

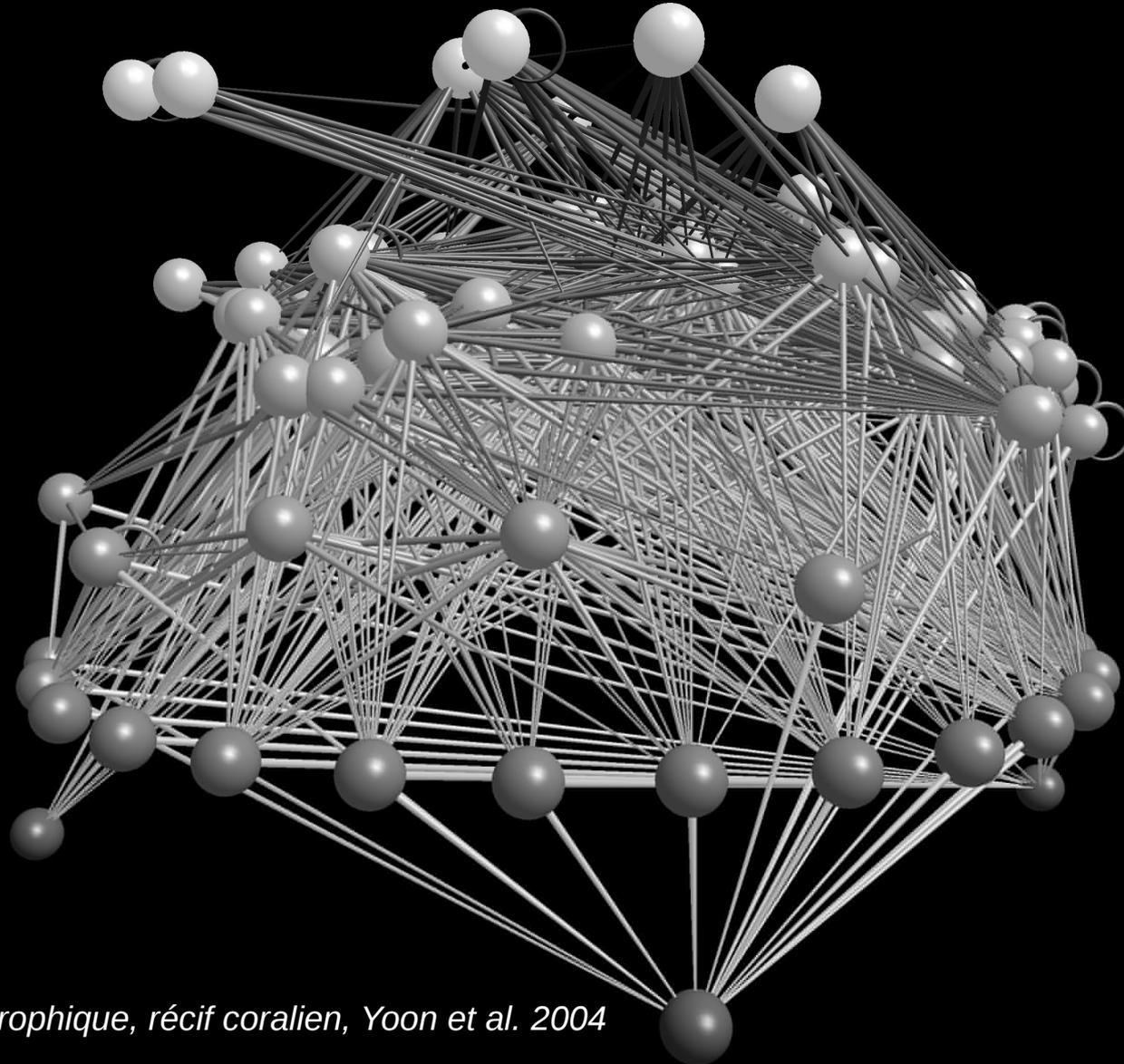


Effets indirects et stabilité d'un module d'espèces à différents types d'interactions

Alix Sauve, Colin Fontaine, Elisa Thébault

Introduction

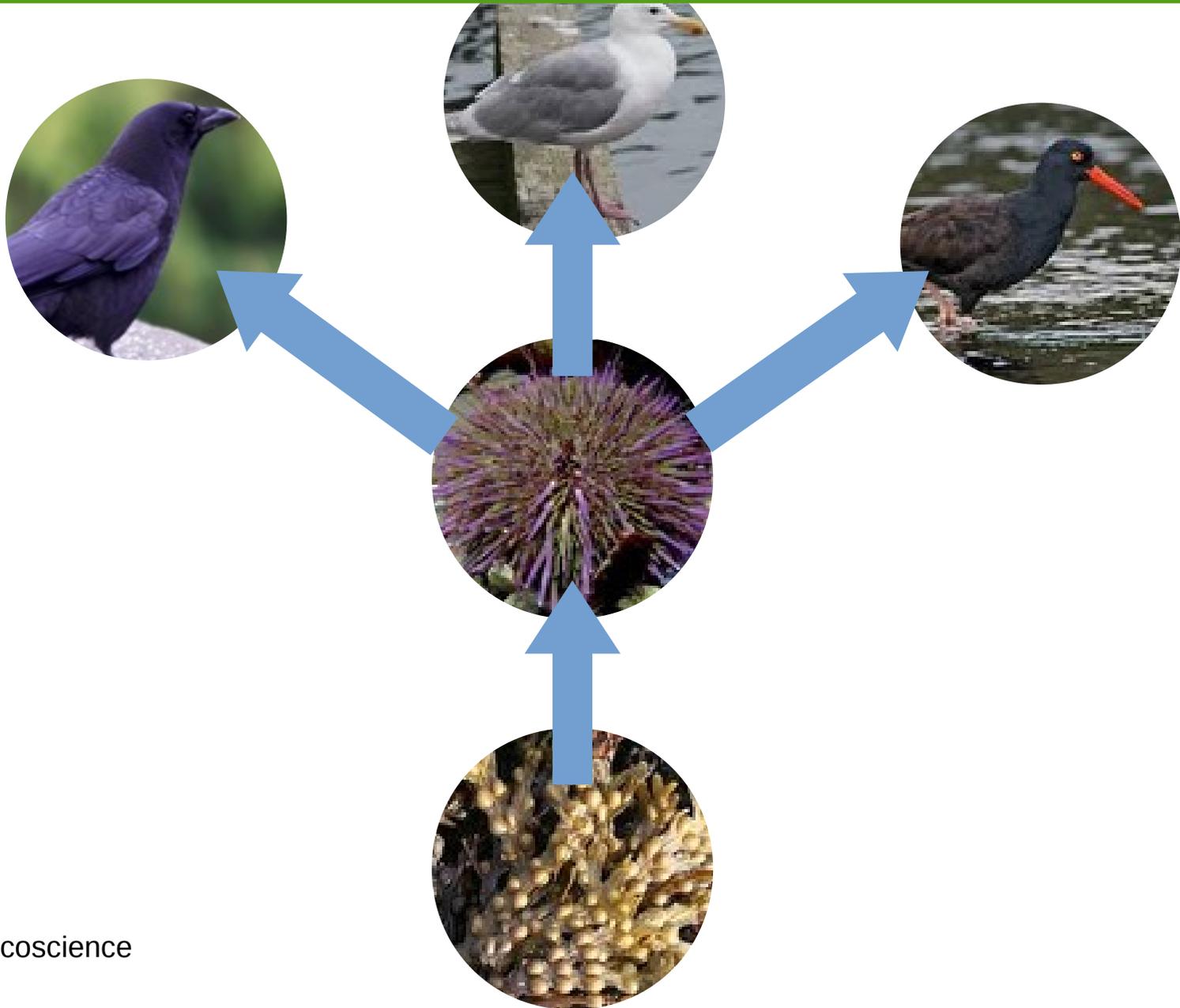
Prédire la réponse des communauté écologiques aux perturbations



Réseau trophique, récif coralien, Yoon et al. 2004

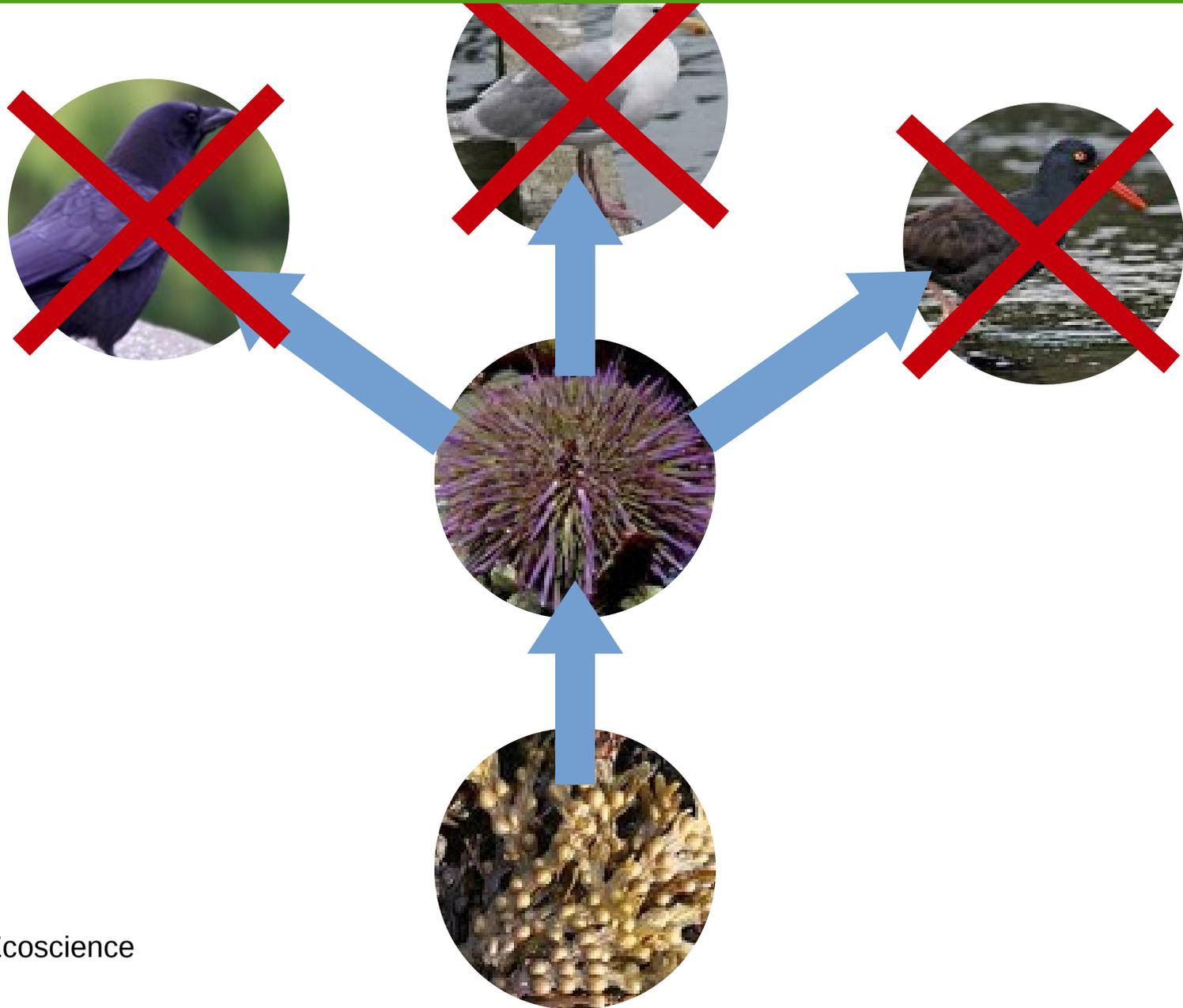
Introduction

Exemple : effets en cascades



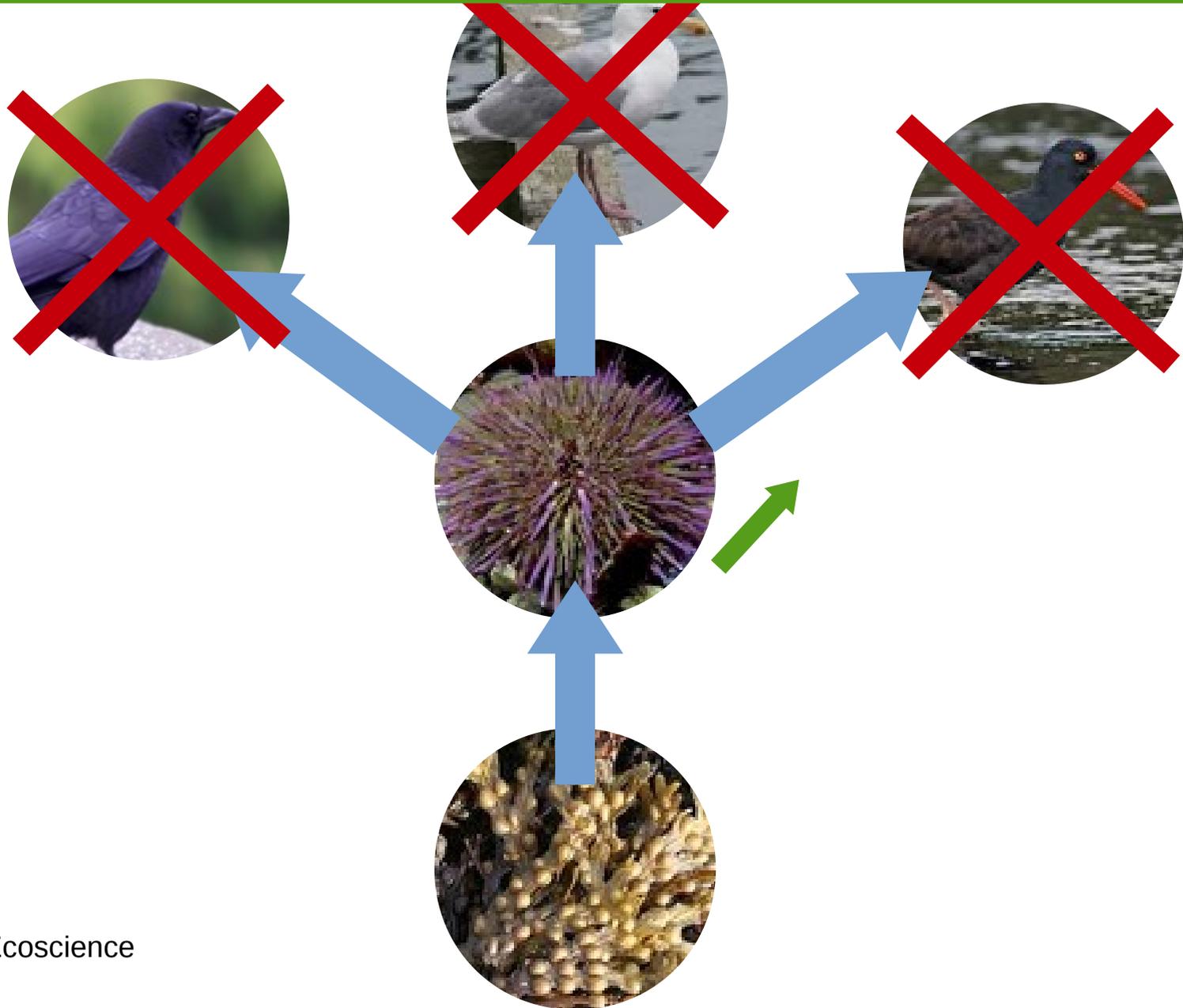
Introduction

Exemple : effets en cascades



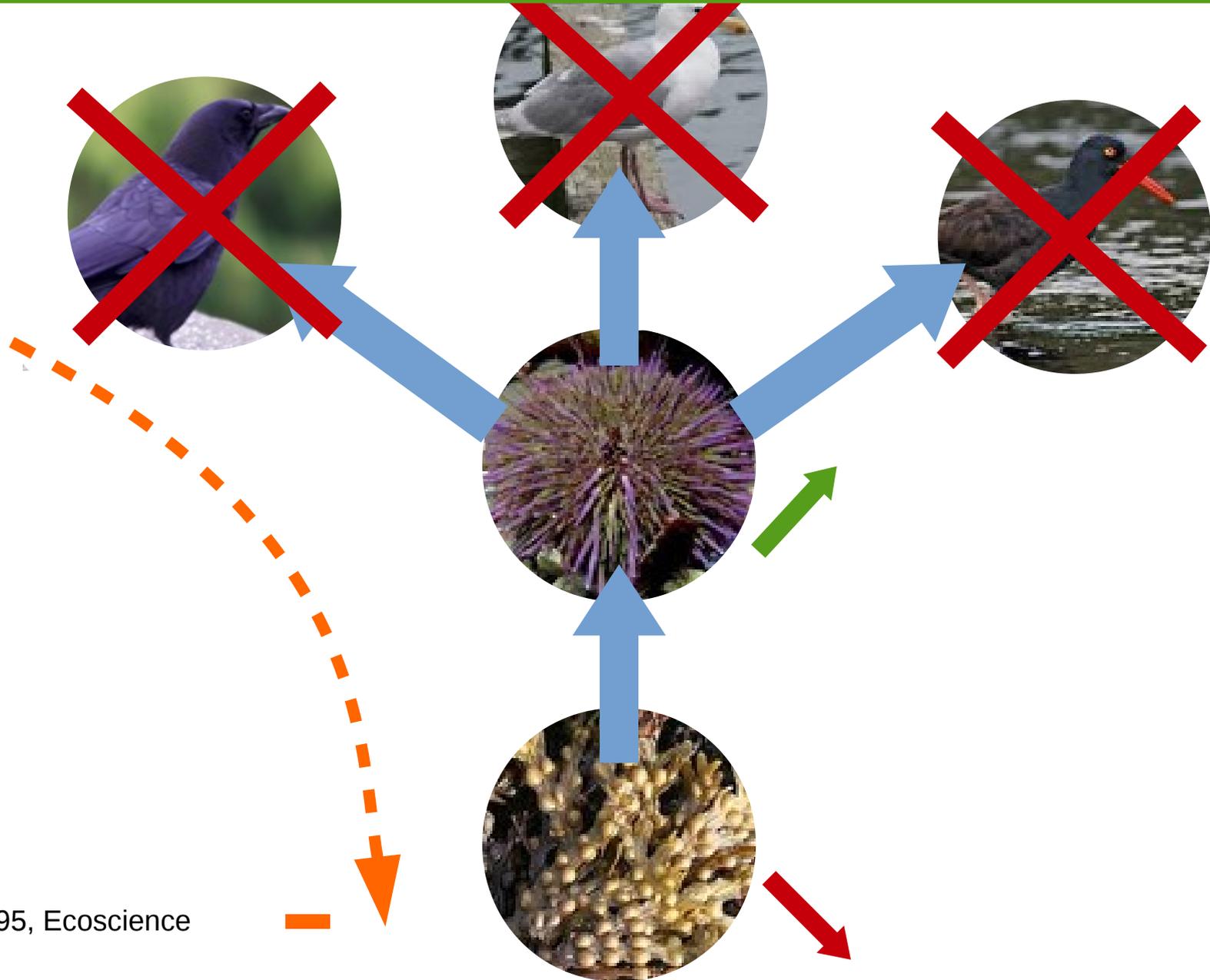
Introduction

Exemple : effets en cascades



Introduction

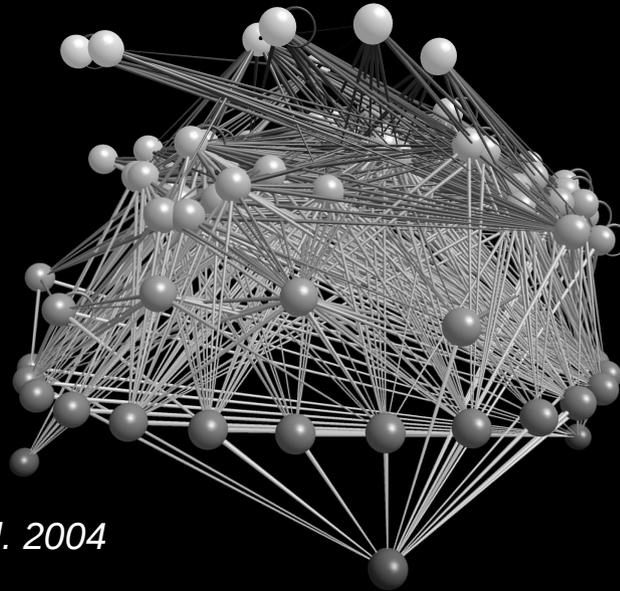
Exemple : effets en cascades



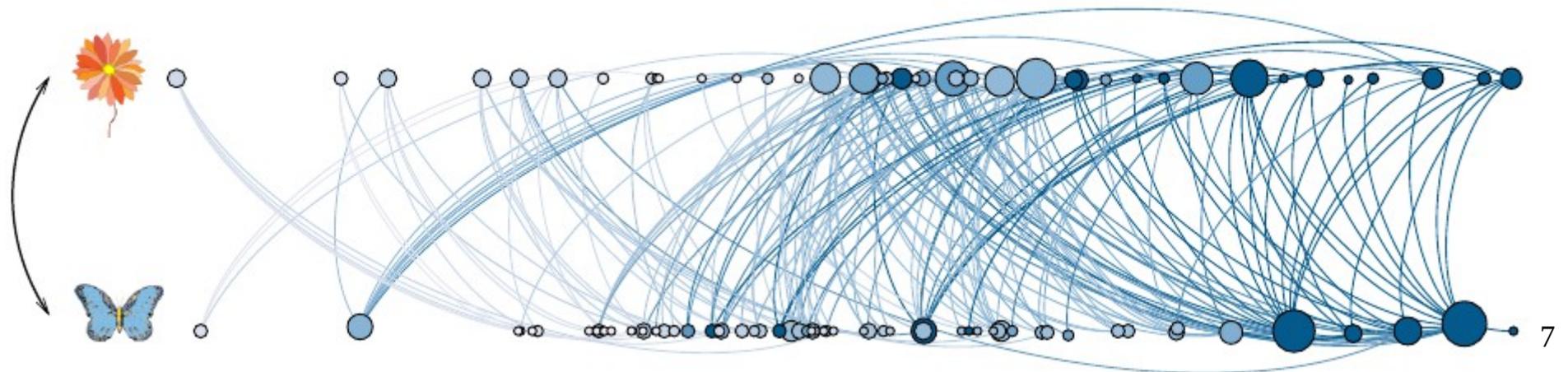
Wootton, 1995, Ecoscience

Introduction

Les interactions indirectes sont omniprésentes dans les communautés



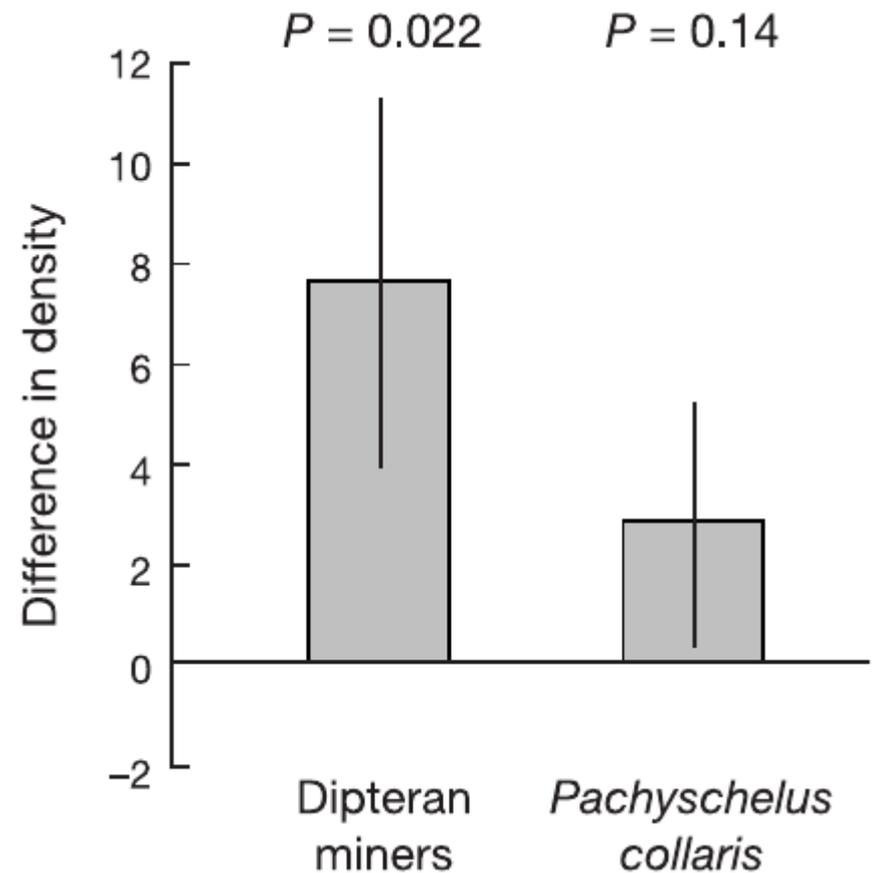
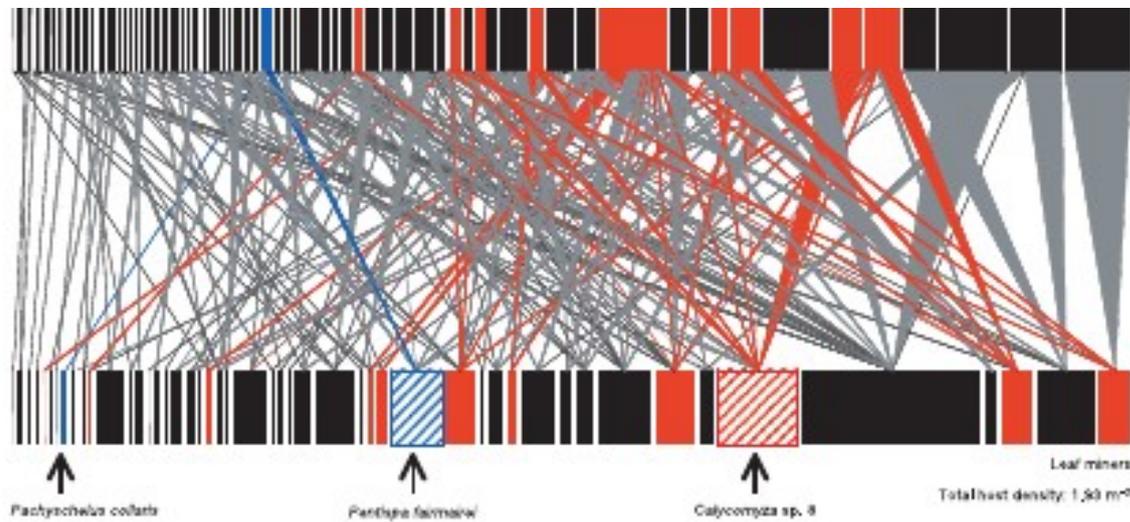
Réseau trophique, récif coralien, Yoon et al. 2004



Saavedra et al. 2013

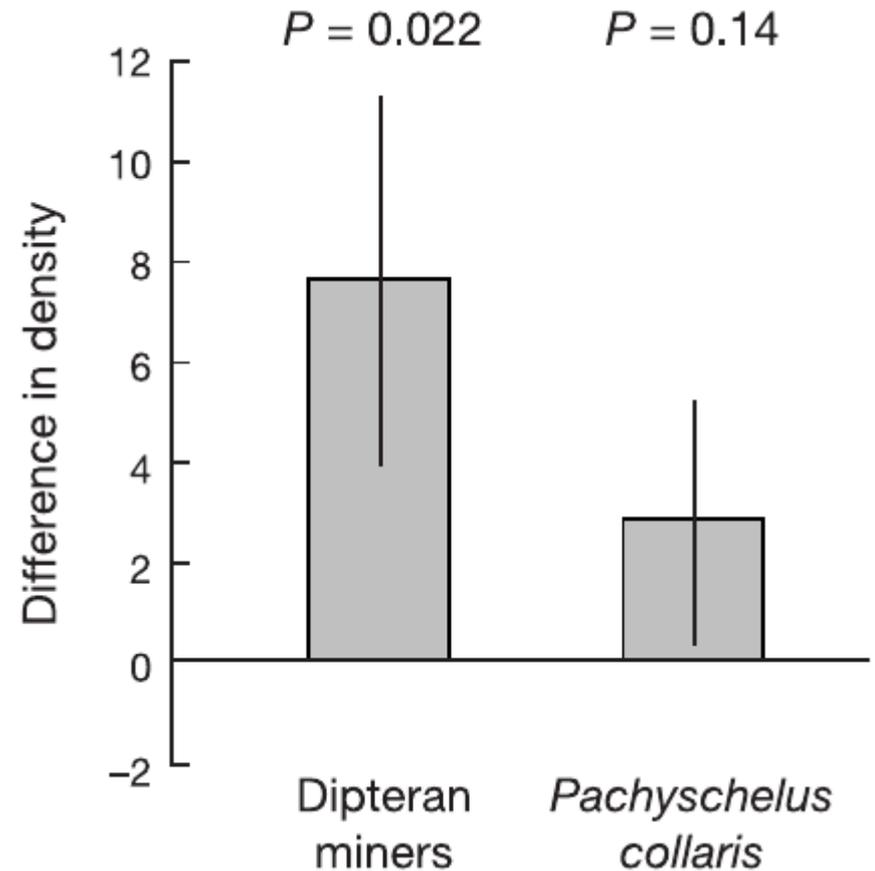
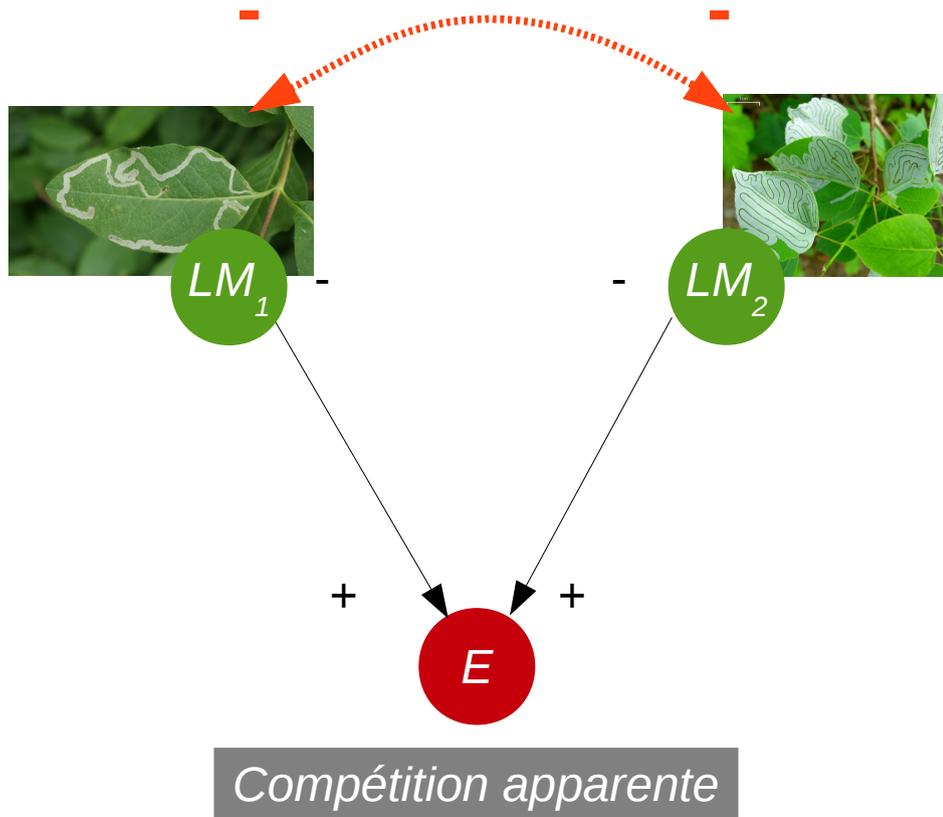
Introduction

