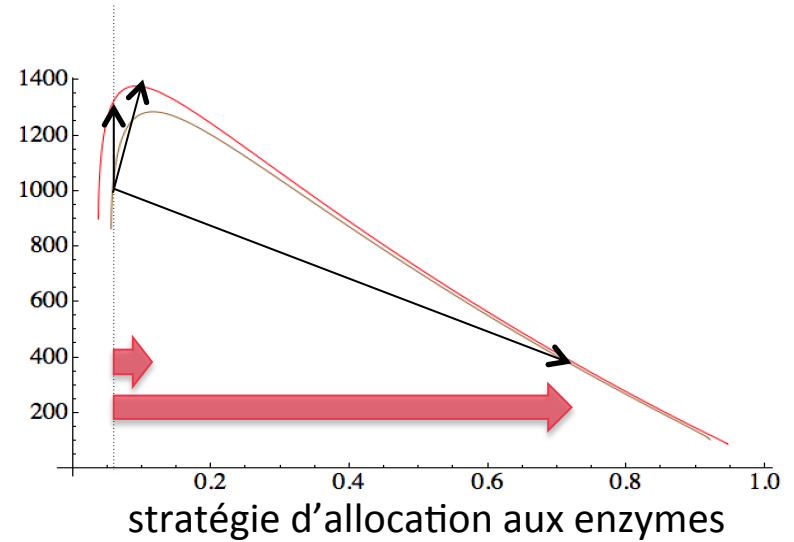


# Obtention d'un cas plus général grâce à l'ajout du lessivage

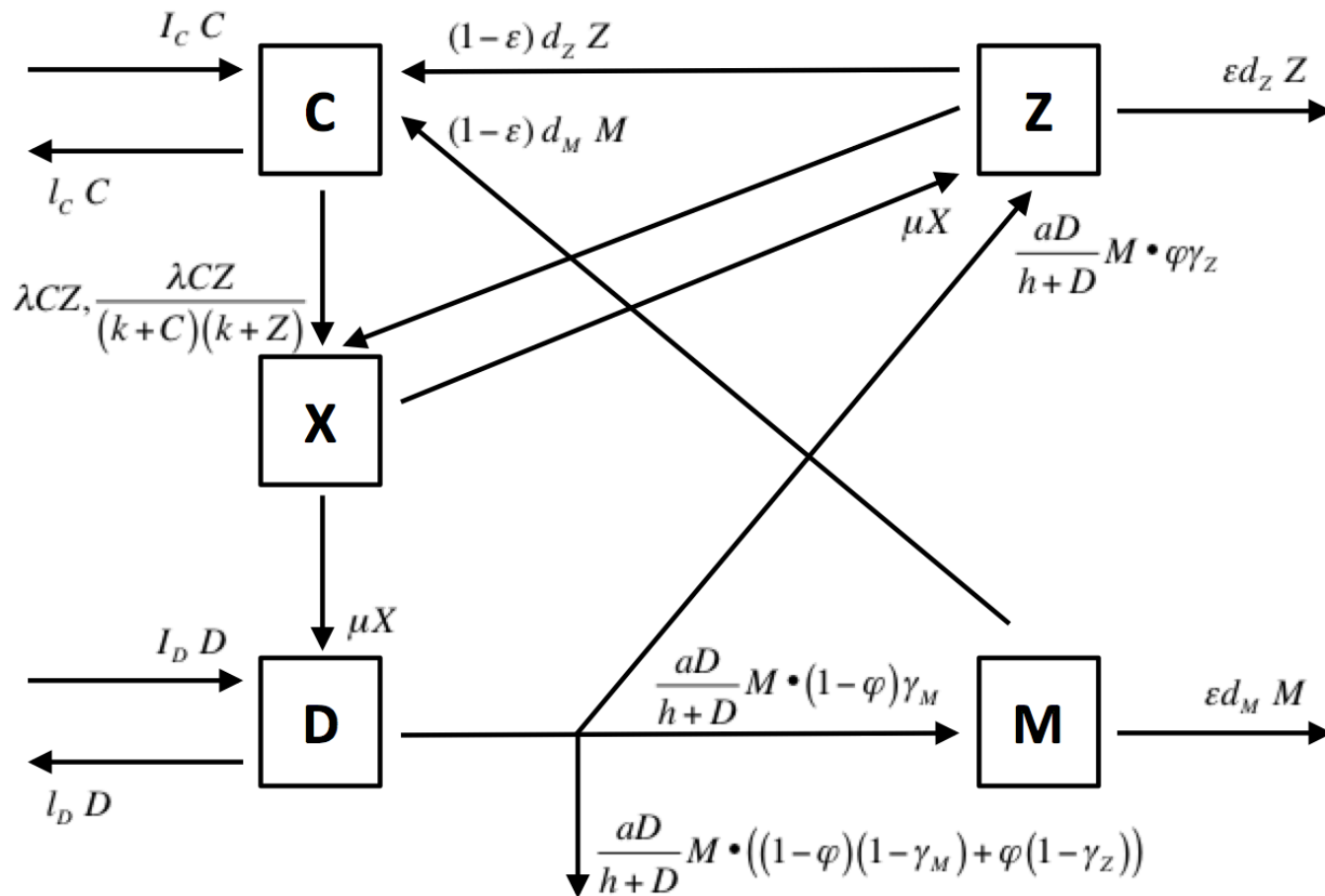
## Faible lessivage



## Fort lessivage



# Modèle microscopique : travail en cours avec H. Leman



**Microbial Respiration**

# Modèle microscopique : travail en cours avec H. Leman

## Modèle microscopique non spatial

Discuter les hypothèses qui permettent de faire converger le modèle microscopique à 5 compartiments vers le modèle de population à 3 compartiments.



# Modèle microscopique : travail en cours avec H. Leman

## Modèle microscopique non spatial

Discuter les hypothèses qui permettent de faire converger le modèle microscopique à 5 compartiments vers le modèle de population à 3 compartiments.

## Modèle microscopique spatial

Retrouver la fonction d'effet local du modèle évolutif à partir de contraintes de diffusivité du milieu et de mobilité des éléments du système.

# Remerciements

Régis Ferrière (ENS, Université d'Arizona, dir. thèse)

Scott Saleska (Université d'Arizona, co-dir. thèse)

Ferrière lab

Saleska lab

Membres externes du comité de thèse :

Pierre-Henri Gouyon (MNHN)

Rachel Gallery (Université d'Arizona)

Laura Meredith (Université d'Arizona)

Hélène Leman (CIMAT)
















Noelle Espinoza (UA)



