

# Méta-écosystèmes dans un contexte de changements globaux

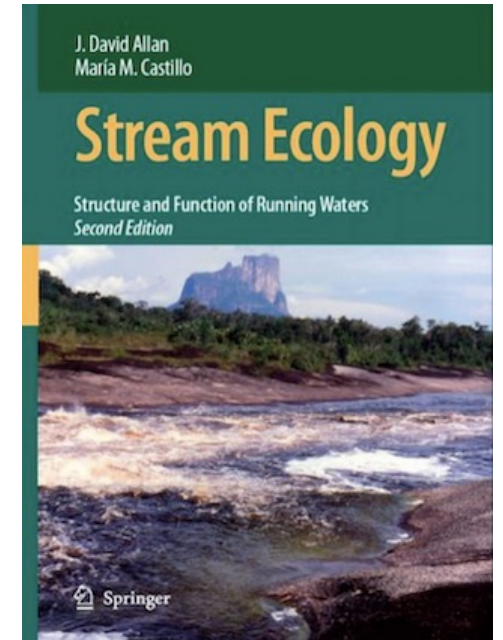
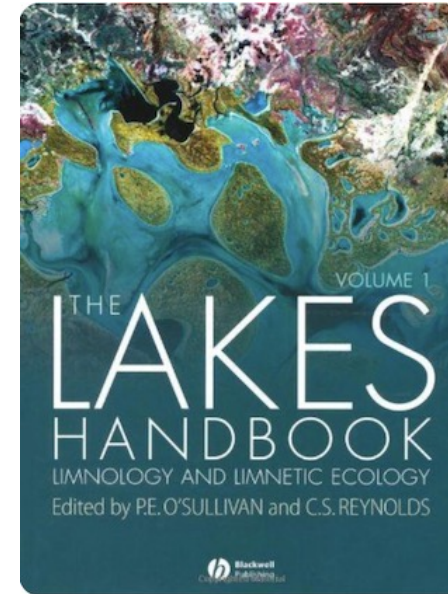
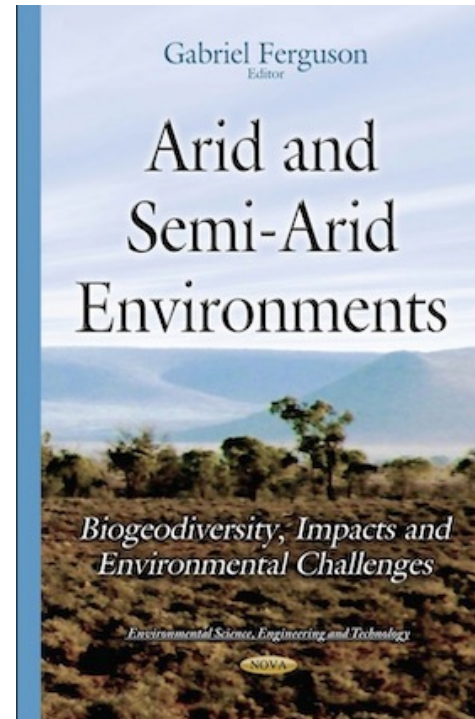
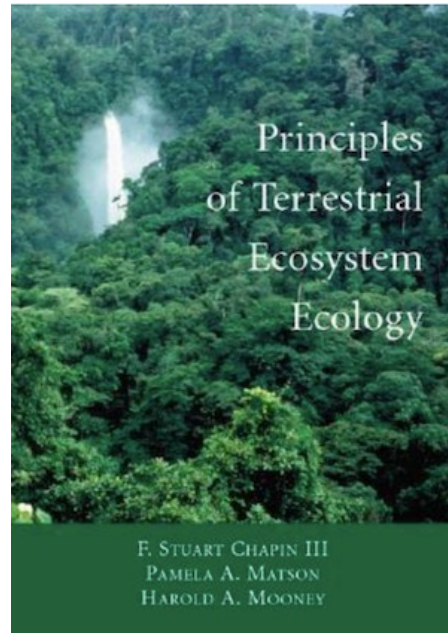
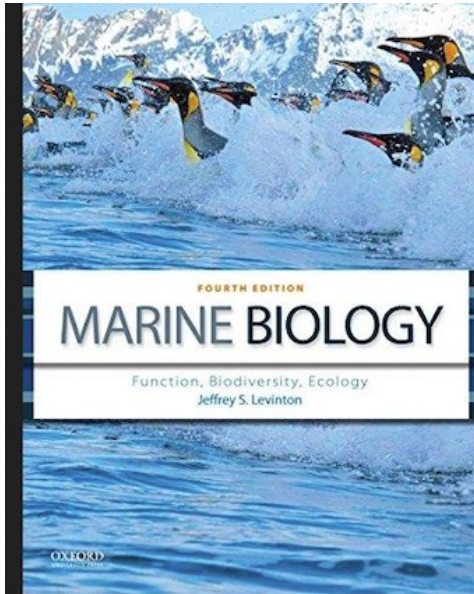


Isabelle Gounand  
[isabelle.gounand@sorbonne-universite.fr](mailto:isabelle.gounand@sorbonne-universite.fr)



*Saint Jacut de la mer, 3 juin 2022*

# Les écosystèmes sont souvent étudiés et gérés isolément



# Pourtant les écosystèmes sont interconnectés

## Flux de ressources

### Abiotiques « passifs »

- courants, lessivage
- vents
- érosion

### Biotiques « actifs »

- recherche de nourriture
- migration
- dispersion



## **A. Développement du concept de méta-écosystèmes**

- Héritages théoriques et empiriques
- Résultats théoriques généraux

## **B. Méta-écosystèmes empiriques**

- Importance quantitative et qualitative des flux de ressources (C, N, P)
- Echelles spatio-temporelles des couplages entre écosystèmes

## **C. Méta-écosystèmes et changements globaux**

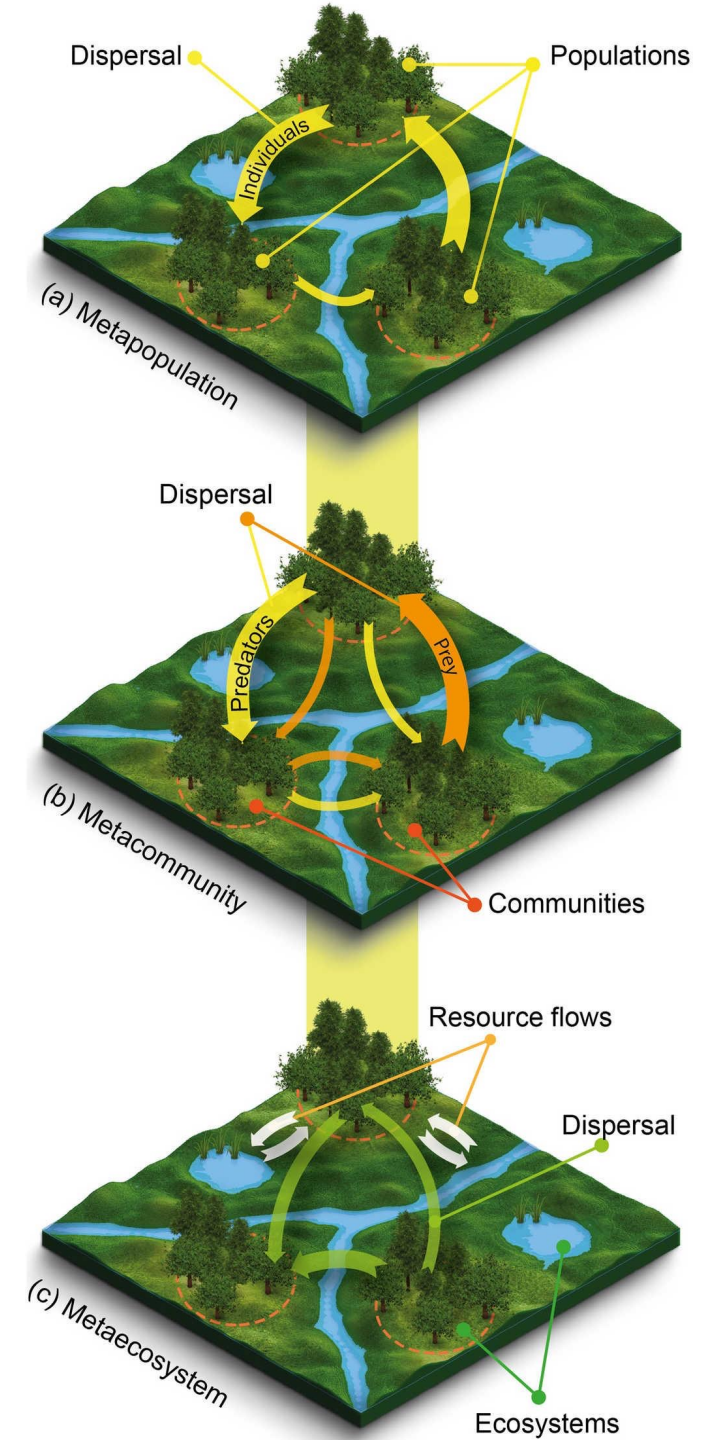
- Effets directs et indirects

# A) Développement du concept

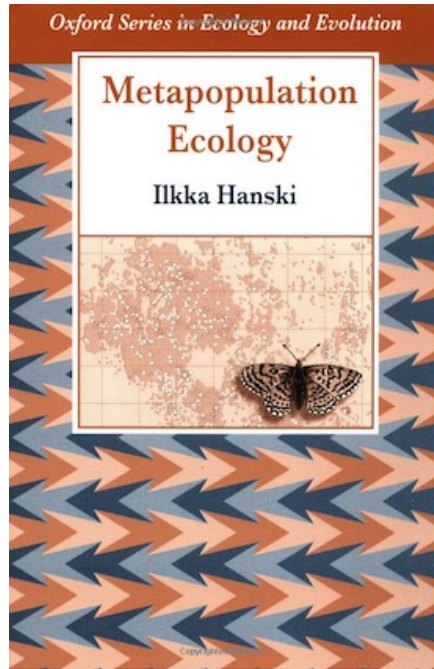
## Approche « méta-écologie »

Postulats :

- structure spatiale: hiérarchie et hétérogénéité.
- connectivité
- processus écologiques locaux

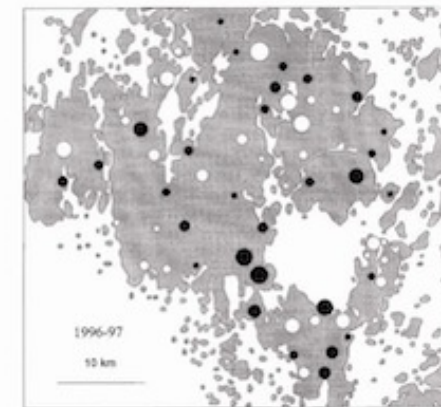
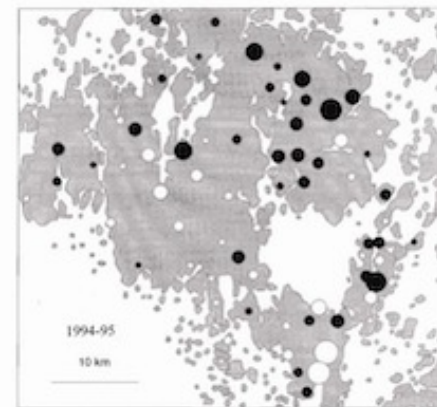
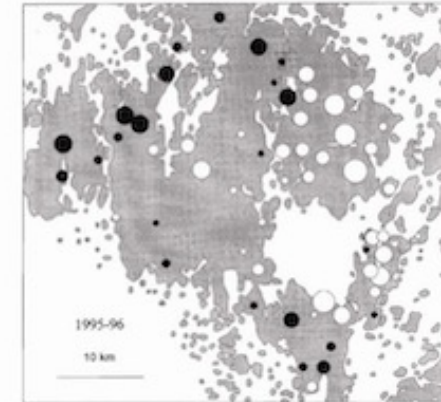
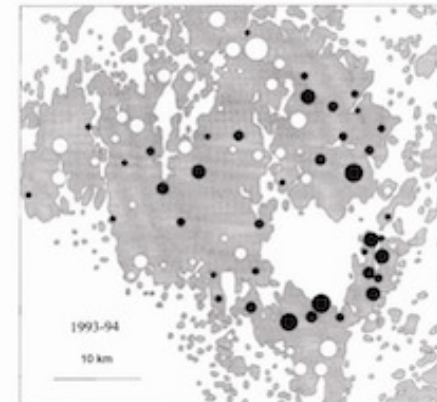
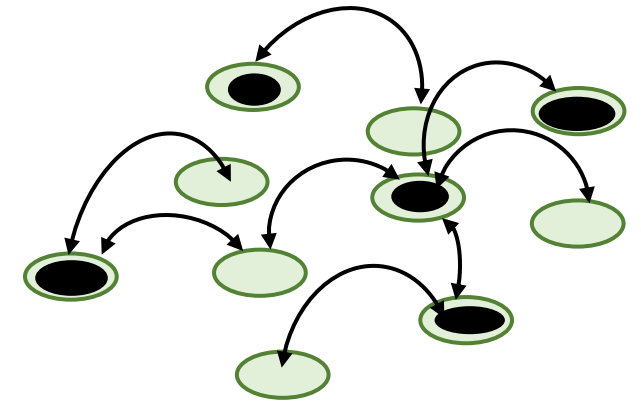


# A) Développement du concept Méta-populations



I.Hanski

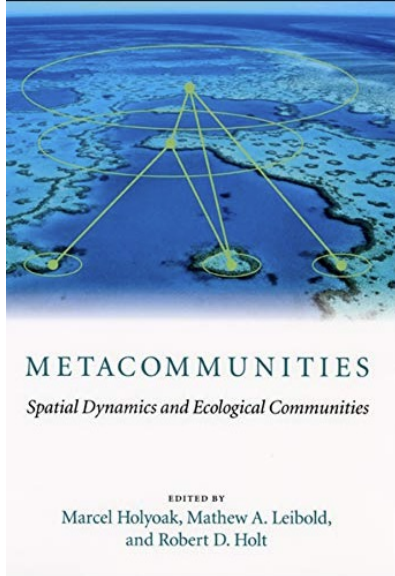
- Contexte de fragmentation du paysage
- Dynamiques de colonisation-extinction
- Modèle de Levins, 1969



Ilkka Hanski « Metapopulation ecology » 1976  
Oxford series in Ecology and Evolution

# A) Développement du concept

## Méta-communautés

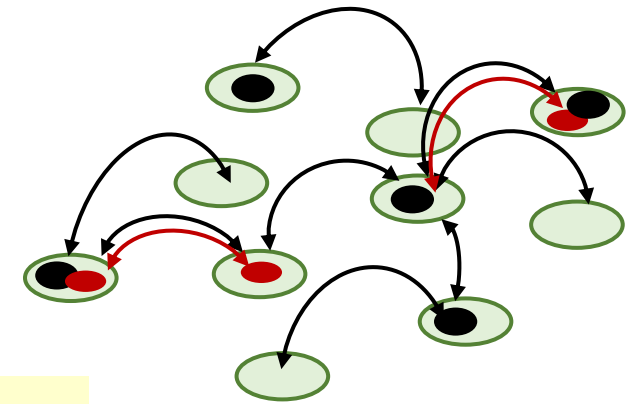
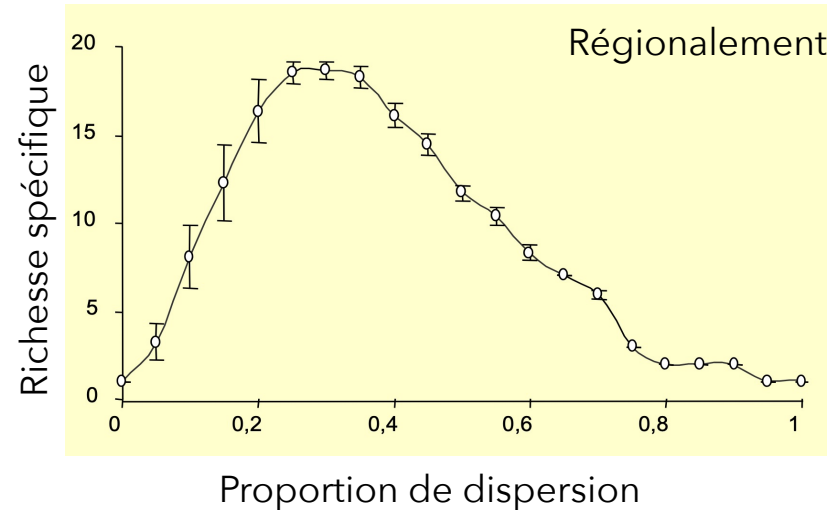


R.Holt



M. Leibold

Leibold et al 2004



Expliquer la coexistence régionale par la dispersion et l'hétérogénéité spatiale.

- « Competition-colonization trade-off », « Extinction debt » Tilman 1994, Tilman et al. 1994
- Diversité maximale à dispersion intermédiaire Mouquet & Loreau 2003
- Maintien de communauté en milieu pauvre par dynamique source-puits

# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes

*Ecology Letters*, (2003) 6: 673–679

doi: 10.1046/j.1461-0248.2003.00483.x

IDEAS AND  
PERSPECTIVES

Meta-ecosystems: a theoretical framework  
for a spatial ecosystem ecology

### Abstract

Michel Loreau<sup>1\*</sup>, Nicolas  
Mouquet<sup>2,4</sup> and Robert D. Holt<sup>3</sup>

This contribution proposes the meta-ecosystem concept as a natural extension of the metapopulation and metacommunity concepts. A meta-ecosystem is defined as a set of



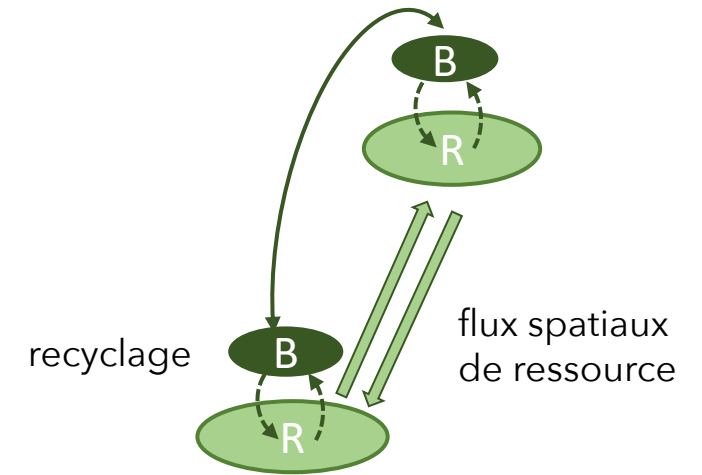
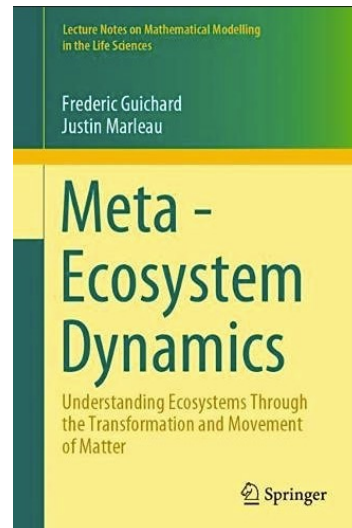
M. Loreau



R. Holt



F. Guichard



Extension des métacommunautés  
à la dynamique des ressources



# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

*Ecology Letters*, (2003) 6: 673–679

doi: 10.1046/j.1461-0248.2003.00483.x

IDEAS AND  
PERSPECTIVES

### Meta-ecosystems: a theoretical framework for a spatial ecosystem ecology

#### Abstract

This contribution proposes the meta-ecosystem concept as a natural extension of metapopulation and metacommunity concepts. A meta-ecosystem is defined as a spatially explicit ecosystem with multiple interacting sub-ecosystems.

Michel Loreau<sup>1\*</sup>, Nicolas Mouquet<sup>2,4</sup> and Robert D. Holt<sup>3</sup>



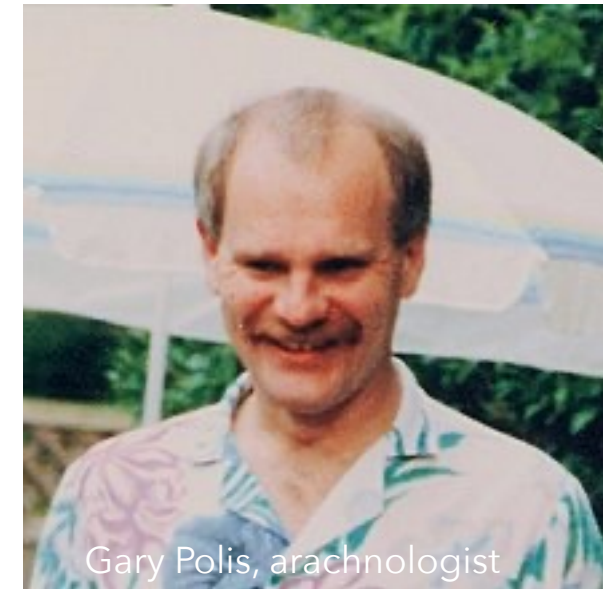
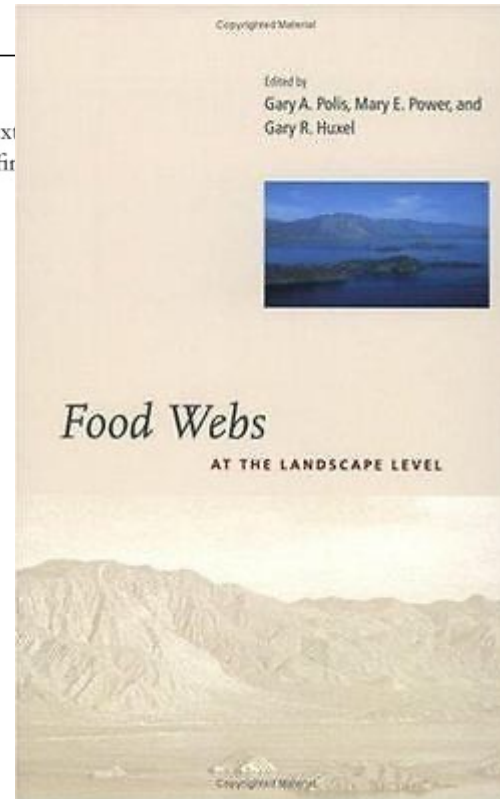
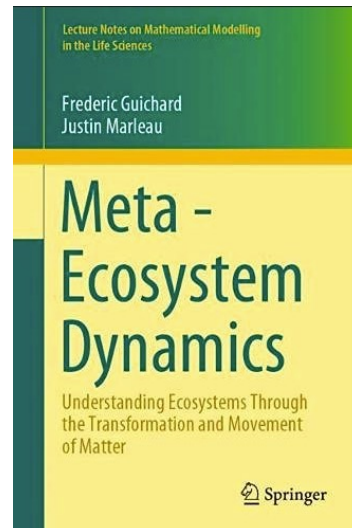
M. Loreau