Différents types d'interactions indirectes qui structurent les communautés



Introduction

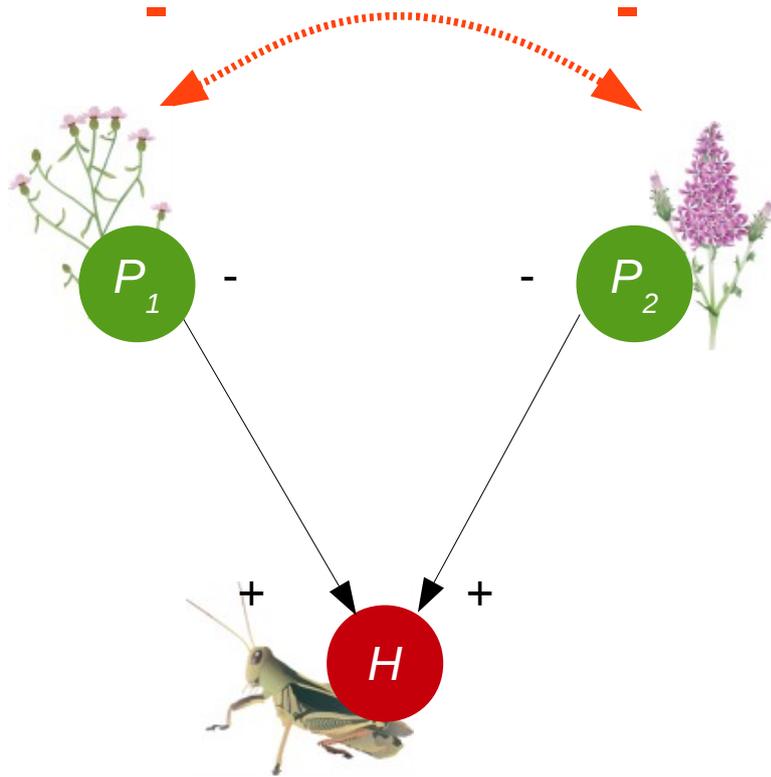
Différents types d'interactions indirectes qui structurent les communautés



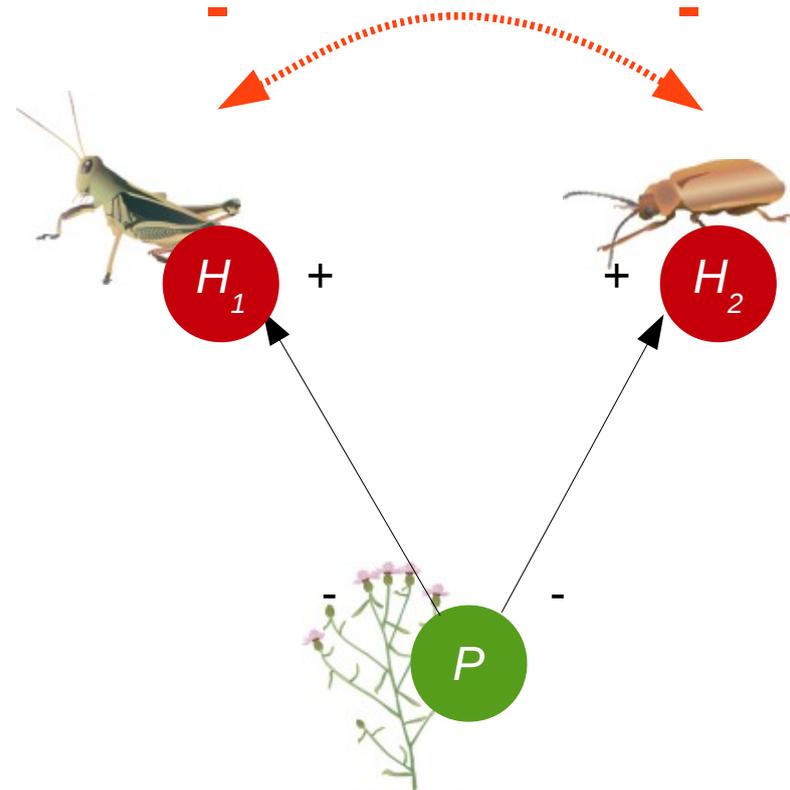
Introduction

Différents types d'interactions indirectes qui structurent les communautés

Compétition apparente

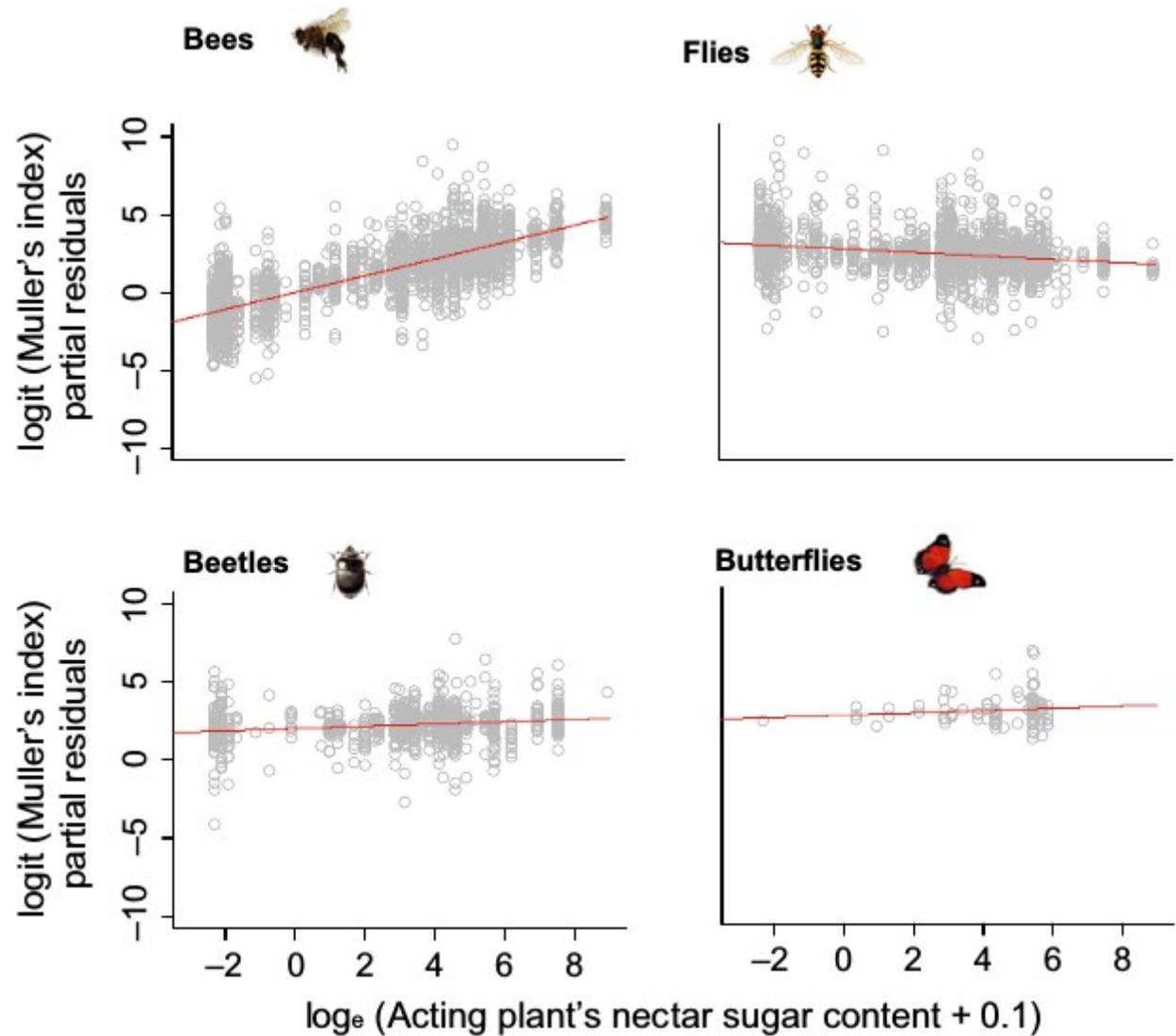


Compétition pour une ressource



Introduction

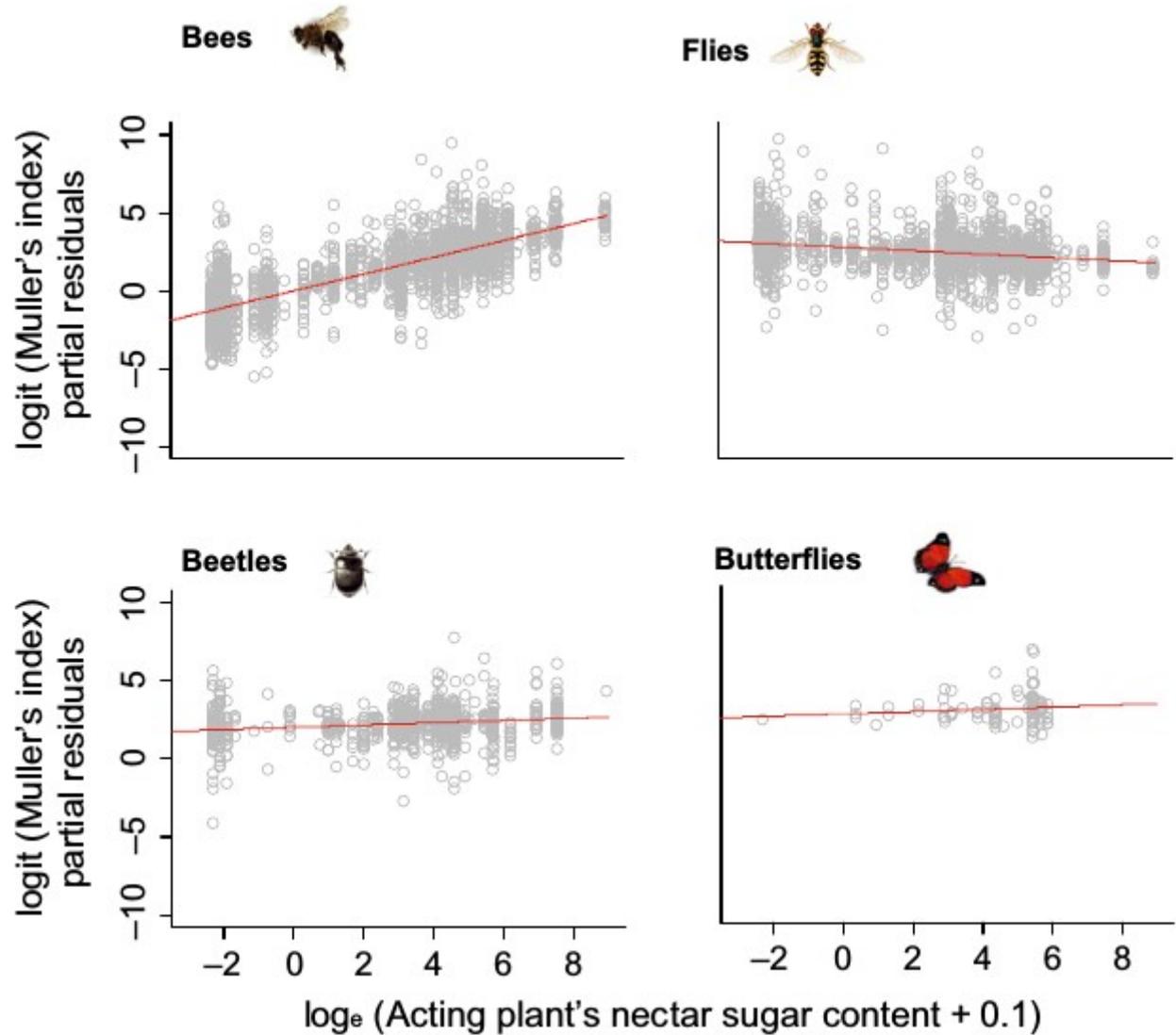
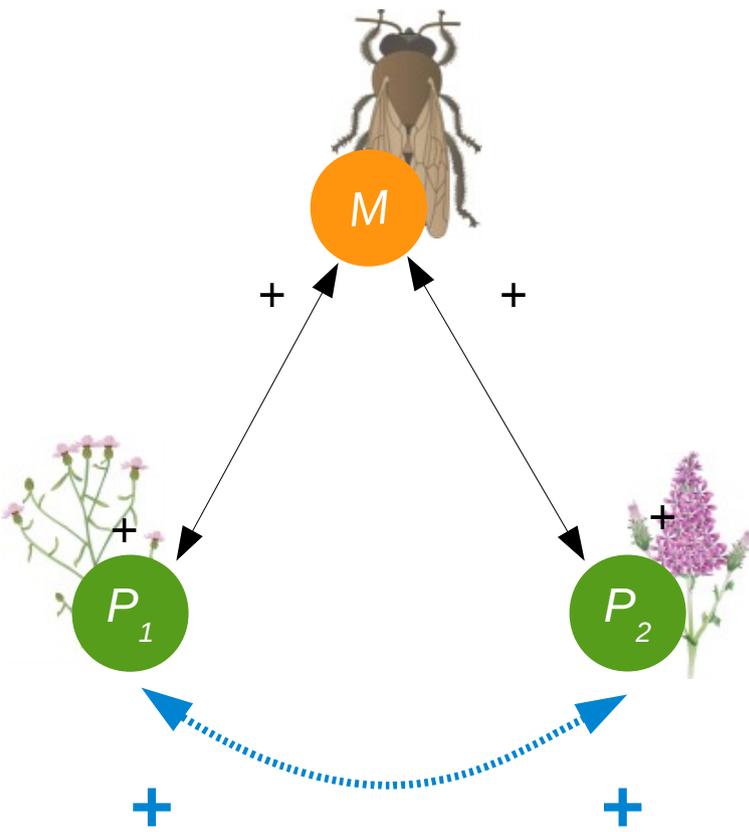
Différents types d'interactions indirectes qui structurent les communautés



Introduction

Différents types d'interactions indirectes qui structurent les communautés

Facilitation apparente



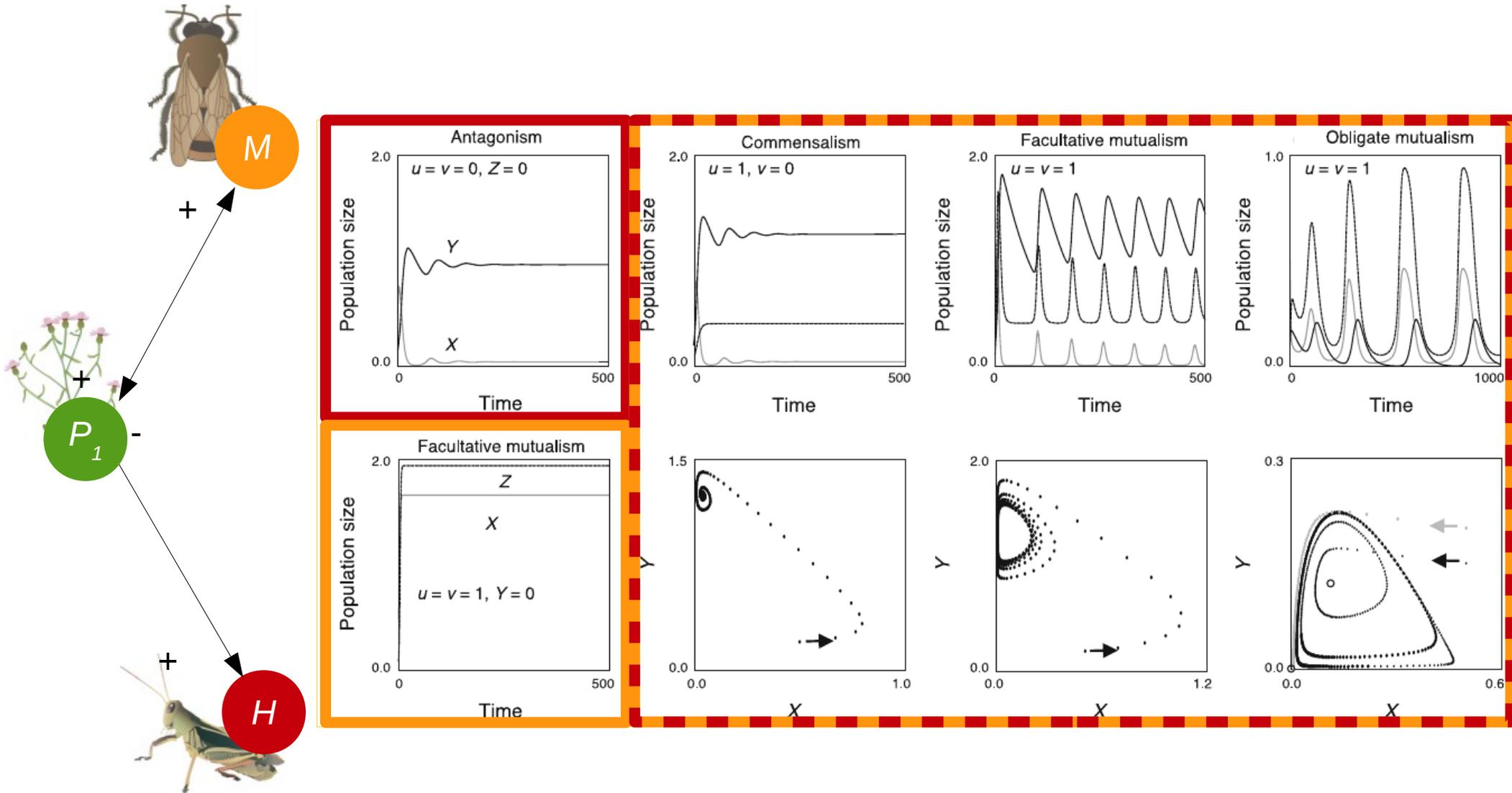
Introduction

Considérer différents types d'interactions ensemble



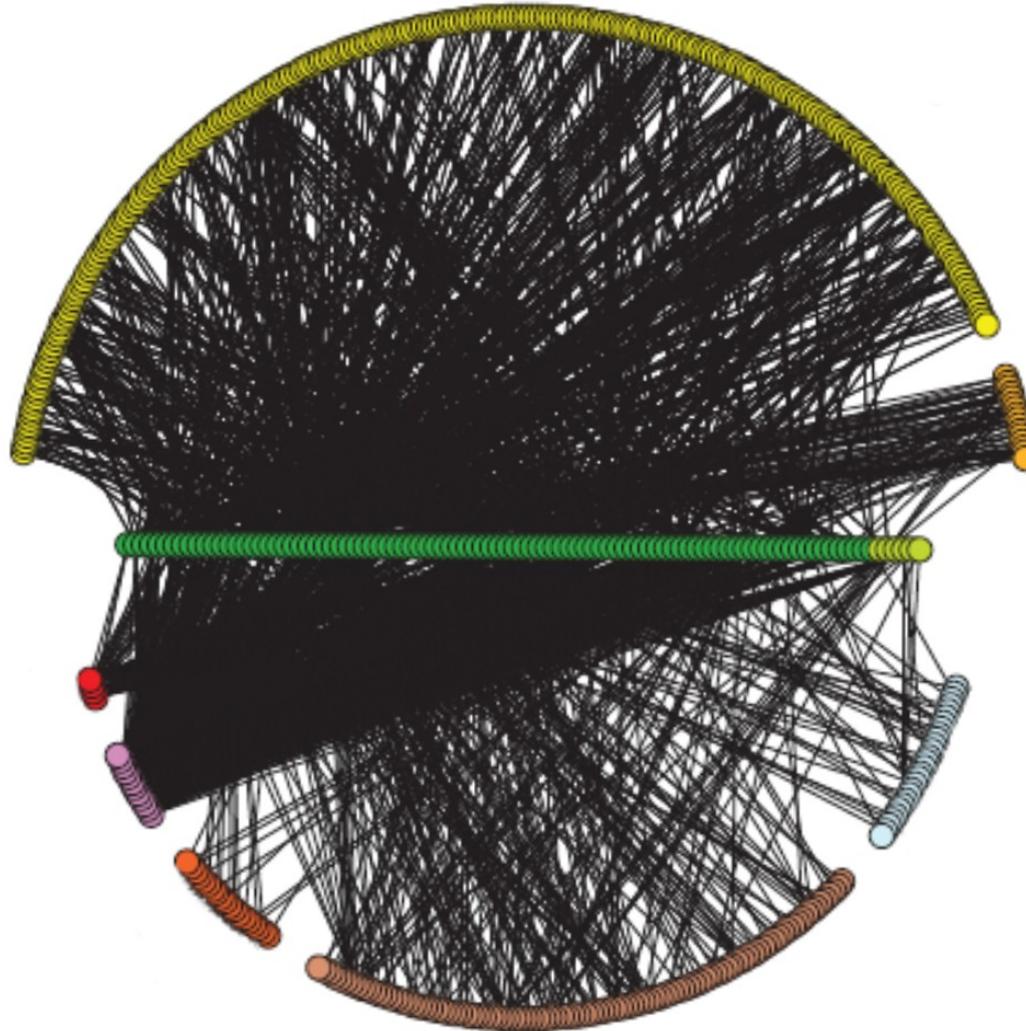
Introduction

La diversité de types d'interactions peut entraîner des dynamiques différentes



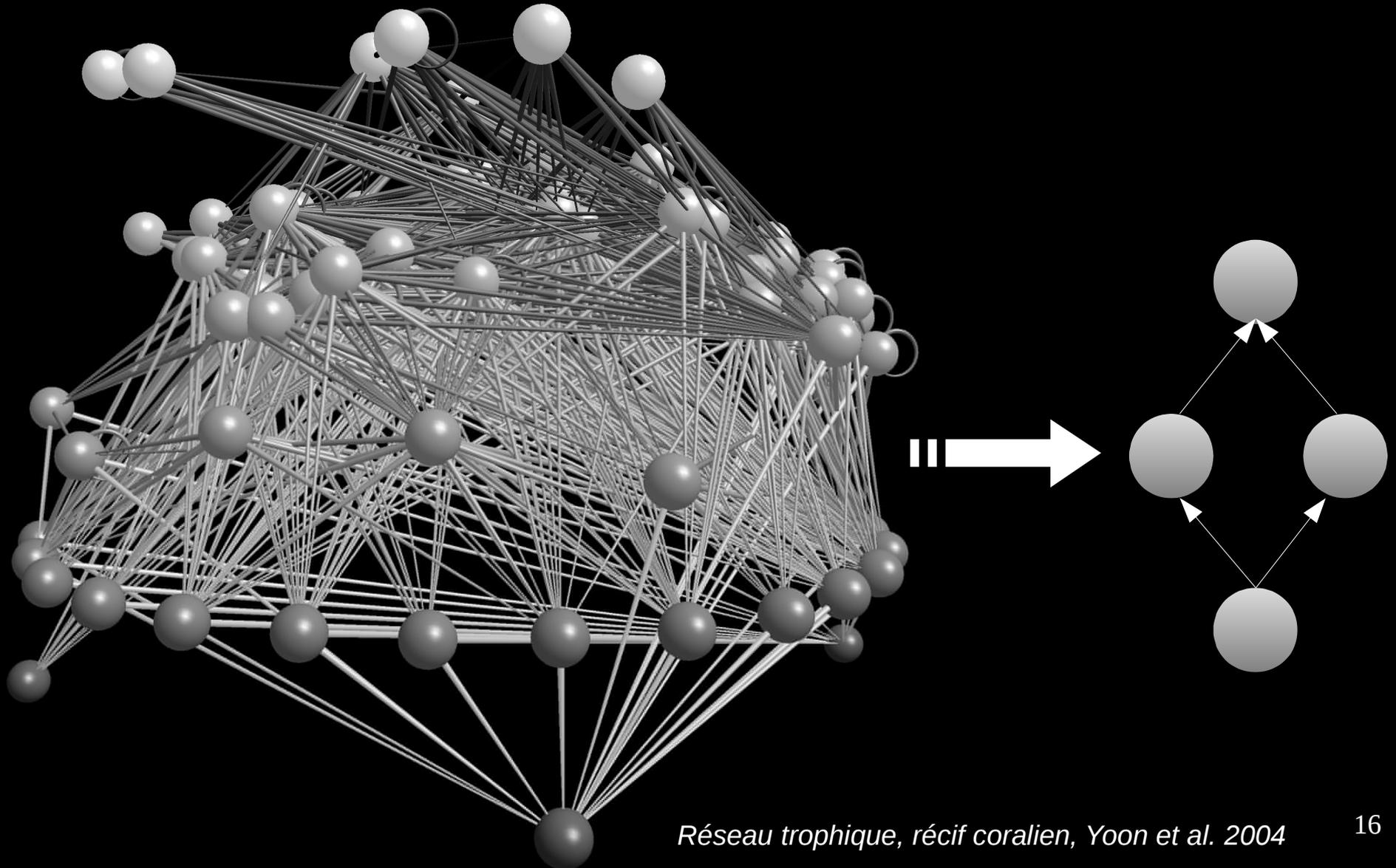
Introduction

A l'échelle des réseaux, des interactions indirectes complexes



Introduction

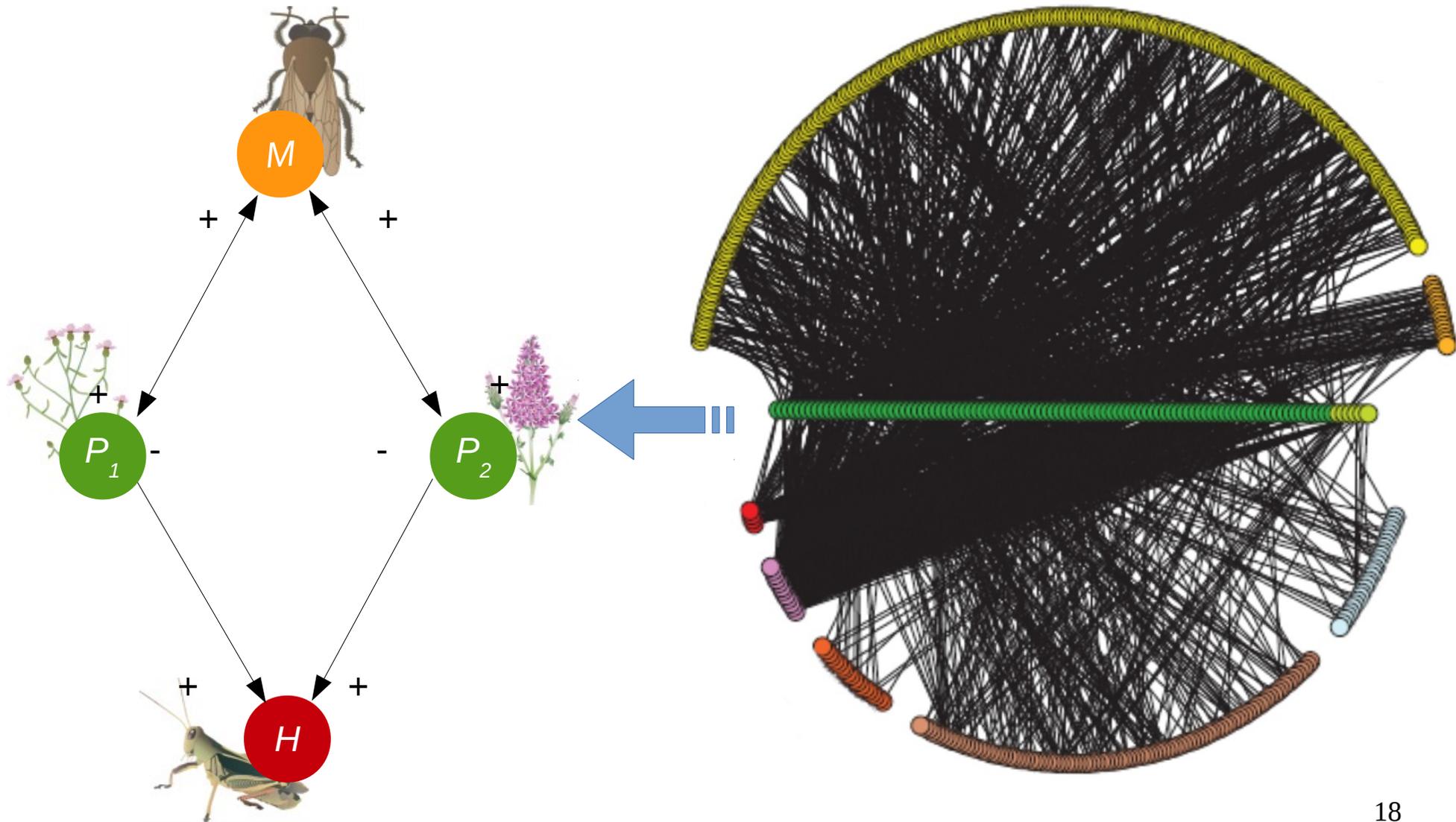
Simplifier les réseaux écologiques pour mieux les décrire