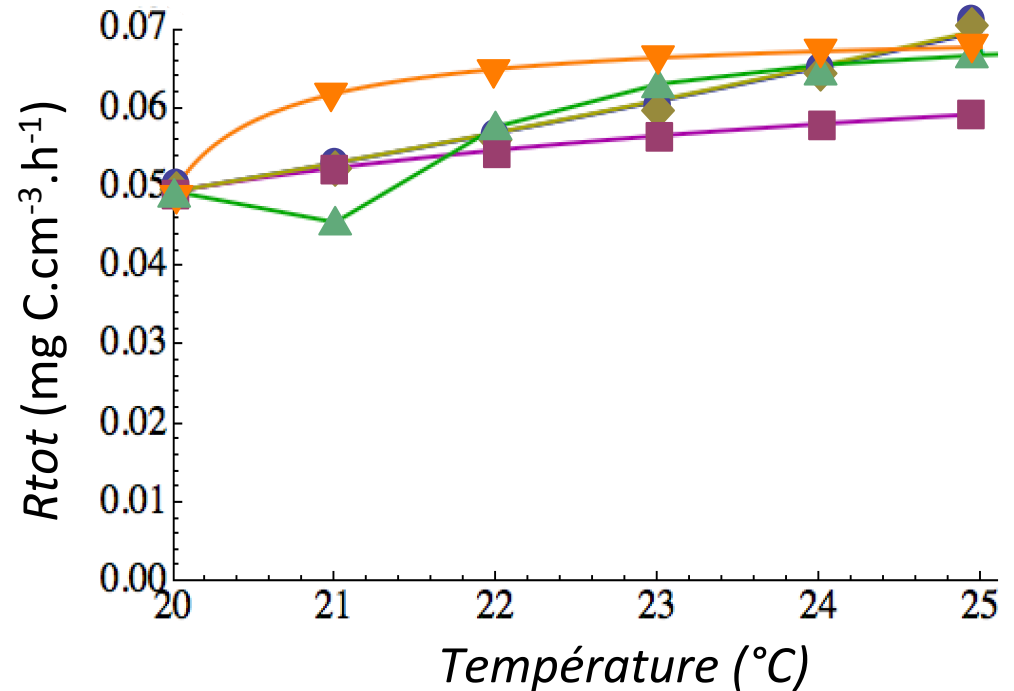
Additional slides

# Plasticité et réchauffement lent (pas de +0,5°C)

## Effets court/moyen/long sur la respiration totale du sol
















	S1	S2	S3	S4	S5
BioX 					
Eco 					