R. Holt



F. Guichard

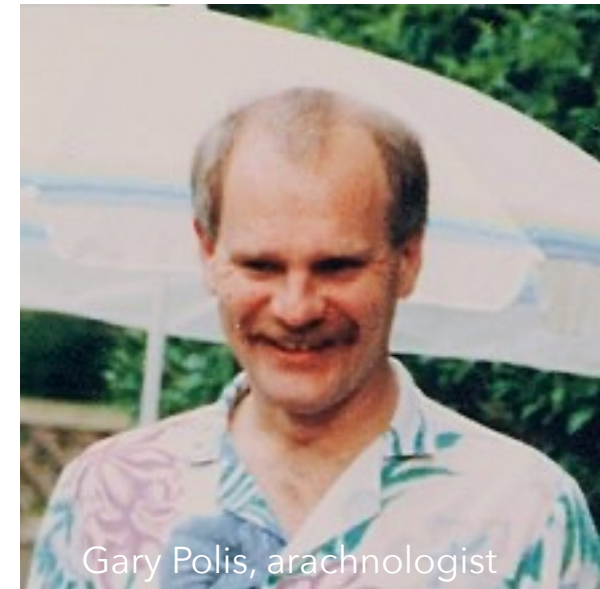


Gary Polis, arachnologist

# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

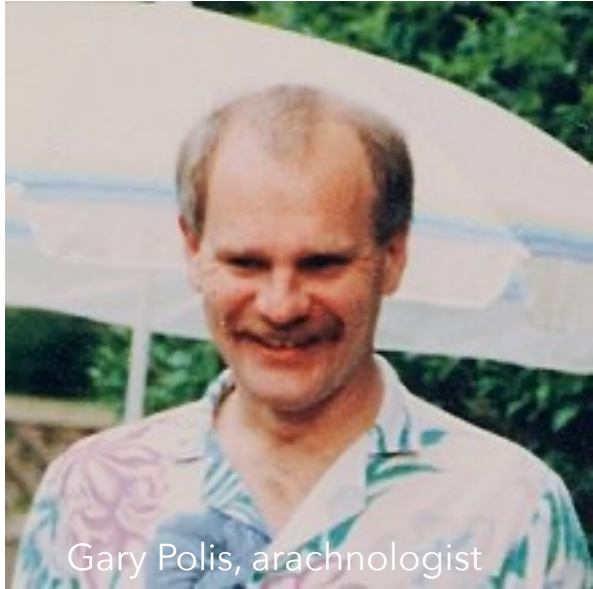
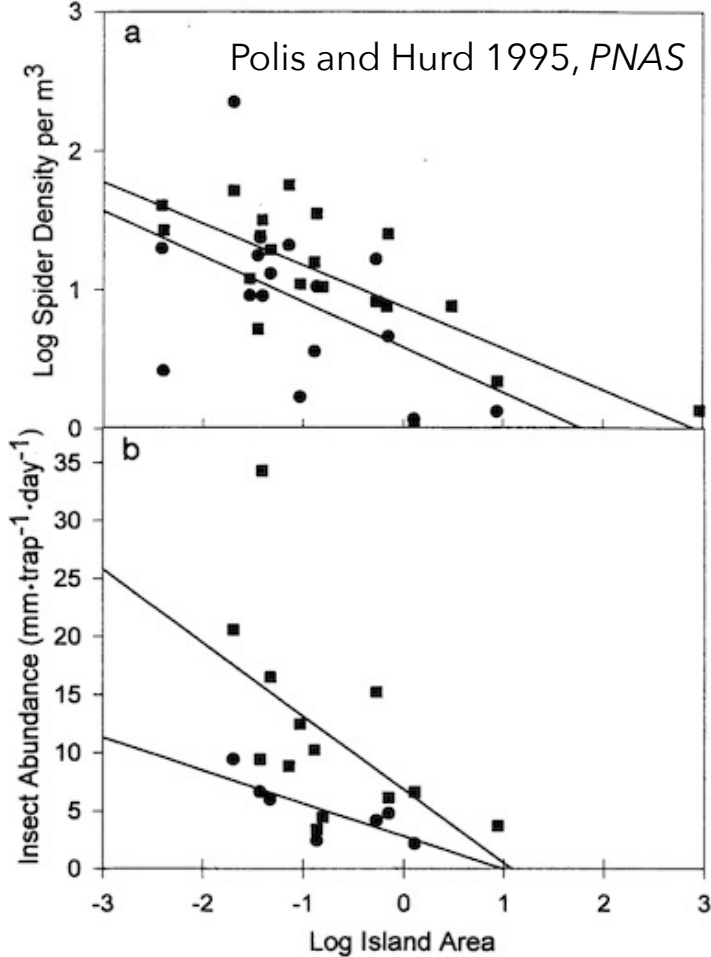
Cas emblématique  
des îles désertiques



# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

Cas emblématique des îles désertiques

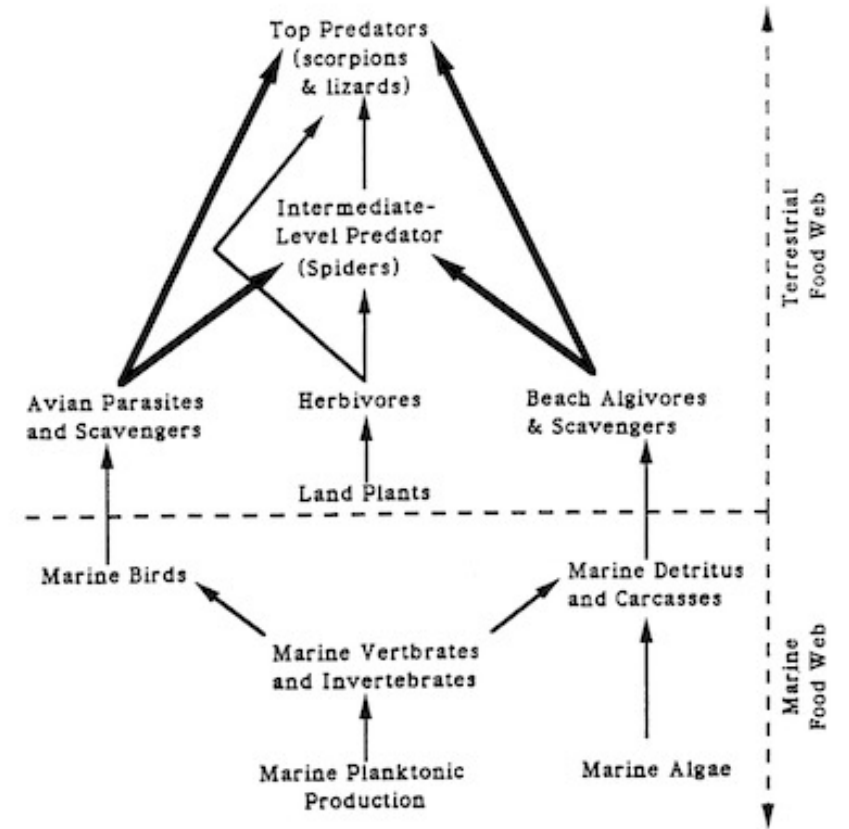
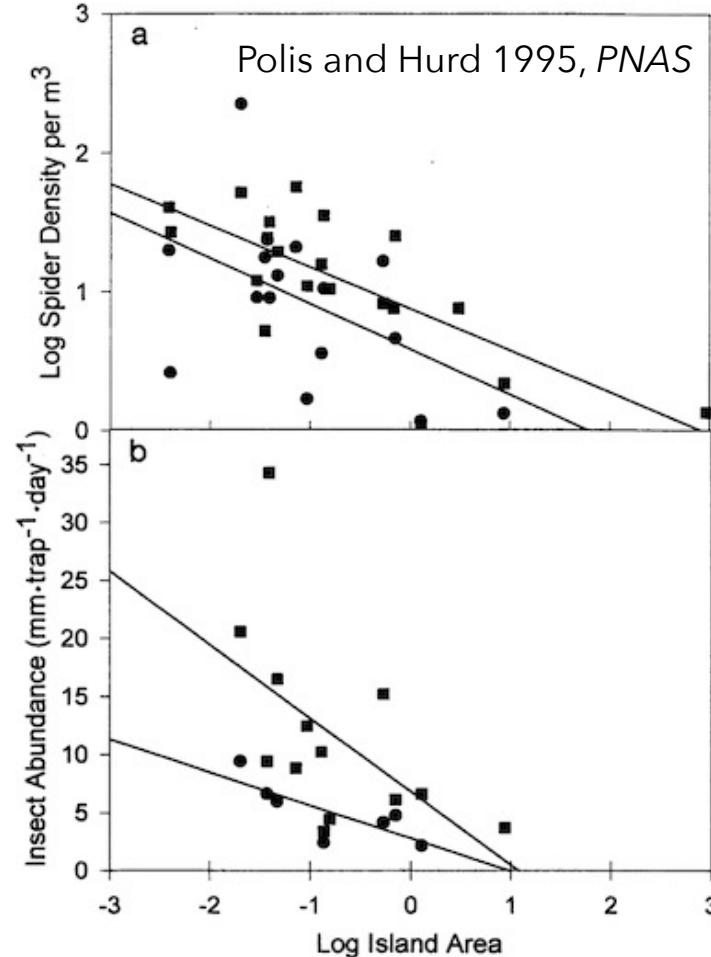




# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

Cas emblématique des îles désertiques

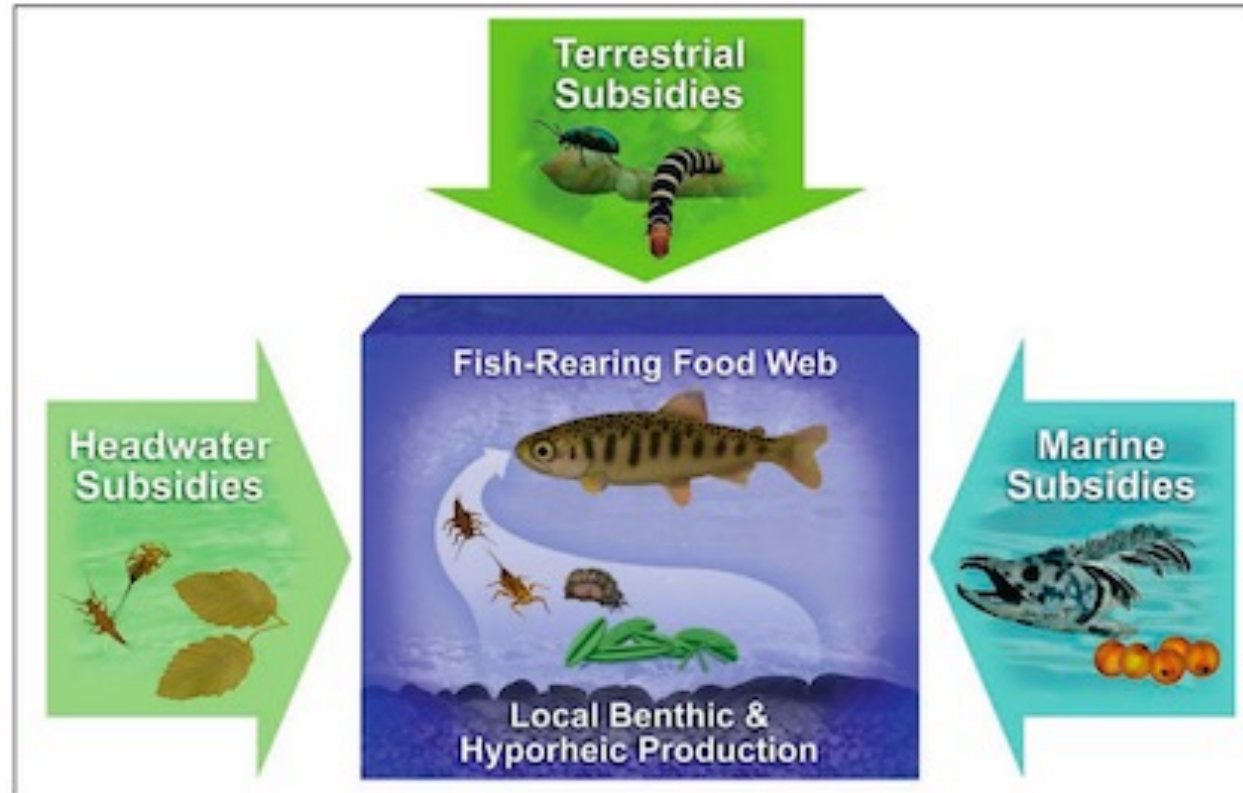


⇒ des communautés qui n'existeraient pas autrement

# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

Cas emblématique des écosystèmes d'eau douce



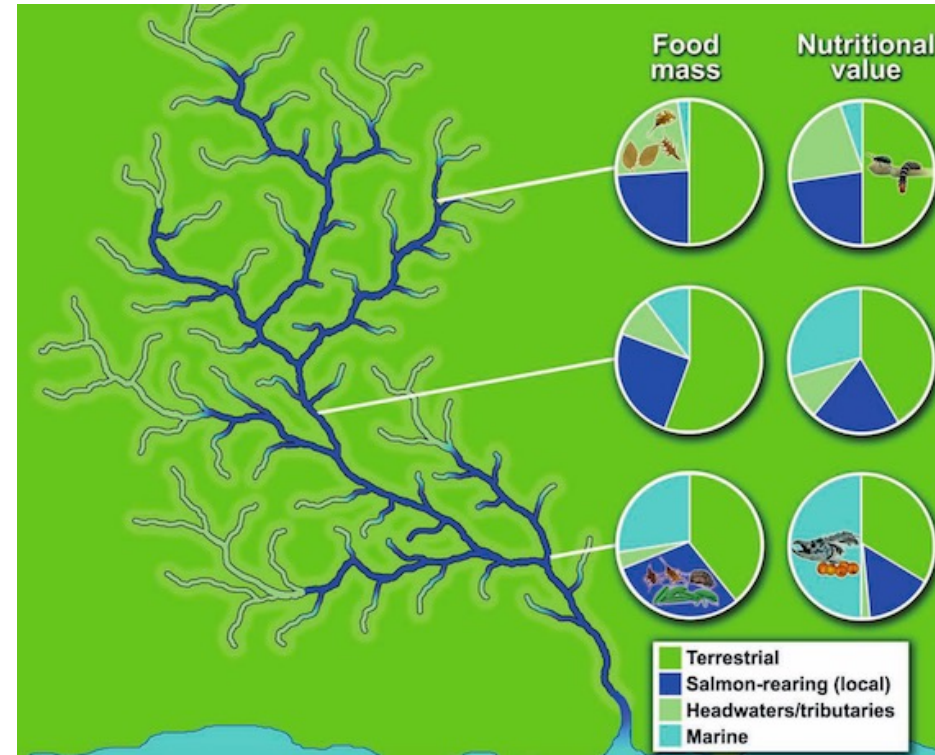
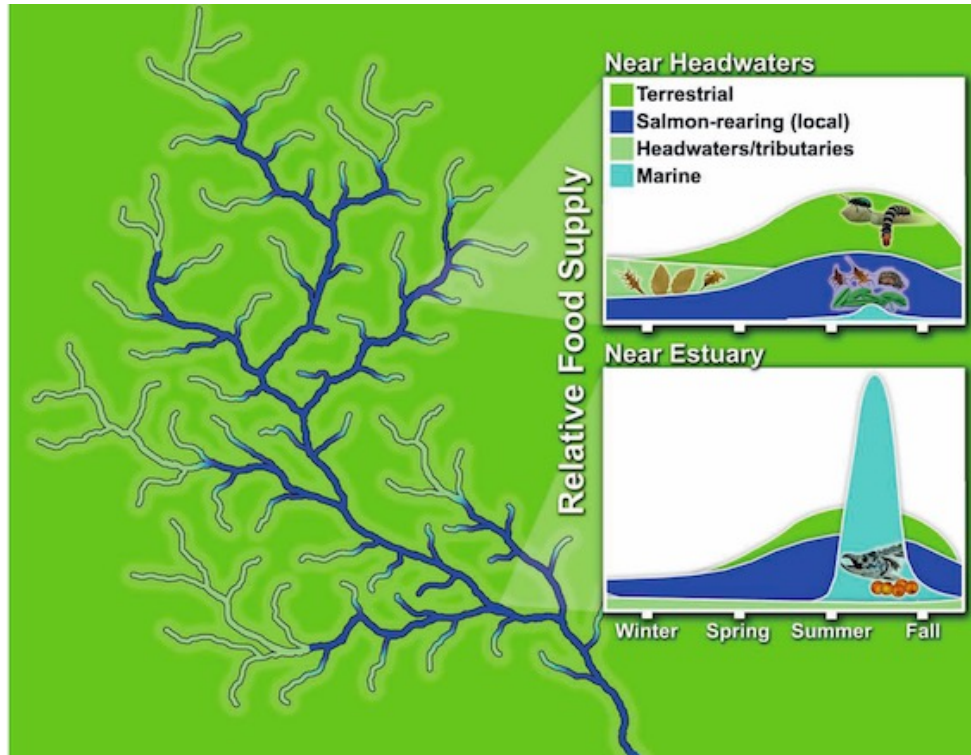
Wipfli and Baxter 2010, *Fisheries*

⇒ Production de poisson, cas du saumon du Pacifique en Amérique du Nord-Est

# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

Cas emblématique des écosystèmes d'eau douce



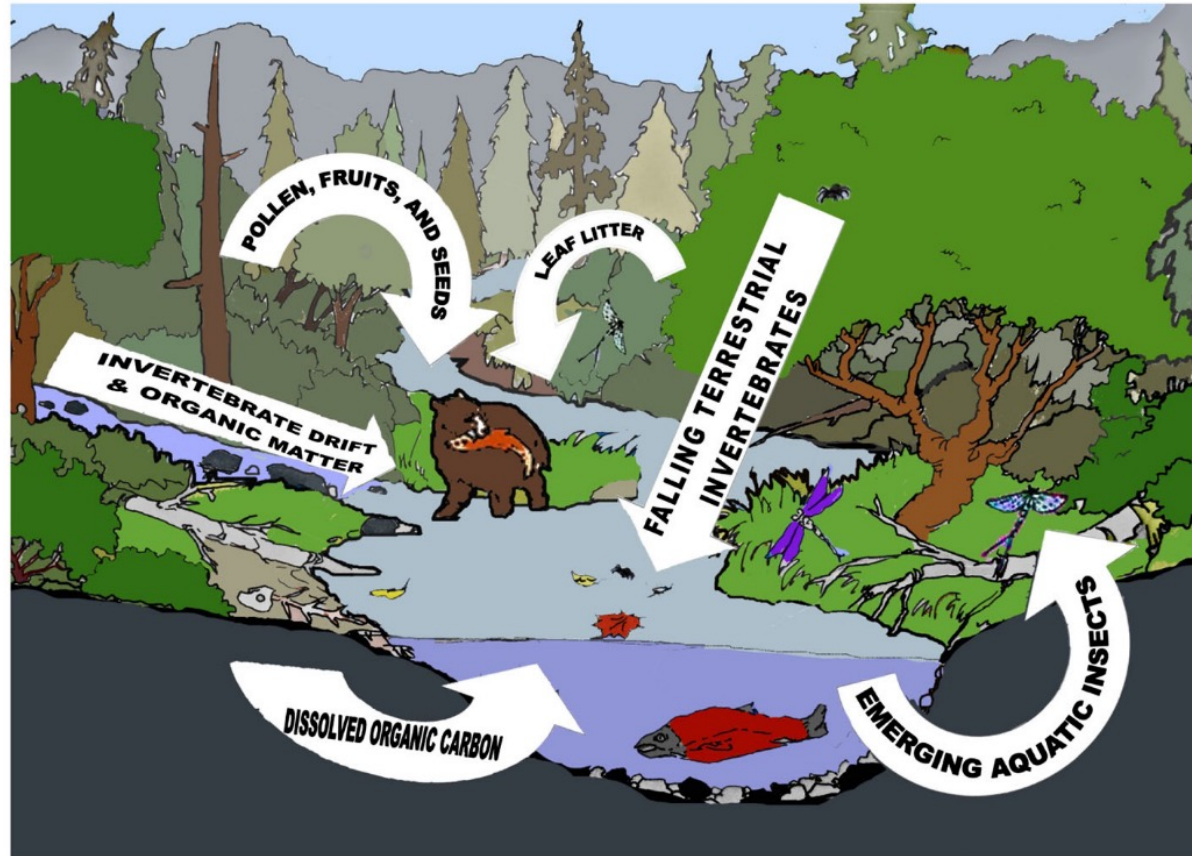
Wipfli and Baxter 2010, *Fisheries*

- ⇒ Production de poisson, cas du saumon du Pacifique en Amérique du Nord-Est
- ⇒ Dépend pour + de 50% d'autres écosystèmes, avec des variations saisonnières

# A) Développement du concept

## Méta-écosystèmes - motivations empiriques

Cas emblématique des écosystèmes d'eau douce



Richardson and Sato 2015,  
*Ecohydrology*

⇒ Importance des apports spatiaux de ressource reconnue depuis longtemps mais dynamique spatiale intégrée depuis peu



# A) Développement du concept

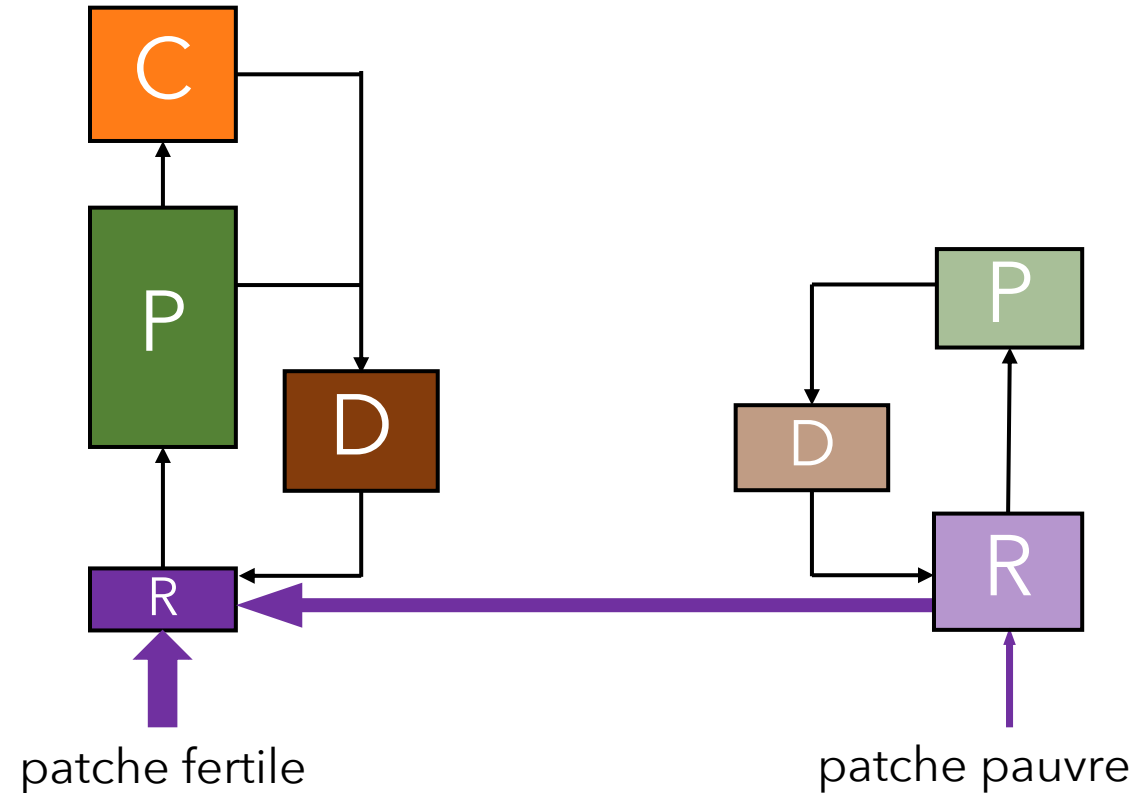
## Résultats théoriques généraux

⇒ Flux de nutriments déstabilise les interactions consommateur-ressource

Marleau et al. 2010; Gounand et al. 2014

Paradoxe de l'enrichissement

Rozensweig 1971, *Science*



# A) Développement du concept

## Résultats théoriques généraux

⇒ Flux de nutriments déstabilise les interactions consommateur-ressource

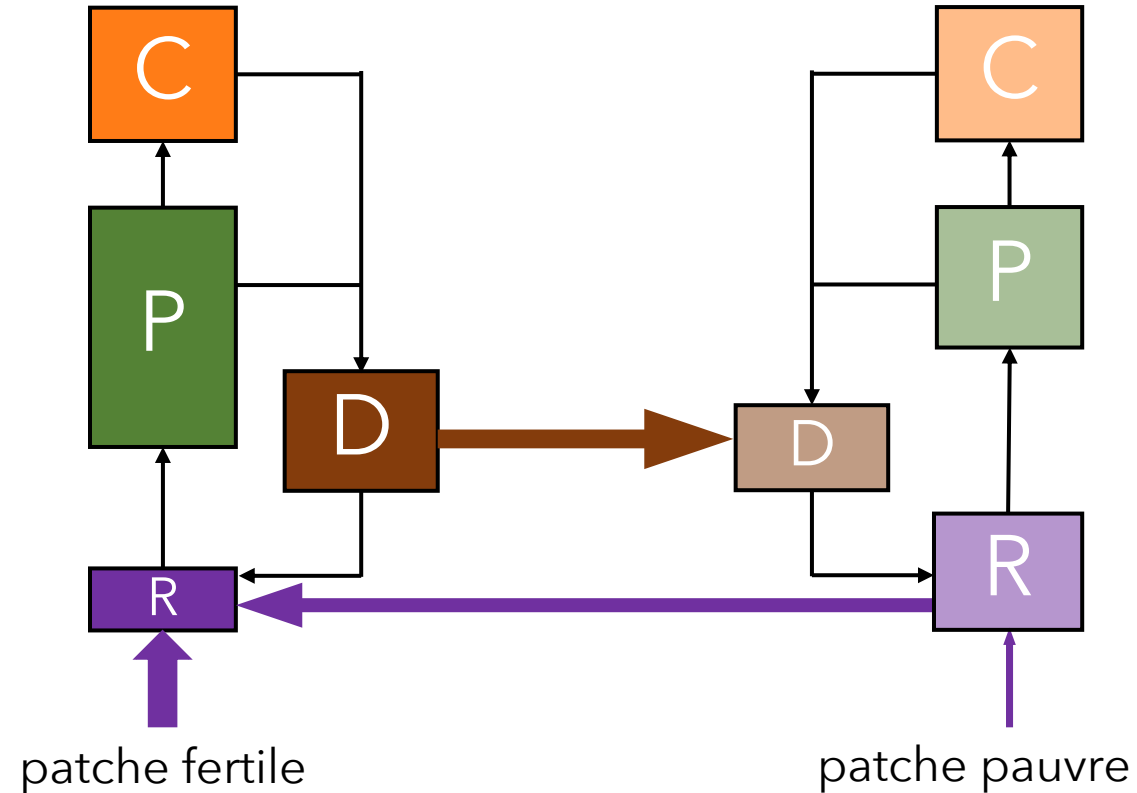
Marleau et al. 2010; Gounand et al. 2014