Réseau trophique, récif coralien, Yoon et al. 2004

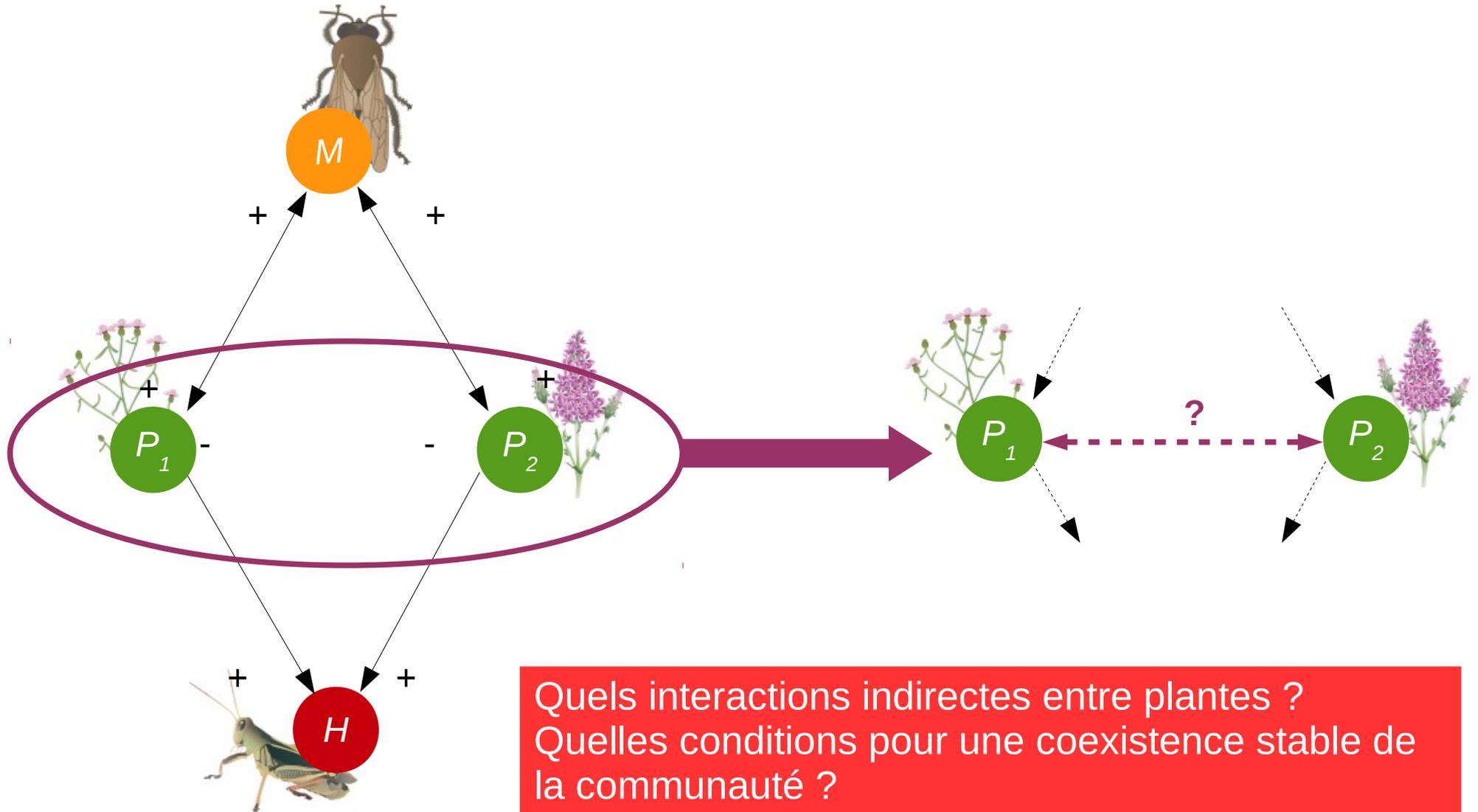
Introduction

Considérer différents types d'interactions ensemble



Introduction

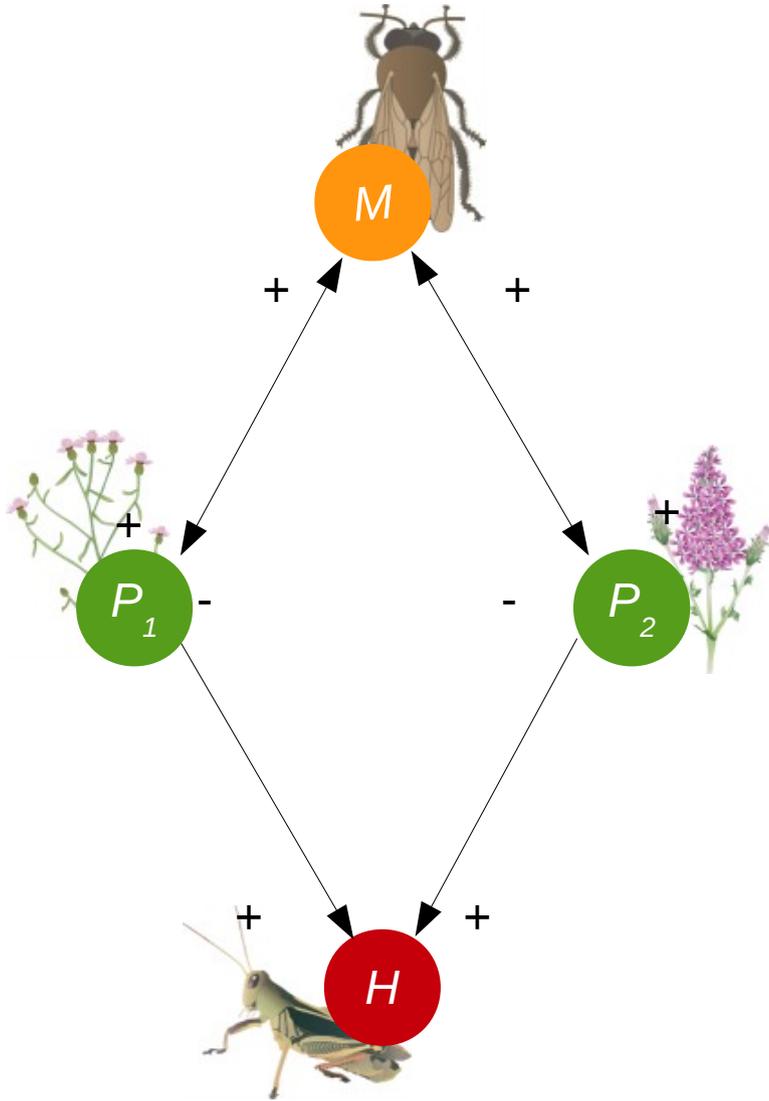
Considérer différents types d'interactions ensemble



Quels interactions indirectes entre plantes ?
Quelles conditions pour une coexistence stable de la communauté ?

Modèle

Un module « diamant » à plusieurs types d'interactions



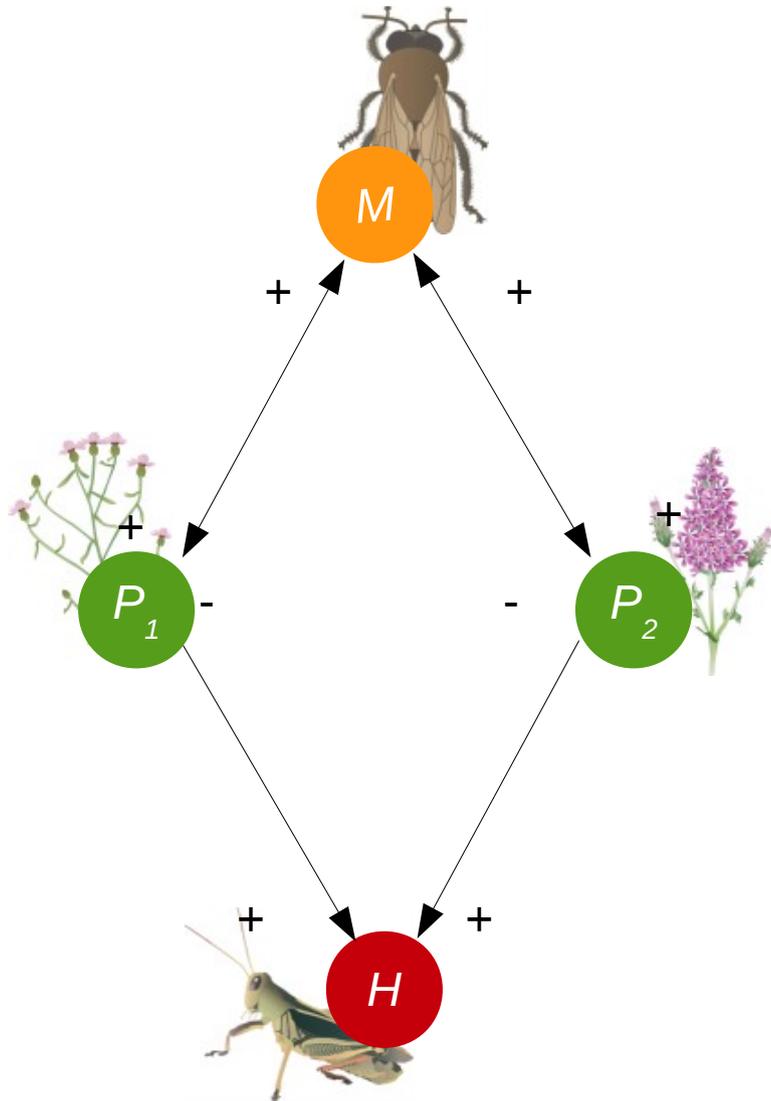
$$\frac{dM}{dt} = (\alpha^M - \beta^M M + \sum_i (\gamma_i^M P_i)) M$$

$$\frac{dP_i}{dt} = (\alpha^P - \beta^P P_i + \gamma_i^P M - \delta_i^P H) P_i$$

$$\frac{dH}{dt} = (\alpha^H - \beta^H H + \sum_i (\delta_i^H P_i)) H$$

Modèle

Un module « diamant » à plusieurs types d'interactions



$$\frac{dM}{dt} = (\alpha^M - \beta^M M + \sum_i (\gamma_i^M P_i)) M$$

$$\frac{dP_i}{dt} = (\alpha^P - \beta^P P_i + \gamma_i^P M - \delta_i^P H) P_i$$

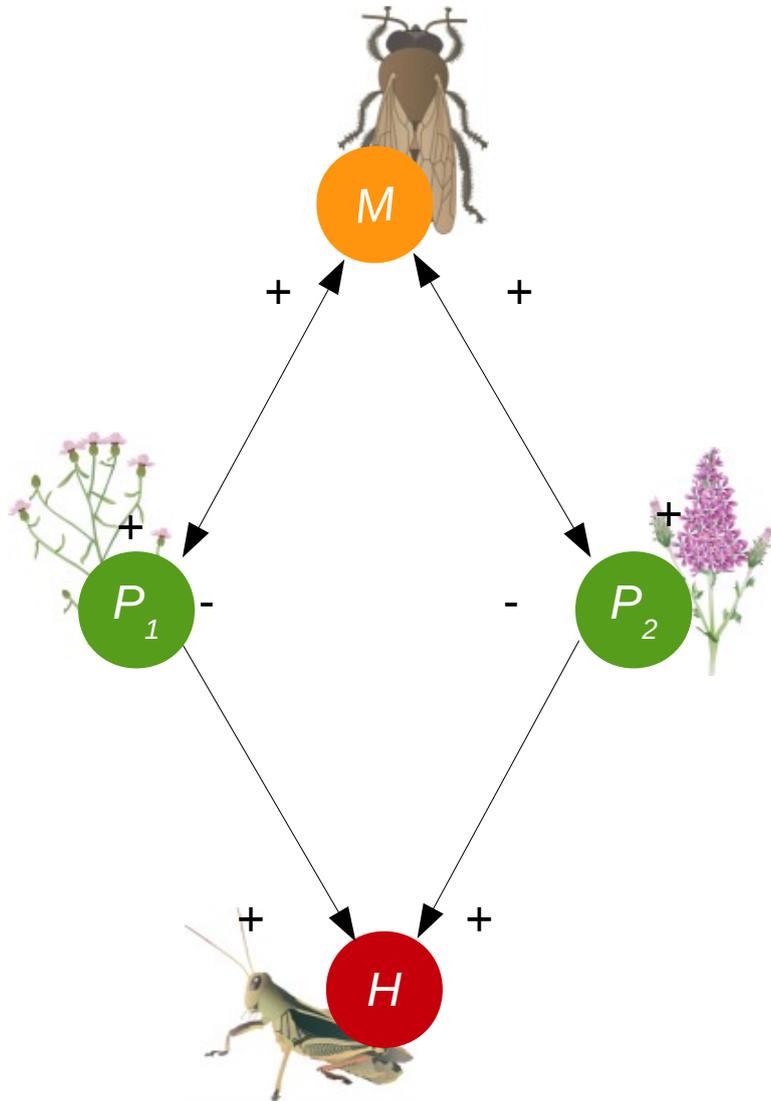
Taux de croissance intrinsèque

Taux de compétition intra-spécifique

$$\frac{dH}{dt} = (\alpha^H - \beta^H H + \sum_i (\delta_i^H P_i)) H$$

Modèle

Un module « diamant » à plusieurs types d'interactions



$$\frac{dM}{dt} = (\alpha^M - \beta^M M + \sum_i (\gamma_i^M P_i)) M$$

$$\frac{dP_i}{dt} = (\alpha^P - \beta^P P_i + \gamma_i^P M - \delta_i^P H) P_i$$

Taux de croissance intrinsèque

Taux de compétition intra-spécifique

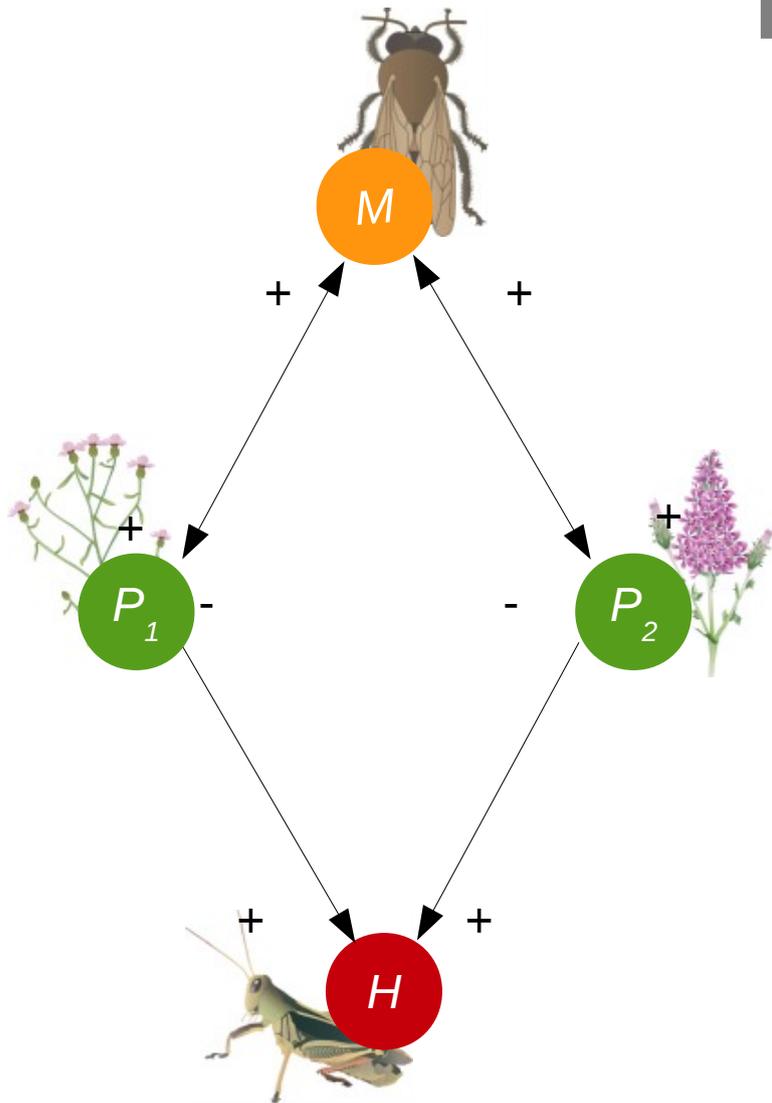
Interaction antagoniste

Interaction mutualiste

$$\frac{dH}{dt} = (\alpha^H - \beta^H H + \sum_i (\delta_i^H P_i)) H$$

Modèle

Réduction du système à deux dimensions



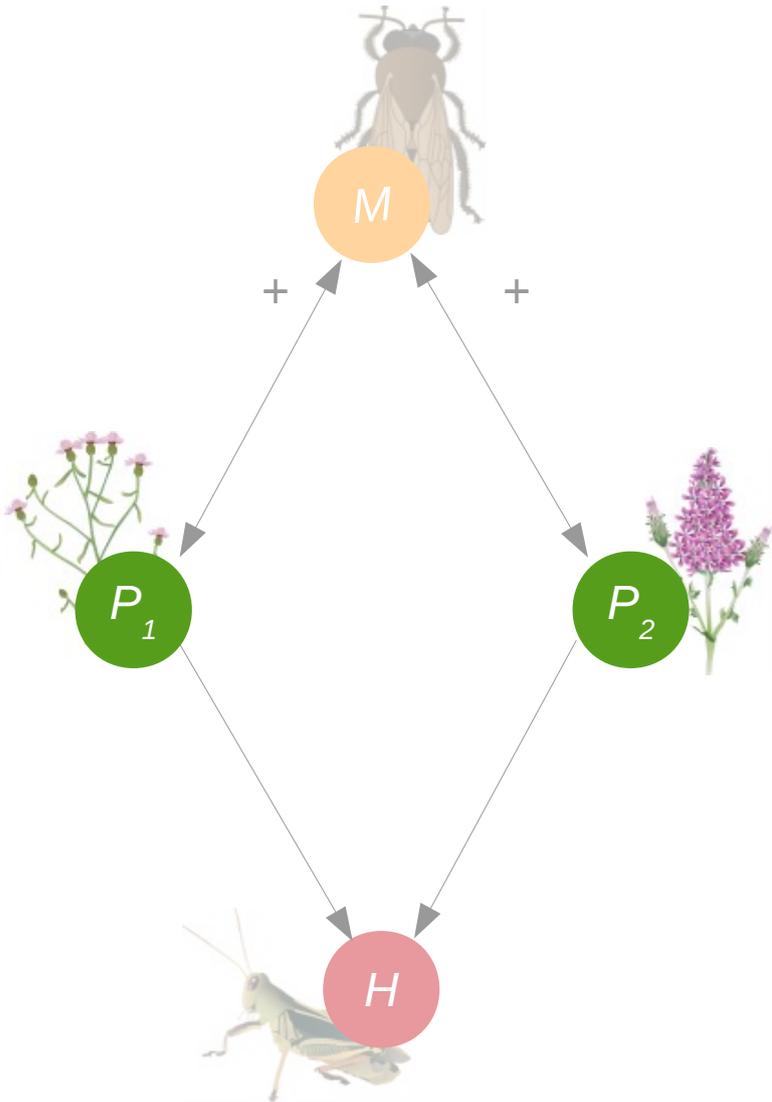
M et H ont des dynamiques plus rapides que P_i

$$\frac{dP_i}{P_i dt} = \pi_i - \sum_j C_{ij} P_j$$

→ Un modèle Lotka-Volterra à deux dimensions

Modèle

Réduction du système à deux dimensions



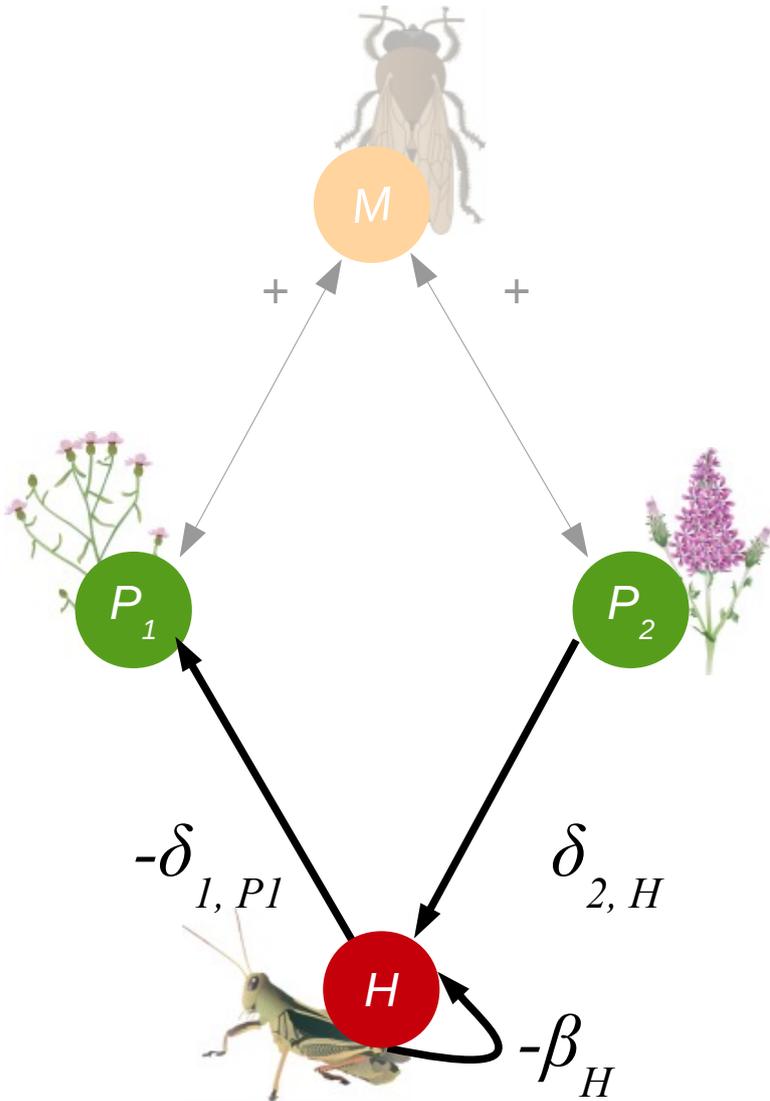
$$\frac{dP_i}{P_i dt} = \pi_i - \sum_j C_{ij} P_j$$

Effet net de P_j sur P_i

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Modèle

Réduction du système à deux dimensions



$$\frac{dP_i}{P_i dt} = \pi_i - \sum_j C_{ij} P_j$$

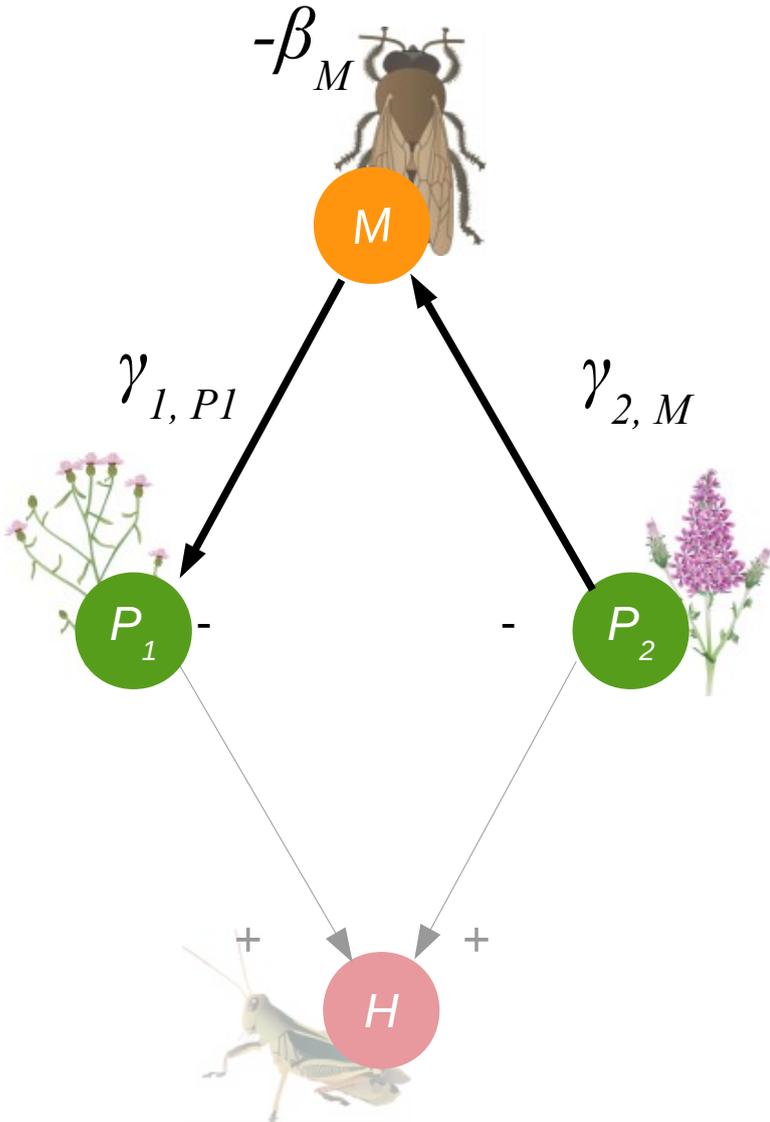
Effet net de P_j sur P_i

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Effets indirects négatifs par H

Modèle

Réduction du système à deux dimensions



$$\frac{dP_i}{P_i dt} = \pi_i - \sum_j C_{ij} P_j$$

Effet net de P_j sur P_i

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Effets indirects négatifs par H

Effets indirects positifs par M

Interactions indirectes

Différents types d'interactions indirectes possibles

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Effets indirects négatifs par H

Effets indirects positifs par M

Interactions indirectes

Différents types d'interactions indirectes possibles

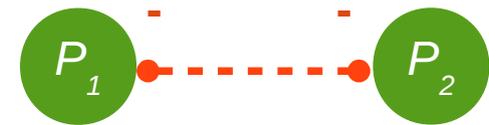
$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Effets indirects négatifs par H

Effets indirects positifs par M

Compétition apparente

$$\forall \{i, j\} \in \{1, 2\}, C_{ij} > 0 \Leftrightarrow \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} > \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$



Interactions indirectes

Différents types d'interactions indirectes possibles

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Effets indirects négatifs par H

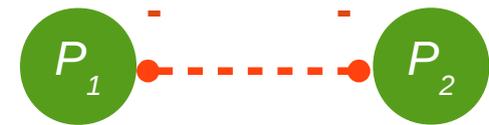
Effets indirects positifs par M

Compétition apparente

$$\forall \{i, j\} \in \{1, 2\}, C_{ij} > 0 \Leftrightarrow \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} > \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Facilitation apparente

$$\forall \{i, j\} \in \{1, 2\}, C_{ij} < 0 \Leftrightarrow \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} < \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$



Interactions indirectes

Différents types d'interactions indirectes possibles

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Effets indirects négatifs par H

Effets indirects positifs par M

Compétition apparente

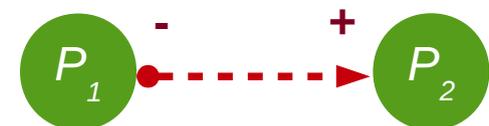
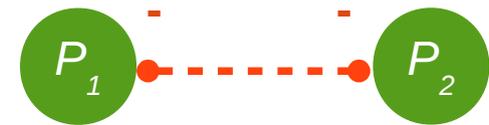
$$\forall \{i, j\} \in \{1, 2\}, C_{ij} > 0 \Leftrightarrow \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} > \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Facilitation apparente

$$\forall \{i, j\} \in \{1, 2\}, C_{ij} < 0 \Leftrightarrow \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} < \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