Plastic 					
Evo 					

Réchauffement  
par pas de +0,5°C

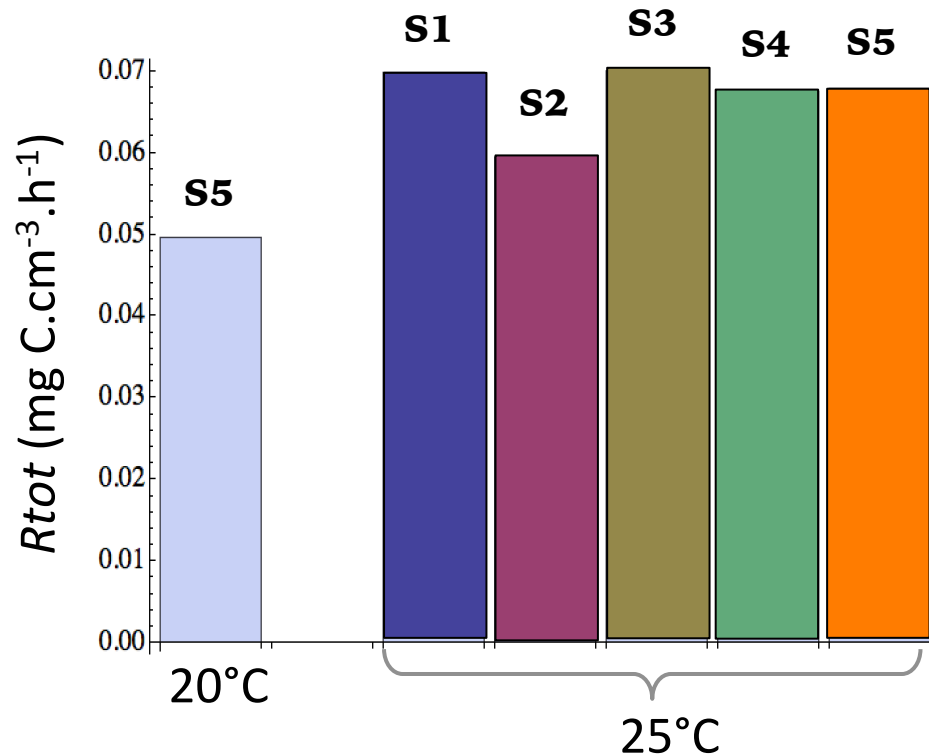


# Plasticité et réchauffement lent

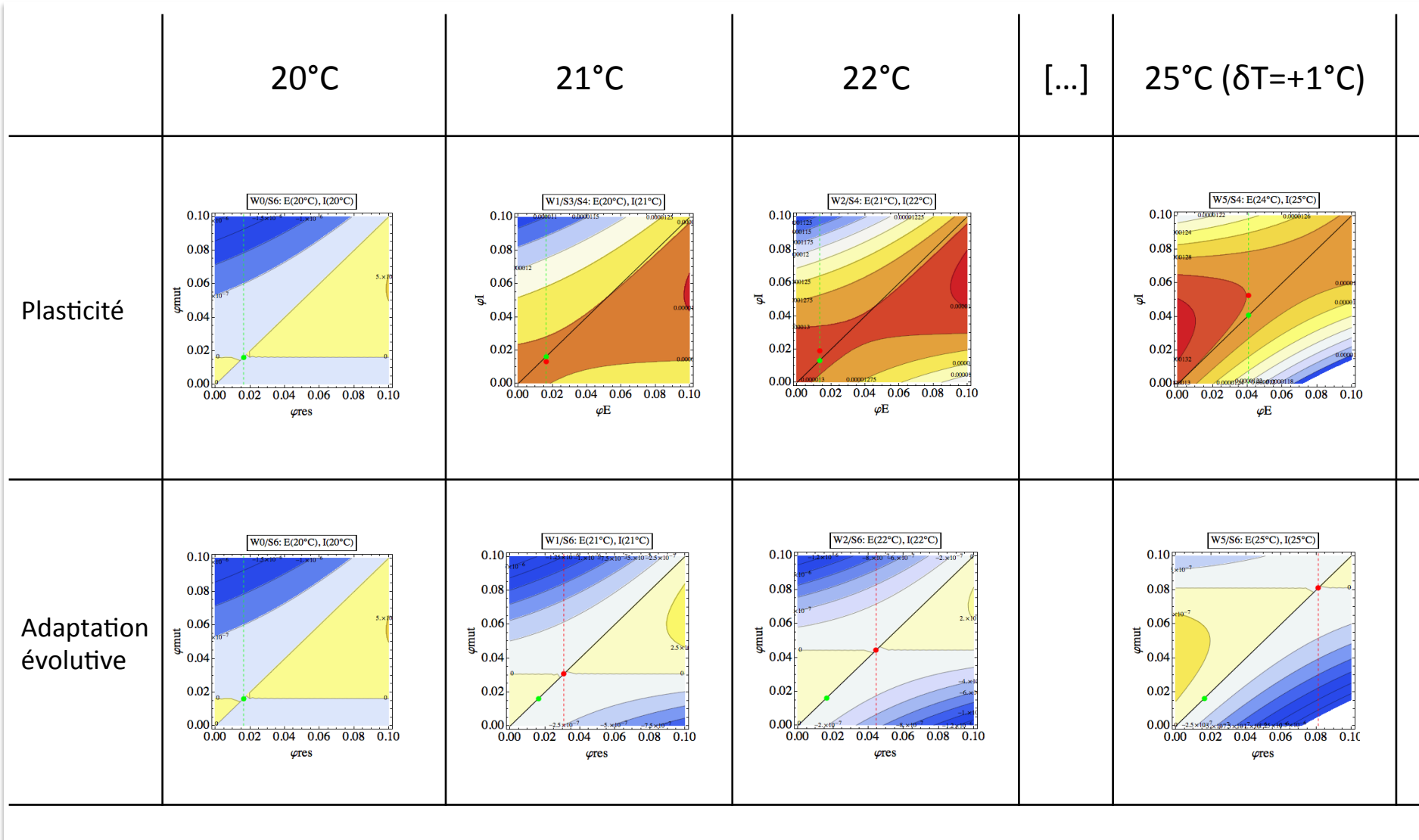
Effets court/moyen/long sur la respiration totale du sol