Paradoxe de l'enrichissement

Rozensweig 1971, *Science*

⇒ Flux de détritux permet la persistance en milieu pauvre

Gravel et al. 2010, *Ecology*



# A) Développement du concept

## Résultats théoriques généraux

⇒ Flux de nutriments déstabilise les interactions consommateur-ressource

Marleau et al. 2010; Gounand et al. 2014

Paradoxe de l'enrichissement

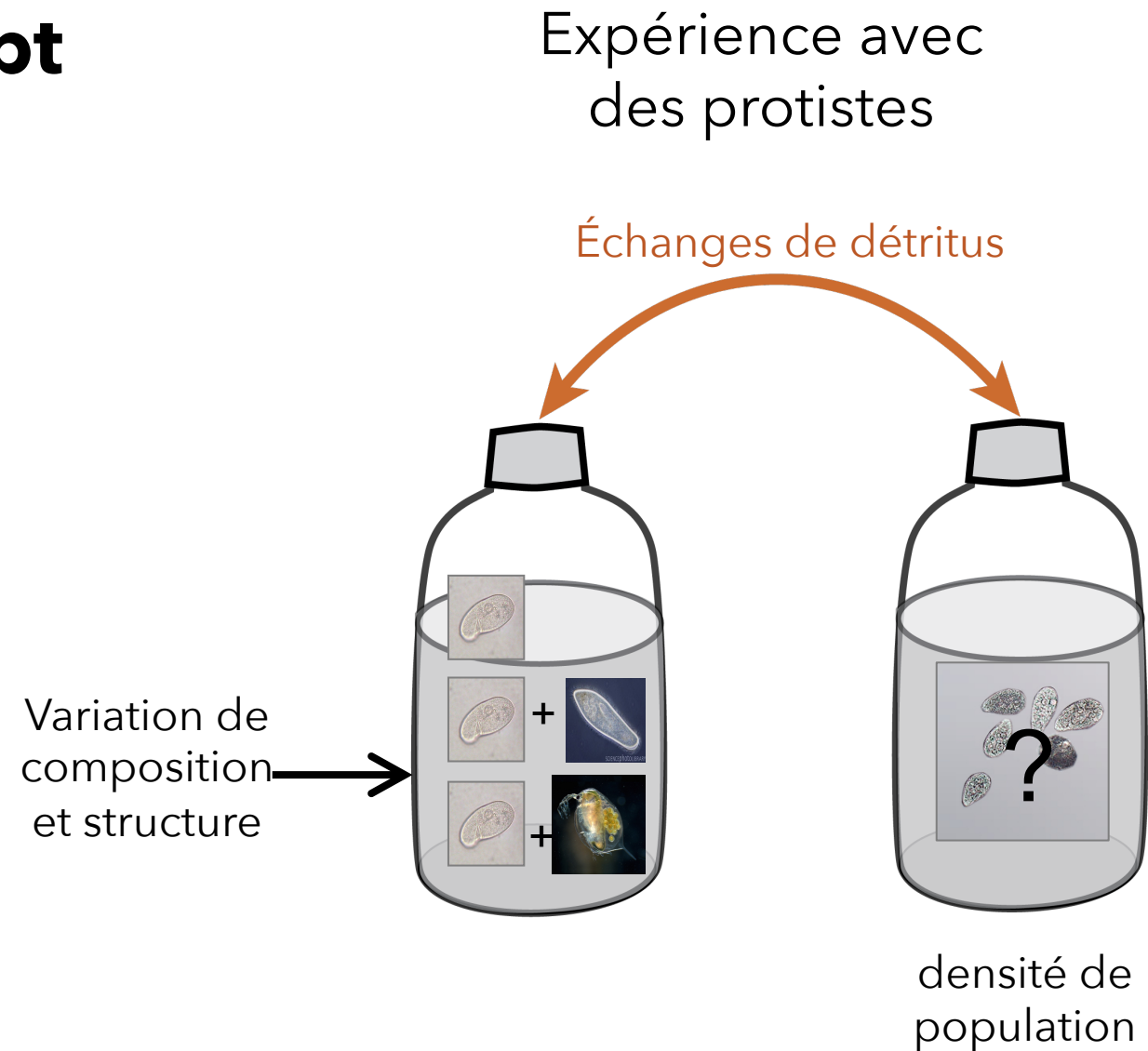
Rozensweig 1971, *Science*

⇒ Flux de détritux permet la persistance en milieu pauvre

Gravel et al. 2010, *Ecology*

⇒ Flux de ressources et liens entre communautés ?

Gounand et al. 2017, Harvey et al. 2017, Belhassen et al. in prep



# A) Développement du concept

## Résultats théoriques généraux

⇒ Flux de nutriments déstabilise les interactions consommateur-ressource

Marleau et al. 2010; Gounand et al. 2014

Paradoxe de l'enrichissement

Rozensweig 1971, *Science*

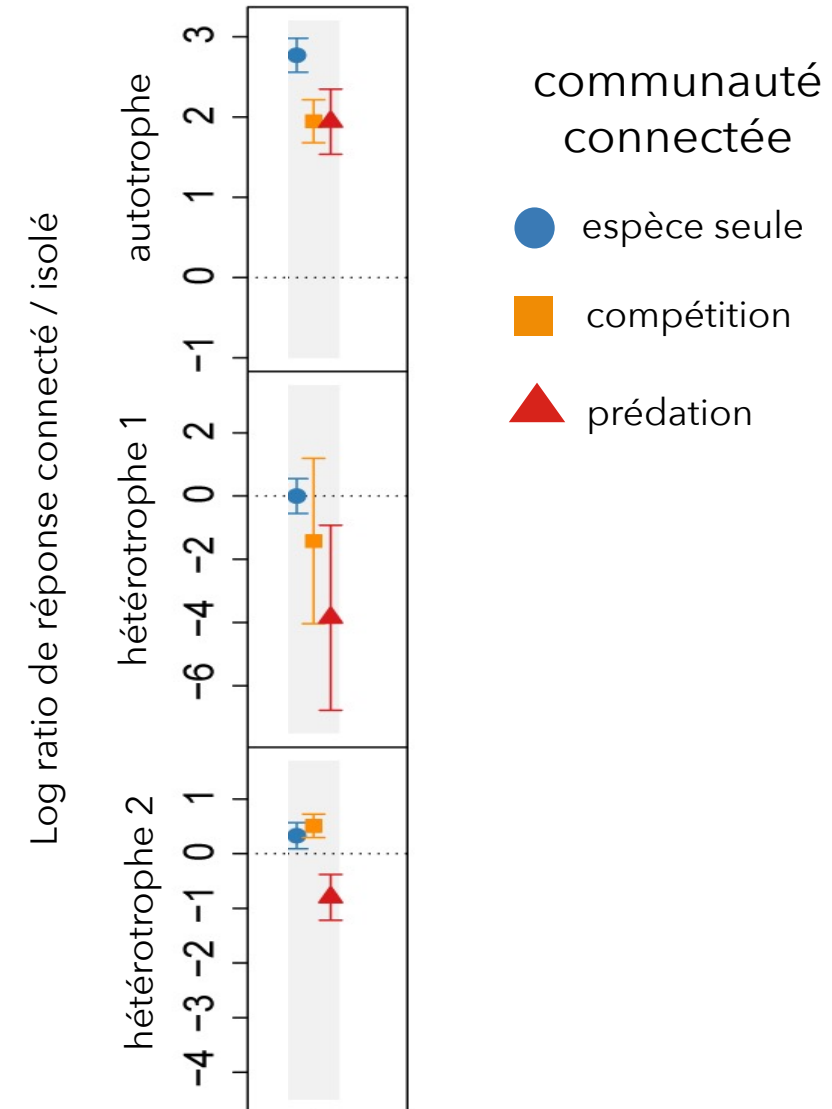
⇒ Flux de détritux permet la persistance en milieu pauvre

Gravel et al. 2010, *Ecology*

⇒ La qualité des ressources relie les communautés

Gounand et al. 2017, Harvey et al. 2017, Belhassen et al. in prep

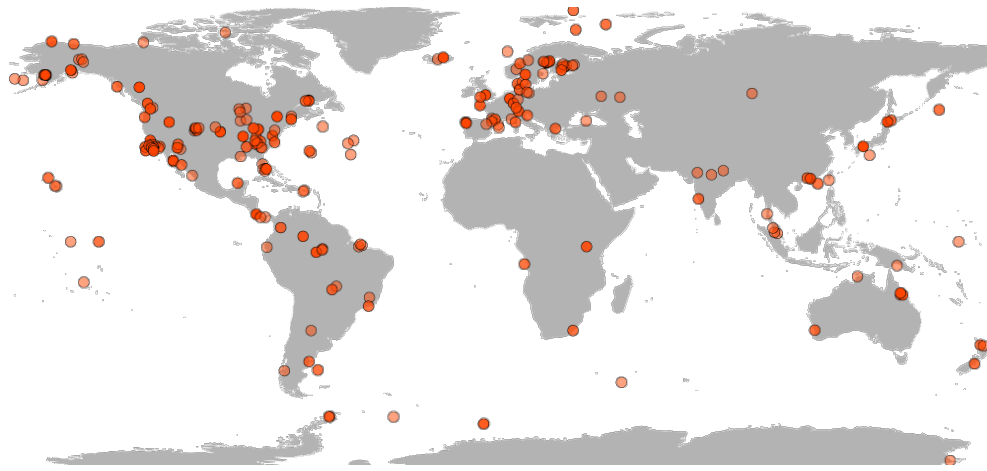
Expérience avec des protistes



# B) Méta-écosystèmes empiriques

## Quantité des flux (C)

Données empiriques



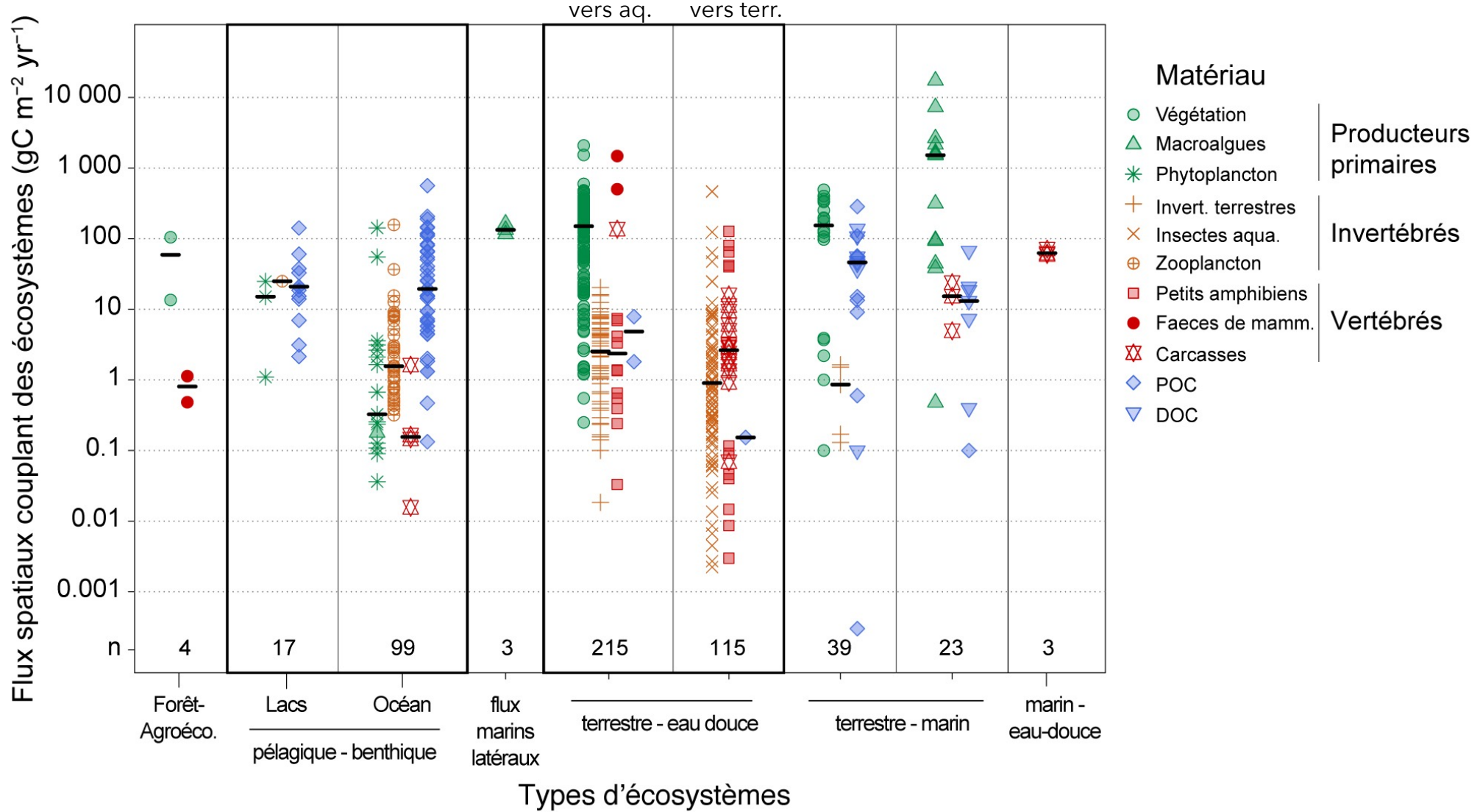
Flux de carbone (n=518)  
+ Flux locaux (n=2516)

- 3034 valeurs
- 557 articles
- Unité Carbone:  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$



# B) Méta-écosystèmes empiriques

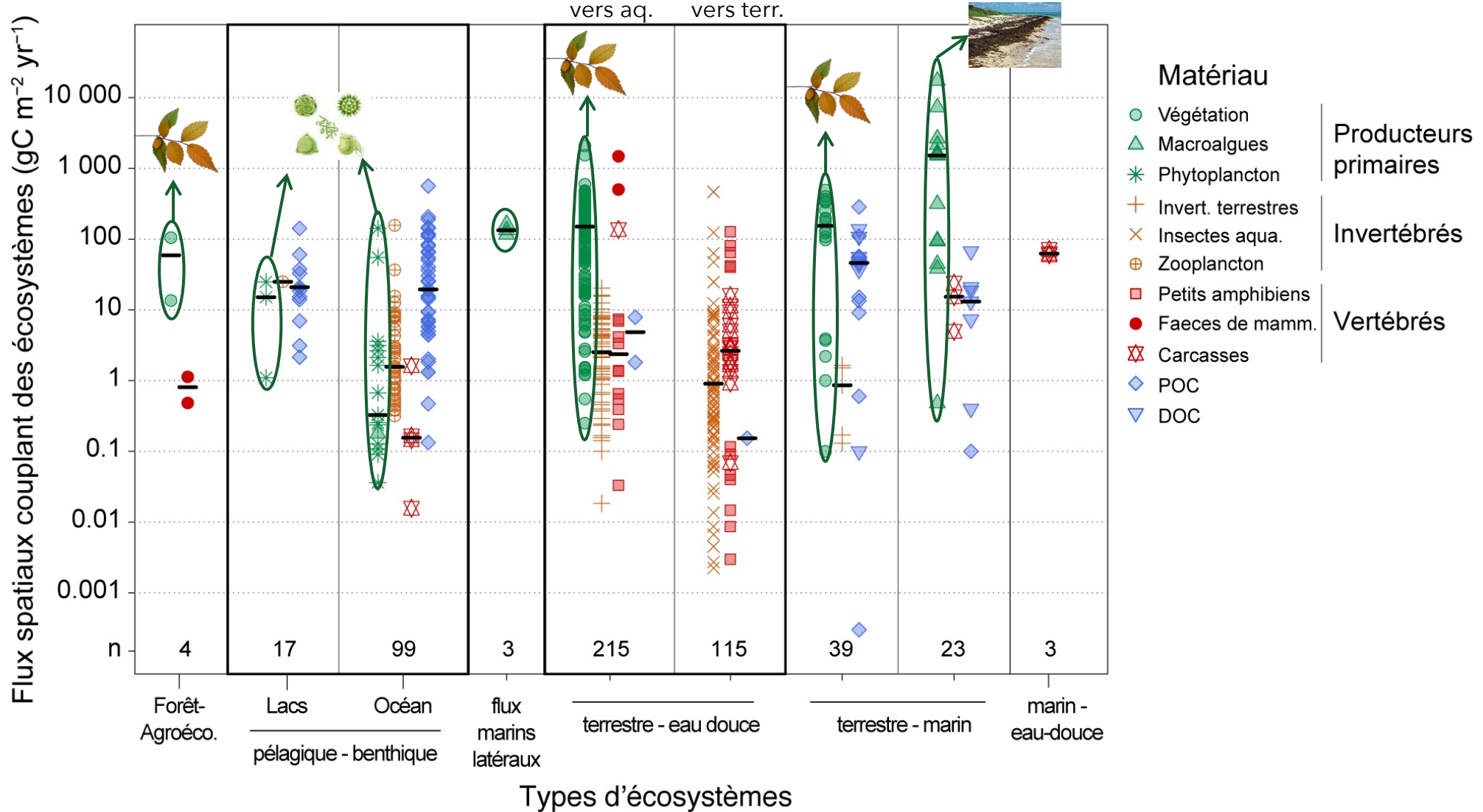
## Quantité des flux (C)