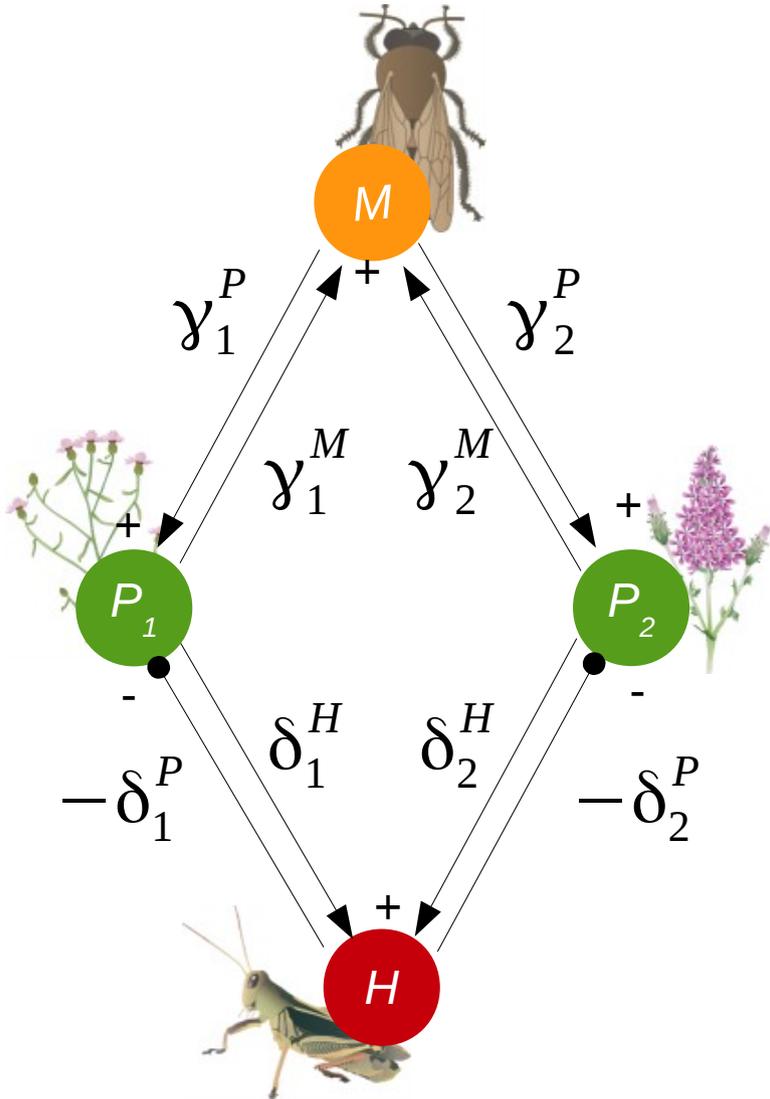
Antagonisme apparent

$$i \neq j, \{i, j\} \in \{1, 2\}, C_{ij} < 0 \wedge C_{ji} > 0$$



Interactions indirectes

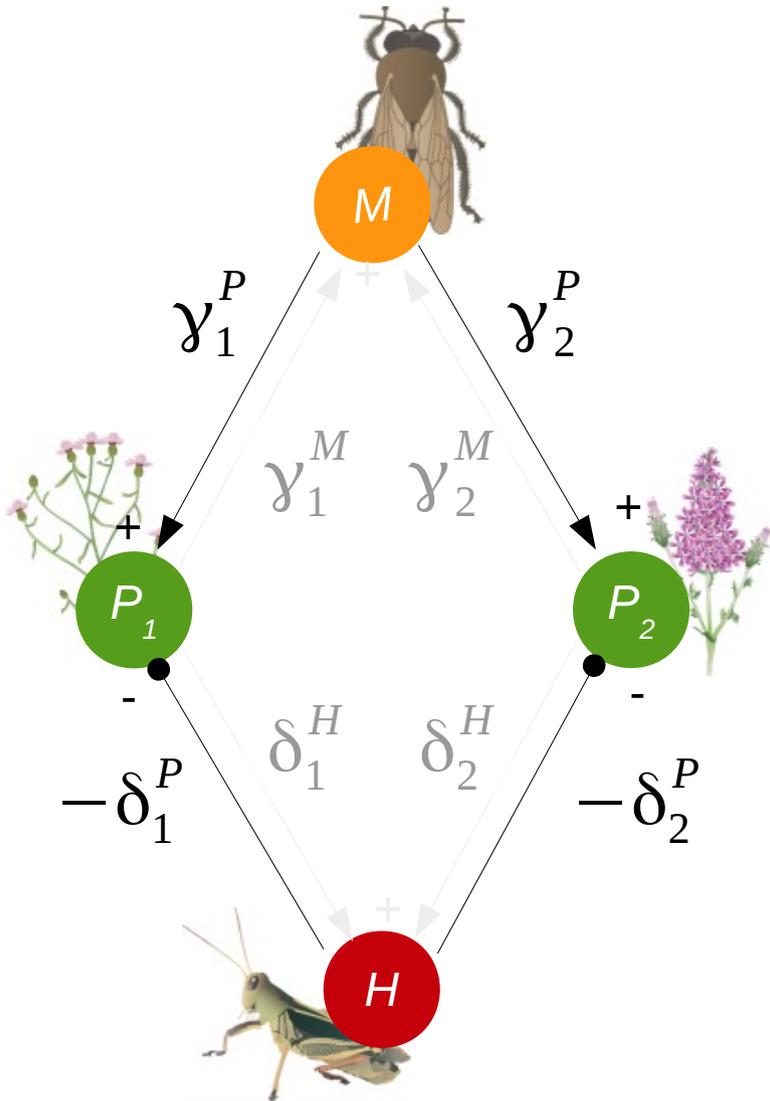
La nature des effets indirects dépend des forces d'interactions



$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Interactions indirectes

La nature des effets indirects dépend des forces d'interactions

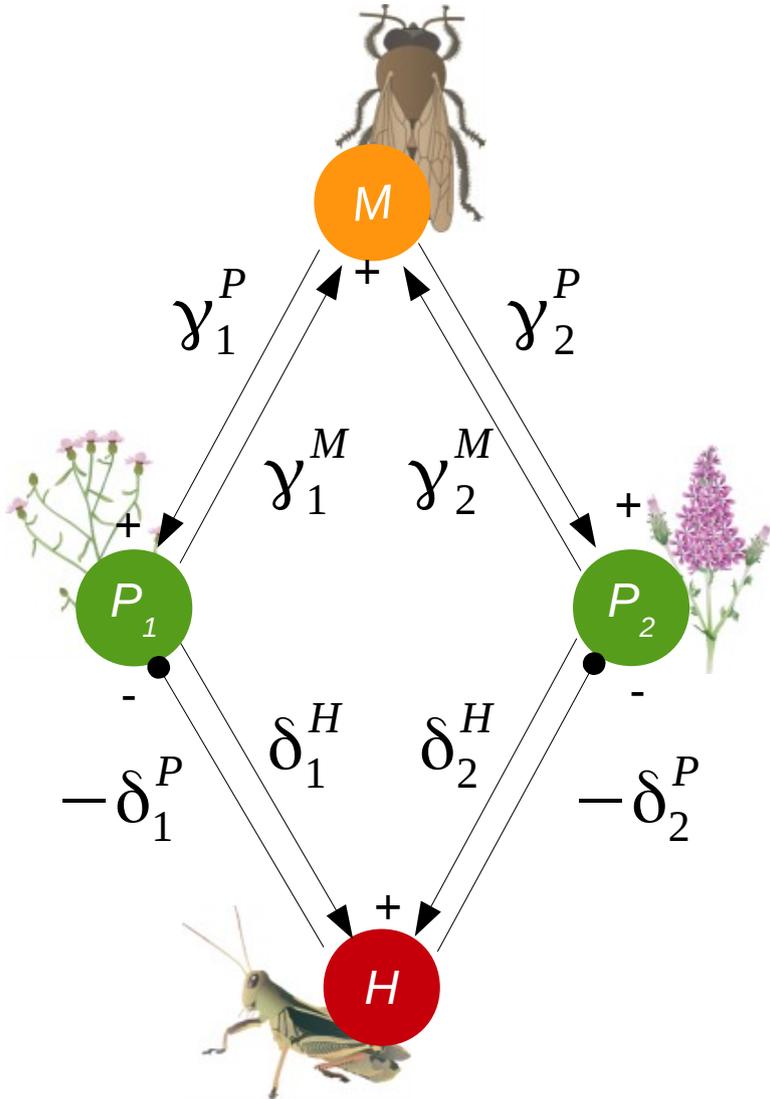


$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Généralisme des espèces

Interactions indirectes

La nature des effets indirects dépend des forces d'interactions



$$C_{ji} = \delta_i^H \delta_j^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_i^M \gamma_j^P (\beta^M)^{-1}$$

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

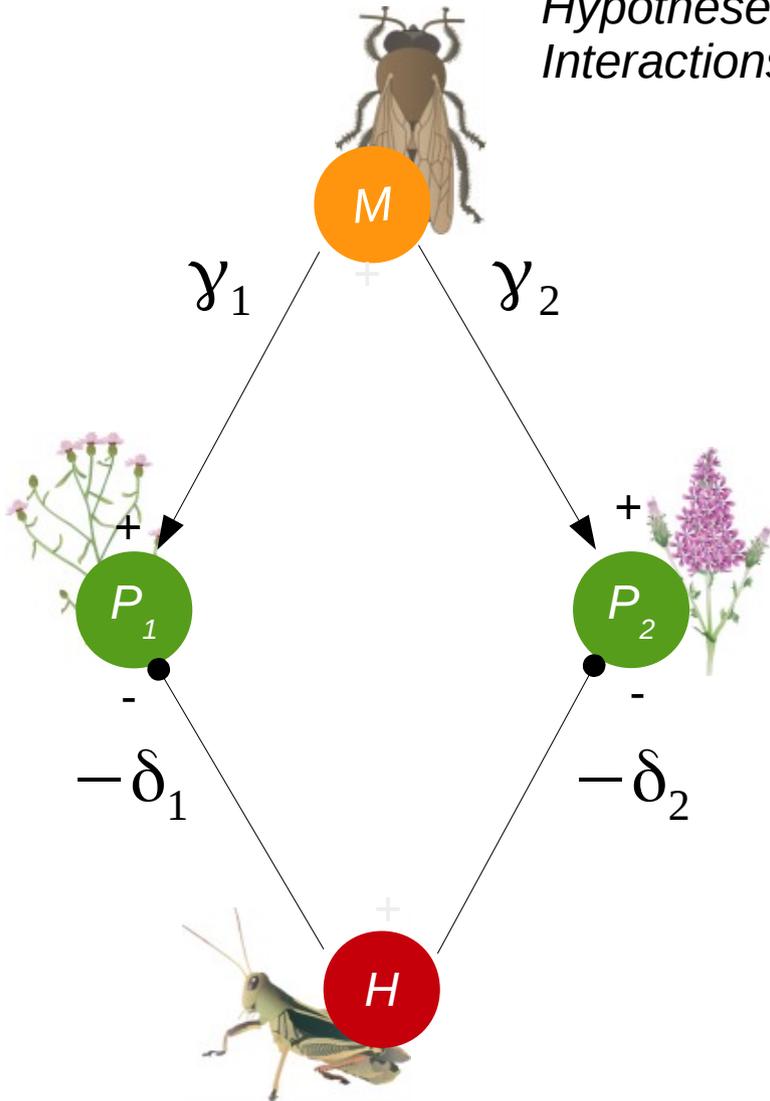
Asymétrie des interactions

Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces

Hypothèses : Les interactions sont symétriques.

Interactions antagonistes et mutualistes de même amplitude maximale.



$$C_{ji} = C_{ij} = \delta_i \boxed{\delta_i} (\beta^H)^{-1} - \gamma_j \boxed{\gamma_i} (\beta^M)^{-1}$$

Généralisme des espèces

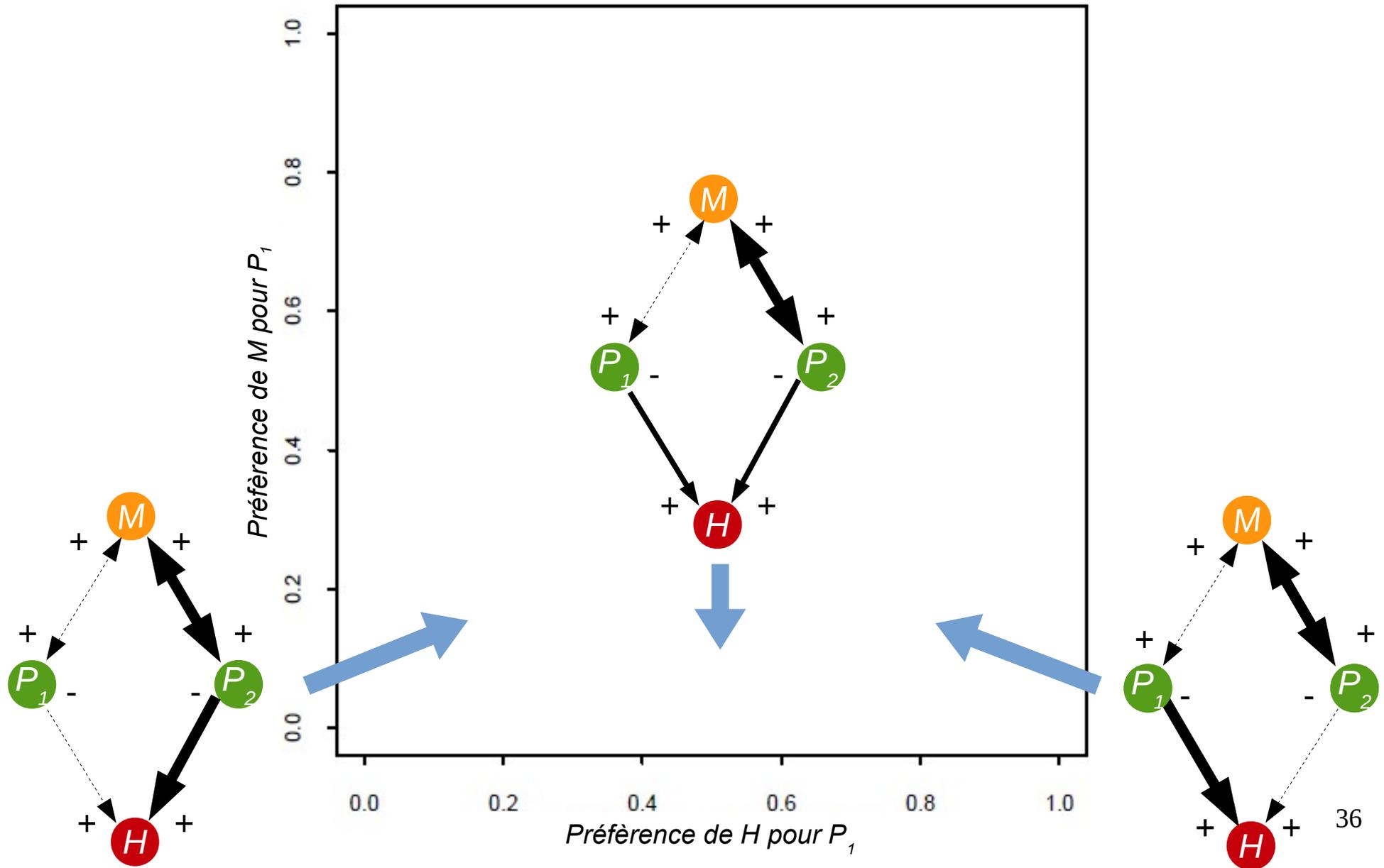
$$\gamma_i = I \omega_i^M, \quad \boxed{\omega_i^M} \in [0, 1] \quad \text{and} \quad \sum_i \gamma_i = 1$$

$$\delta_i = I \omega_i^H, \quad \boxed{\omega_i^H} \in [0, 1] \quad \text{and} \quad \sum_i \delta_i = 1$$

Préférences des espèces

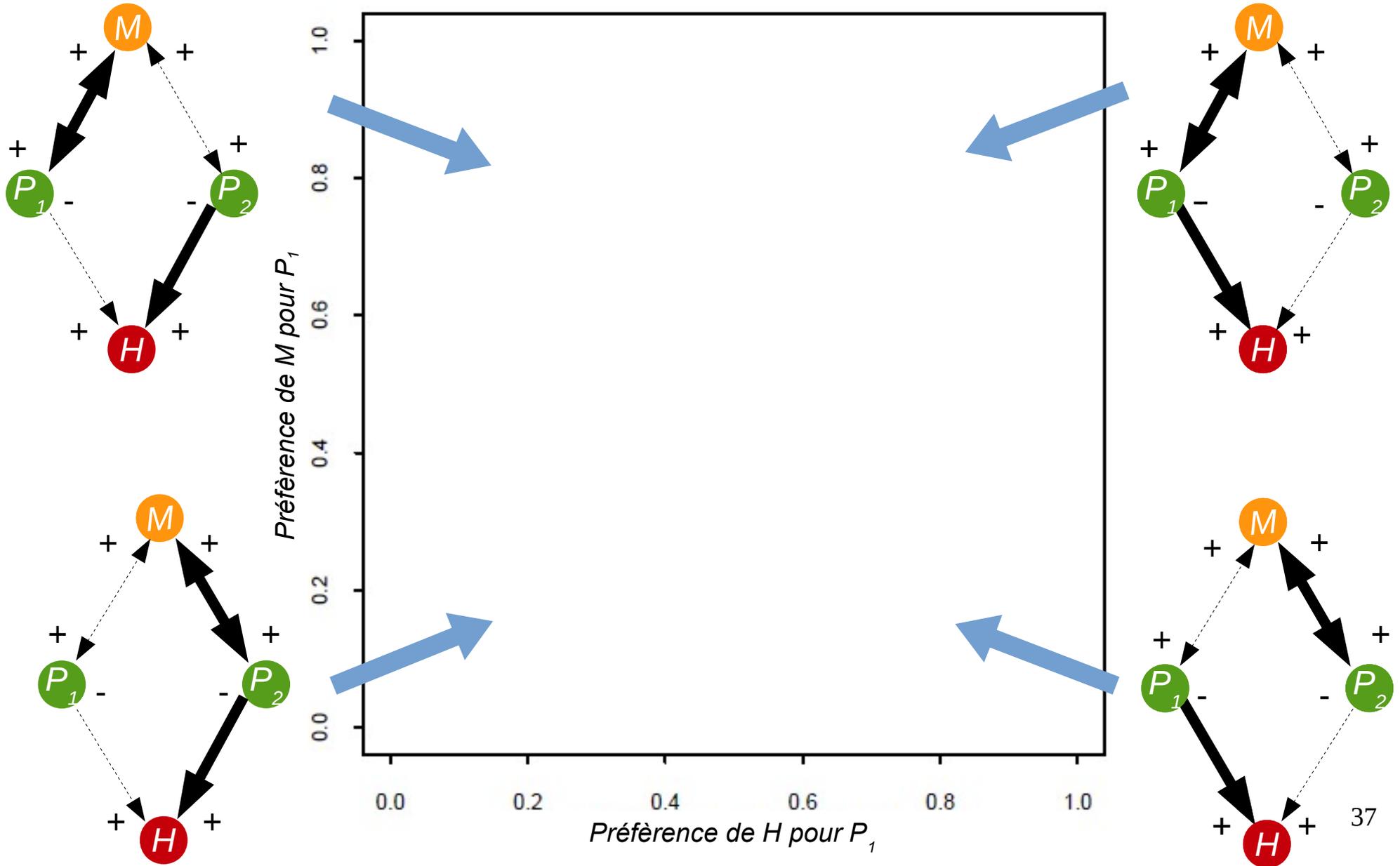
Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



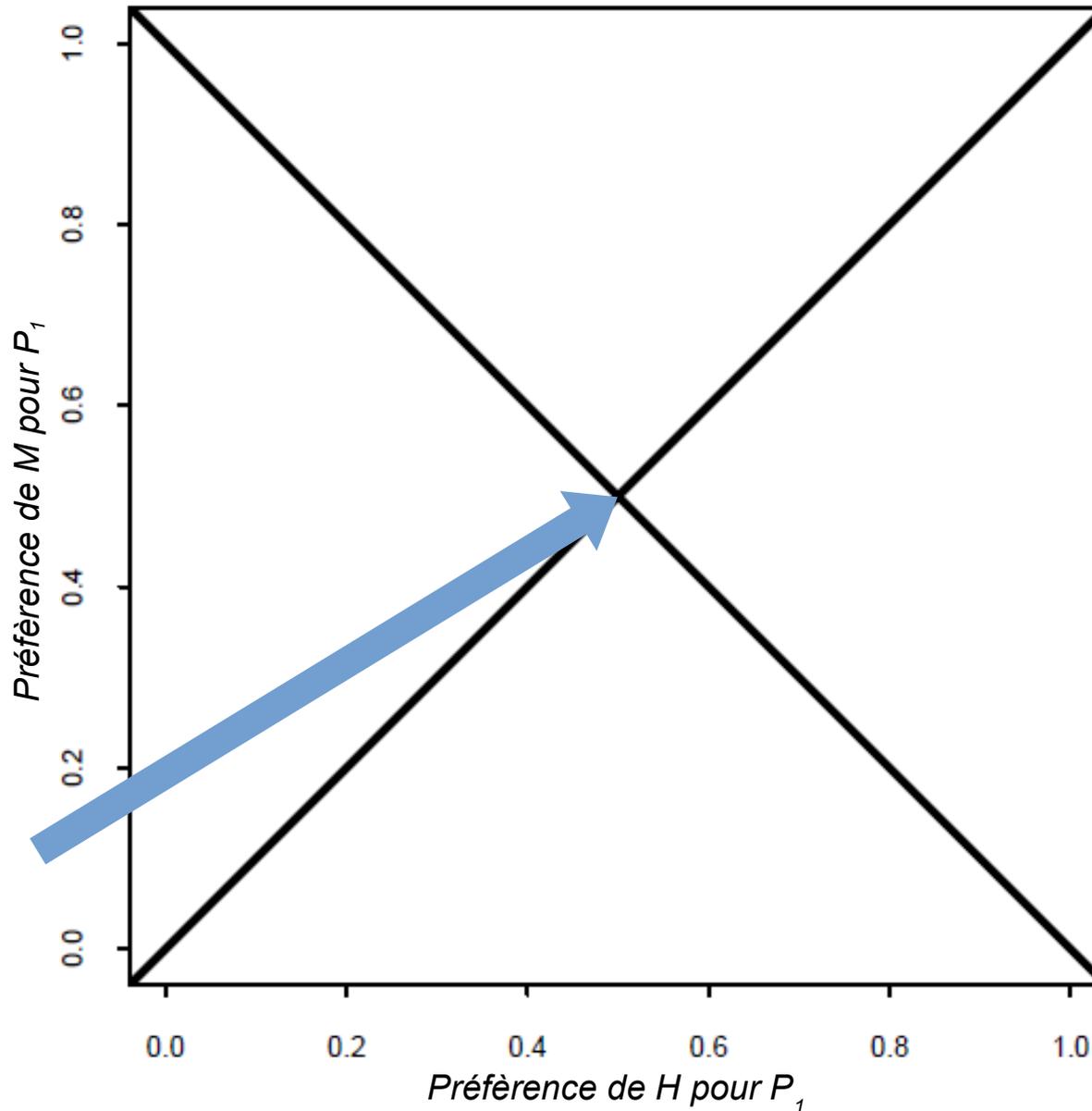
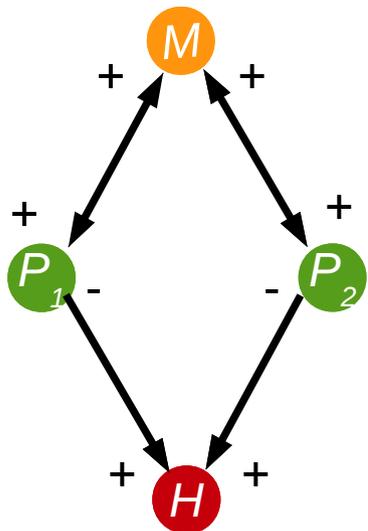
Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



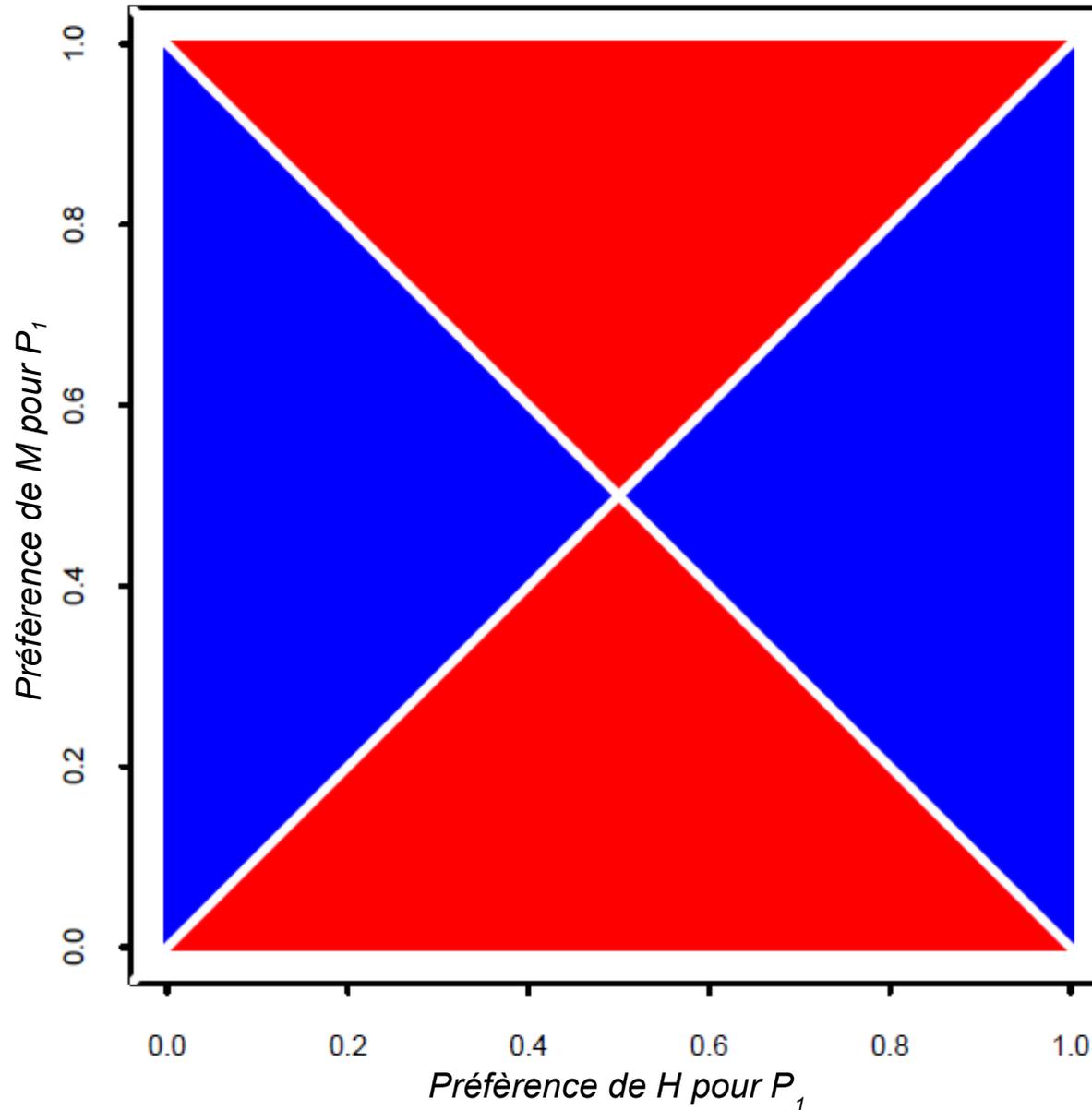
Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



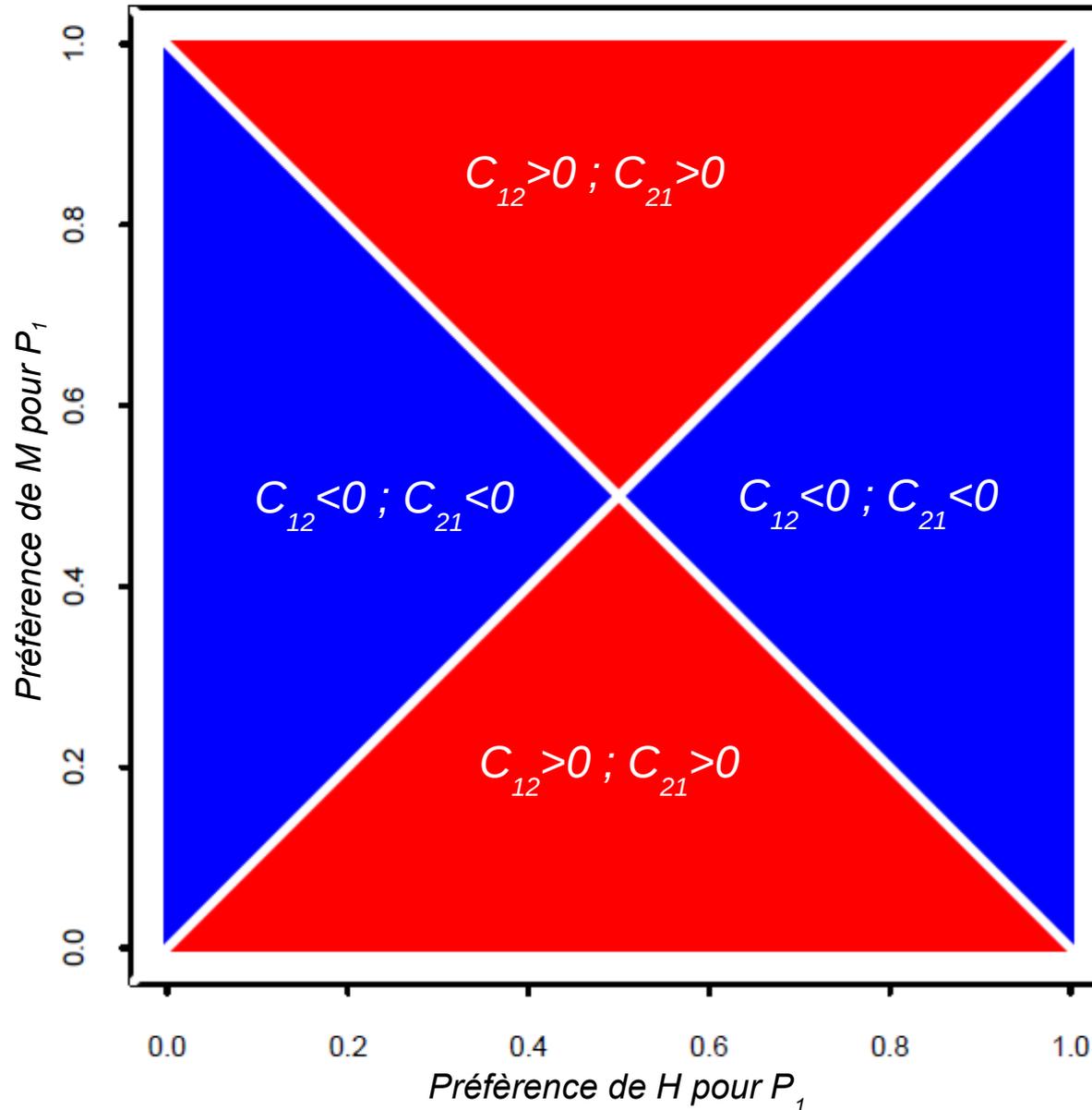
Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