	S1	S2	S3	S4	S5
BioX 					
Eco 					
Plastic 					
Evo 					

Réchauffement  
par pas de +0,5°C


















# Modélisation de la plasticité vs. adaptation génétique



# Plasticité et réchauffement **rapide**

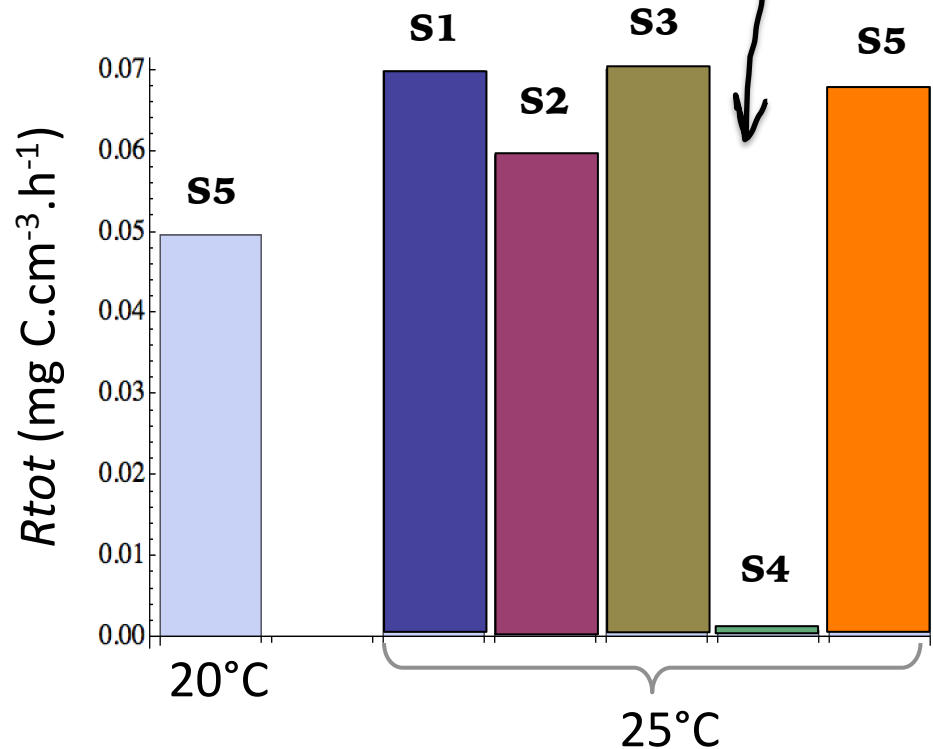
Effets court/moyen/long sur la respiration totale du sol

	S1	S2	S3	S4	S5
BioX 					
Eco 					
Plasticité 					
Evo 					

plasticité  
+ éco

Réchauffement  
par pas de +5°C

extinction des  
microbes

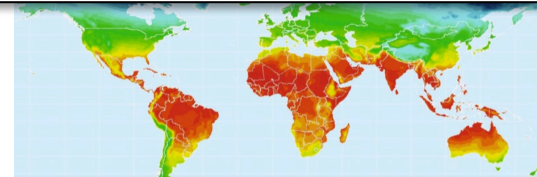
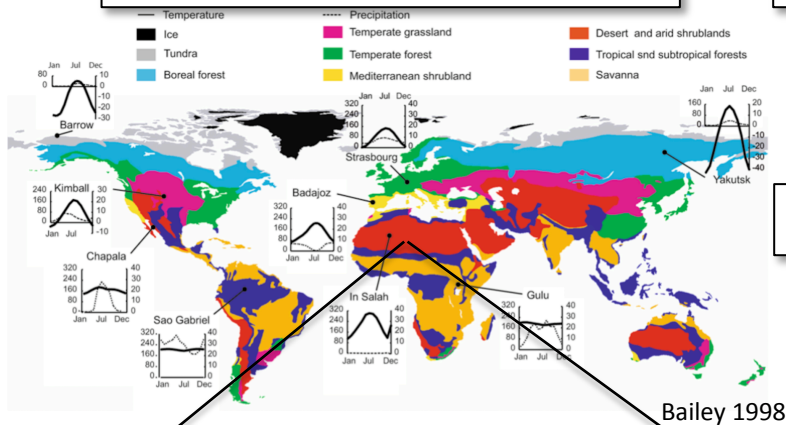