⇒ 8 ordres de grandeur

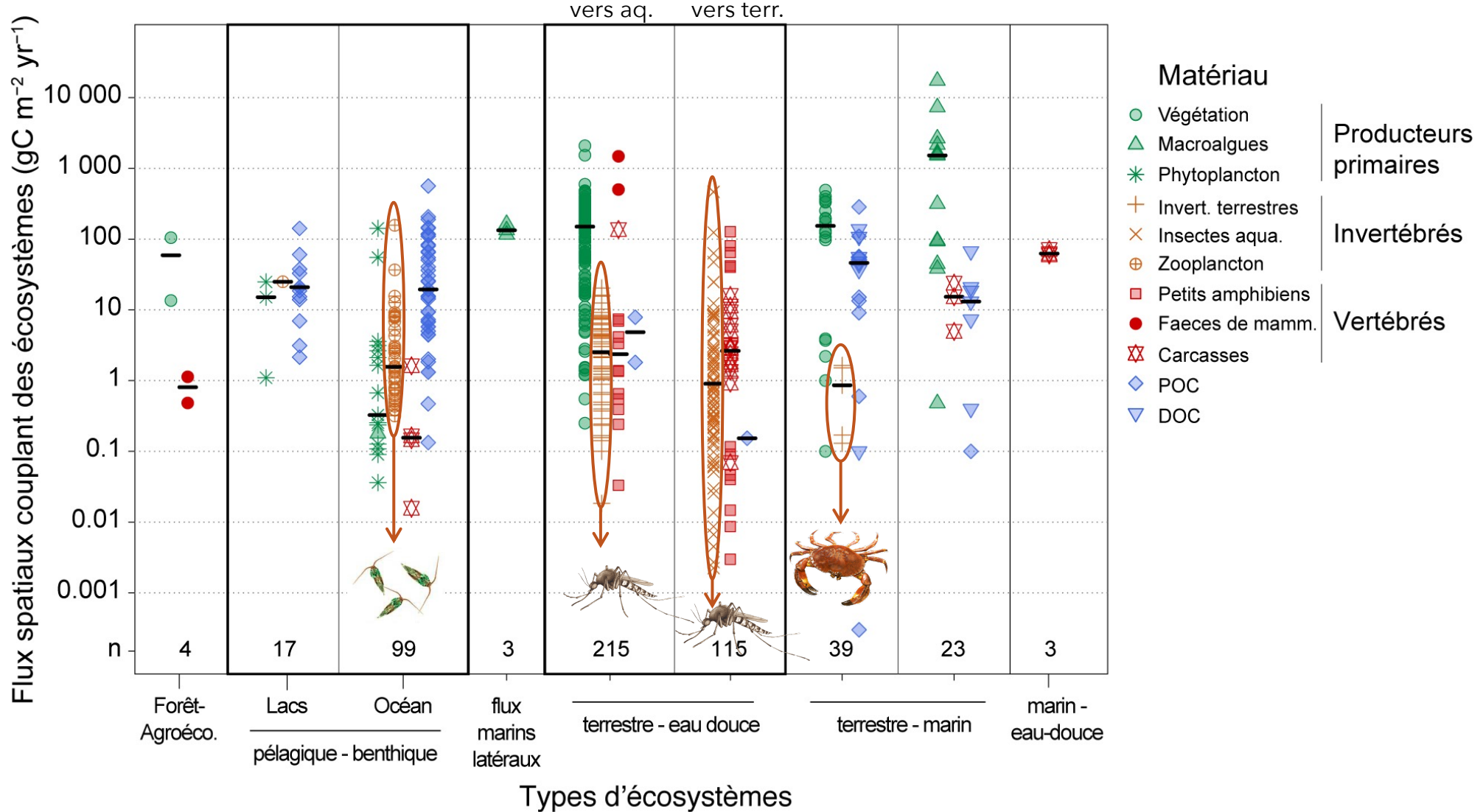
# B) Méta-écosystèmes empiriques

## Quantité des flux (C)



# B) Méta-écosystèmes empiriques

## Quantité des flux (C)

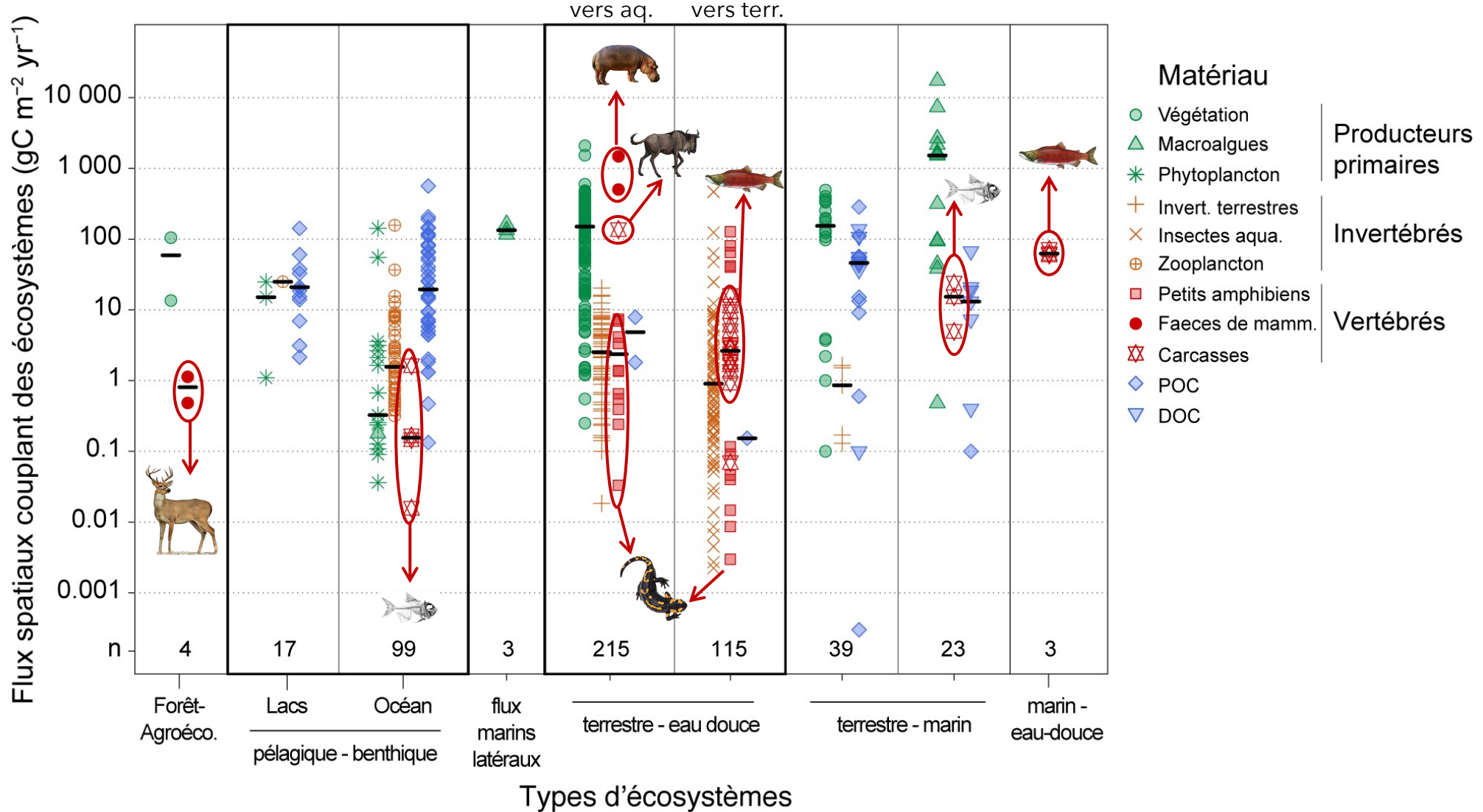


⇒ 8 ordres de grandeur



# B) Méta-écosystèmes empiriques

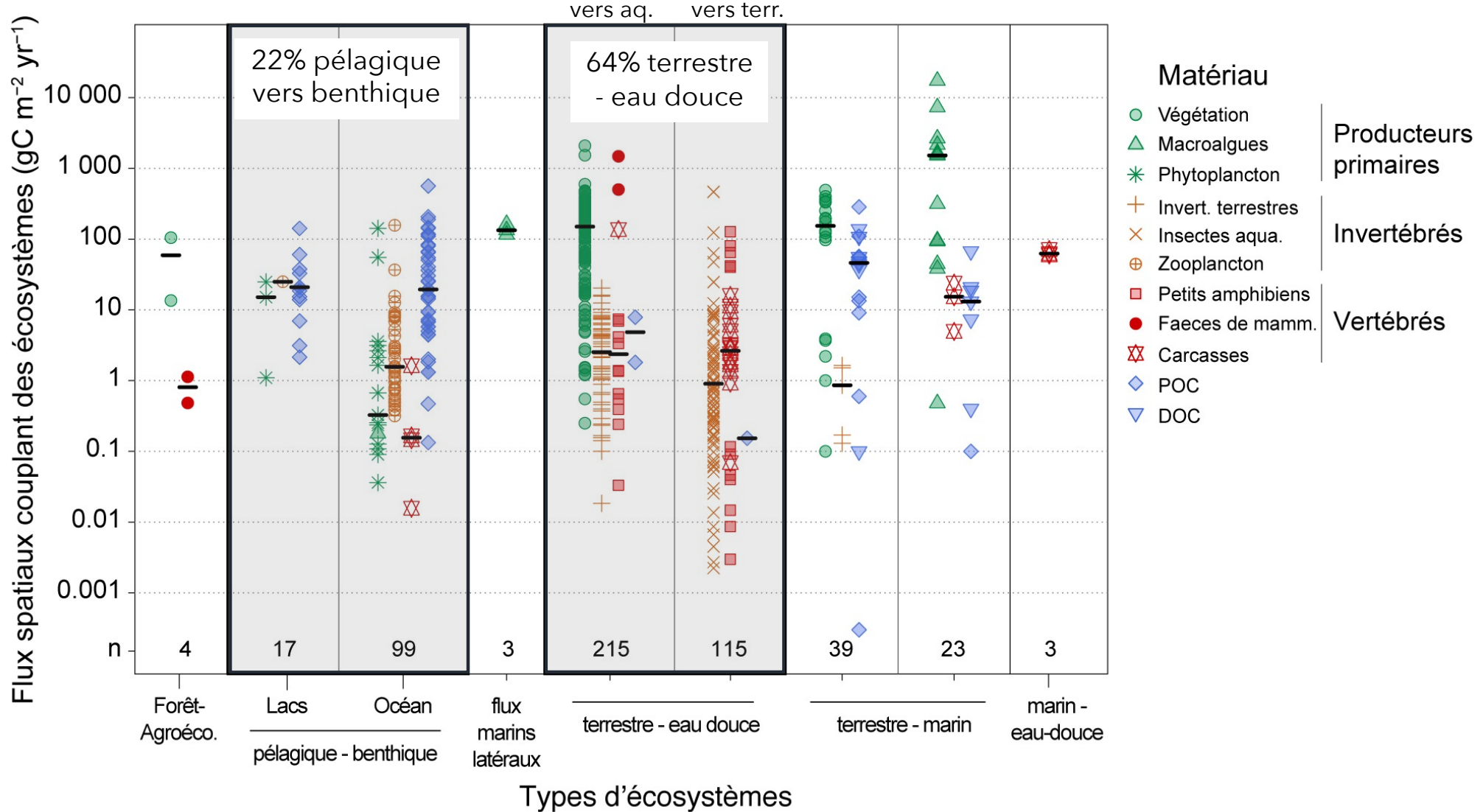
## Quantité des flux (C)



⇒ 8 ordres de grandeur

# B) Méta-écosystèmes empiriques

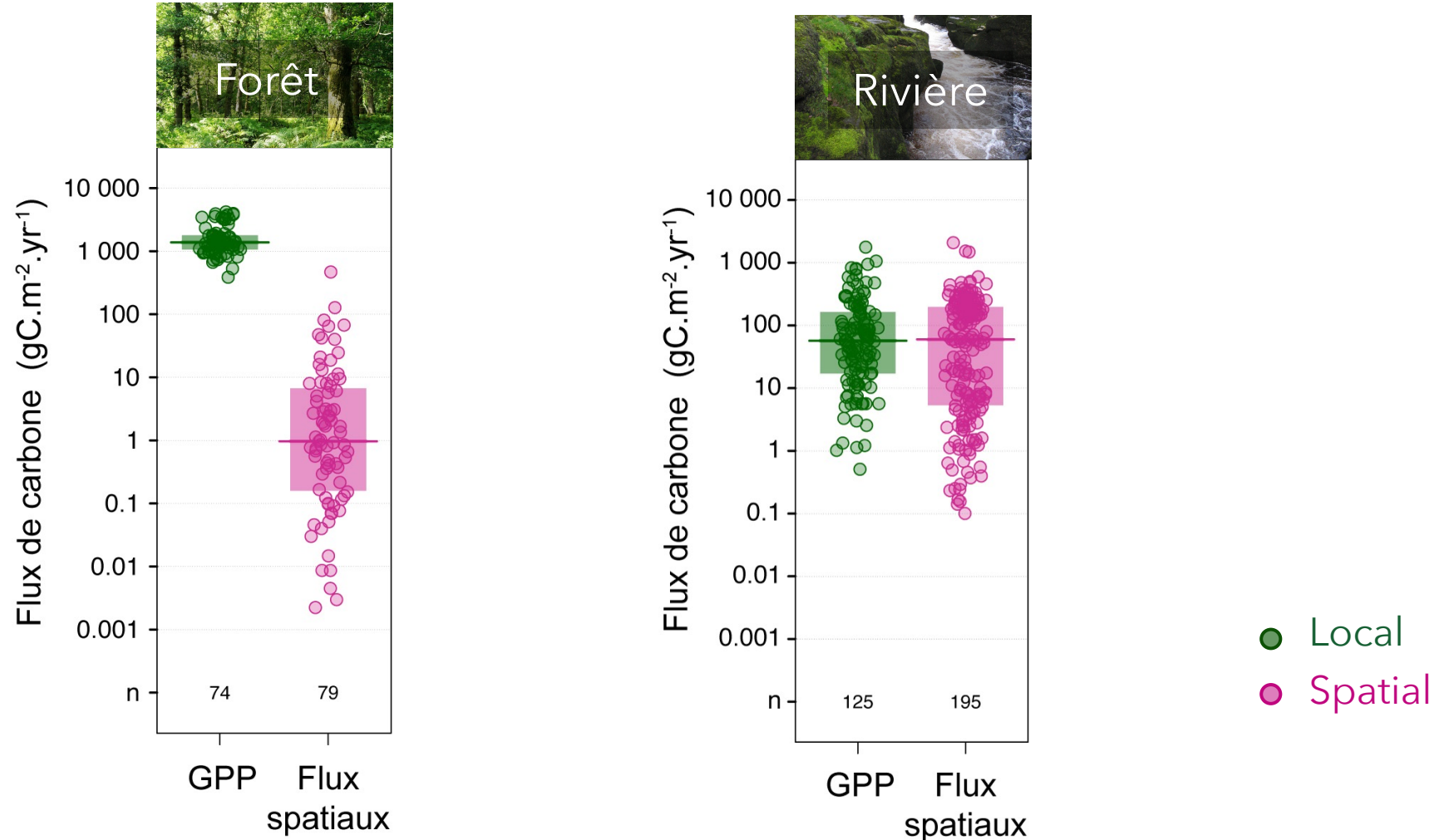
## Quantité des flux (C)



⇒ Flux mieux documentés aux interfaces pélagique-benthique et terrestre-eau douce

# B) Méta-écosystèmes empiriques    Quantité des flux (C)

## Comparaison avec les flux locaux

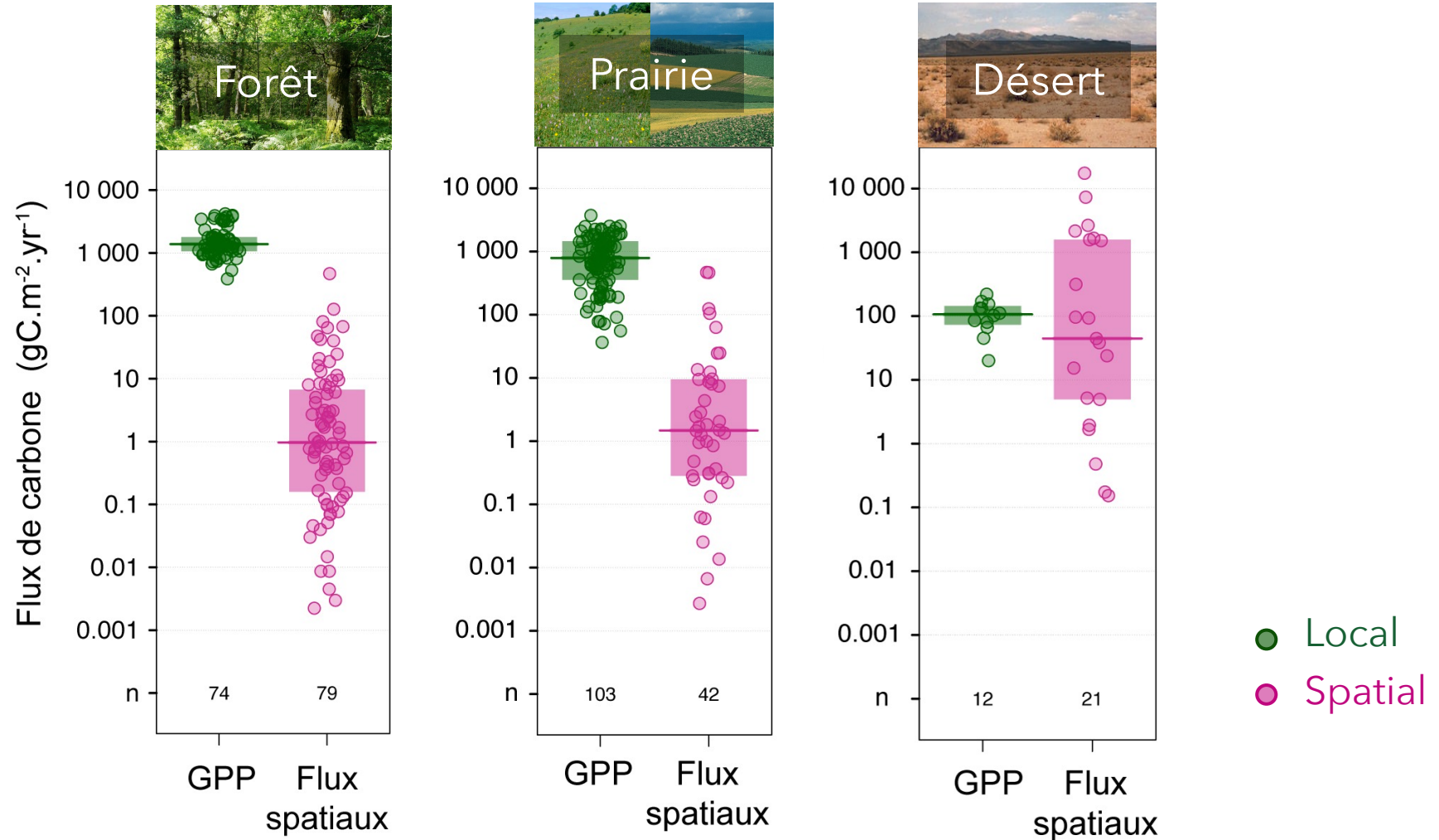


⇒ Quantitativement plus important pour aquatique que Terrestre

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Quantité des flux (C)

Terrestre

## Comparaison avec les flux locaux

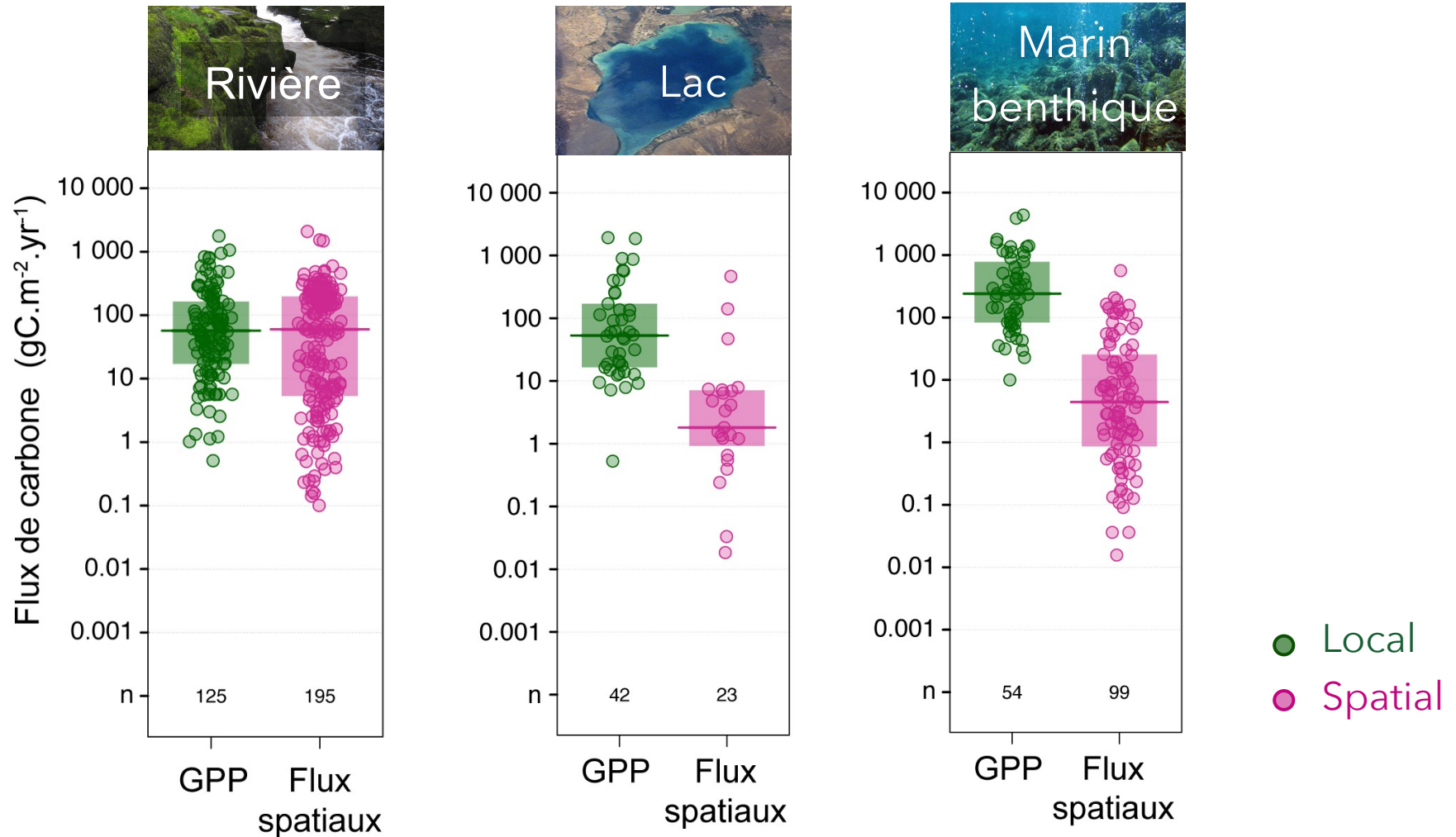


⇒ Quantitativement plus important pour aquatique que Terrestre

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Quantité des flux (C)

Aquatique

## Comparaison avec les flux locaux

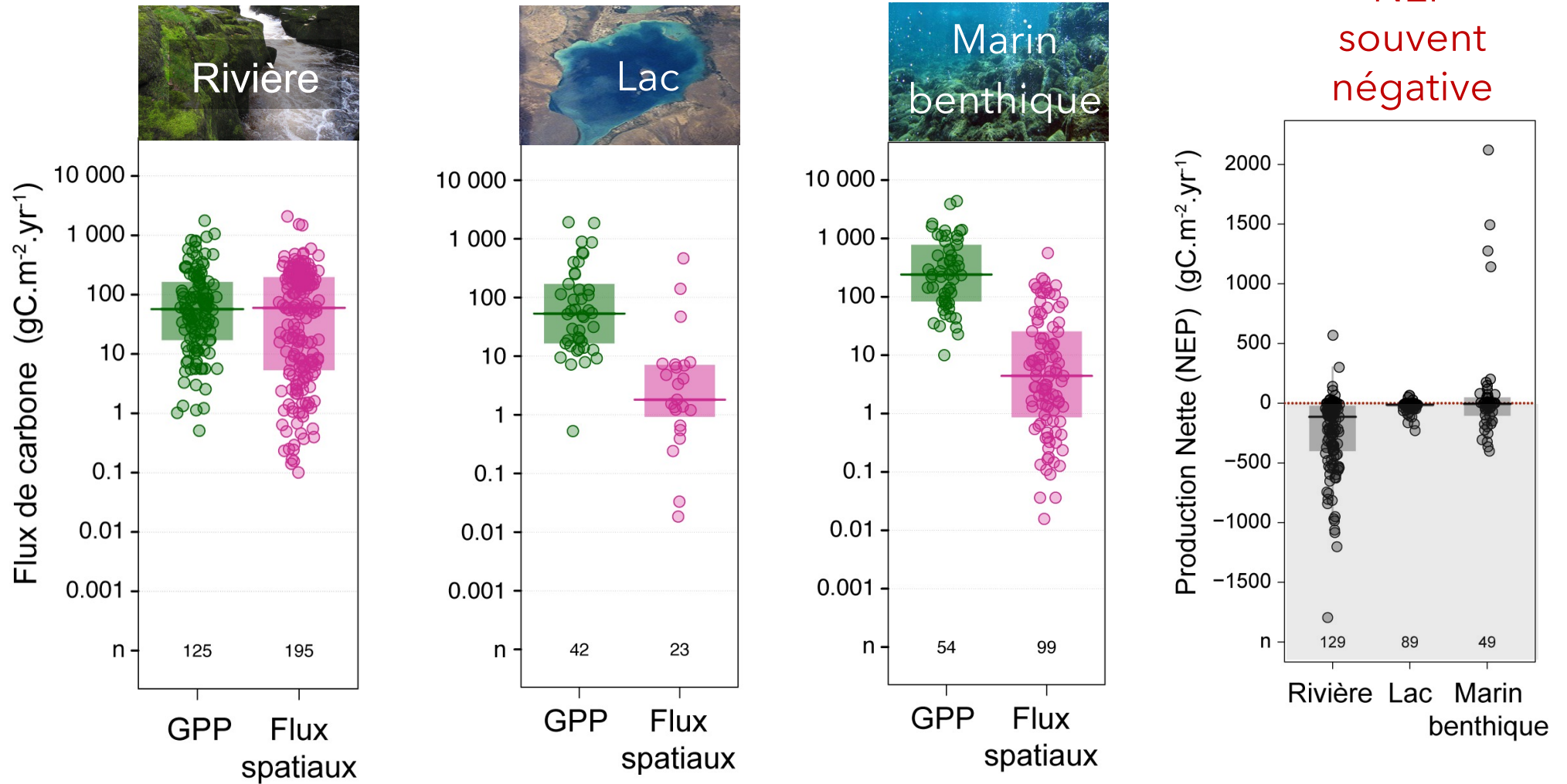


⇒ Quantitativement plus important pour aquatique que Terrestre

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Quantité des flux (C)