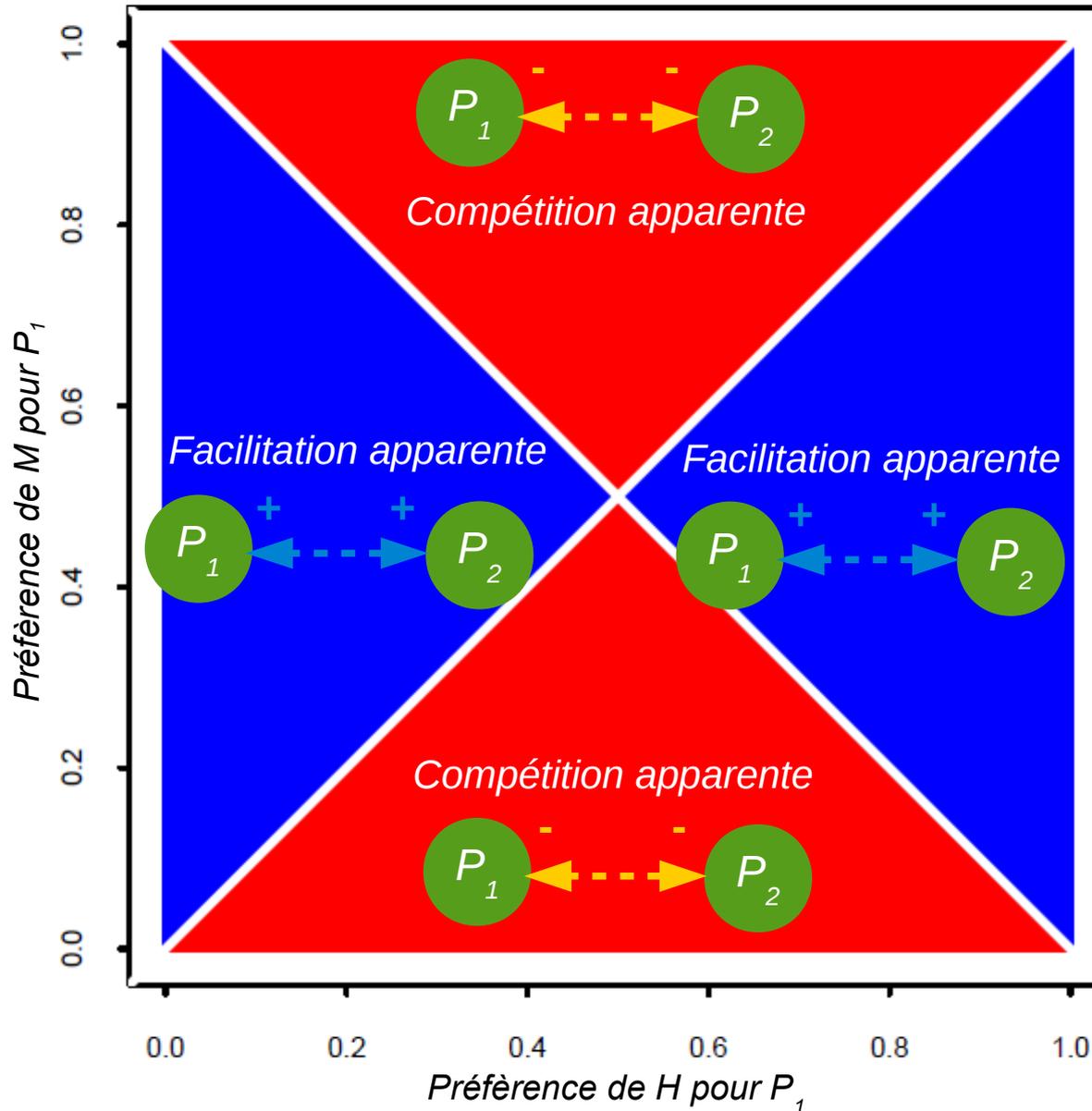
Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



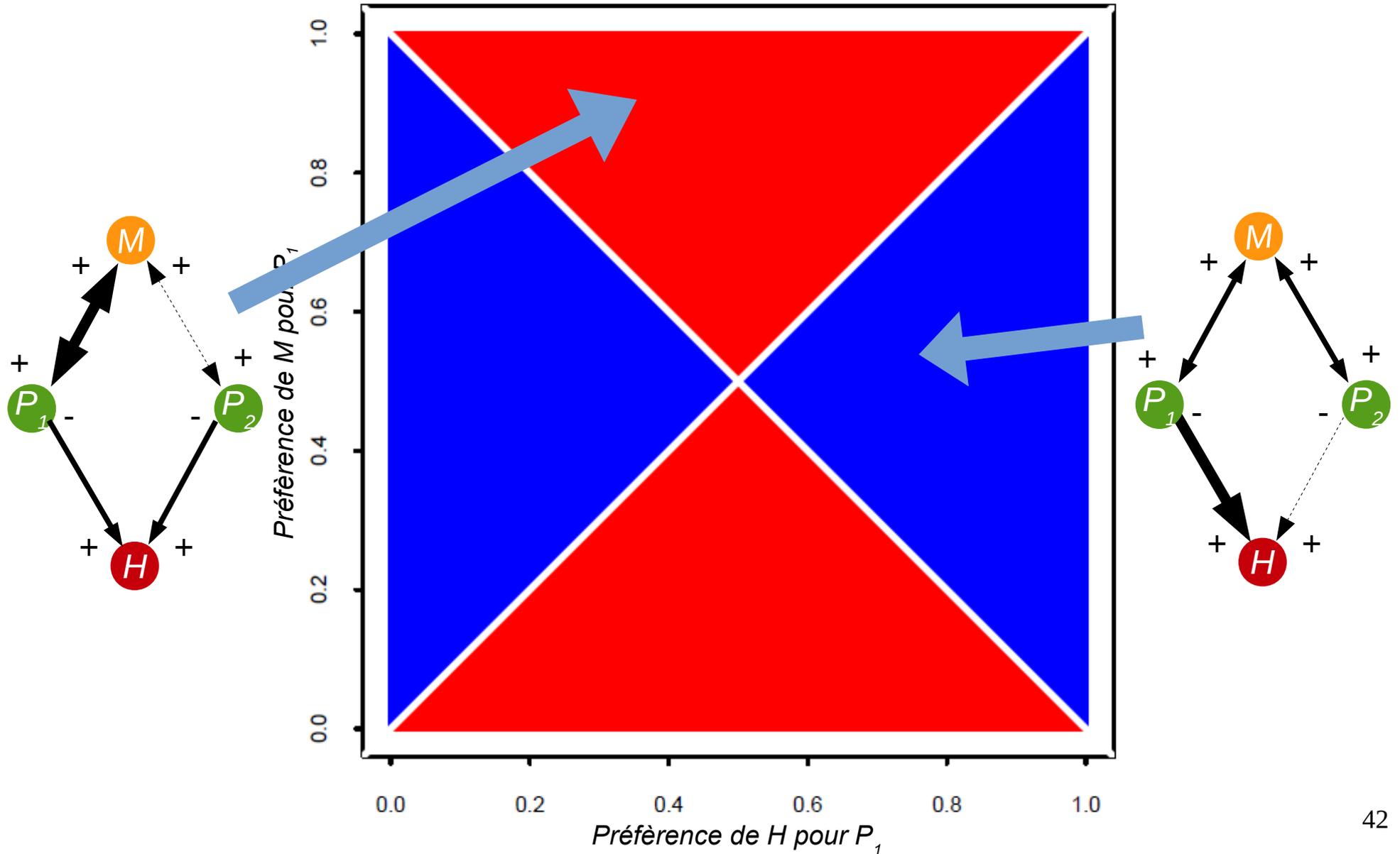
Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



Interactions indirectes

Effet du généralisme des espèces



Interactions indirectes

Résumé des résultats

Résultats généraux

- Différents types d'interactions indirectes possibles (forces relatives mutualisme/antagonisme)
- Interactions symétriques = facilitation/compétition apparente
- Interactions asymétriques = antagonisme apparent possible

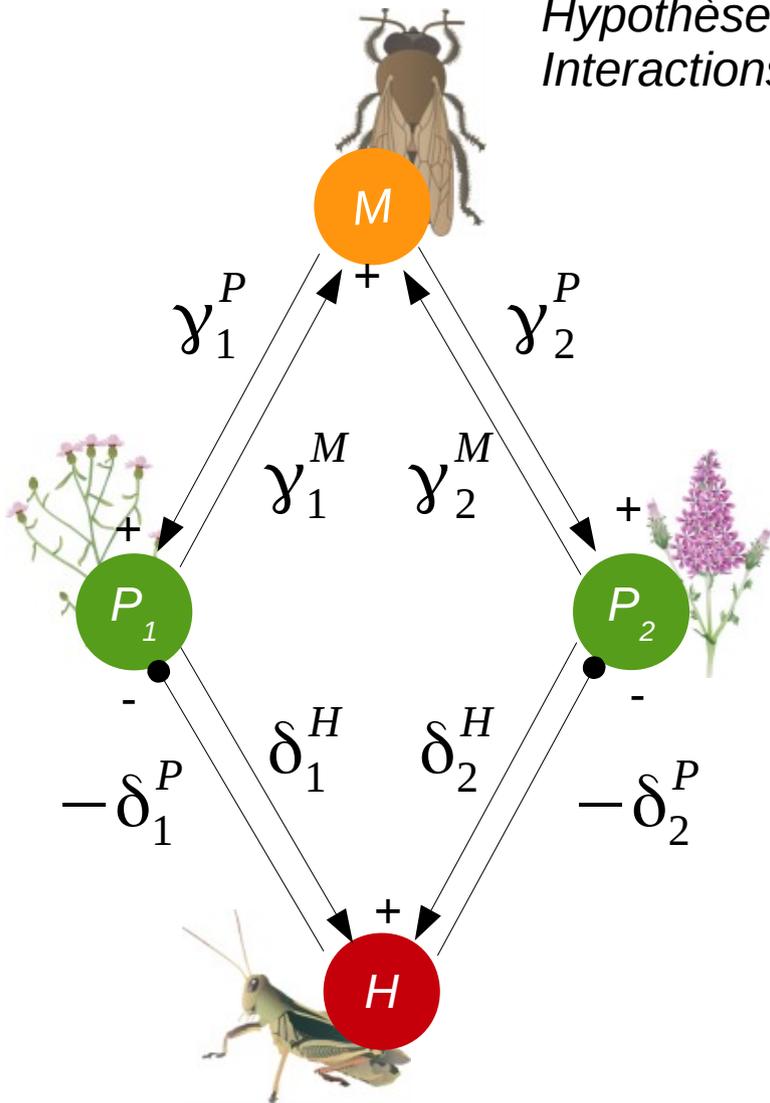
Effet du généralisme des espèces

- Facilitation apparente = M plus généraliste que H
- Compétition apparente = H plus généraliste que M

Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions

Hypothèses : Les interactions mutualistes sont asymétriques.
Interactions mutualistes et antagonistes de même amplitude maximale.



$$C_{ji} = \delta_i^H \delta_j^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_i^M \gamma_j^P (\beta^M)^{-1}$$

$$C_{ij} = \delta_j^H \delta_i^P (\beta^H)^{-1} - \gamma_j^M \gamma_i^P (\beta^M)^{-1}$$

Asymétrie des interactions

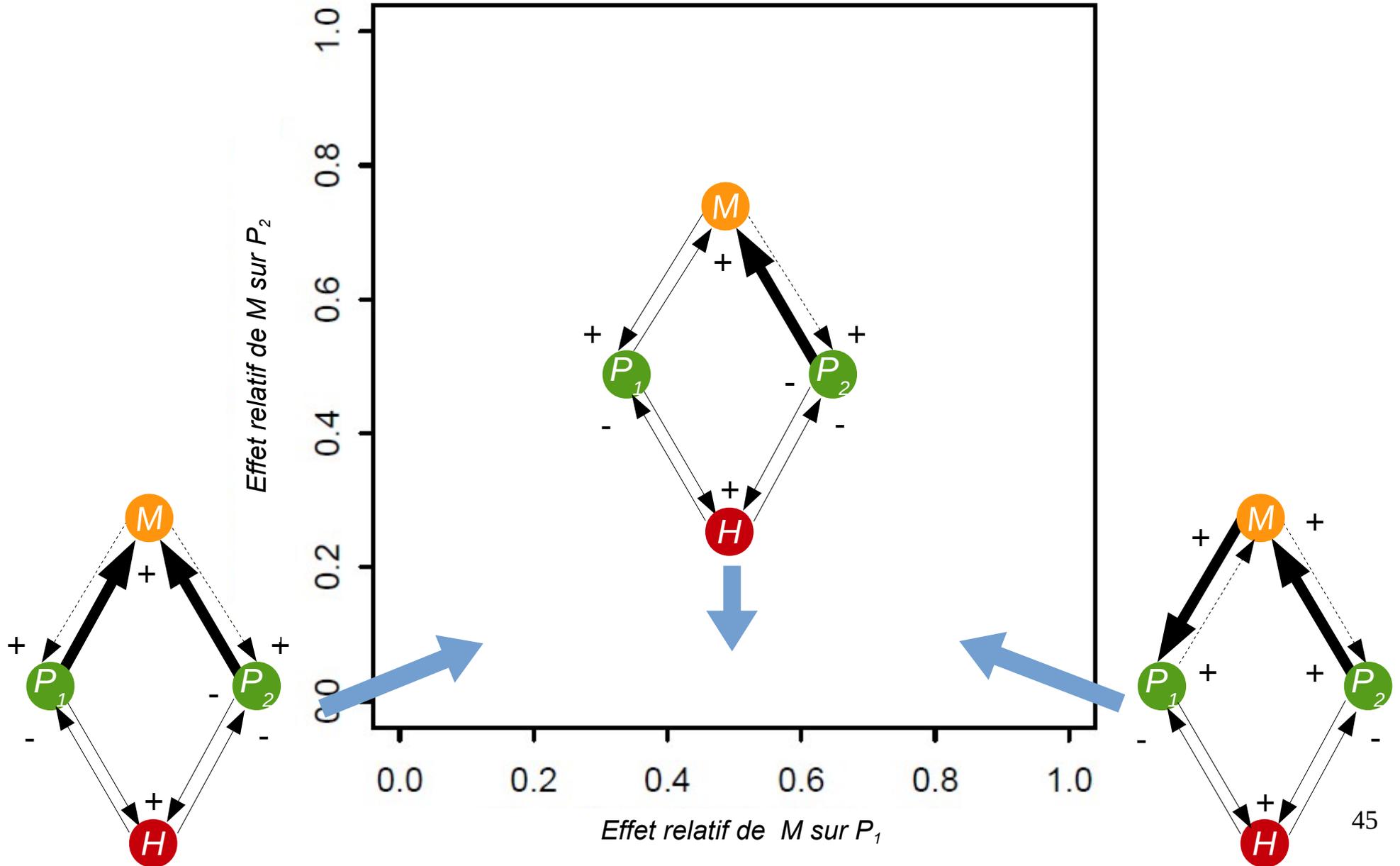
$$\forall i, \gamma_i^P = I\epsilon_i \text{ and } \gamma_i^M = I(1 - \epsilon_i), \epsilon_i \in [0, 1]$$

$$\forall i, \delta_i^P = \delta_i^H = I/2$$

Effet relatif de M sur Pi ~ asymétrie

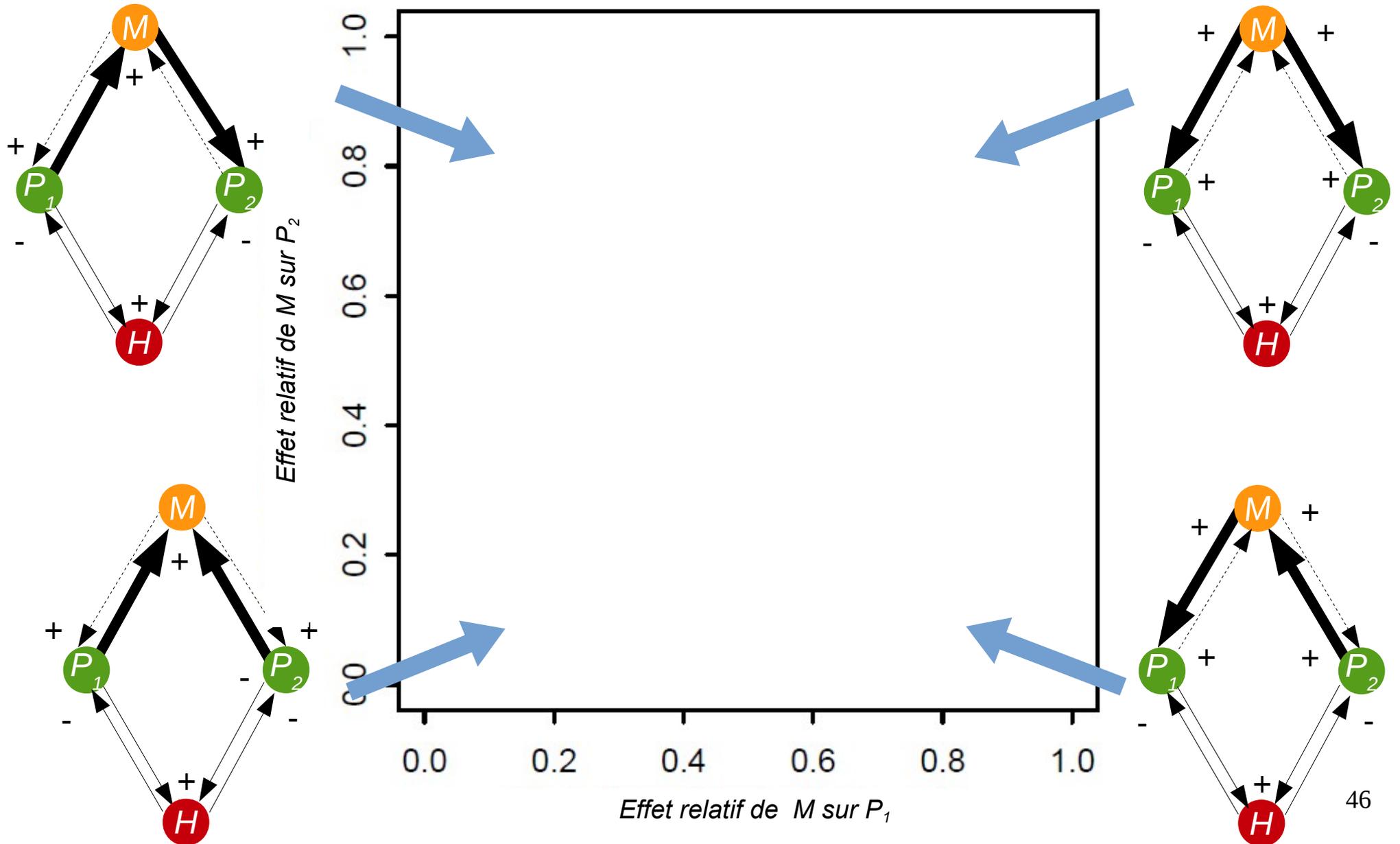
Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



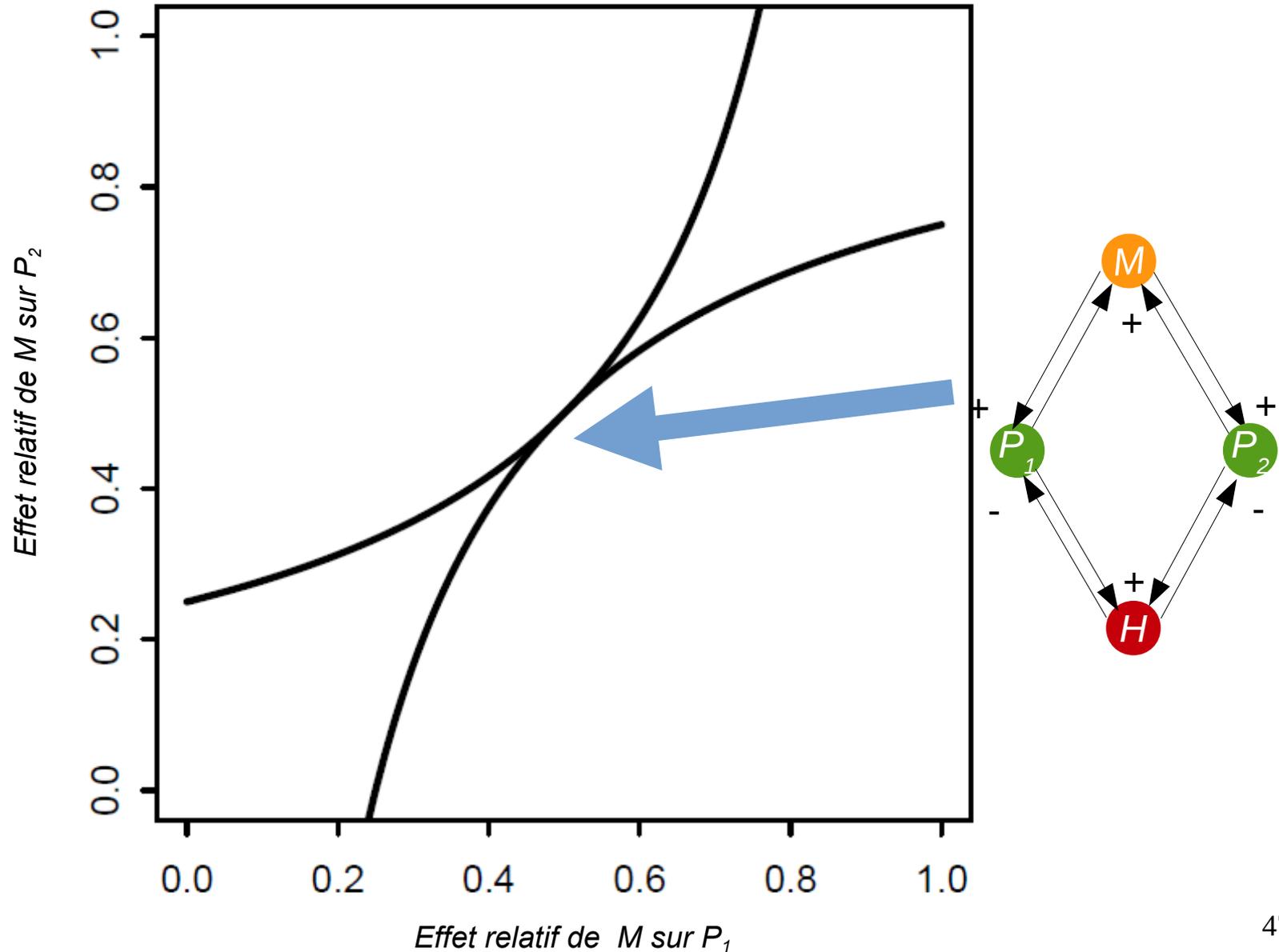
Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



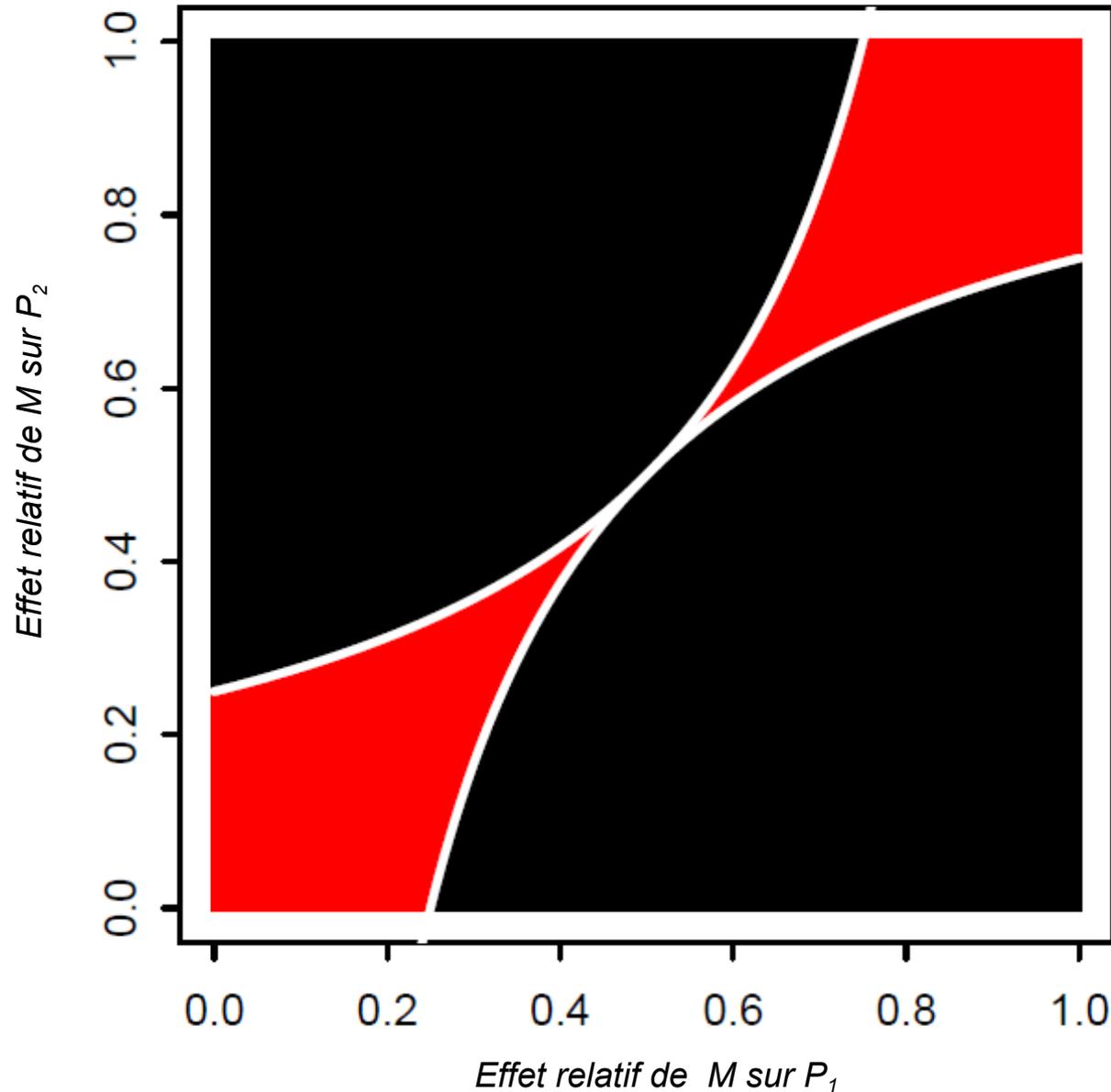
Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