# Biomes terrestres

# Températures annuelles moyennes

Ecosystème terrestre

5,000 km



# Précipitations annuelles moyennes

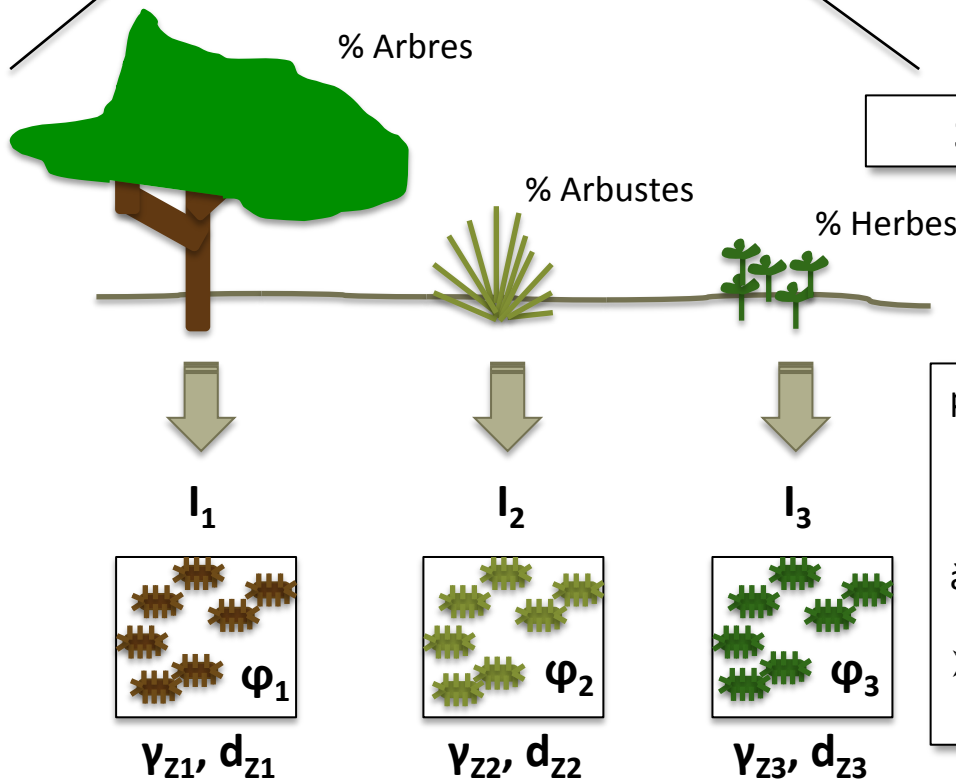


New et al. 1999

# 3 groupes fonctionnels

Ecosystème forêt  
{ $l_1, l_2, l_3$ }

1 km



par case, à  $t_0$

- composition  $\{l_1, l_2, l_3\}$
- température de référence ( $T_0$ )
- humidité de référence ( $\epsilon$ )

à  $t_1$ , la température varie de  $T_0$  à  $T_1$

➤ Quelle est la réponse éco-évo par groupe fonctionnel? par biome ?