Aquatique

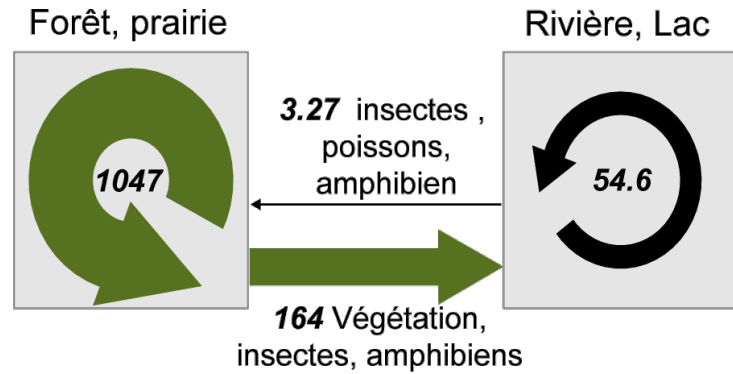
## Comparaison avec les flux locaux



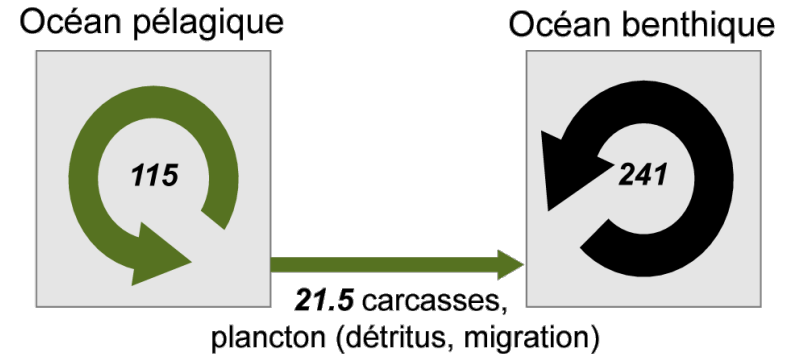
⇒ Quantitativement plus important pour aquatique que Terrestre

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Quantité des flux (C)

## Couplage terrestre-eau douce



## Couplage pélagique-benthique

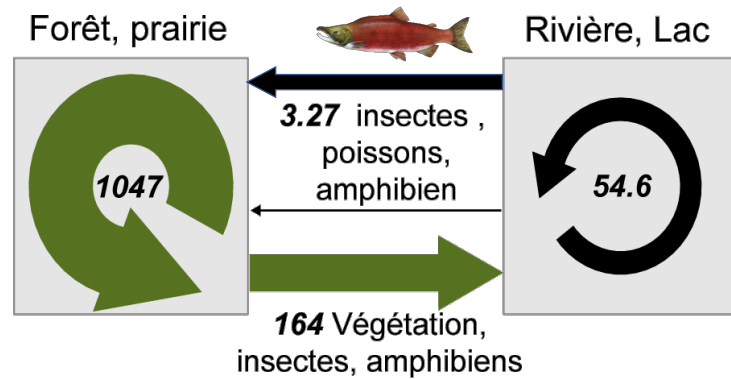


(valeurs médianes en  $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ )

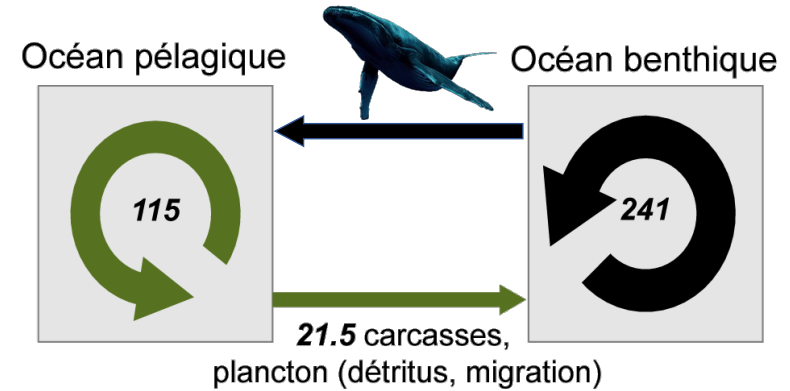
⇒ Les couplages par les flux de carbone sont unidirectionnels

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Qualité des flux (C,N,P)

## Couplage terrestre-eau douce



## Couplage pélagique-benthique



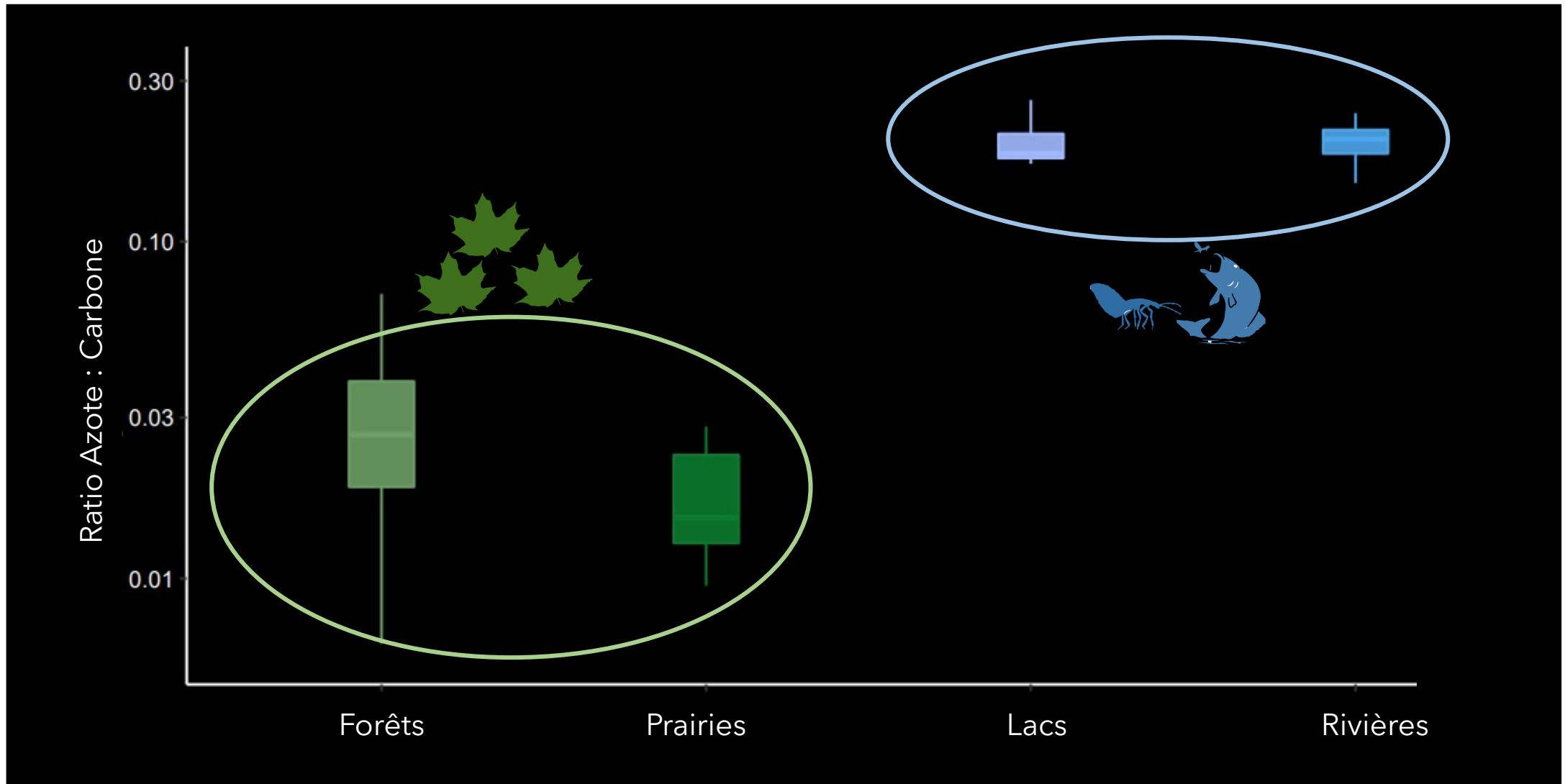
(valeurs médianes en gC.m<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>)

- ⇒ Les couplages par les flux de carbone sont unidirectionnels
- ⇒ Quid des flux de nutriments ?



## B) Méta-écosystèmes empiriques

Qualité des flux (C,N,P)

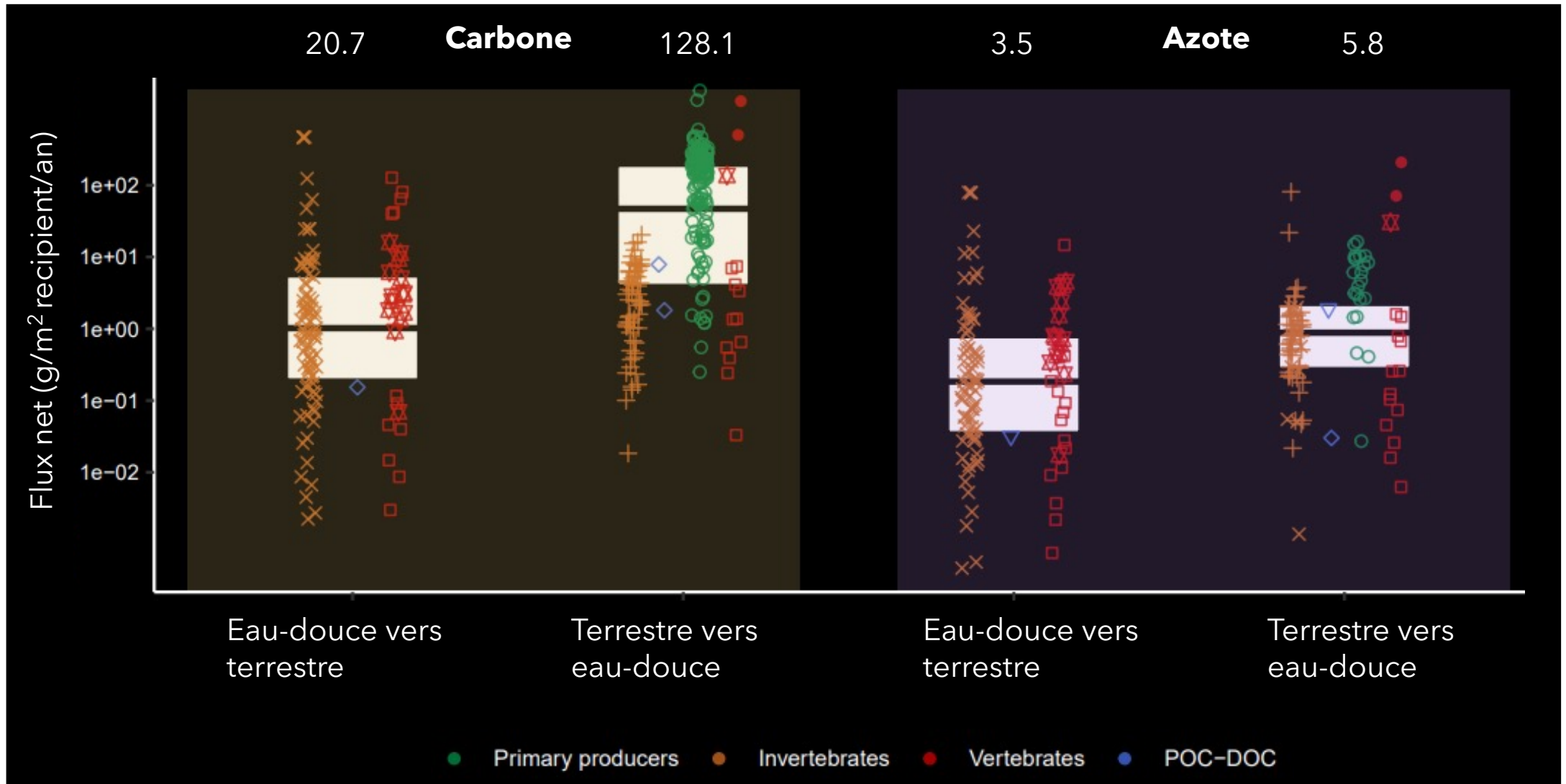


⇒ Assymétrie stœchiométrique des subsides

Gounand et al., unpublished data

# B) Méta-écosystèmes empiriques

## Qualité des flux (C,N,P)

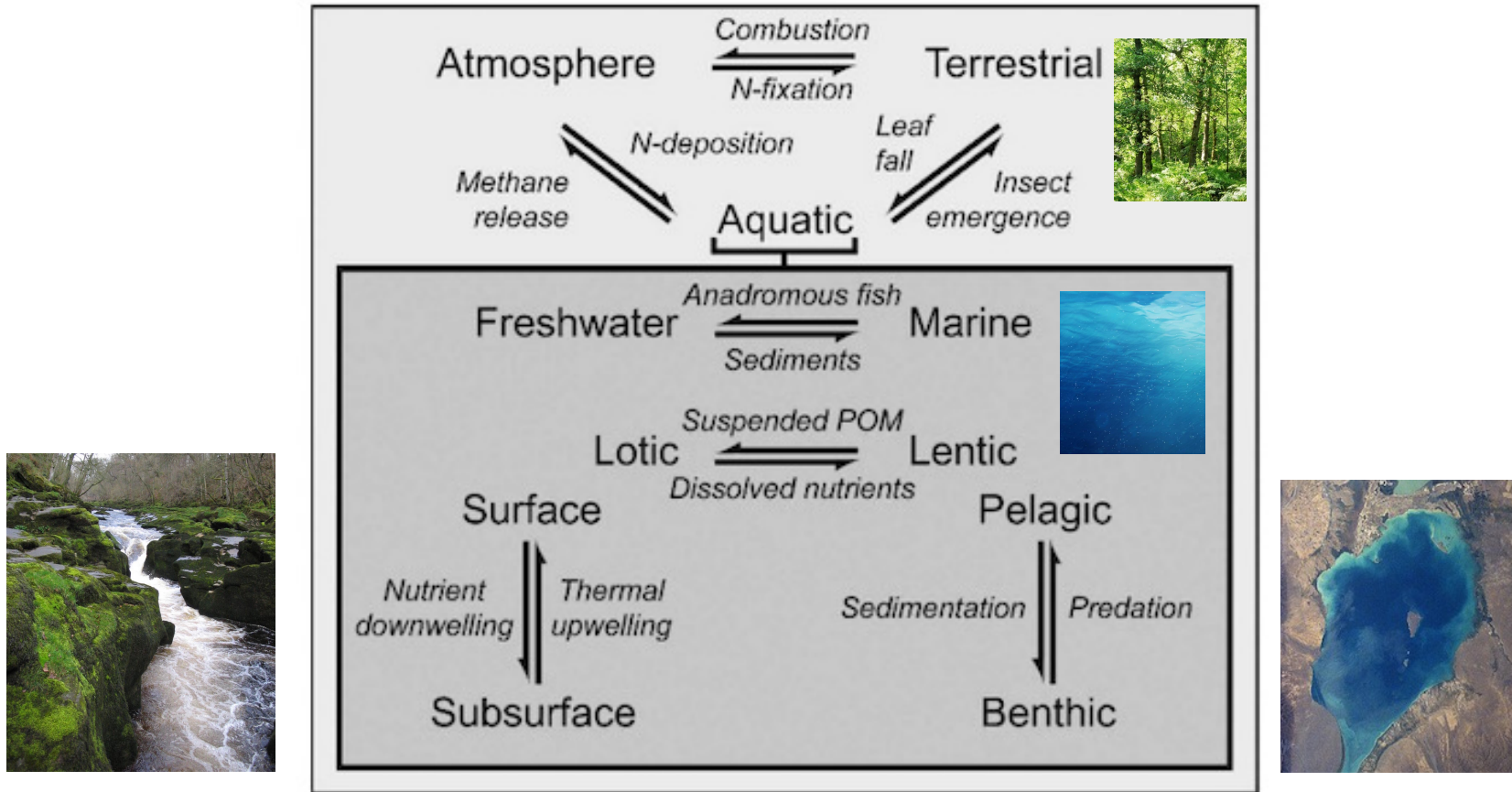


⇒ Flux d'azote équivalents dans les deux sens

Gounand et al., unpublished data

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Qualité des flux (C,N,P)

Flux spatiaux de nutriments dans les écosystèmes d'eau douce à marin



# B) Méta-écosystèmes empiriques      Qualité des flux (C,N,P)

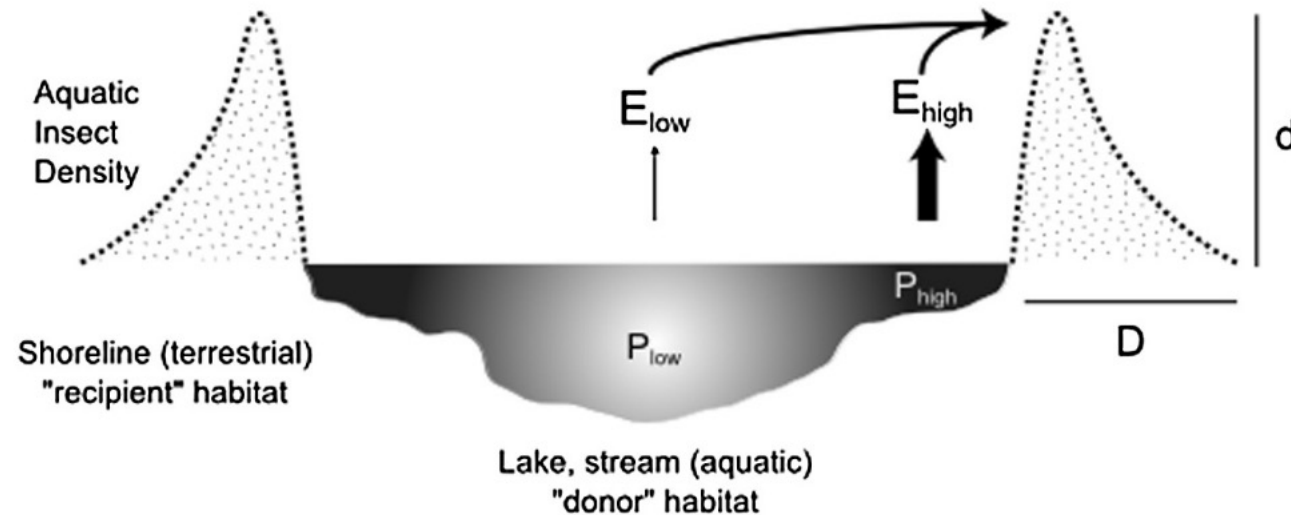
## Flux eau douce → terrestre

Emergence d'insectes

Lac Myvatyn de 2008 à 2011, entre 4 et 100 kg d'insectes déposés par m<sup>2</sup> et par an, dans les 50m

Dreyer and Gratton 2014, *Biological Control*

Dreyer et al. 2015, *Ecology*



⇒ Effet de lisière

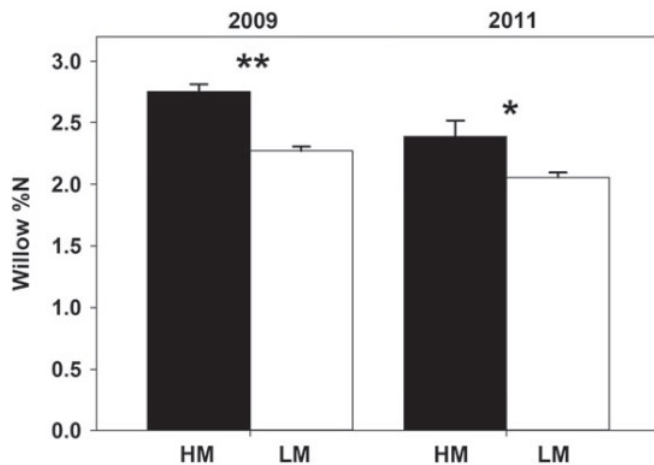
# B) Méta-écosystèmes empiriques      Qualité des flux (C,N,P)

## Flux eau douce → terrestre

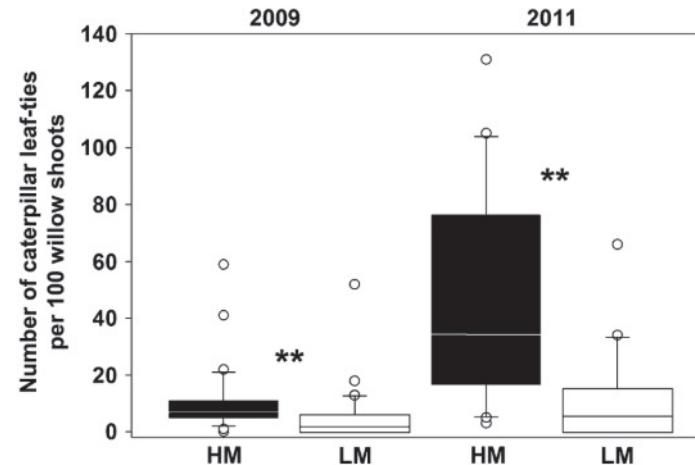
Emergence d'insectes

Des lacs en Islande, Lac Myvatyn (HM), et à 3 km de distance Lac Másvatn et lac Helluvadstjörn (LM)

% d'azote  
des feuilles de saule



abondance de chenilles  
*Hydromena furcata*



Bultman et al. 2014, *Ecological Entomology*

⇒ Les flux de ressources peuvent permettre la persistance en milieux pauvres

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Qualité des flux (C,N,P)

Effets des grands herbivores

Flux terrestre → eau douce

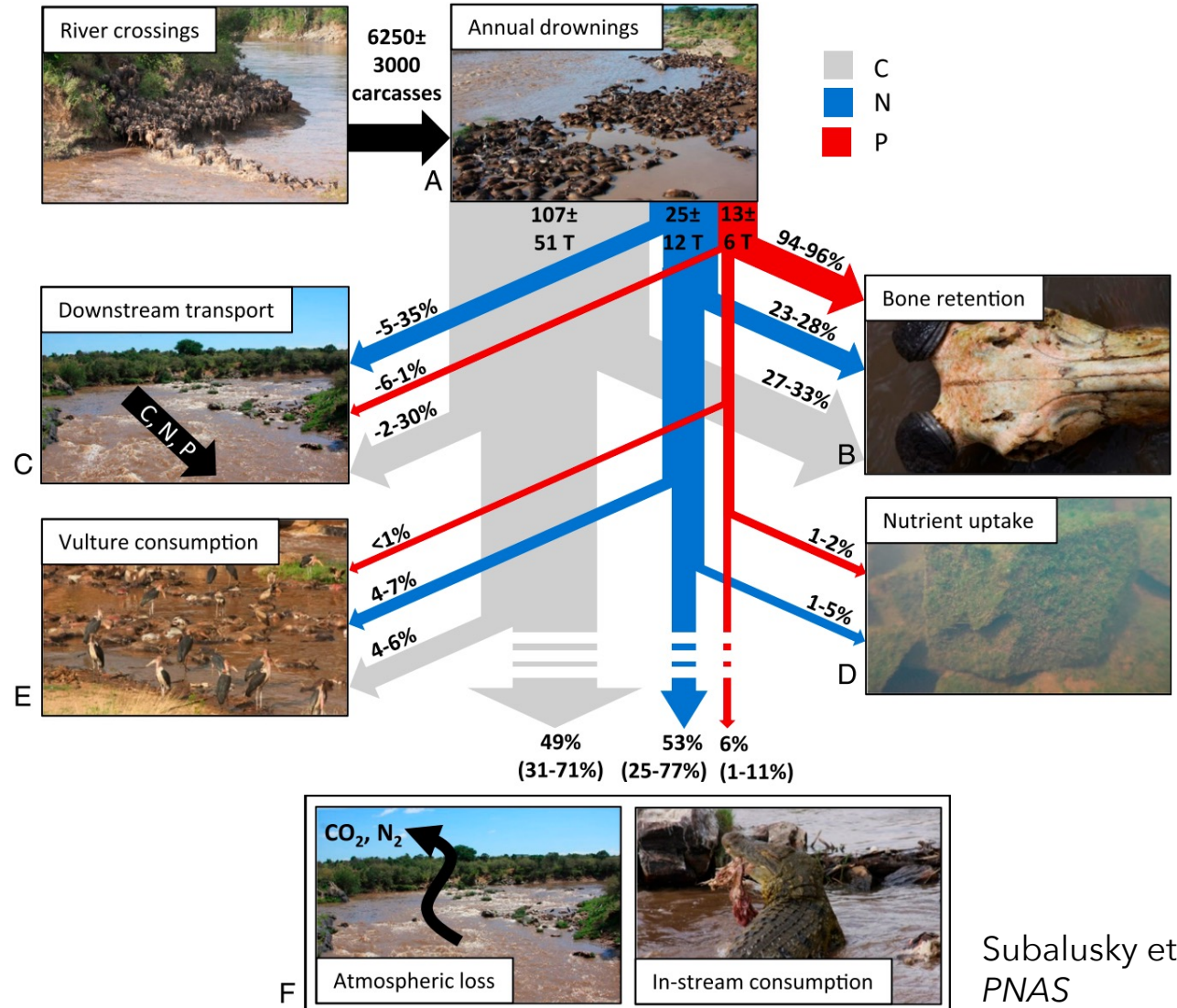


Une population d'hippopotame peut transférer l'équivalent de la production de 260 à 1563 ha de savanes dans la rivière Mara