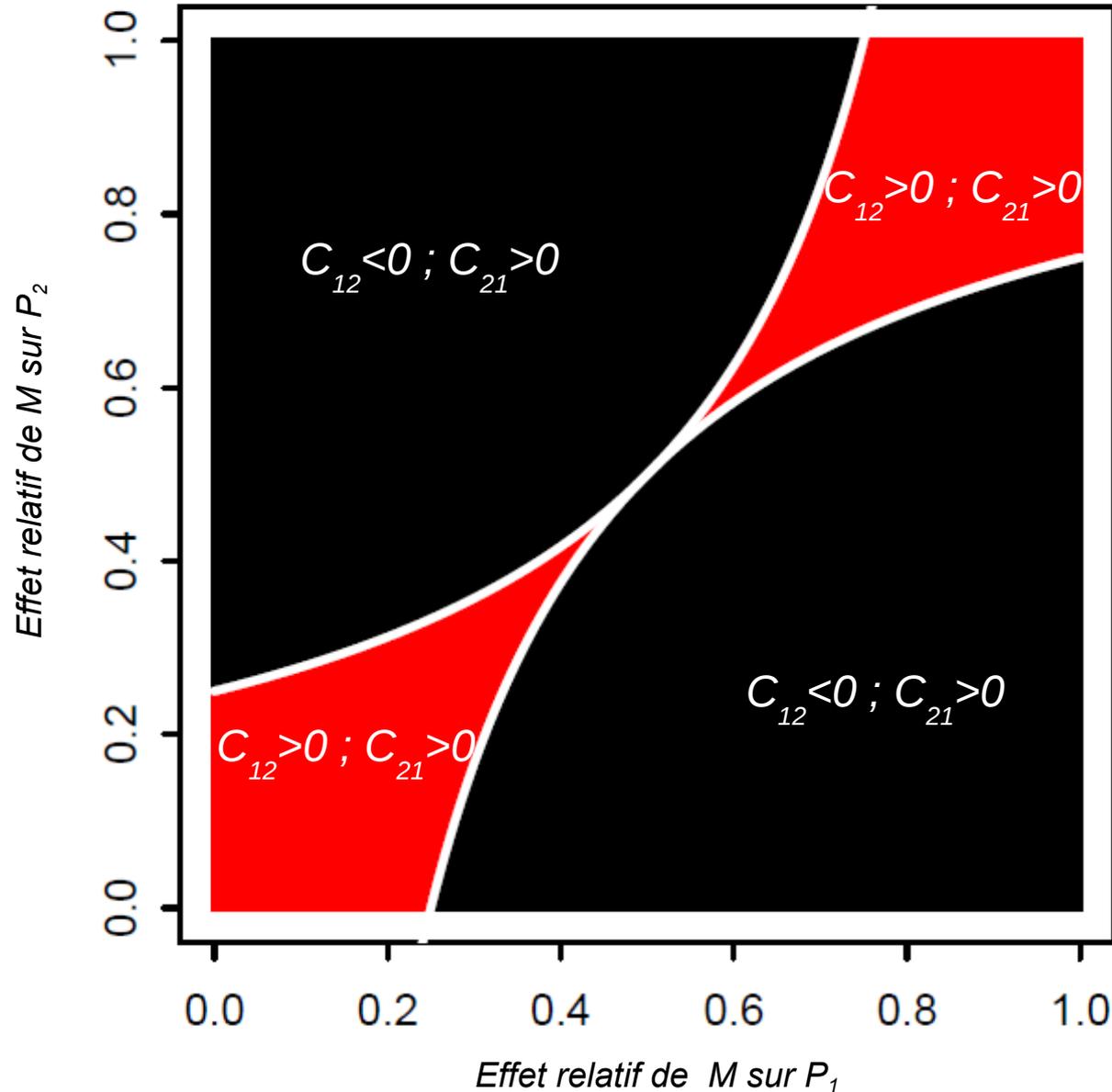
Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



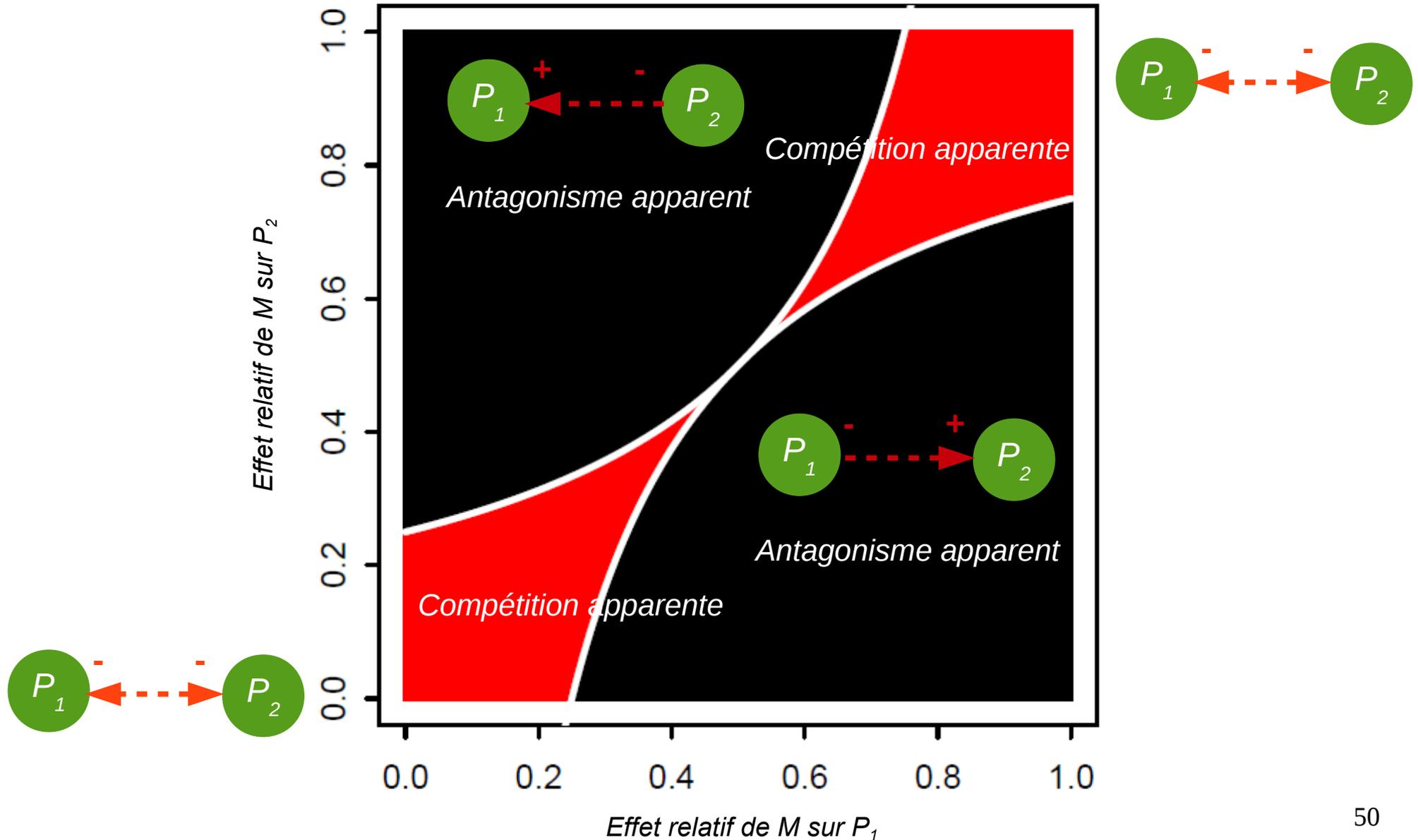
Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



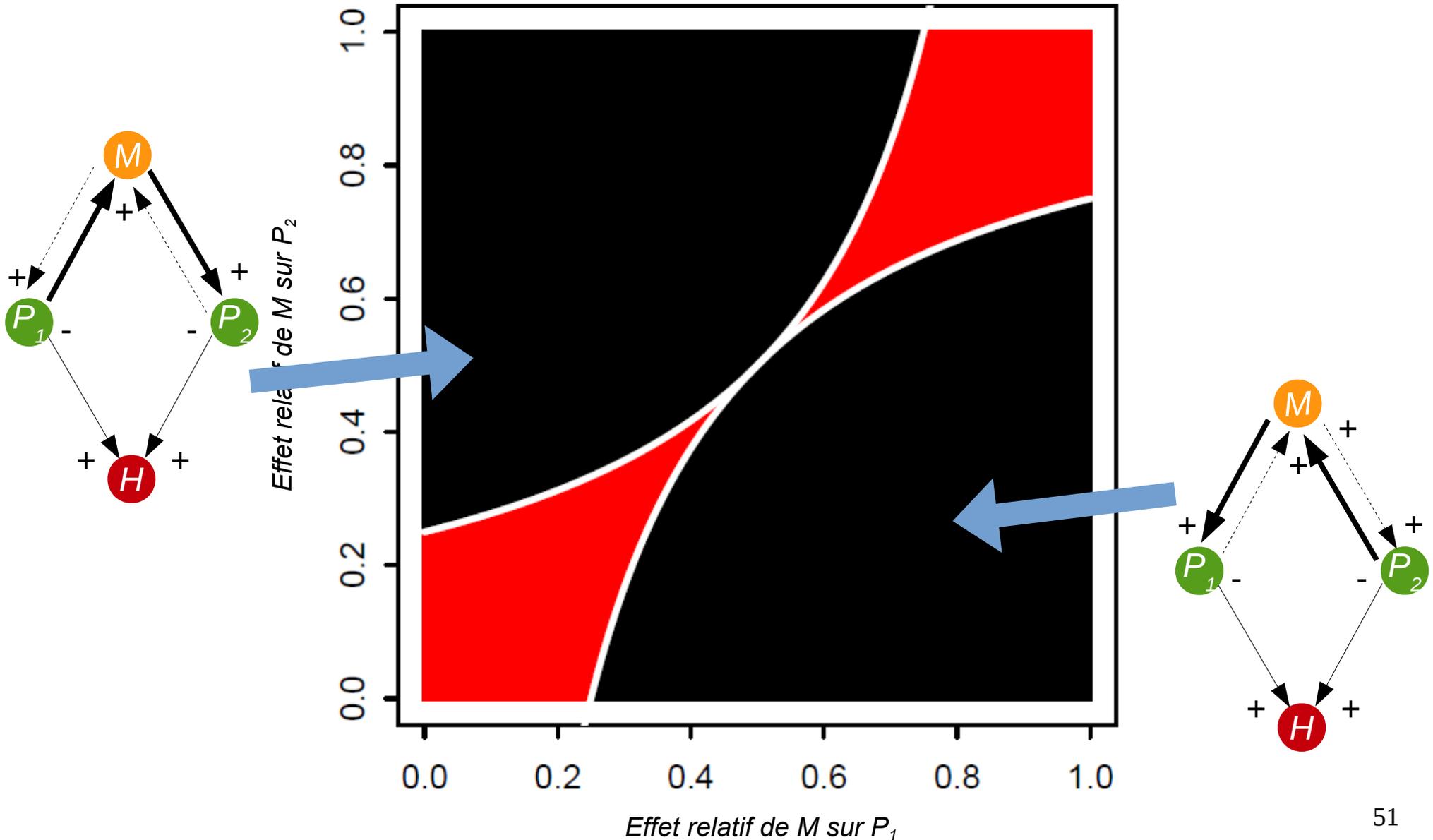
Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



Interactions indirectes

Effet de l'asymétrie des forces d'interactions



Interactions indirectes

Résumé des résultats

Résultats généraux

- Différents types d'interactions indirectes possibles (forces relatives mutualisme/antagonisme)
- Interactions symétriques = facilitation/compétition apparente
- Interactions asymétriques = antagonisme apparent possible

Effet du généralisme des espèces

- Facilitation apparente = M plus généraliste que H
- Compétition apparente = H plus généraliste que M

Effet de l'asymétrie d'interaction

- Antagonisme apparent si asymétrie différentes des interactions

Coexistence stable de la communauté

Résultats généraux

$$(i) C_{ii} > 0$$

Compétition intra-spécifique



$$(ii) C_{ii}C_{jj} - C_{ij}C_{ji} > 0$$

Effets intra-spécifiques > Effets inter-spécifiques



$$(iii) \Pi_i C_{jj} - \Pi_j C_{ij} > 0$$

Coexistence



Coexistence stable de la communauté

Résultats généraux

Compétition intra-spécifique

$$(i) C_{ii} > 0$$

$$\Rightarrow \beta^P + \delta_i^P \delta_j^H - \gamma_i^P \gamma_j^M > 0$$

$$(ii) C_{ii} C_{jj} - C_{ij} C_{ji} > 0$$

Effets intra-spécifiques > Effets inter-spécifiques

$$\Rightarrow \beta^P \left(\beta^P + \delta_i^P \delta_i^H + \delta_j^P \delta_j^H - \gamma_i^P \gamma_i^M - \gamma_j^P \gamma_j^M \right) - \left(\delta_i^P \gamma_j^P - \delta_j^P \gamma_i^P \right) \left(\delta_i^H \gamma_j^M - \delta_j^H \gamma_i^M \right) > 0$$

$$(iii) \Pi_i C_{jj} - \Pi_j C_{ij} > 0$$

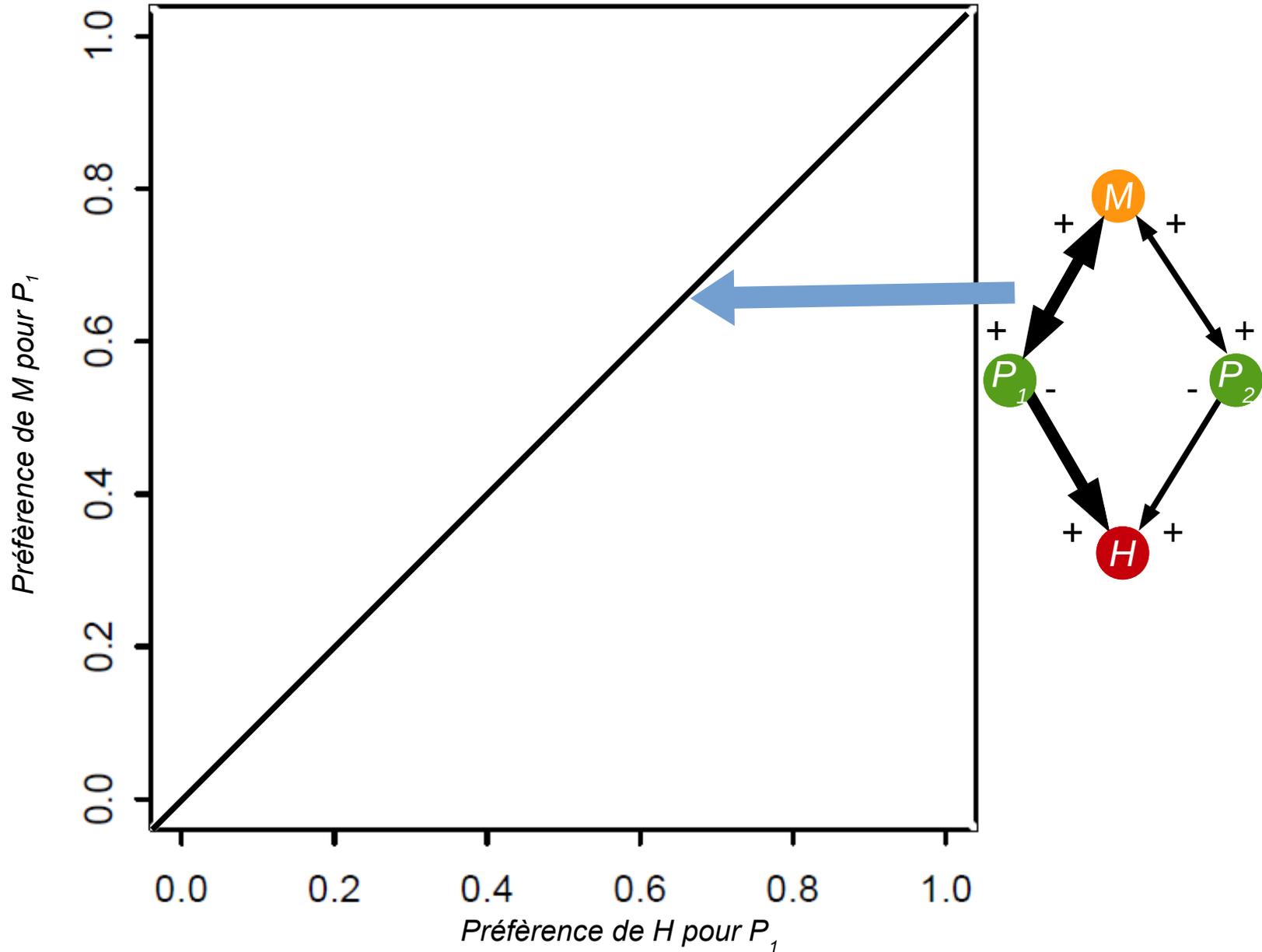
Coexistence

$$\Rightarrow \frac{\alpha^P}{\alpha_A} (C_{jj} - C_{ij}) + \beta^P \left(\gamma_i^P - \delta_i^P \right) \left(\gamma_j^M - \delta_j^H \right) \left(\delta_i^P \gamma_j^P - \delta_j^P \gamma_i^P \right) > 0$$

- Forces relatives des interactions mutualistes et antagonistes
- Généralisme des espèces et asymétrie des interactions

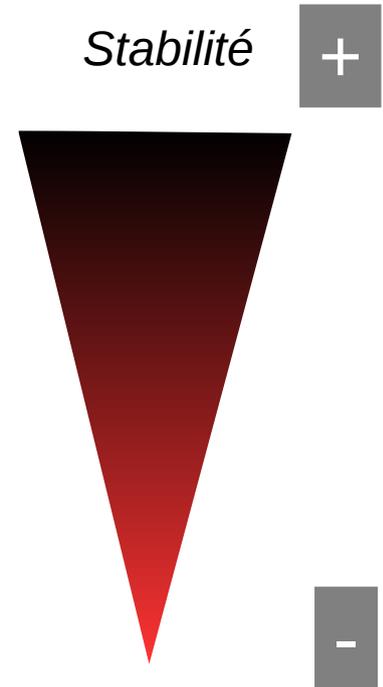
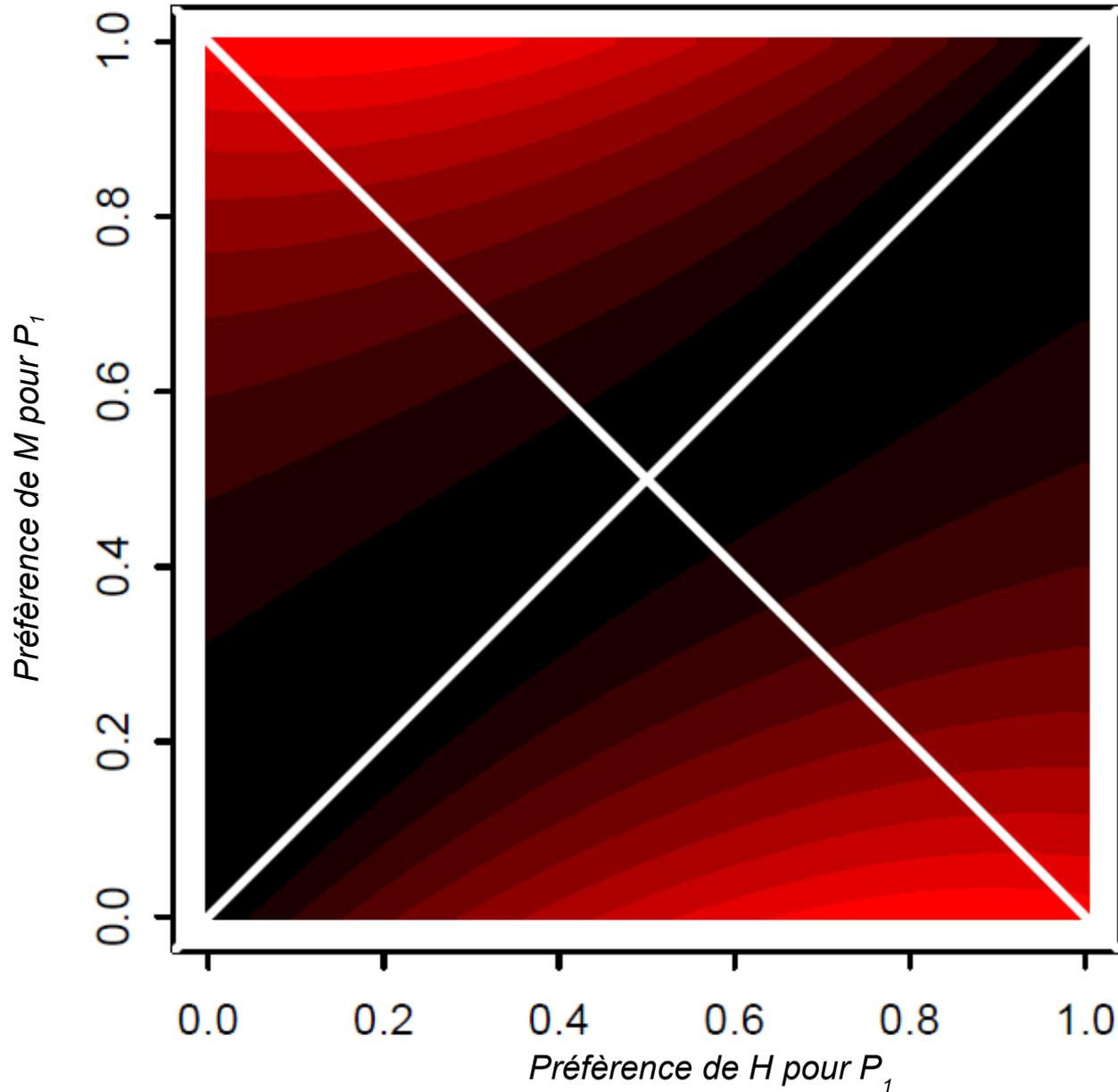
Coexistence stable de la communauté

Effet du généralisme des espèces



Coexistence stable de la communauté

Effet du généralisme des espèces



Coexistence stable de la communauté

Résumé des résultats

Conditions générales

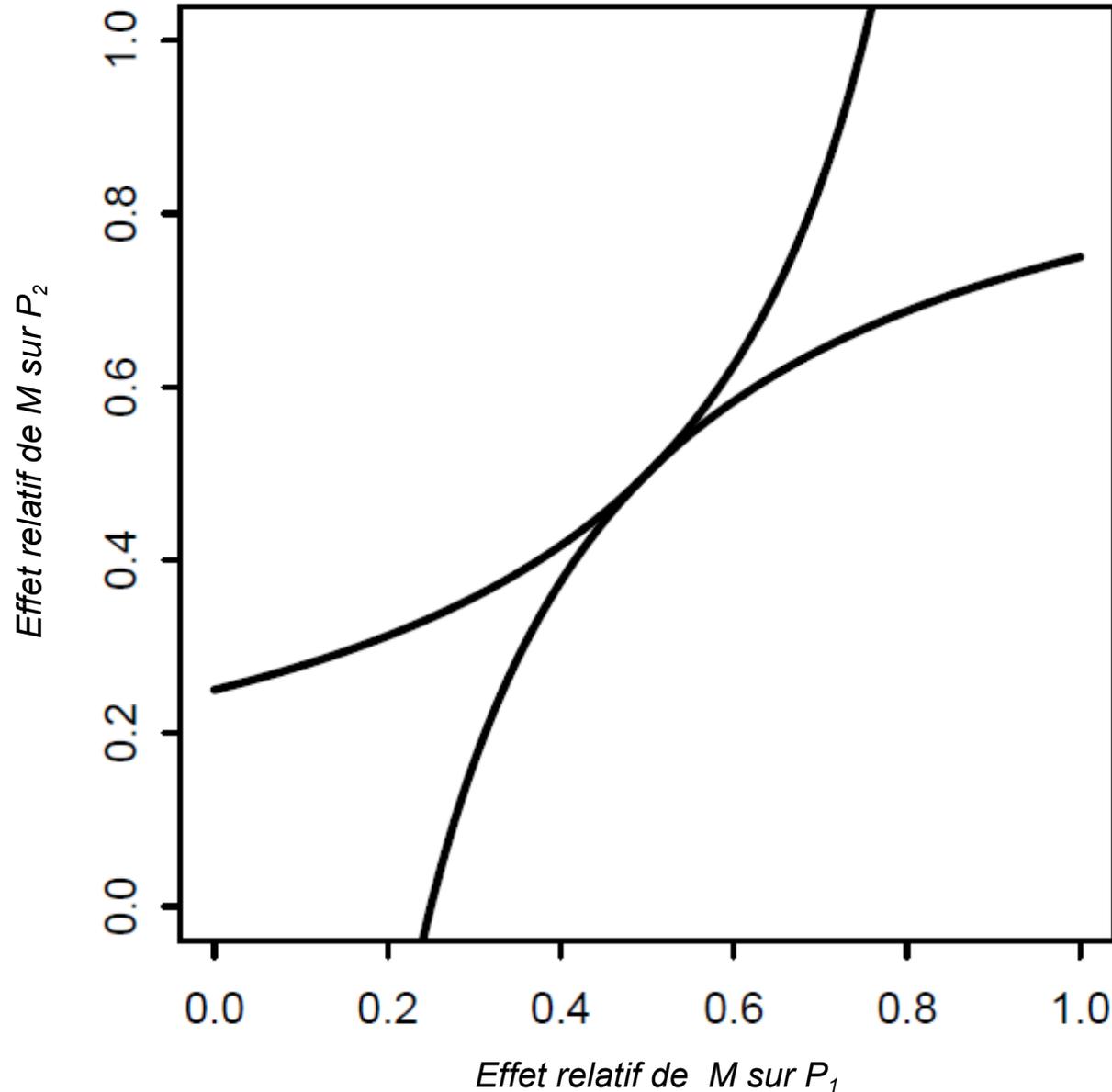
- Compétition intra-spécifique
- Effets intra-spécifiques $>$ effets inter-spécifiques
- Mutualisme \sim Antagonisme

Effet du généralisme

- M et H ont des préférences similaires pour les mêmes espèces

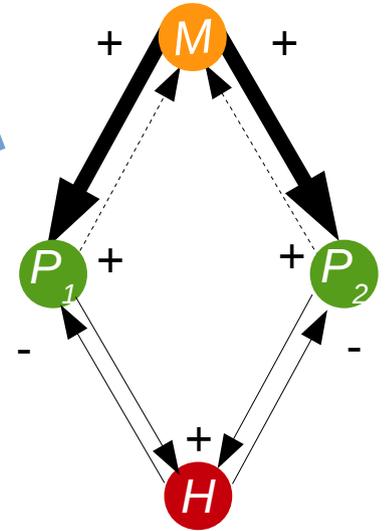
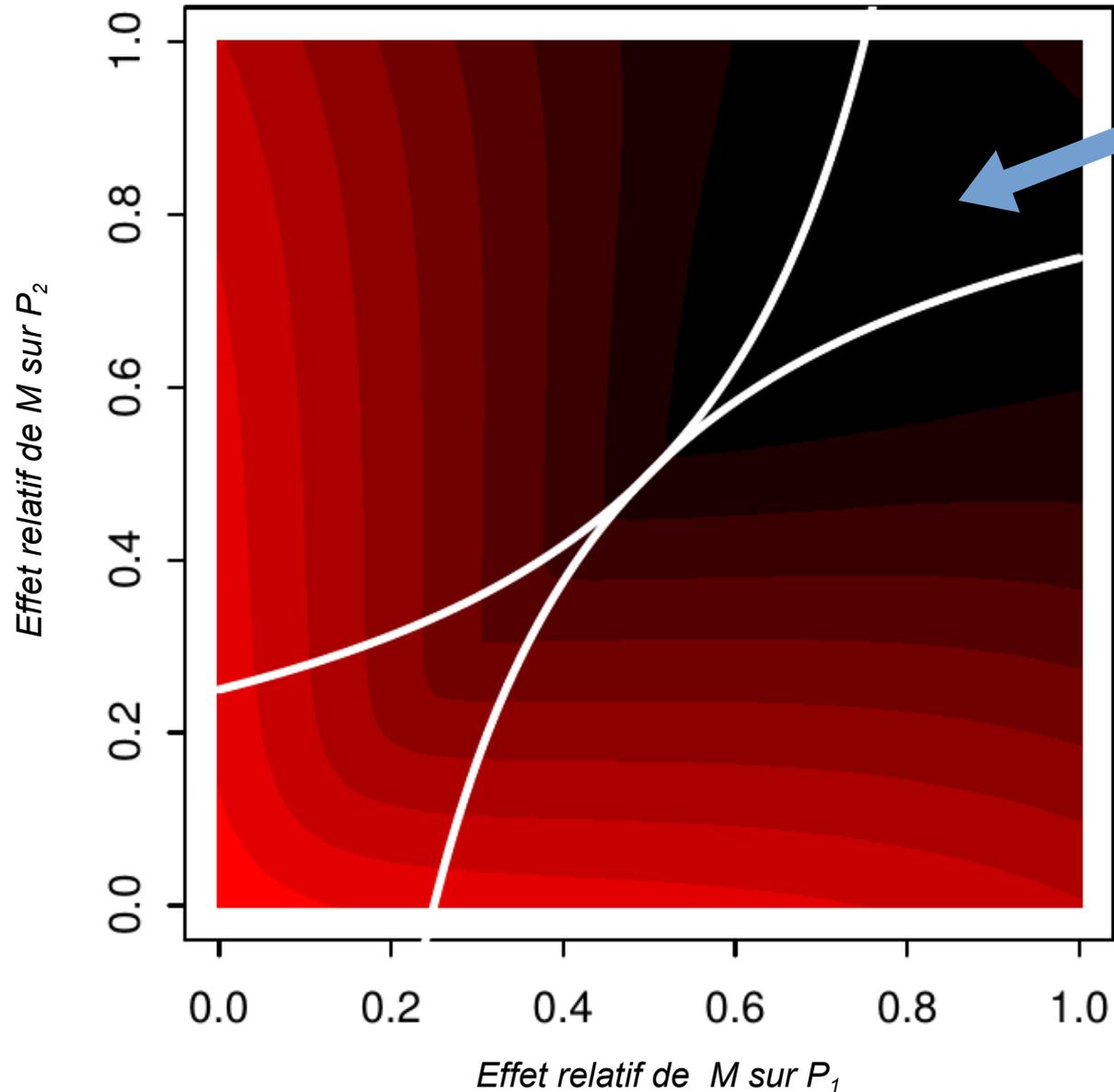
Coexistence stable de la communauté