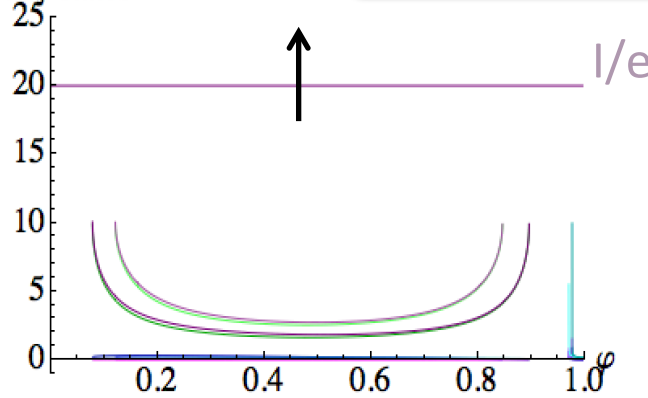


# Illustration de la sensibilité du modèle éco aux paramètres

**Ecological Parameters**

$$\Delta Ctot_{s_2}(\Delta T) = \frac{I}{2} \left[ \sqrt{1 - \frac{4e}{I^2 \Delta_z(\varphi)} \frac{\kappa(T_1)h(T_1)}{1-\varphi-\kappa(T_1)}} - \sqrt{1 - \frac{4e}{I^2 \Delta_z(\varphi)} \frac{\kappa(T_0)h(T_0)}{1-\varphi-\kappa(T_0)}} \right] \left( \Delta_M(\varphi) + \Delta_Z(\varphi) - \frac{1}{e} \right)$$

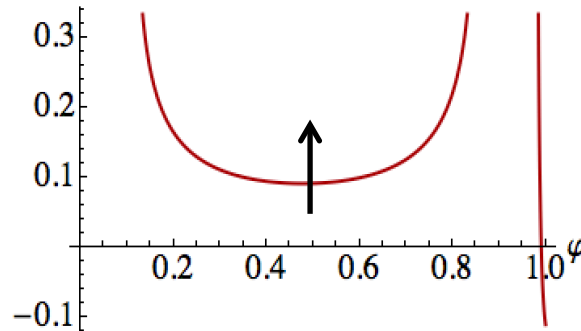
steady states



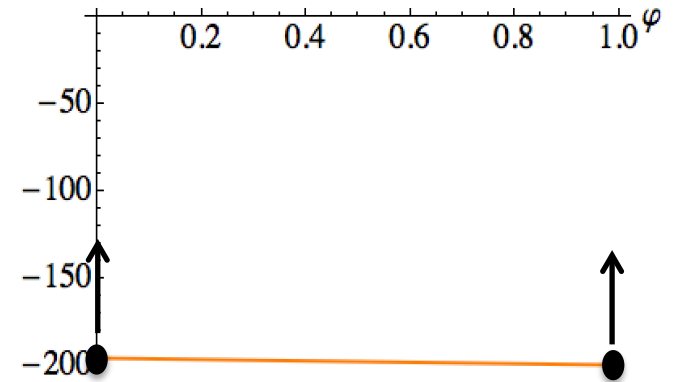
high  $\Delta Ctot_{s_2}(T)$

- high  $I$
- high  $\left[ \sqrt{1 - \frac{4e}{I^2 \Delta_z(\varphi)} \bar{CZ}(T_1)} - \sqrt{1 - \frac{4e}{I^2 \Delta_z(\varphi)} \bar{CZ}(T_0)} \right]$
- high  $\left[ \Delta_M(\varphi) + \Delta_Z(\varphi) - \frac{1}{e} \right]$

$$\Delta \sqrt{1 - 4eCZ / I^2 \Delta_z}$$



$$\Delta m + \Delta z - 1/e$$



sensitivity:  $E_a, E_\lambda \gg I > h_s, e, d_M, d_Z, a_0, \gamma_M, \gamma_Z > \lambda_0$

- high  $E_a, E_\lambda, h_s, e, d_M, d_Z$
- low  $I, a_0, \gamma_M, \gamma_Z, \lambda_0$

sensitivity:  $e \gg \gamma_M, \gamma_Z, d_M, d_Z$

- high  $e, \gamma_M, \gamma_Z$
- low  $d_M, d_Z$