Subalusky et al. 2015, *Freshwater Biology*

⇒ toxicité    Dutton et al. 2018, *Nat. Comm.*

⇒ différents temps de rétention



Subalusky et al. 2017, *PNAS*

# B) Méta-écosystèmes empiriques    Qualité des flux (C,N,P)

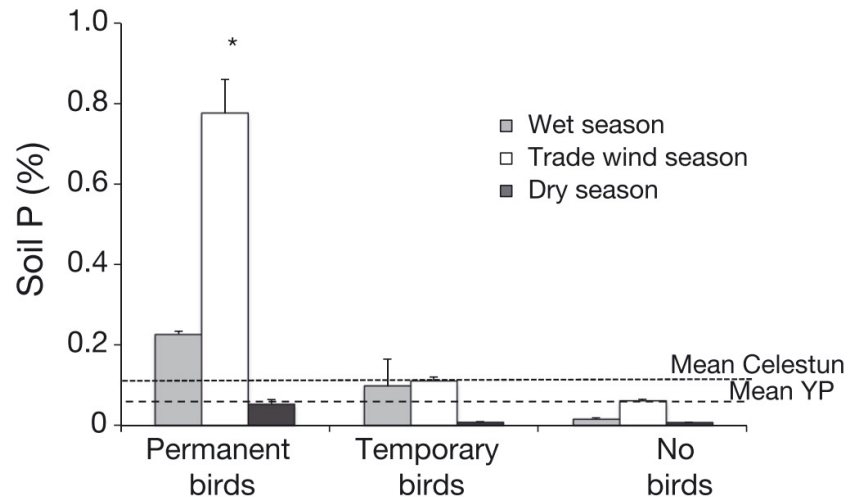
## Flux marin → terrestre

Les oiseaux marins: un fort potentiel de fertilisation

Cas de 6 îles - mangroves dans le Golfe du Mexique



*McInturf et al. 2019 Biological Reviews*



Adame et al. 2015  
*Marine Ecology Progress Series*

# B) Méta-écosystèmes empiriques    Qualité des flux (C,N,P)

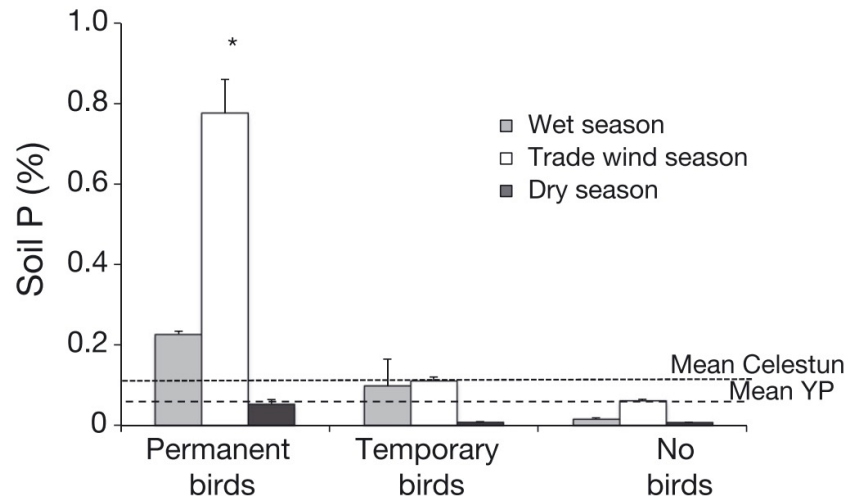
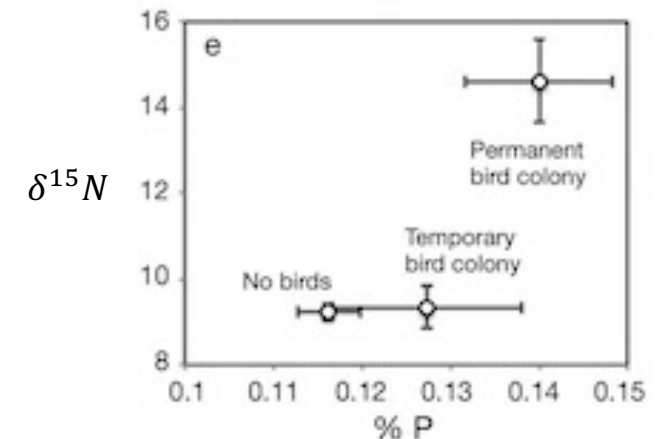
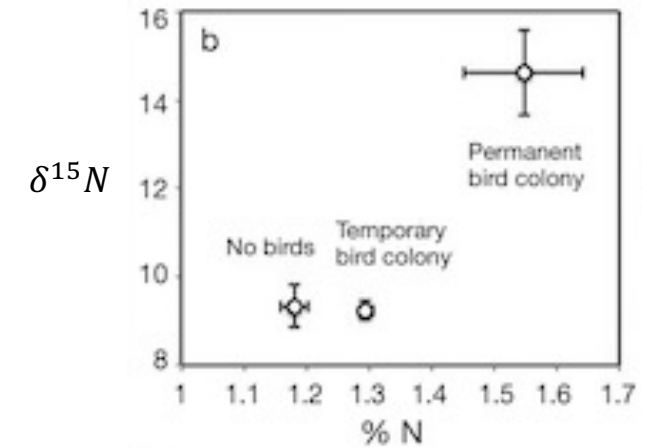
## Flux marin → terrestre

Les oiseaux marins: un fort potentiel de fertilisation



McInturf et al. 2019 Biological Reviews

Cas de 6 îles - mangroves dans le Golfe du Mexique



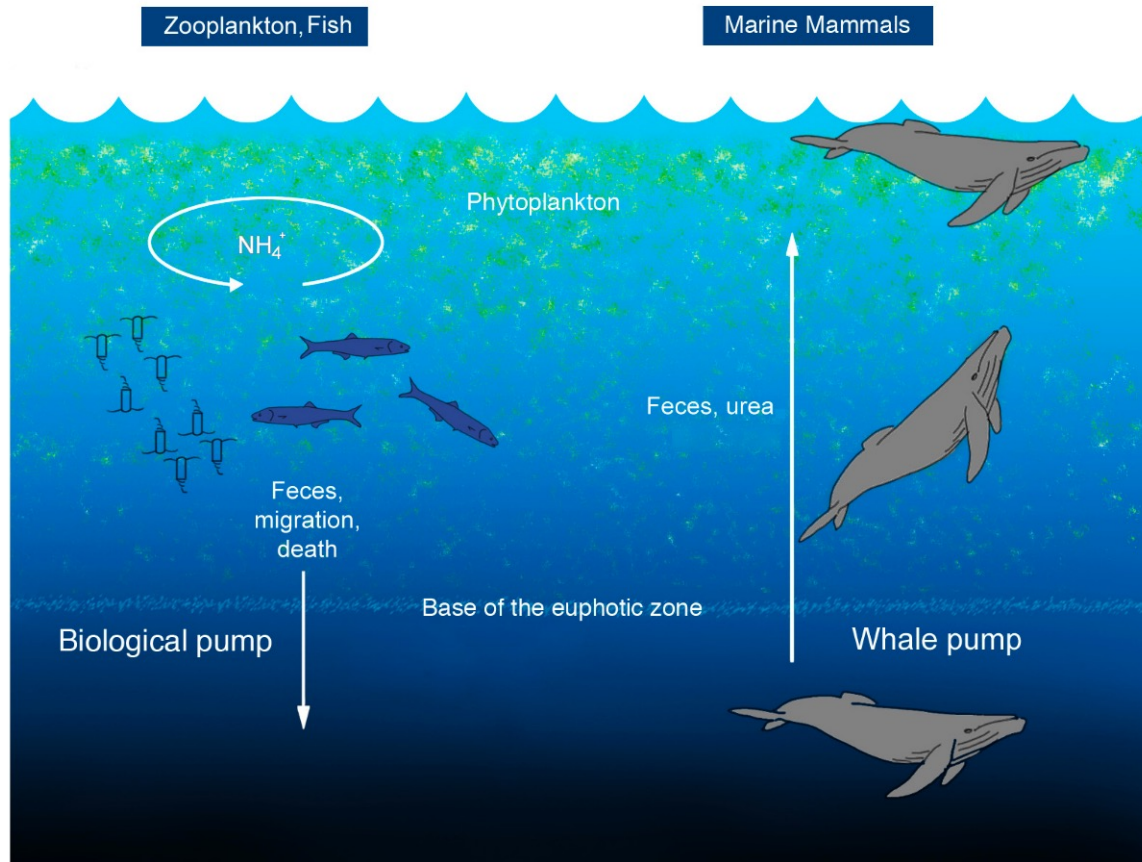
Adame et al. 2015  
Marine Ecology Progress Series

Contenu en nutriments des  
feuilles d'arbres



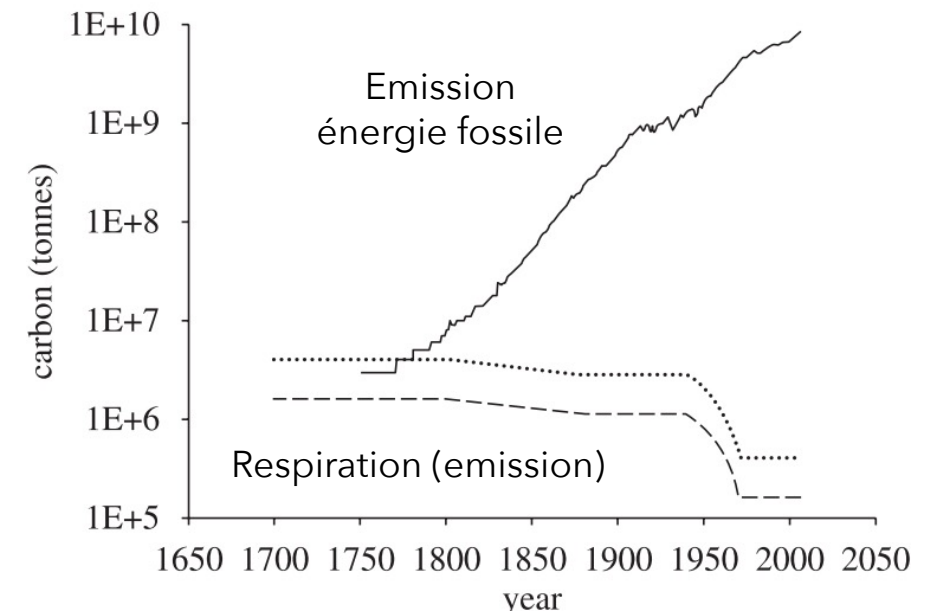
# B) Méta-écosystèmes empiriques    Qualité des flux (C,N,P)

## Flux marin → marin



Roman and McCarthy 2010, PloS One

Effet des cachalots dans le cycle du carbone  
(fèces riches en fer)



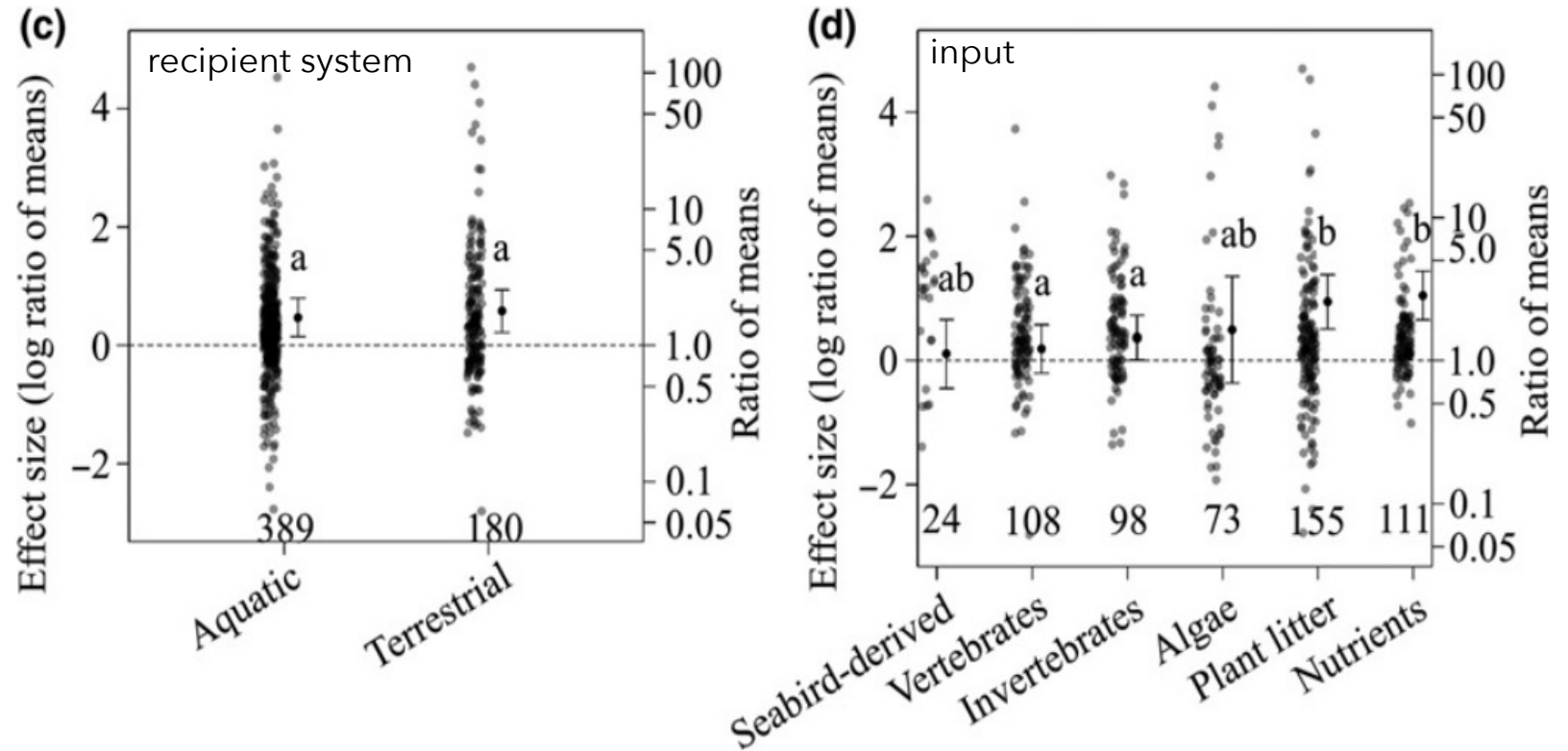
Lavery et al. 2010, PRSLB

⇒ relaxation des limitations à la production primaire (N, P, Fe)

## B) Méta-écosystèmes empiriques

## Qualité des flux (C,N,P)

Méta-analyse des tailles d'effets sur l'abondance de population, avec ou sans flux de ressource



Montagano et al. 2019 *Ecology Letters*

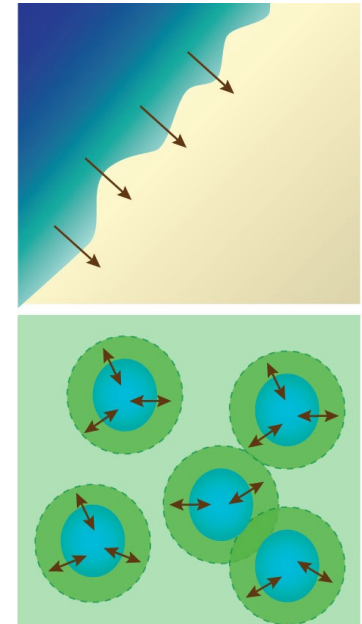
- ⇒ Des effets globalement positifs mais fonction des limitations
- ⇒ Effets des enrichissements en nutriments mitigés

# B) Méta-écosystèmes empiriques      Échelle des flux spatiaux

Retour sur la théorie



Connecte  
des habitats  
différents

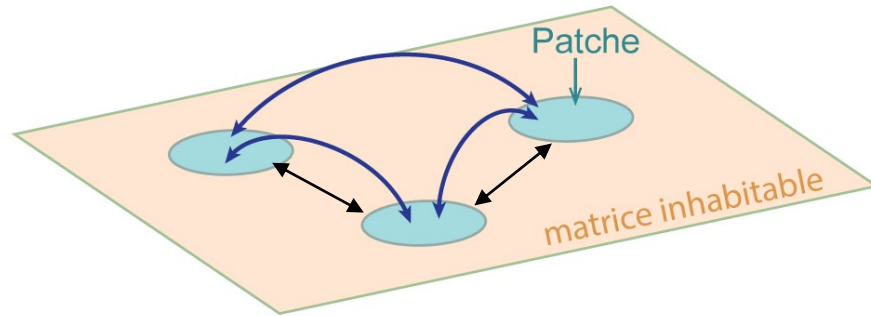


⇒ Les flux spatiaux de ressources se situent à l'interface entre écosystèmes très différents

adapté de  
Massol et al. 2017 Oikos

# B) Méta-écosystèmes empiriques    Échelle des flux spatiaux

Retour sur la théorie

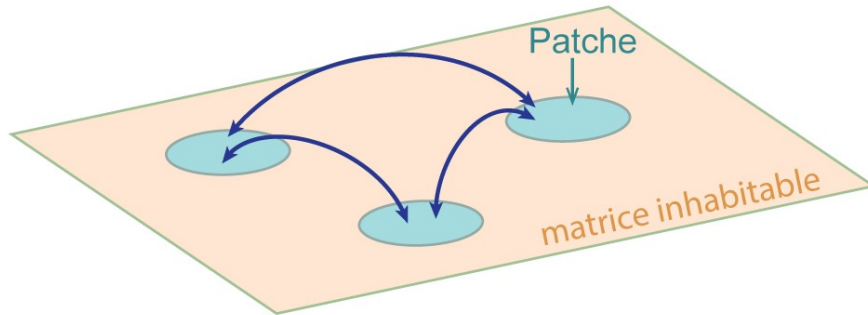


Héritage des méta-communautés

# B) Méta-écosystèmes empiriques

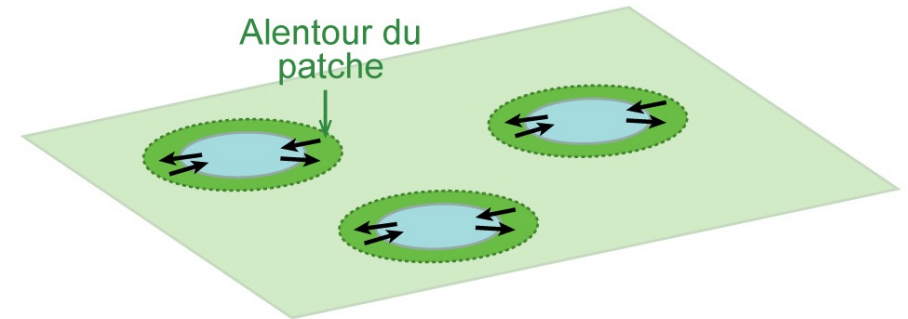
# Échelle des flux spatiaux

Retour sur la théorie



Flux de dispersion  
large échelle

...