Effet de l'asymétrie des interactions



Coexistence stable de la communauté

Effet de l'asymétrie des interactions



Coexistence stable de la communauté

Résumé des résultats

Conditions générales

- Compétition intra-spécifique
- Effets intra-spécifiques $>$ effets inter-spécifiques
- Mutualisme \sim Antagonisme

Effet du généralisme

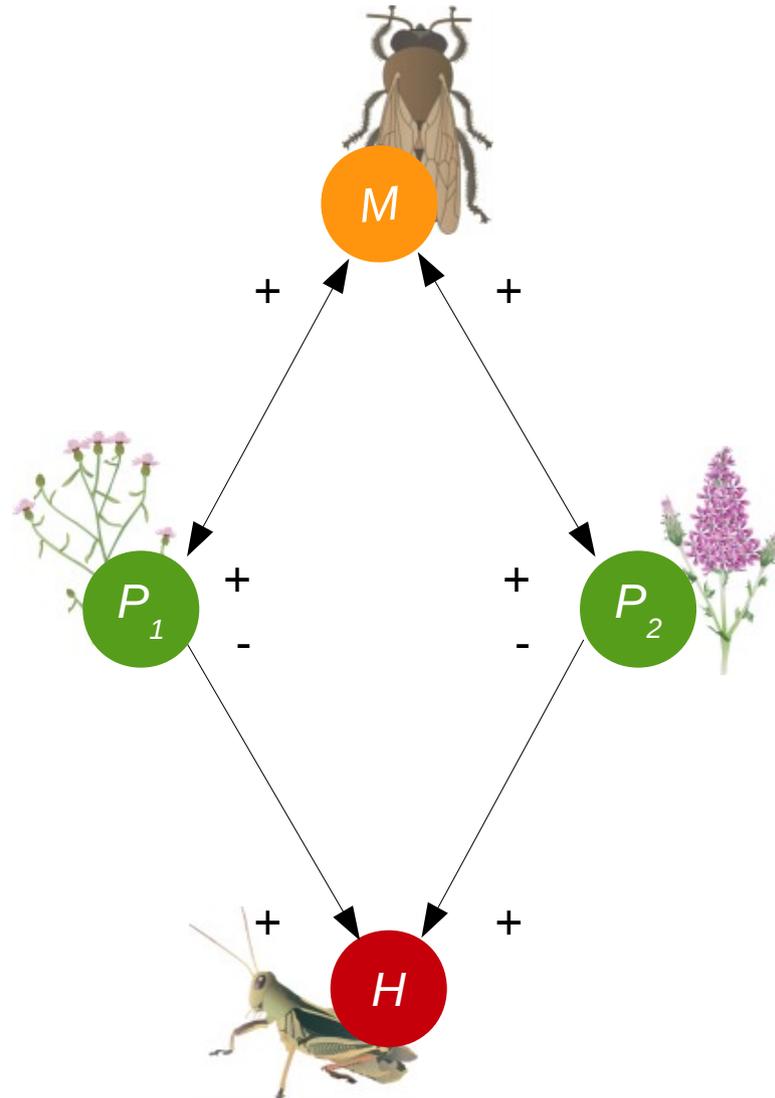
- M et H ont des préférences similaires pour les mêmes espèces

Effet de l'asymétrie d'interaction

- Asymétrie en faveur des espèces ressources

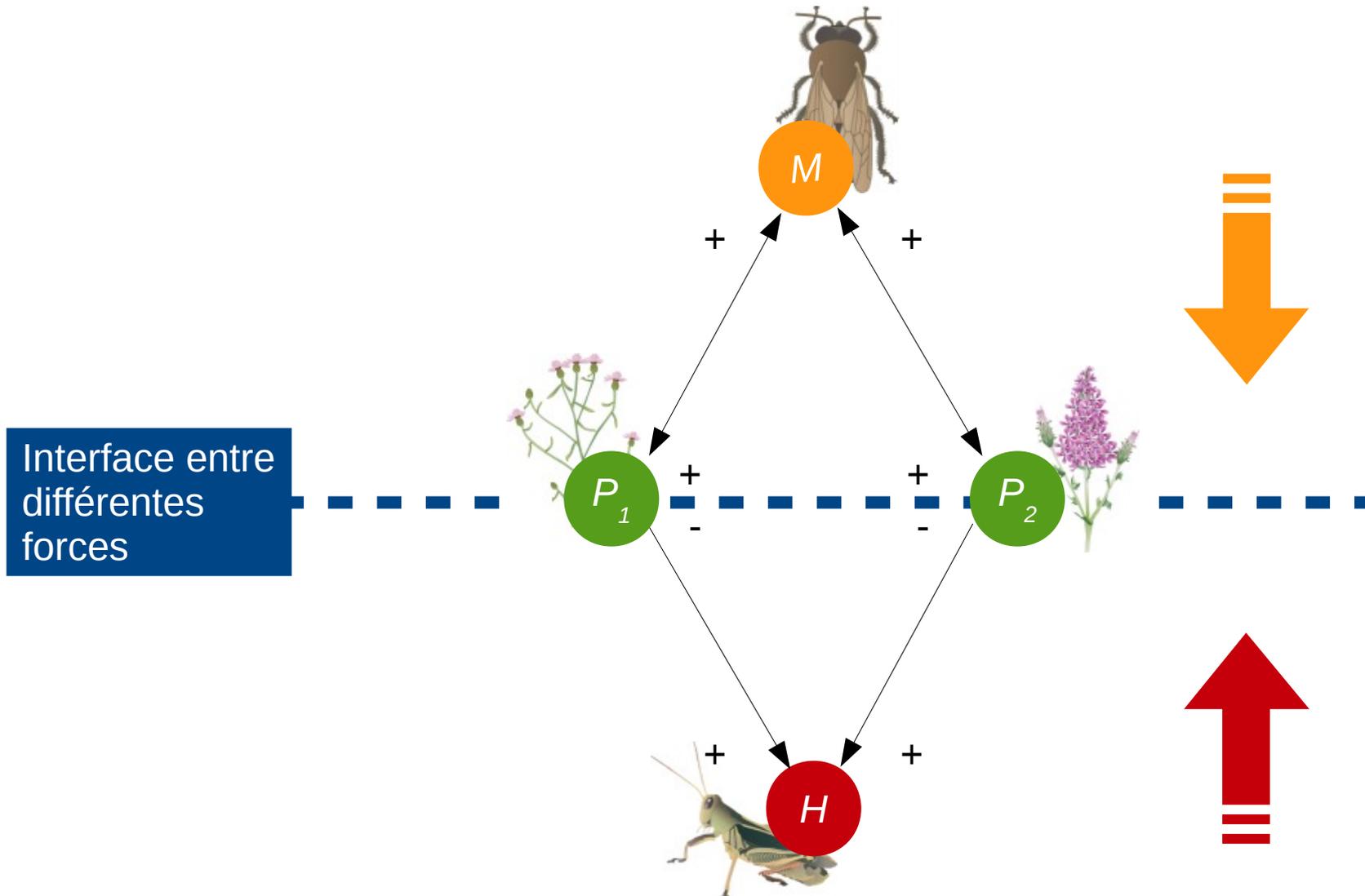
Discussion

Stabilité et persistance des espèces



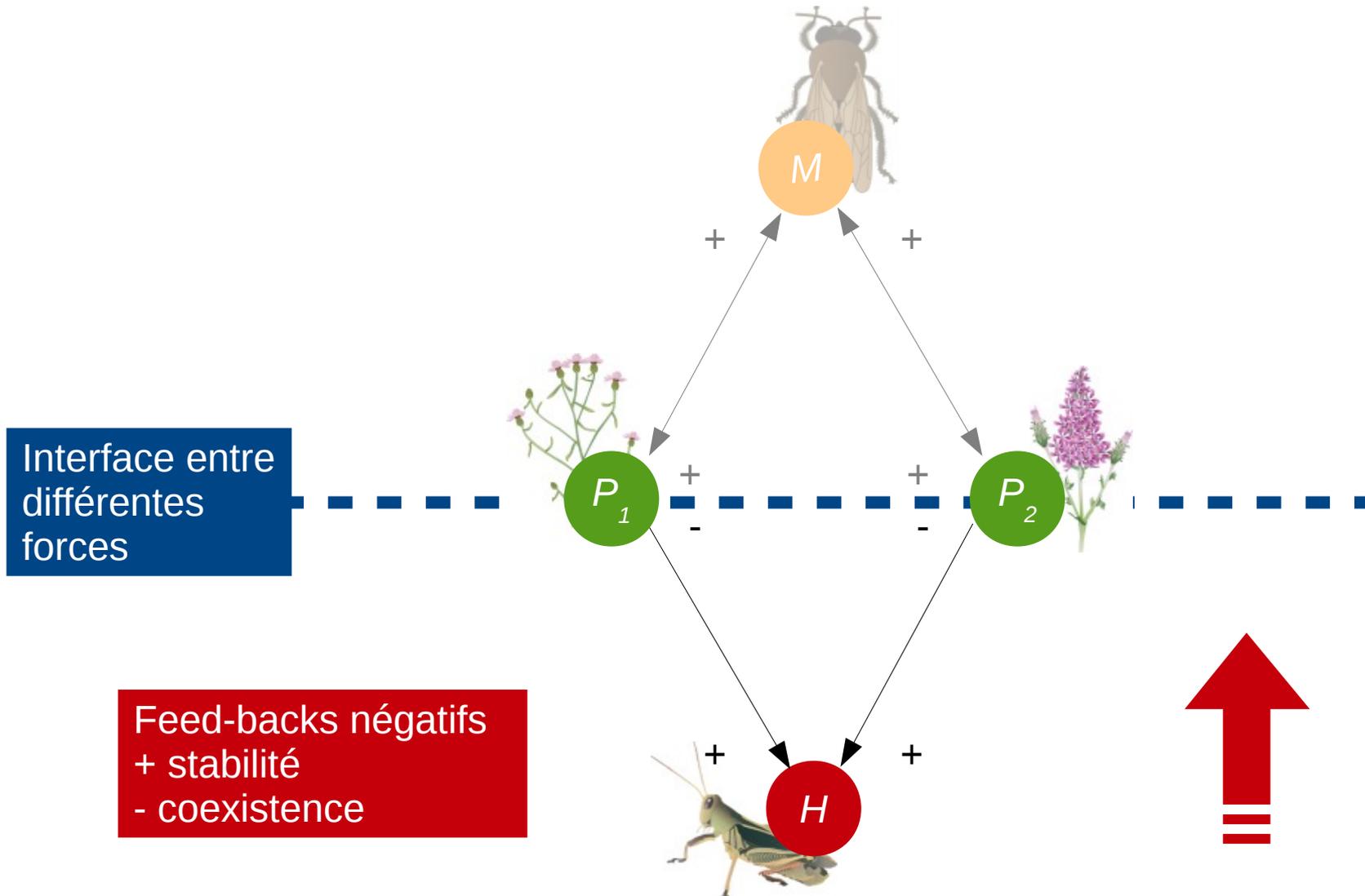
Discussion

Stabilité et persistance des espèces



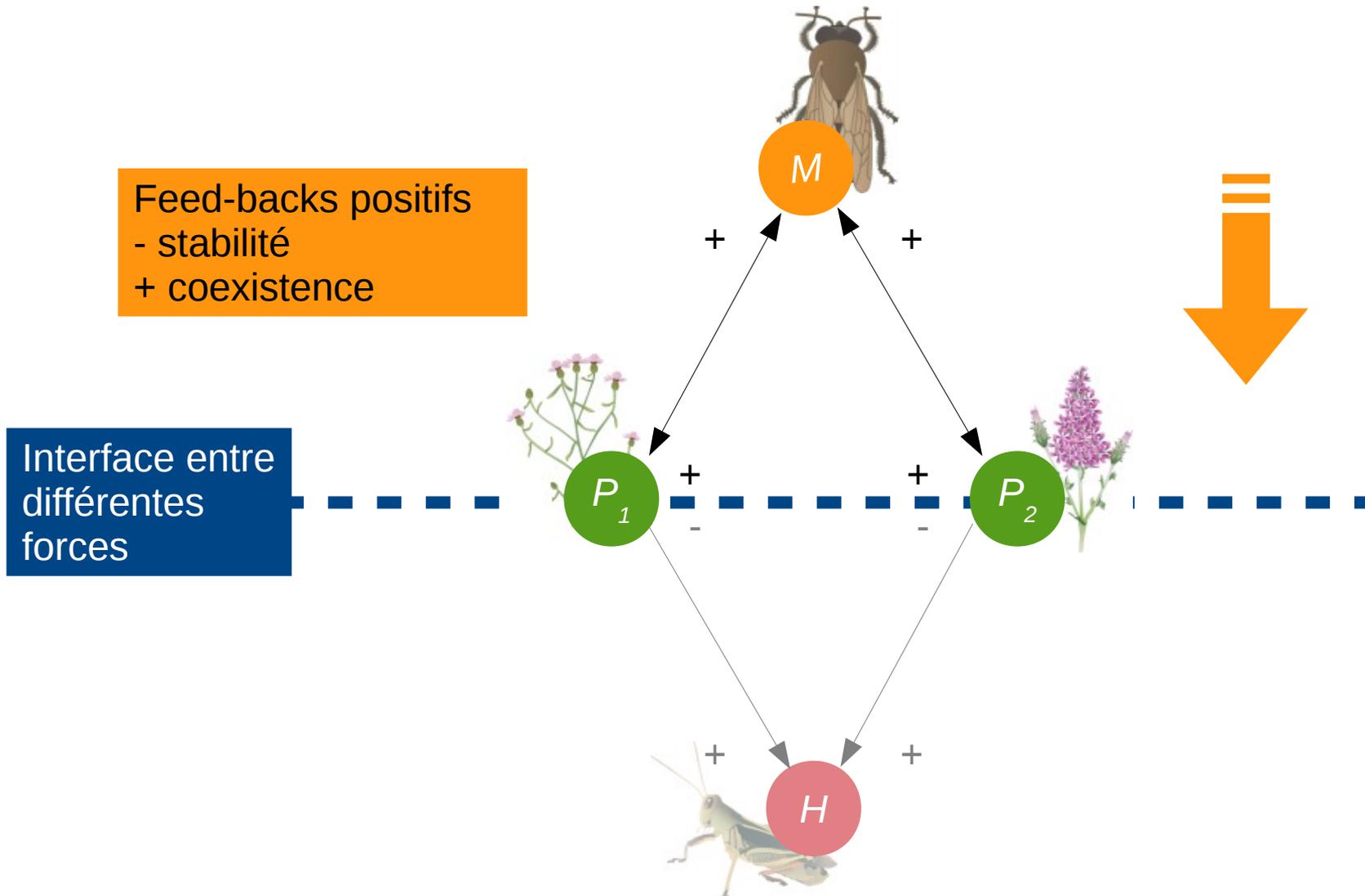
Discussion

Stabilité et persistance des espèces



Discussion

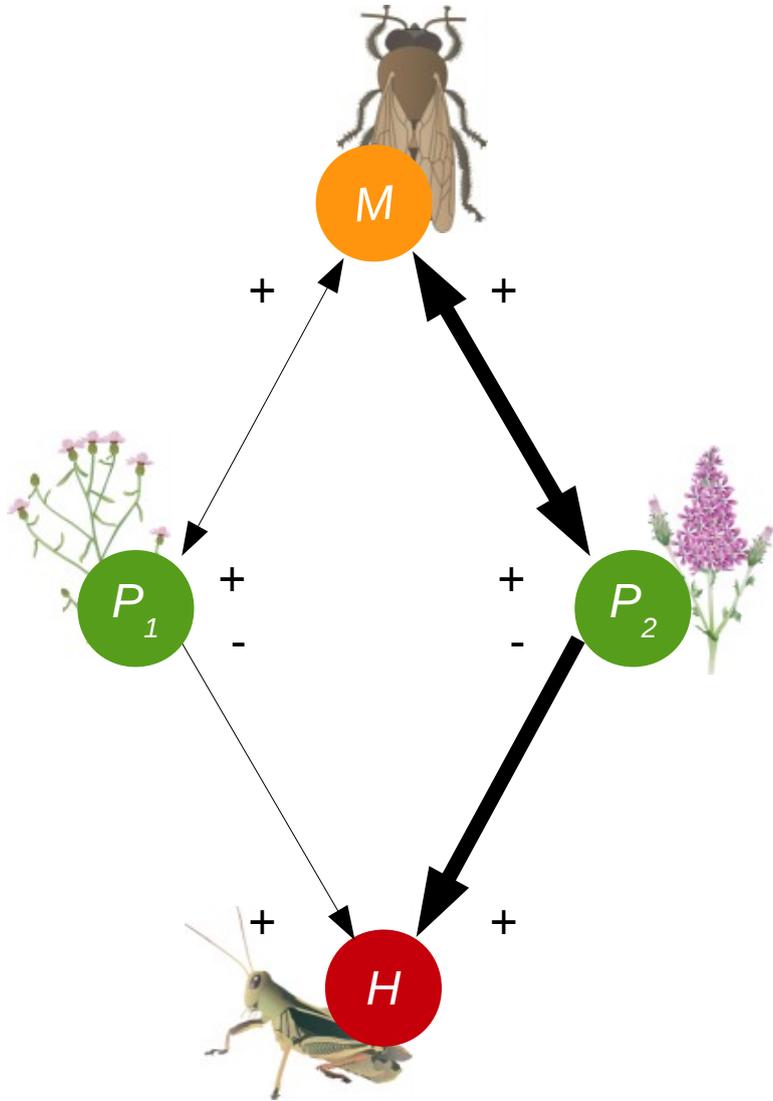
Stabilité et persistance des espèces



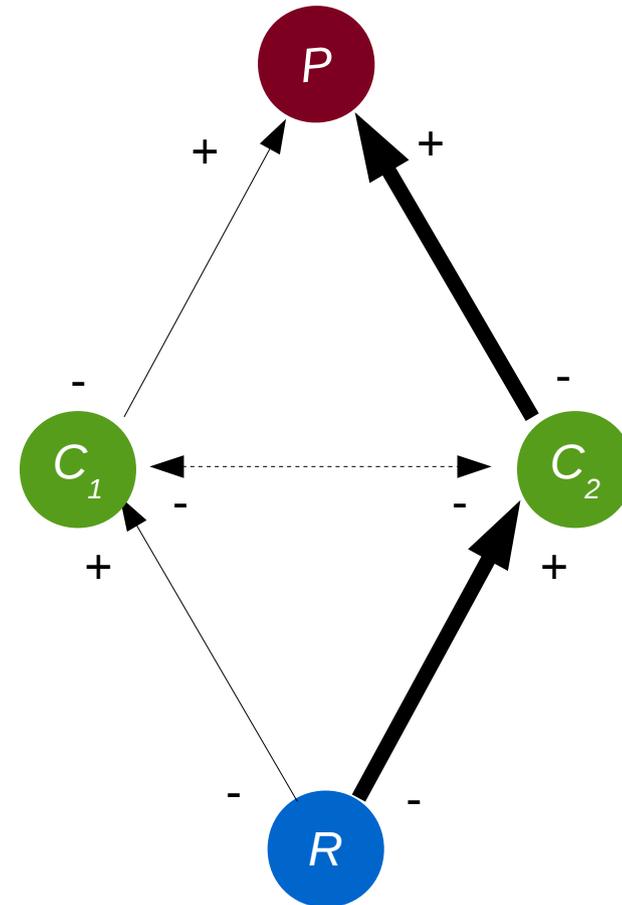
Discussion

Stabilité et persistance des espèces

Holt & Lawton 1994, *Am. Nat.*
Leibold 1996, *Am. Nat.*
McCann et al. 1998, *Nature*



Équilibre forces exercées
au niveau des espèces “interfaces”

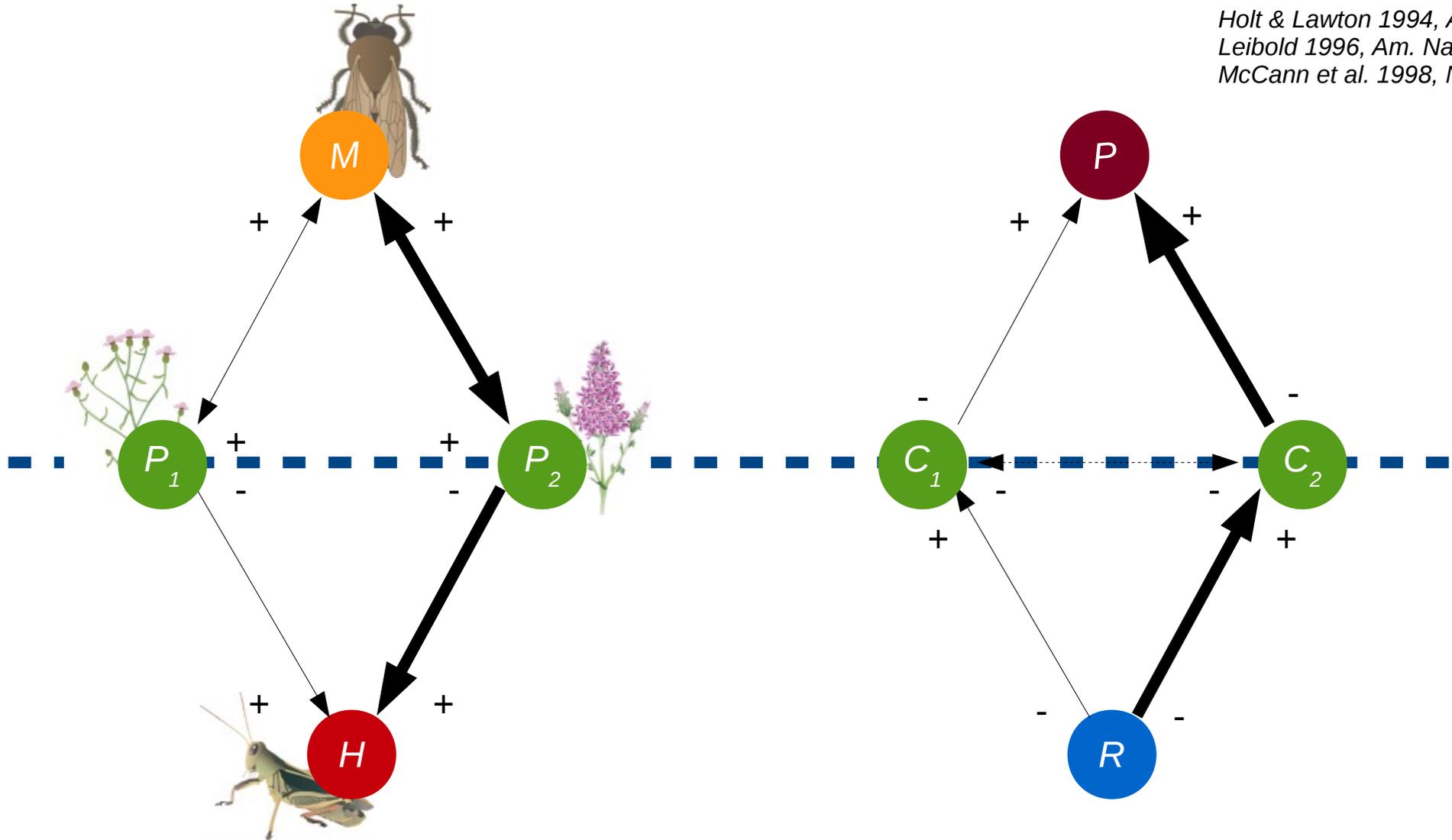


Préférence de P pour
le plus grand compétiteur

Discussion

Stabilité et persistance des espèces

Holt & Lawton 1994, *Am. Nat.*
Leibold 1996, *Am. Nat.*
McCann et al. 1998, *Nature*



Équilibre forces exercées
au niveau des espèces “interfaces”

Préférence de P pour
le plus grand compétiteur

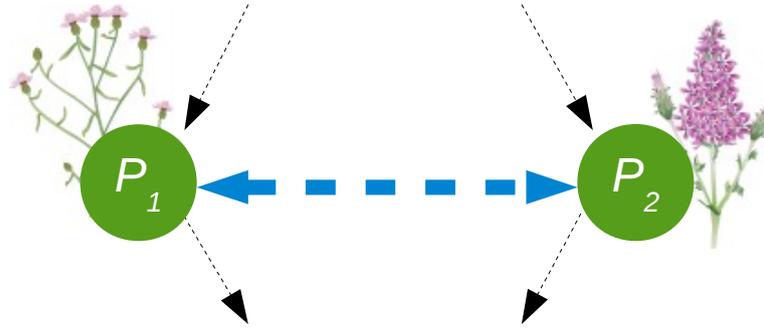
Discussion

Diversité des interactions indirectes

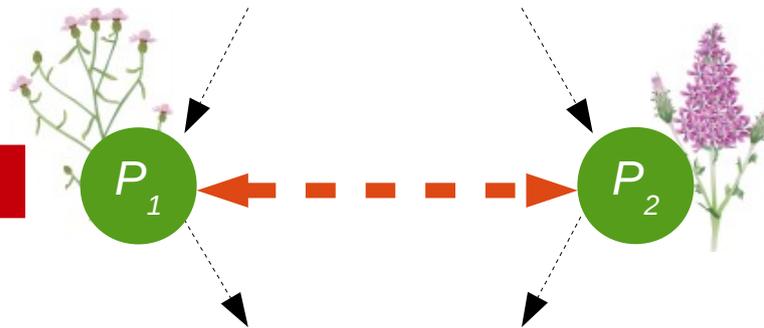
→ Forces relatives
mutualisme vs. antagonisme

→ Généralisme des espèces

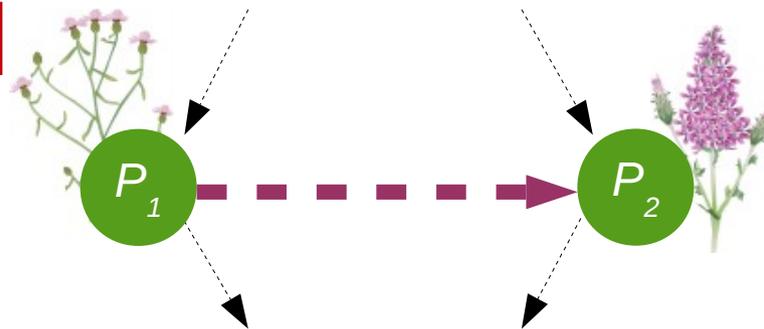
→ Asymétrie des interactions



Facilitation apparente



Compétition apparente

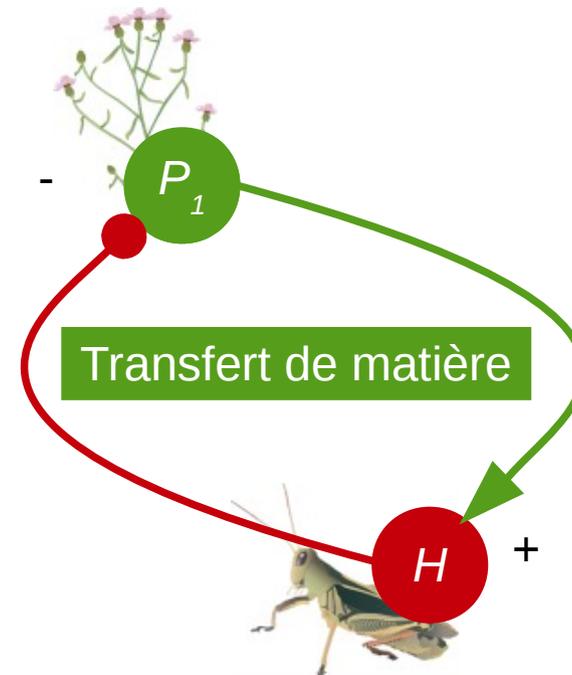
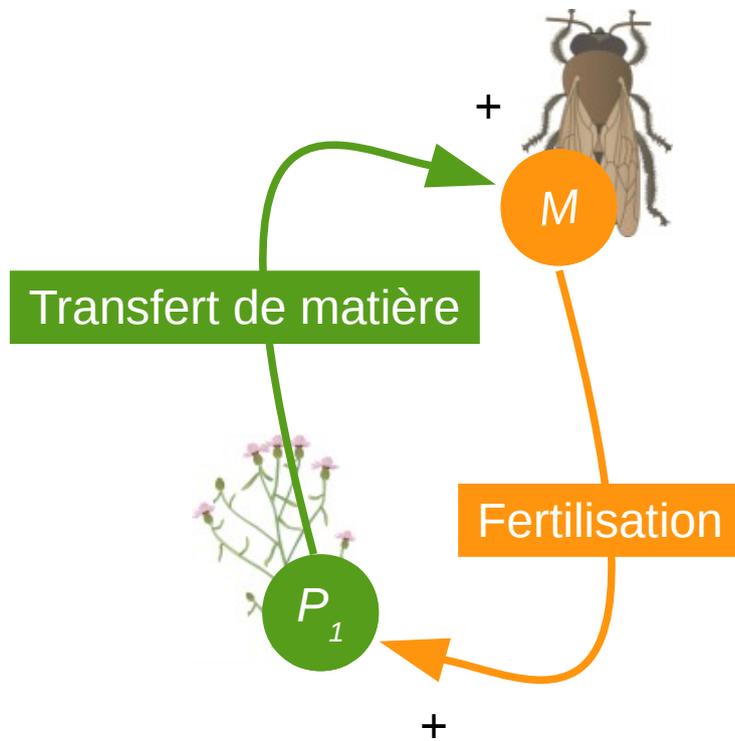