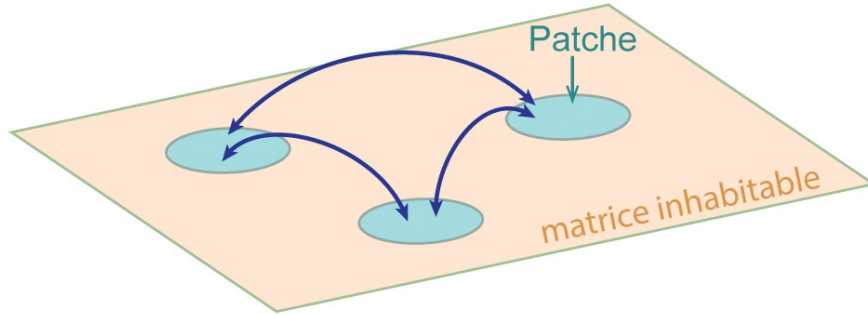


Flux de ressources  
échelle locale

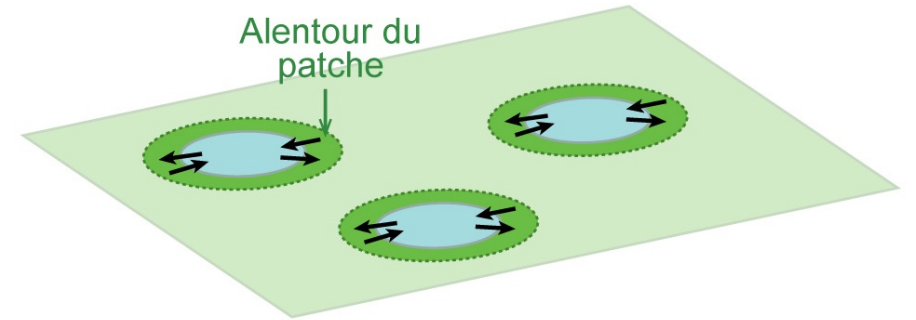
# B) Méta-écosystèmes empiriques

# Échelle des flux spatiaux

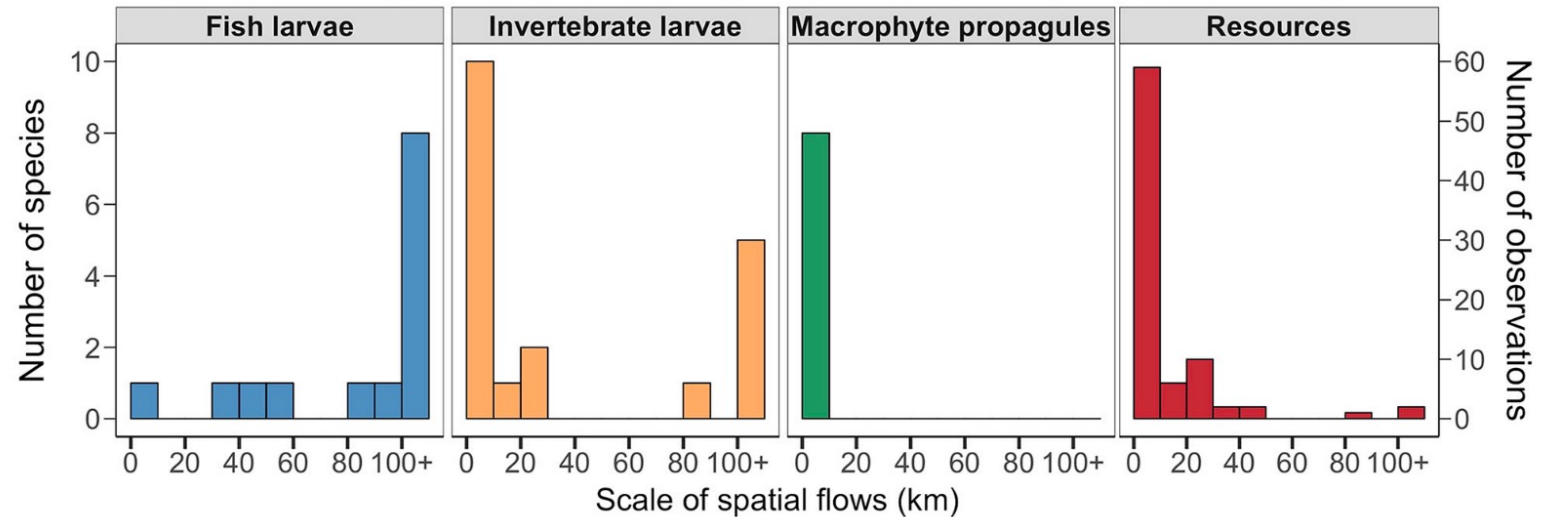
Retour sur la théorie



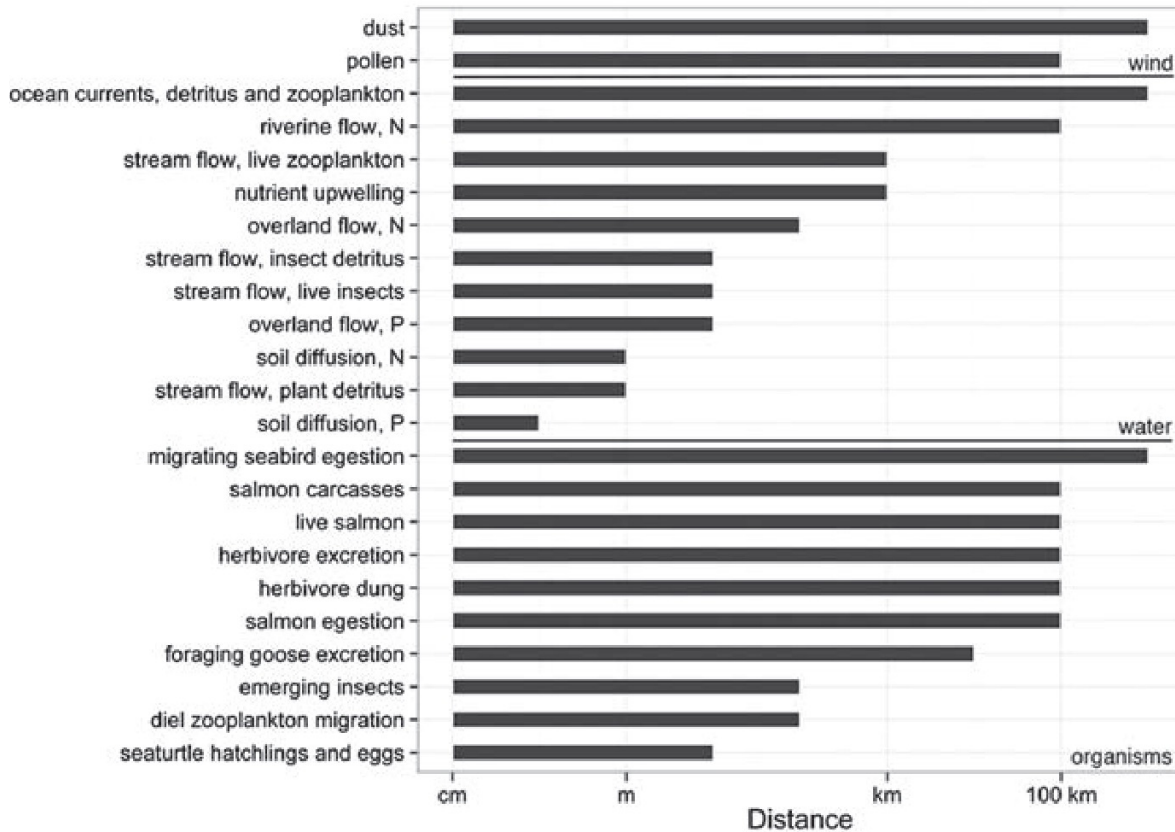
...



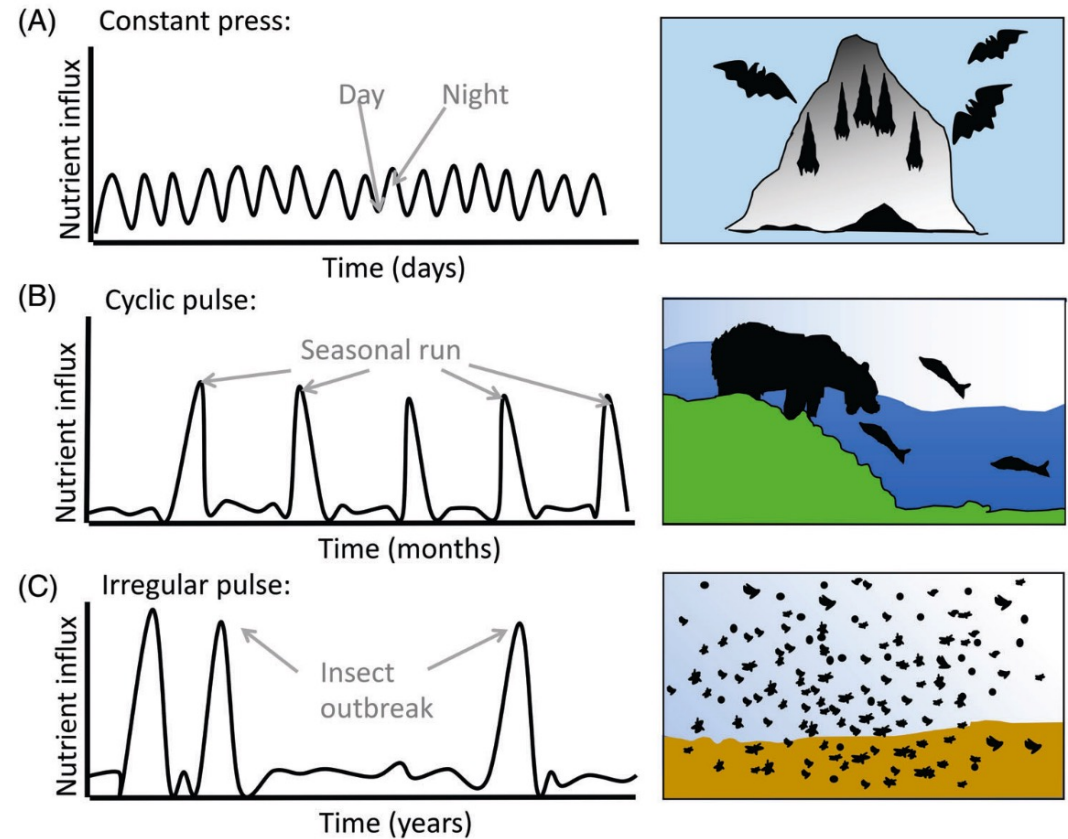
Echelle de différents flux spatiaux entre écosystèmes benthiques marins



# B) Méta-écosystèmes empiriques      Échelle des flux spatiaux



Sitters et al. 2015 *Oikos*



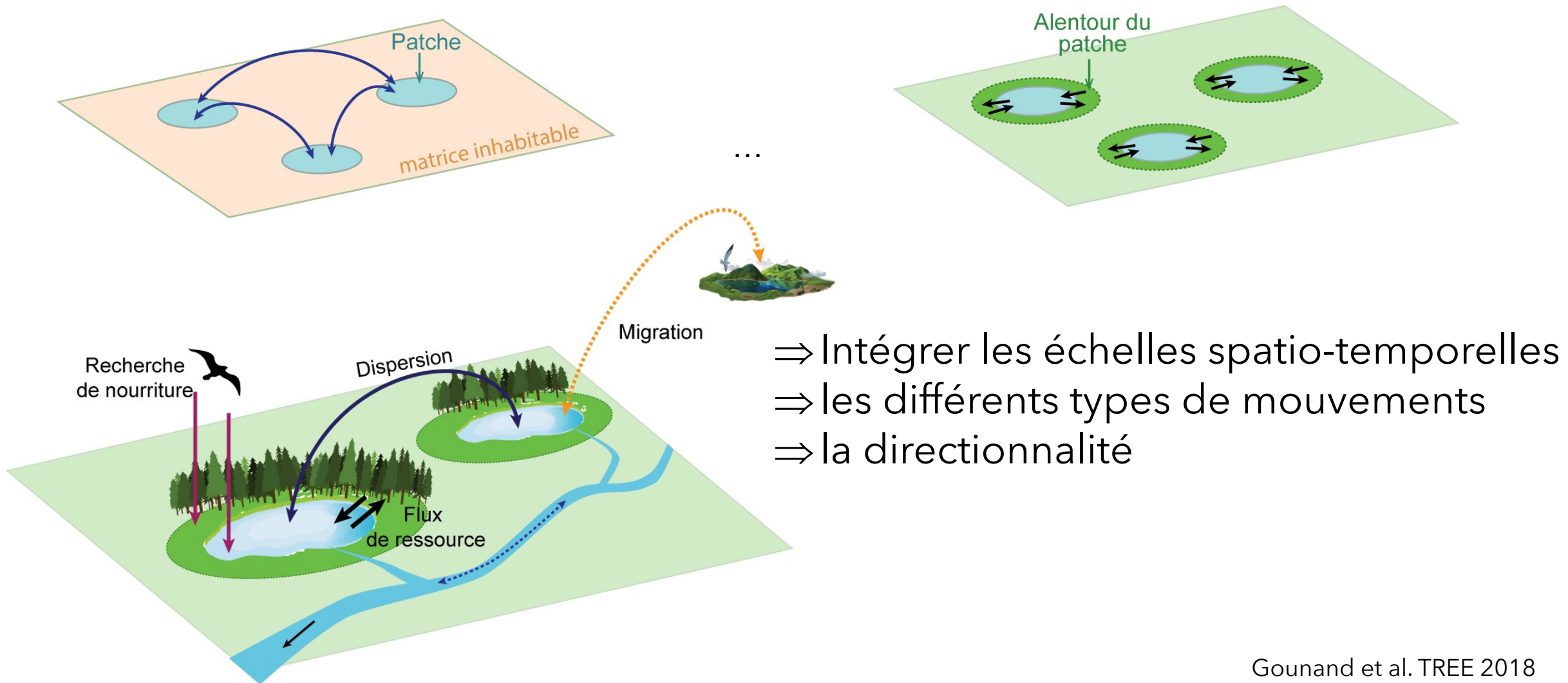
McInturf et al. 2019 *Biological Reviews*

⇒ Des ressources qui varient dans l'espace (distance, aire) et le temps

# B) Méta-écosystèmes empiriques

# Échelle des flux spatiaux

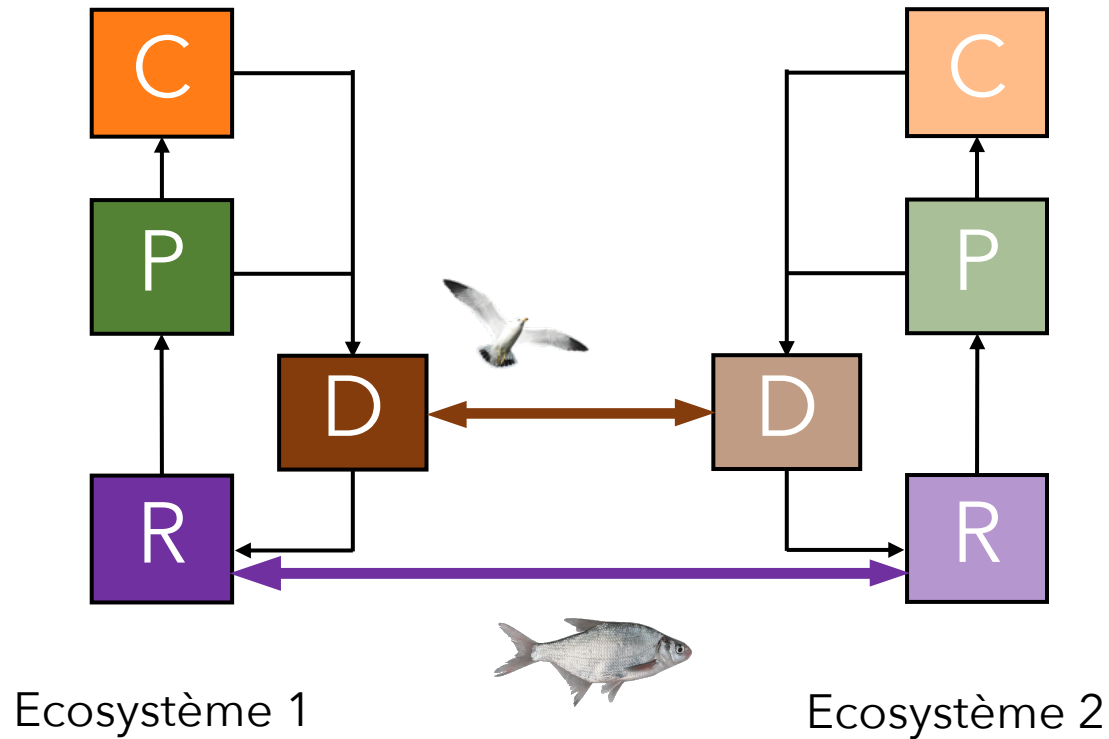
Retour sur la théorie





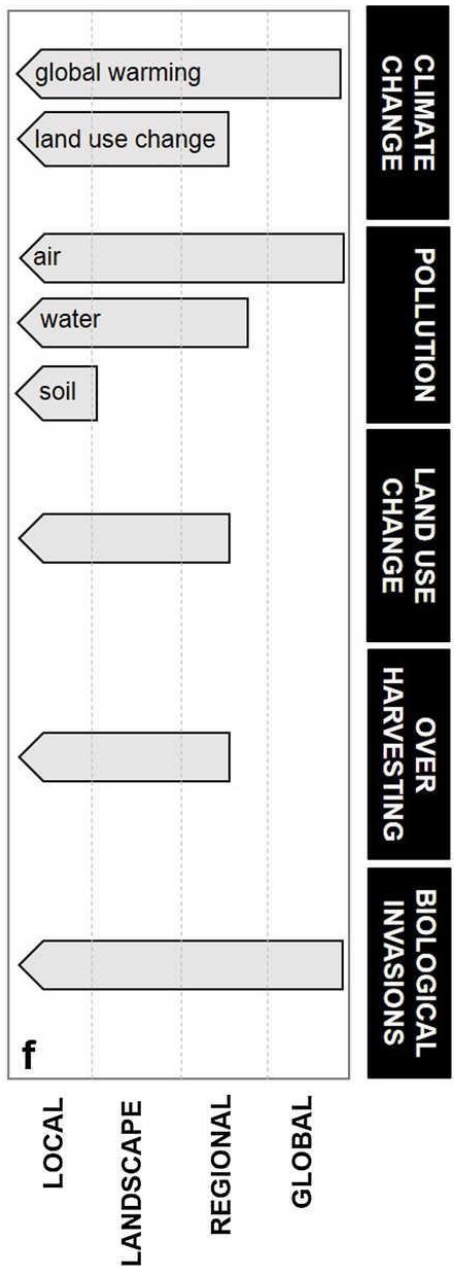
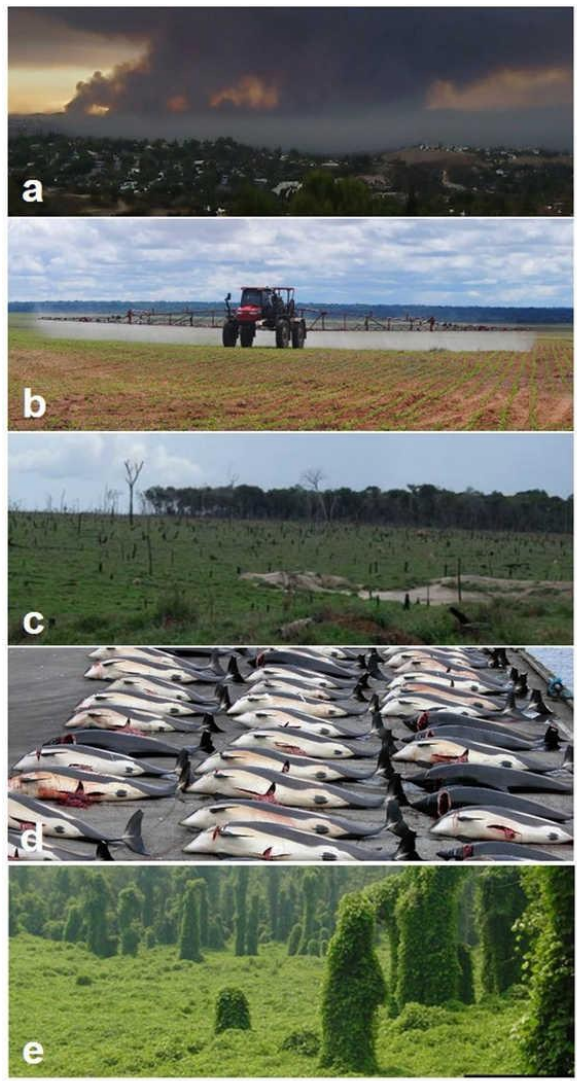
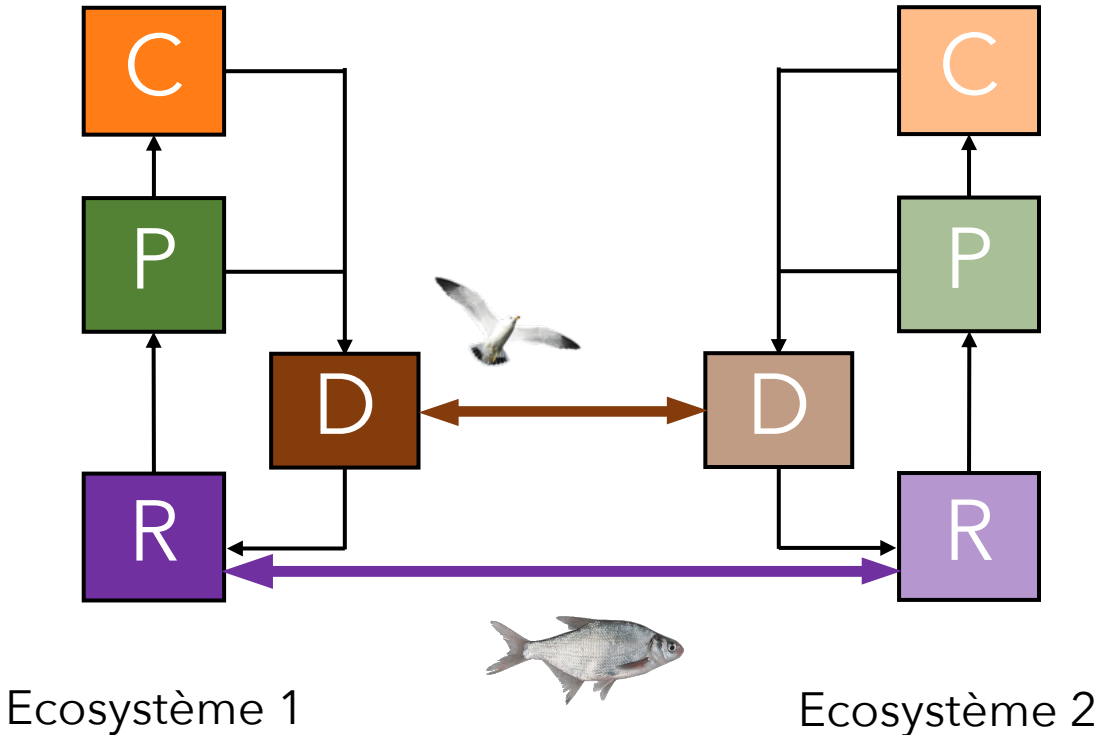
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Pourquoi se soucier des flux spatiaux de ressources ?