Antagonisme apparent

Discussion

Une comparaison difficile entre les types d'interactions

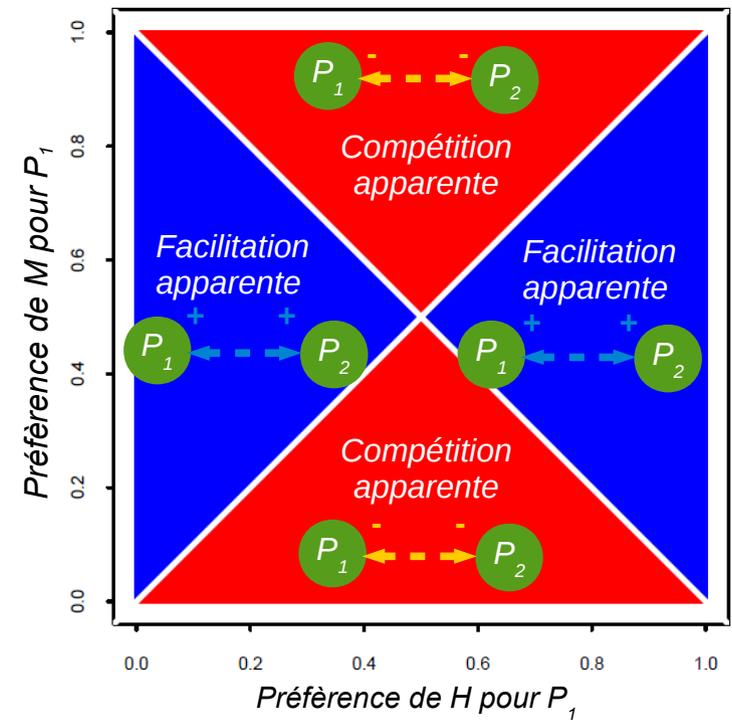
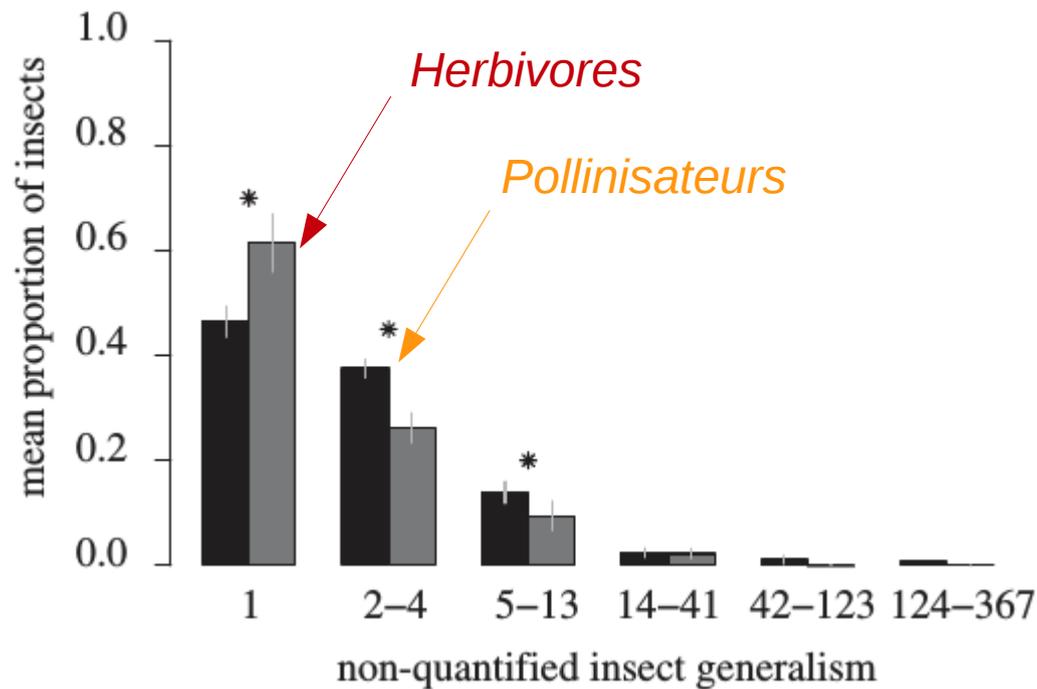
Fontaine et al. 2011, *Ecol. Lett.*



Discussion

Diversité des interactions indirectes

Fontaine et al. 2009 Proc. R. Soc. B

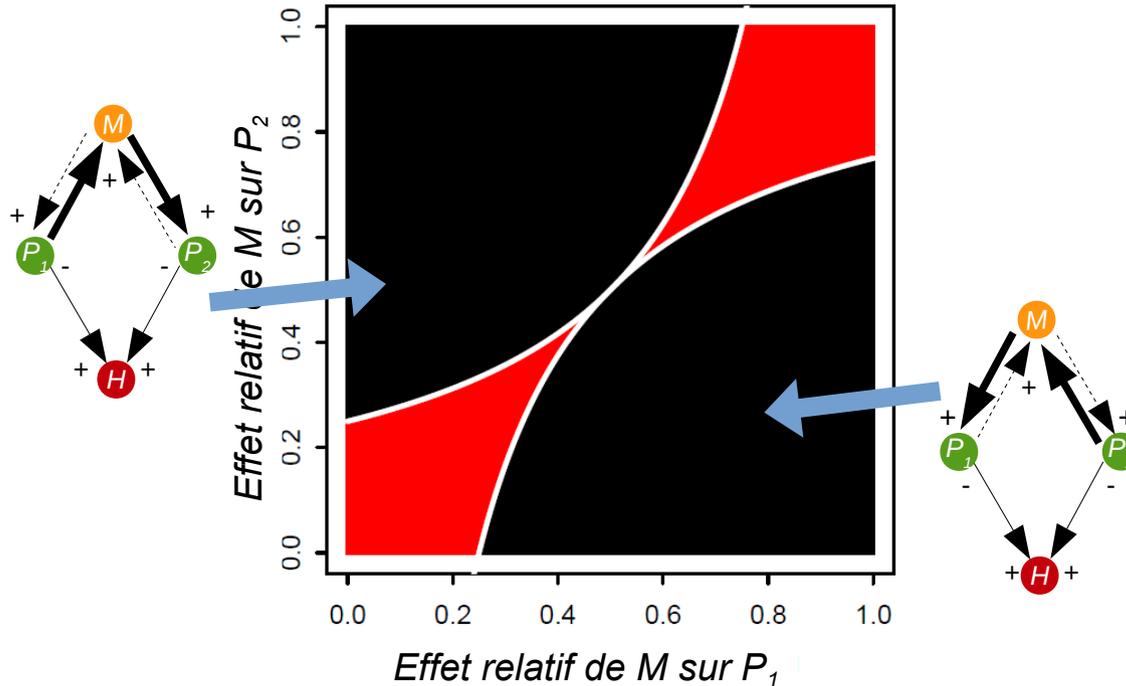


Pollinisateurs plus généralistes (en termes de degrés) que les herbivores,
Facilitation plus probable ?

Discussion

Diversité des interactions indirectes

Antagonisme apparent ← interactions asymétriques.

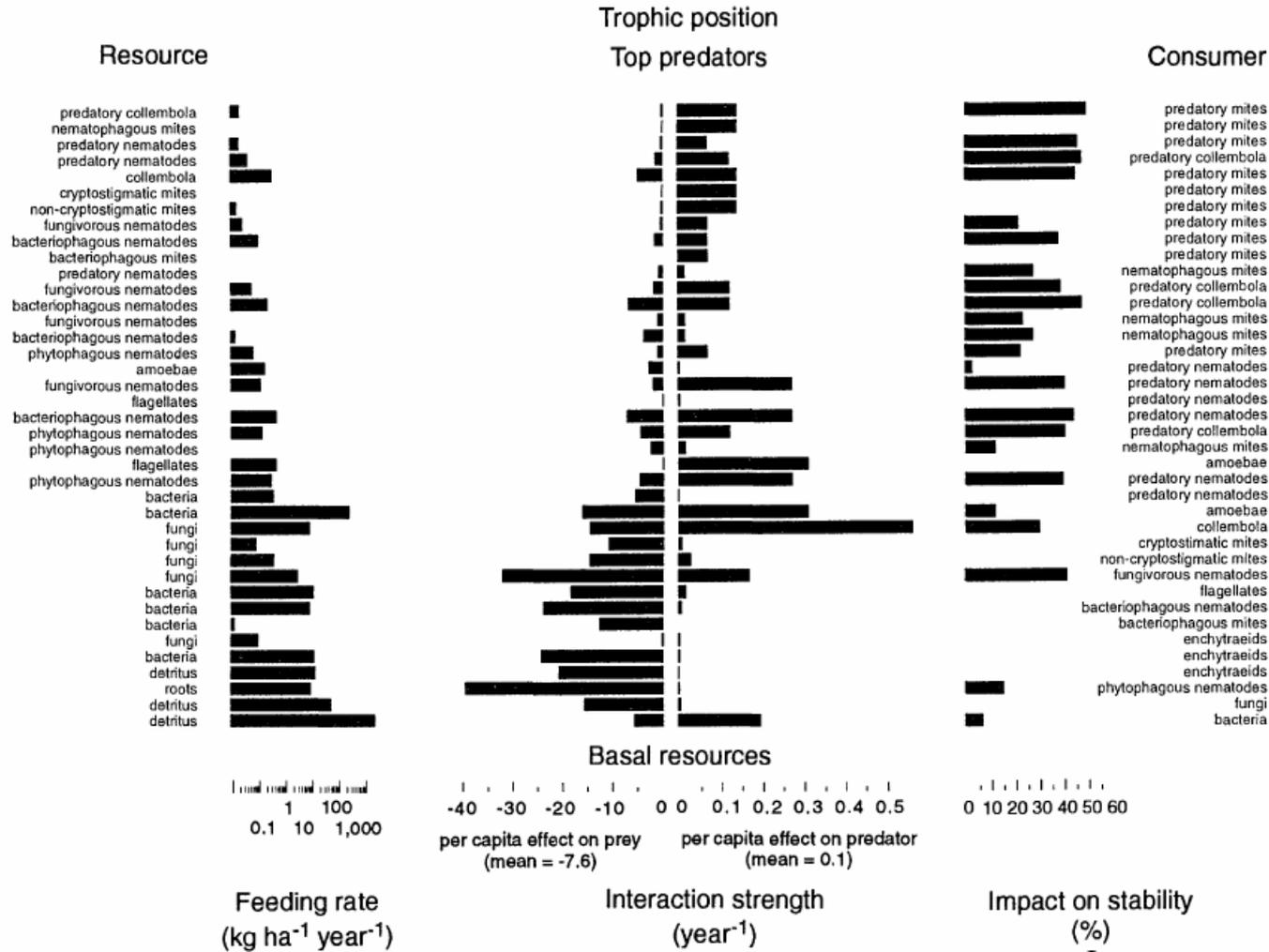


Résulte du mélange de différents types d'interactions directes.

Discussion

Diversité des interactions indirectes

De Ruiter et al. 1995 Science

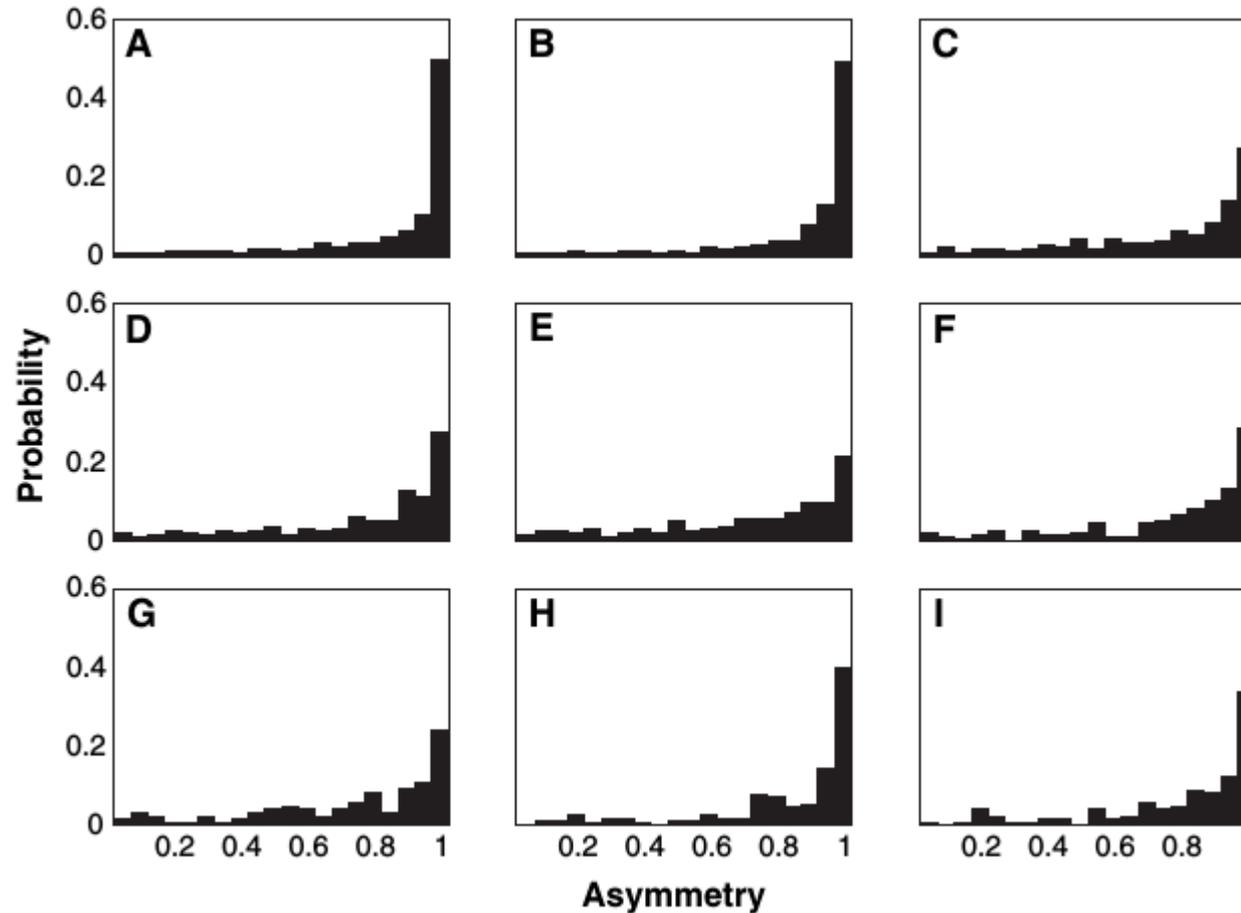


Les interactions trophiques sont asymétriques.

Discussion

Diversité des interactions indirectes

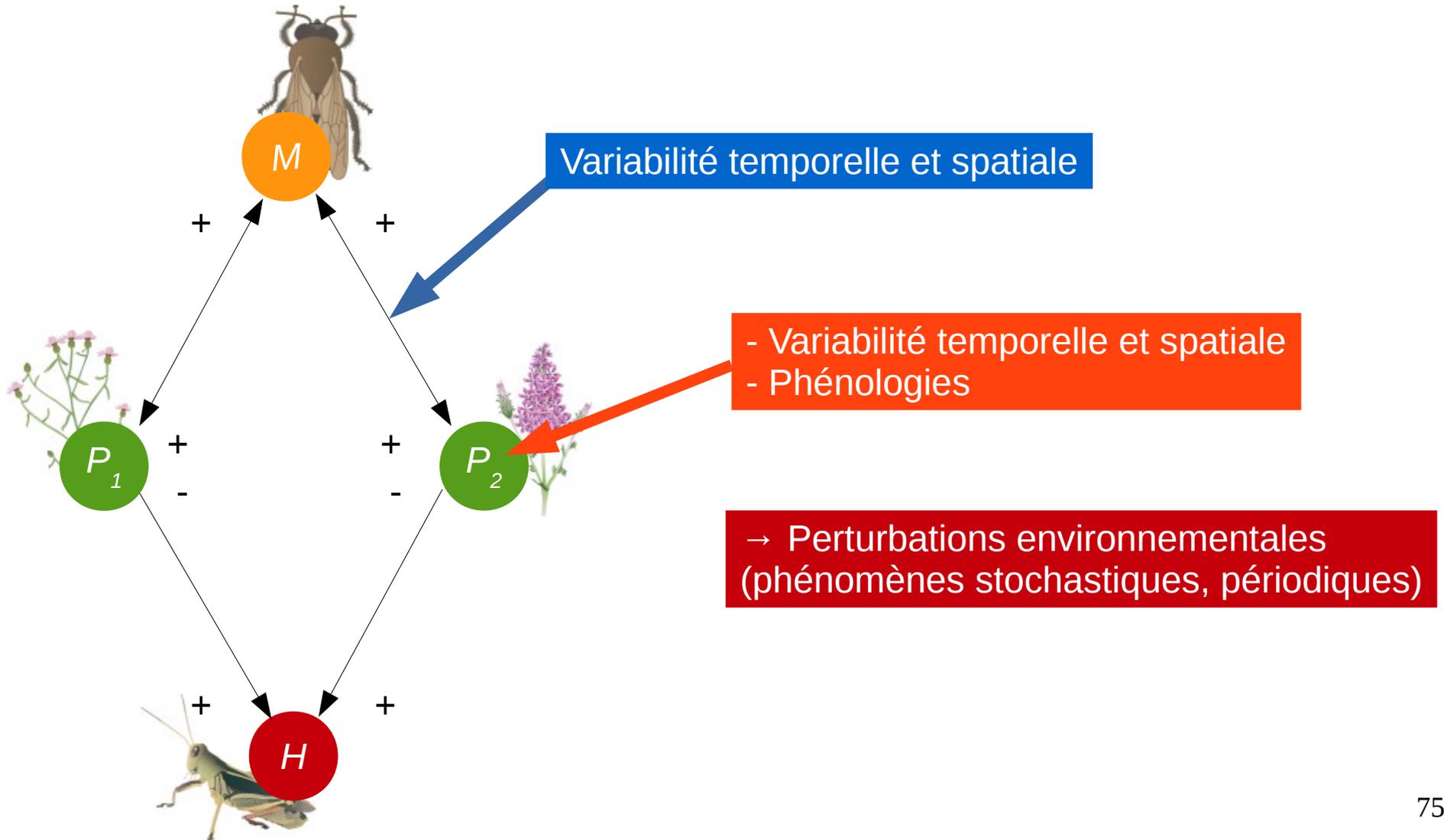
Bascompte et al. 2006, Nature



Réseaux mutualistes: plus une espèce végétale dépend d'une espèce animale, moins cette dernière dépend de la première.

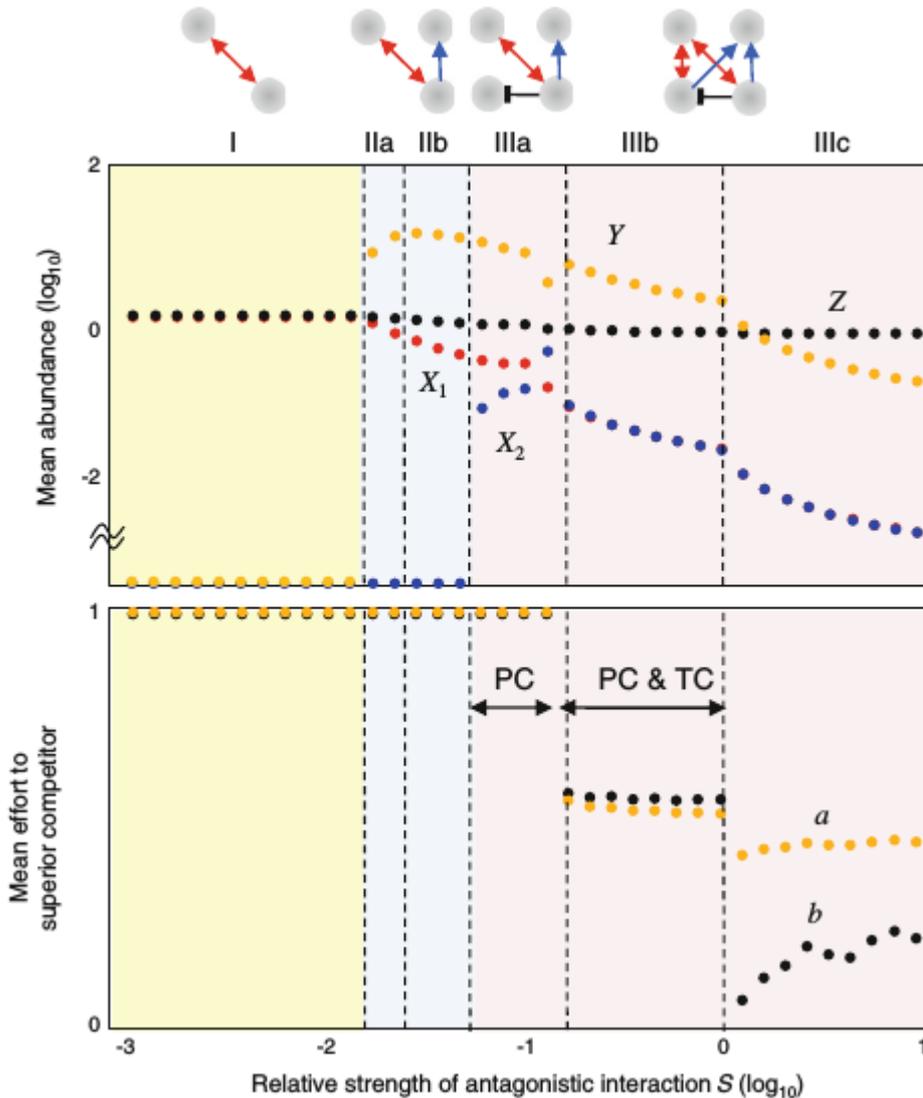
Discussion

Limites de l'approche : Comment étudier la stabilité ?



Discussion

Limites de l'approche : Variabilité temporelle des interactions

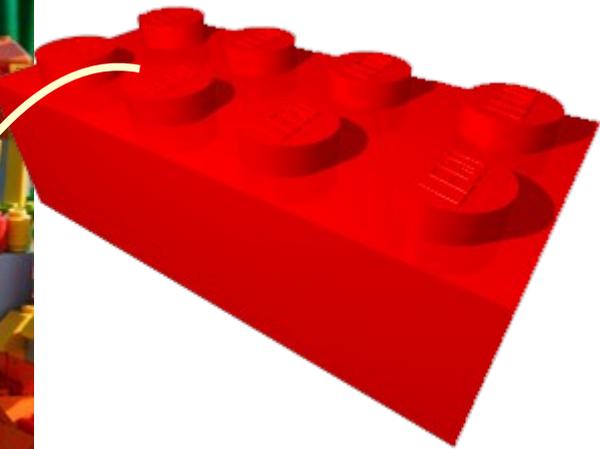


- Mécanisme d'exclusion par compétition entre les deux espèces ressources
 - Amplification par le mutualiste adaptatif,
 - Mécanisme limité par l'antagoniste adaptatif.
- Cohérence des résultats

Discussion

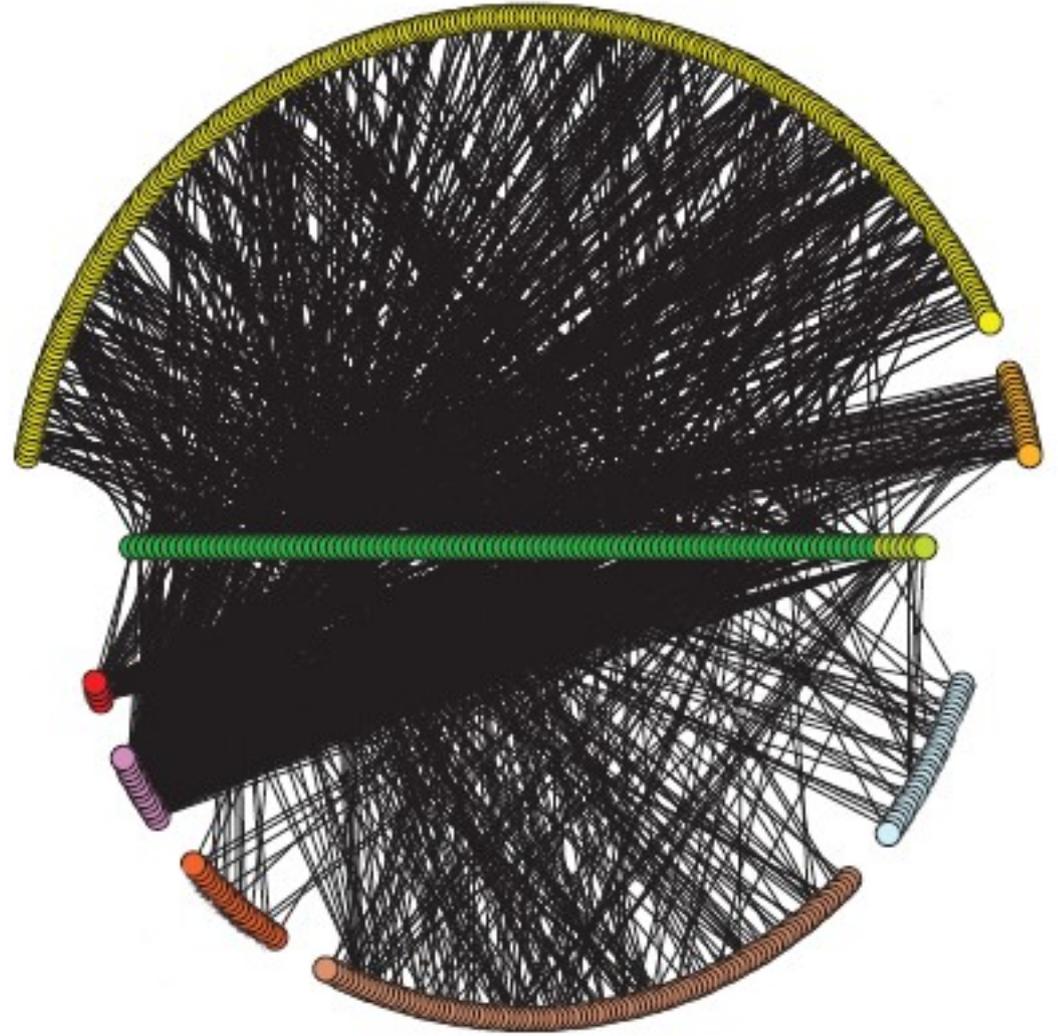
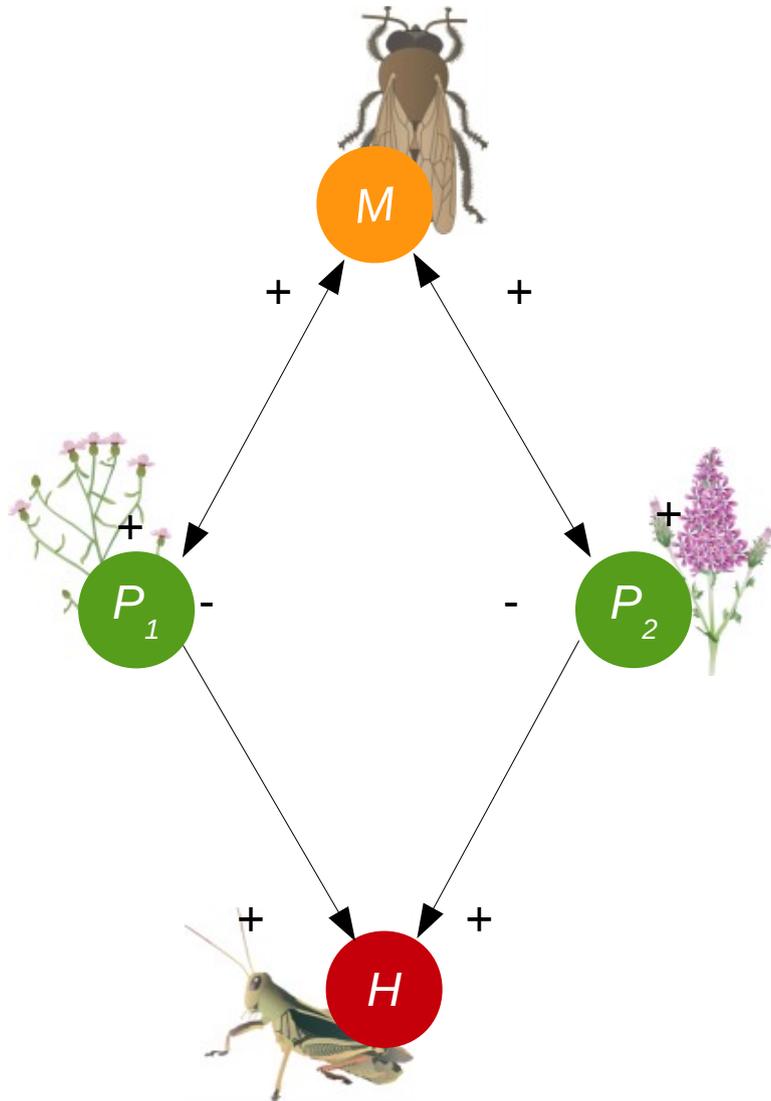
Limites de l'approche : qu'est ce qu'un module ?

Un module
=
un sous-ensemble de la communauté ?



Discussion

Limites de l'approche : qu'est ce qu'un module ?



Ou... Un module = un simplification de la communauté ?



Remerciements

Colin Fontaine
Elisa Thébault
Pierre Collet

La chaire “Modélisation Mathématique et Biodiversité”

*Sauve et al. 2015 “Stability of a diamond-shape module with multiple interaction types”,
Theoretical Ecology*