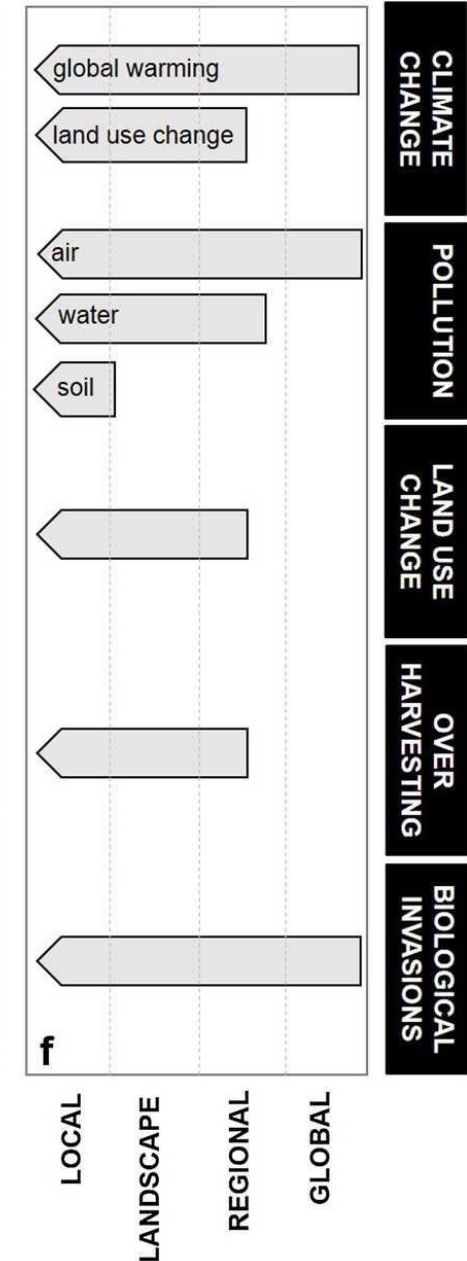
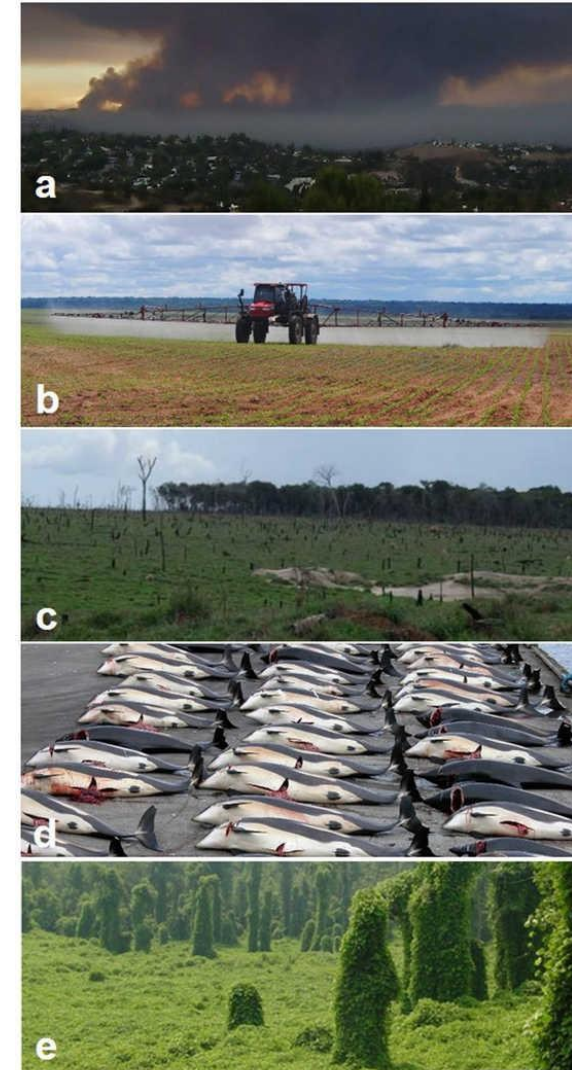
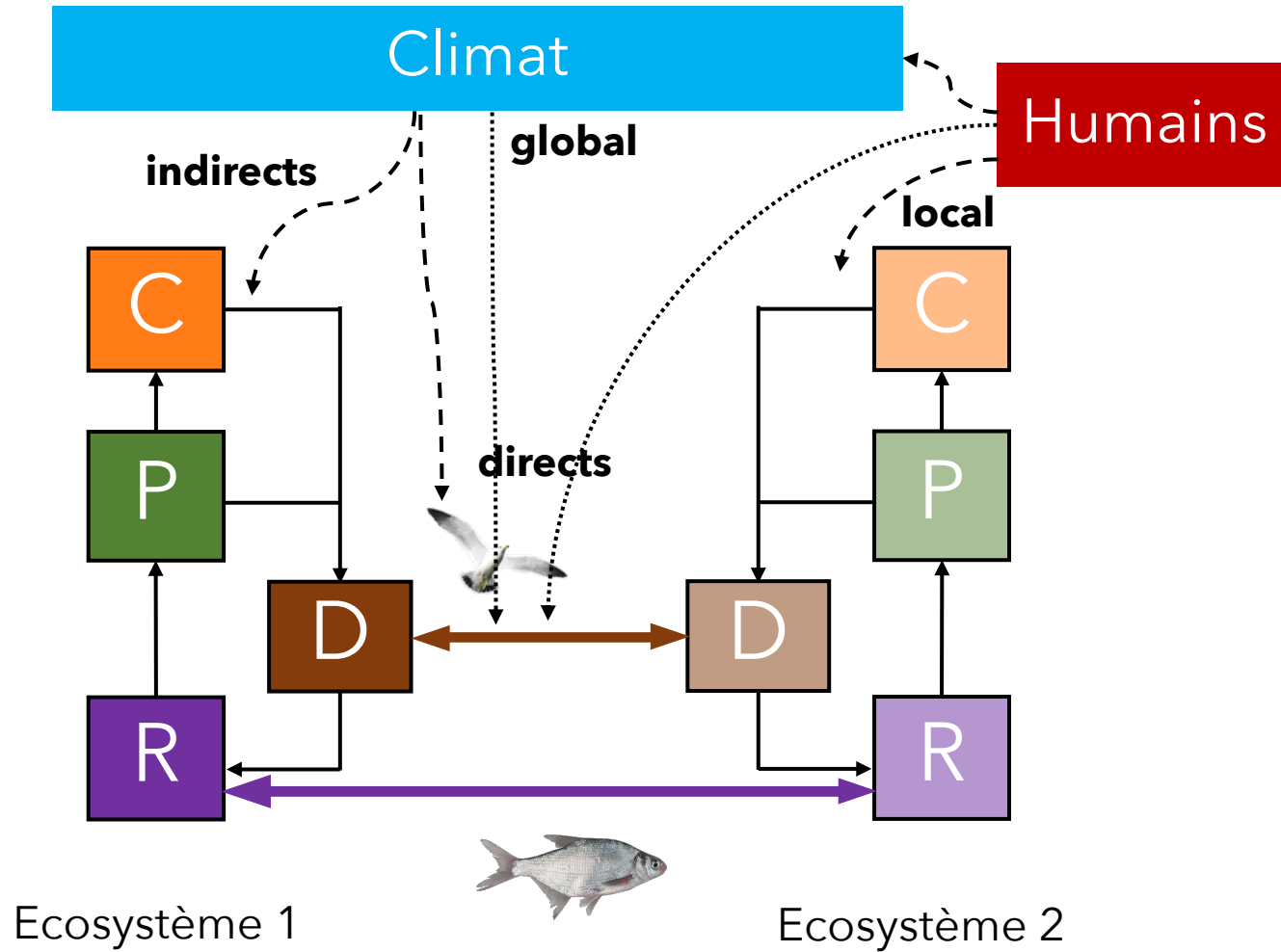


- ⇒ Interdépendance des écosystèmes
- ⇒ Des flux actifs qui dépendent de la dynamique de communautés
- ⇒ Des connexions longue-distance
- ⇒ Des équilibres dynamiques fragiles :  
saisonnalité et synchronisation
- ⇒ Propagation des perturbations

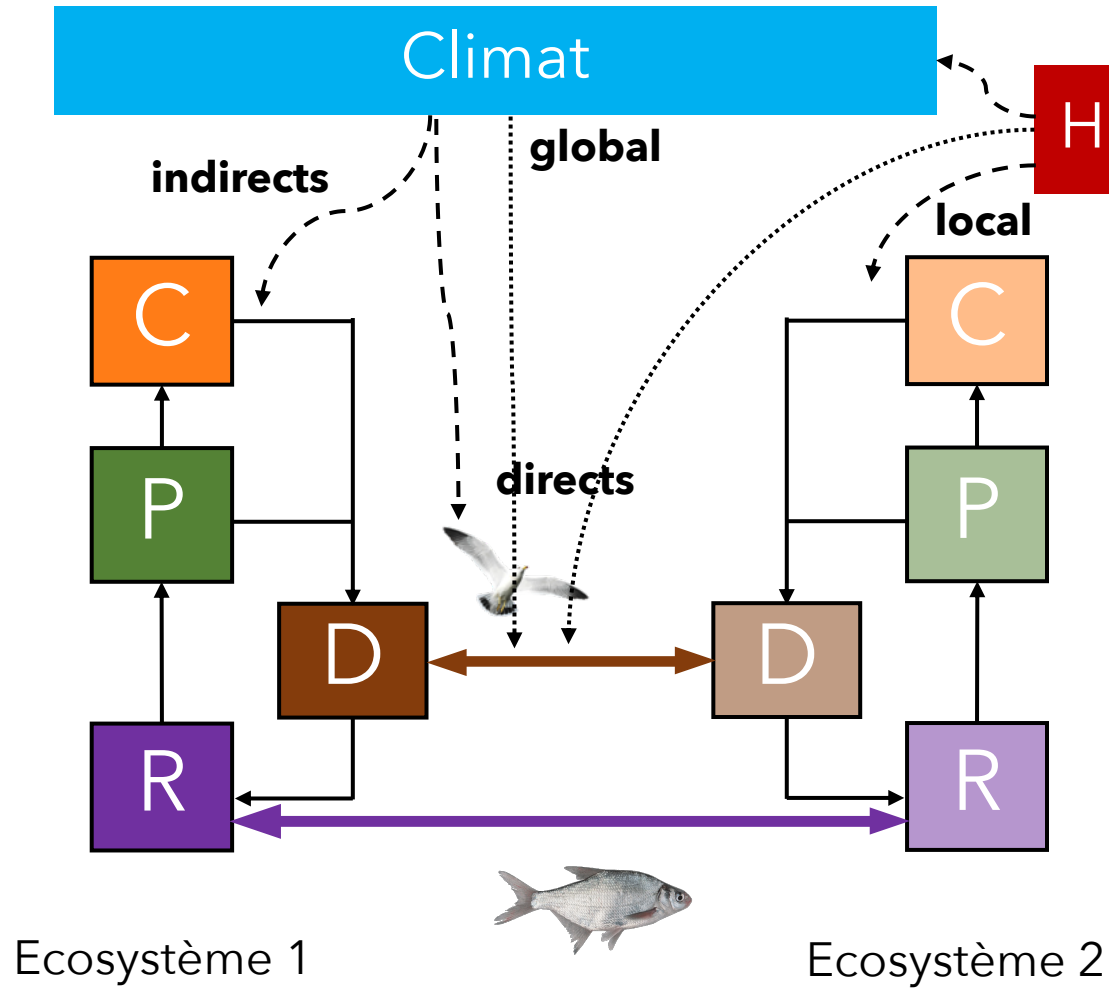
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux



## 1. Effets directs:

- Fertilisants +
- Barrages -

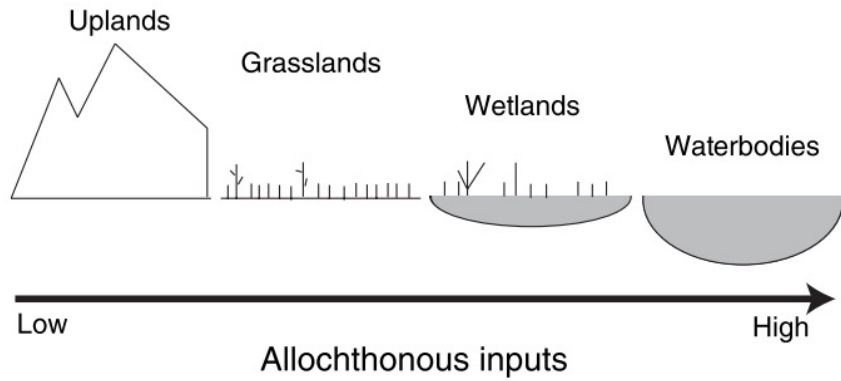
## 2. Effets indirects

- Exploitation
- Invasions biologiques
- Propagations de contaminants

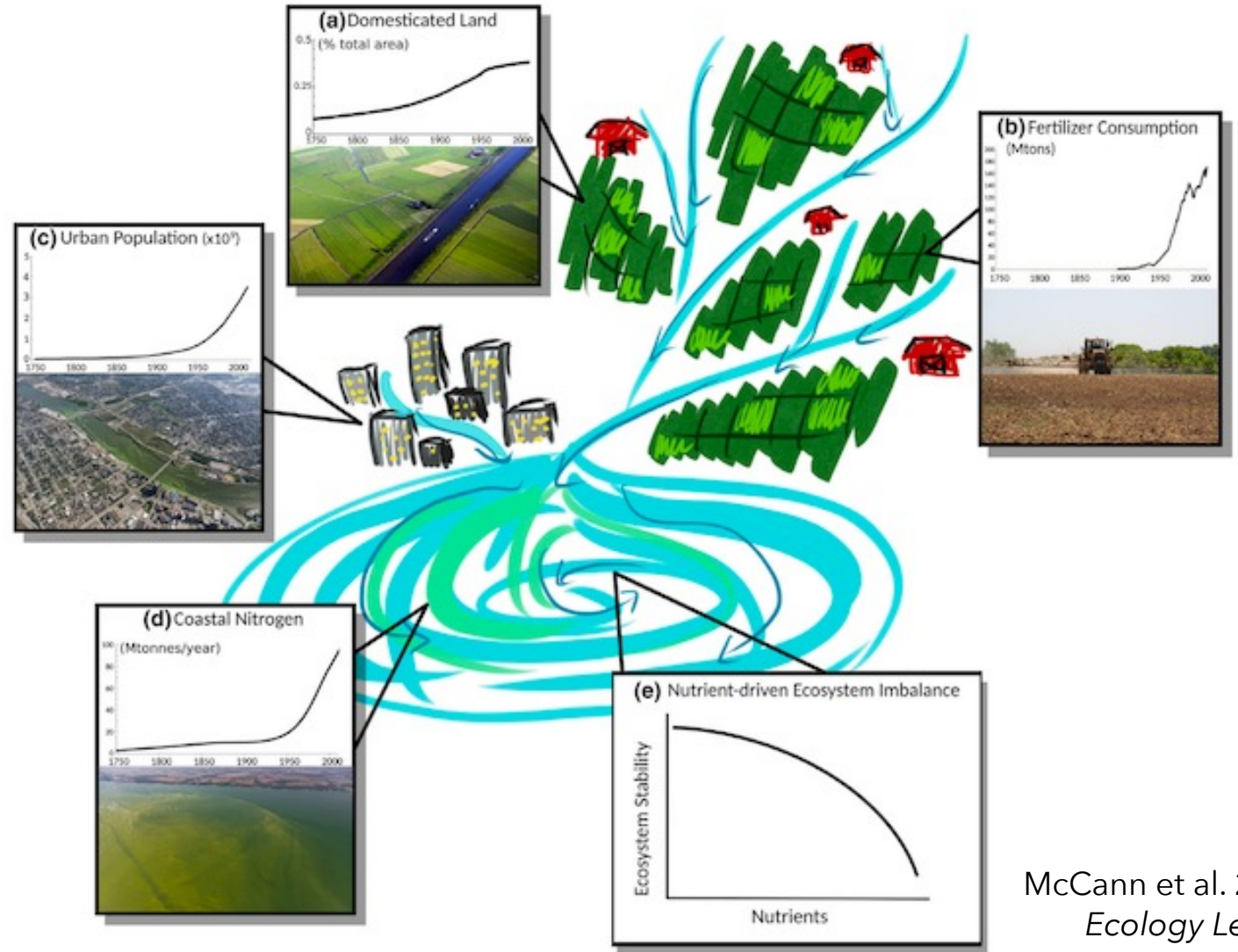
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

Flux nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants

Effet d'accumulation



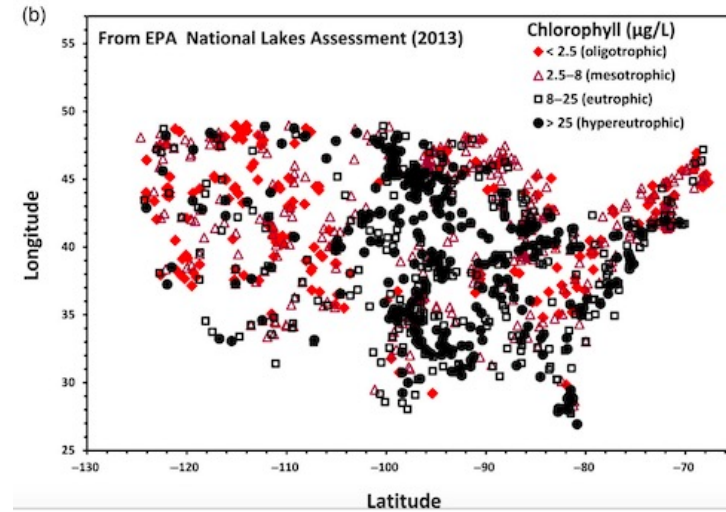
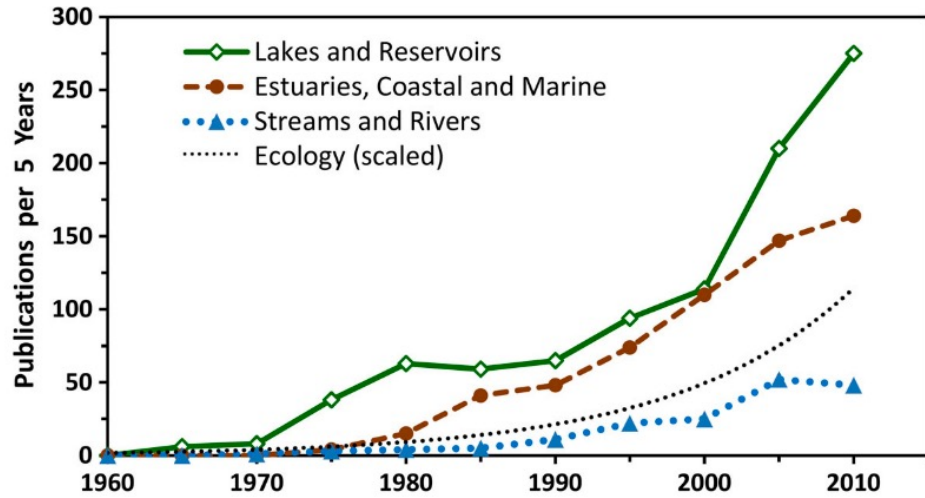
Leroux and Loreau 2008, *Ecology Letters*



McCann et al. 2021  
*Ecology Letters*

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

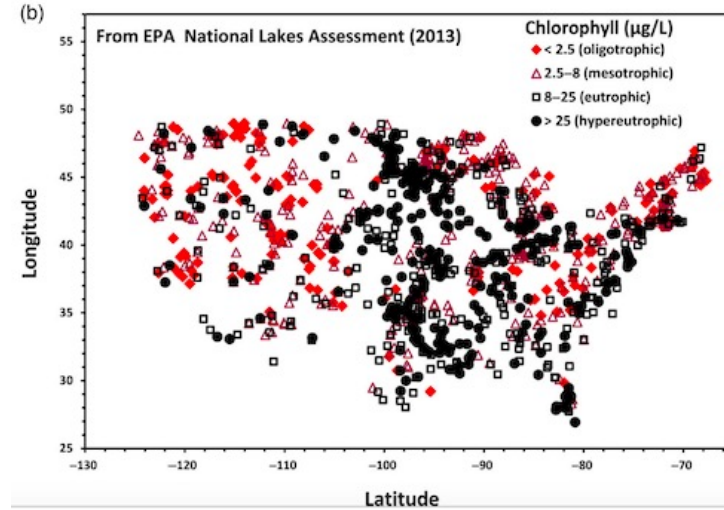
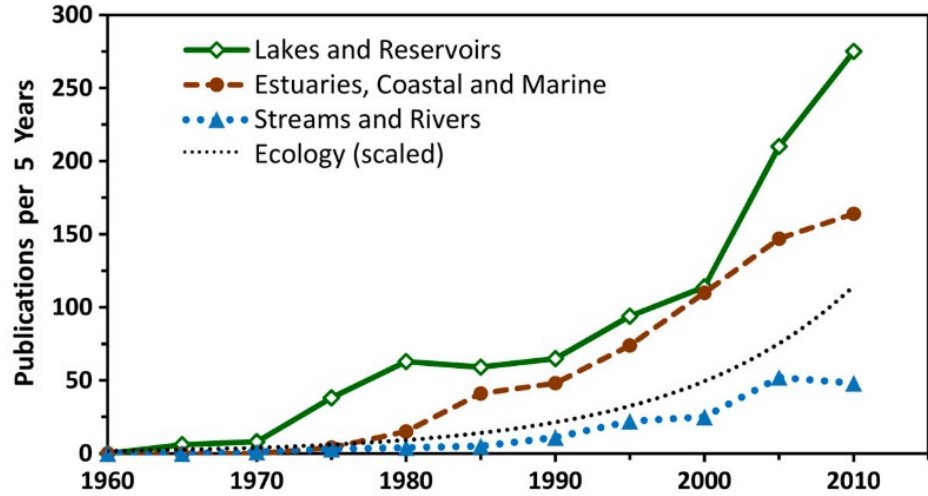
Flux nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants



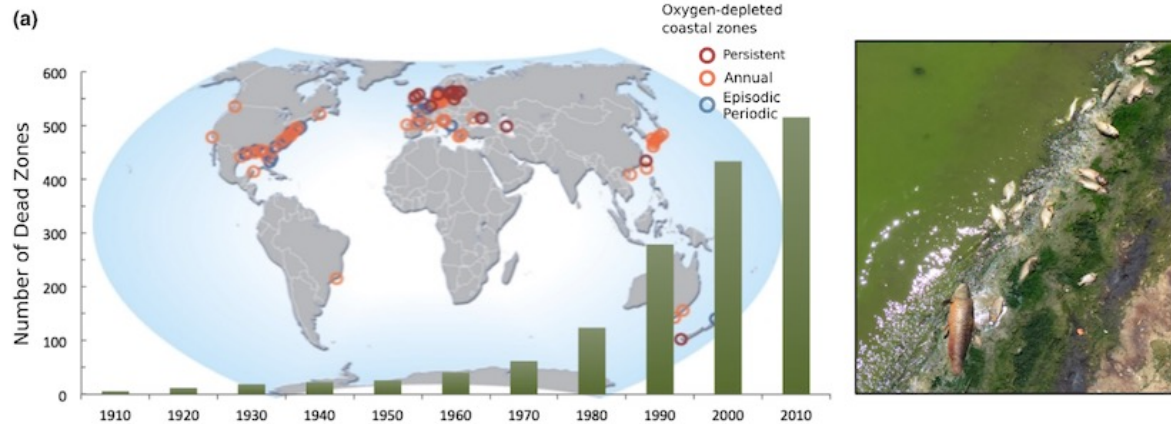
Wurtsbaugh et al. 2019  
*WIREs Water*

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

Flux nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants



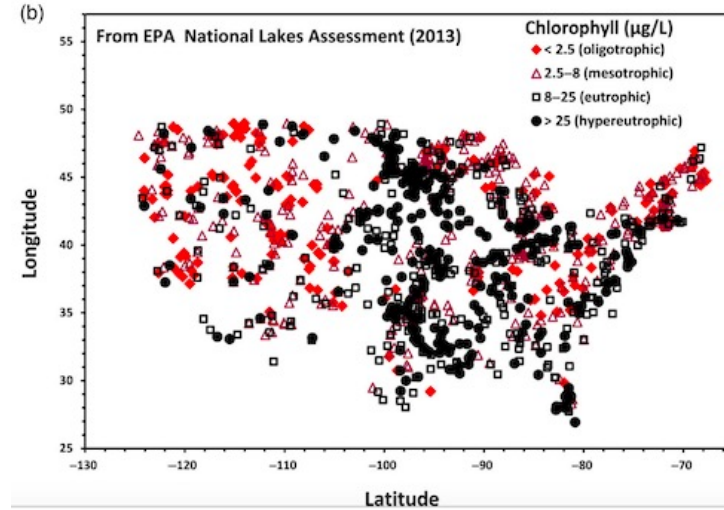
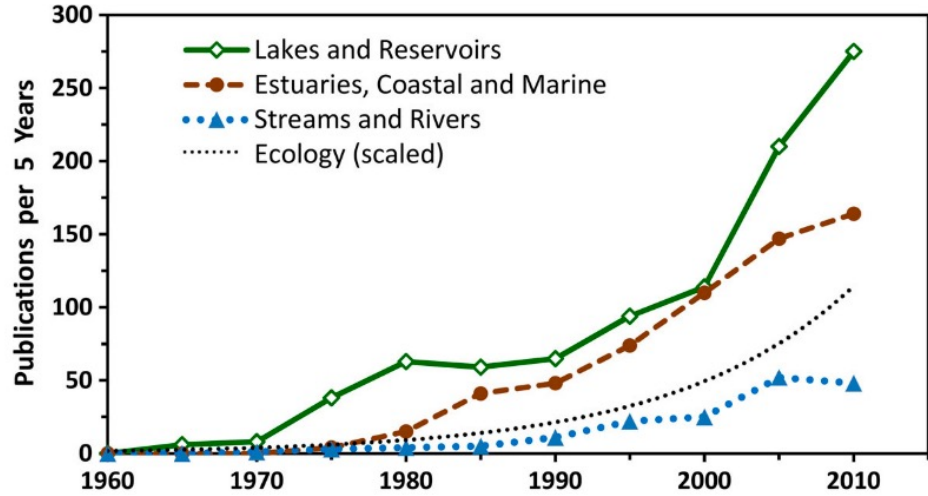
Wurtsbaugh et al. 2019  
*WIREs Water*



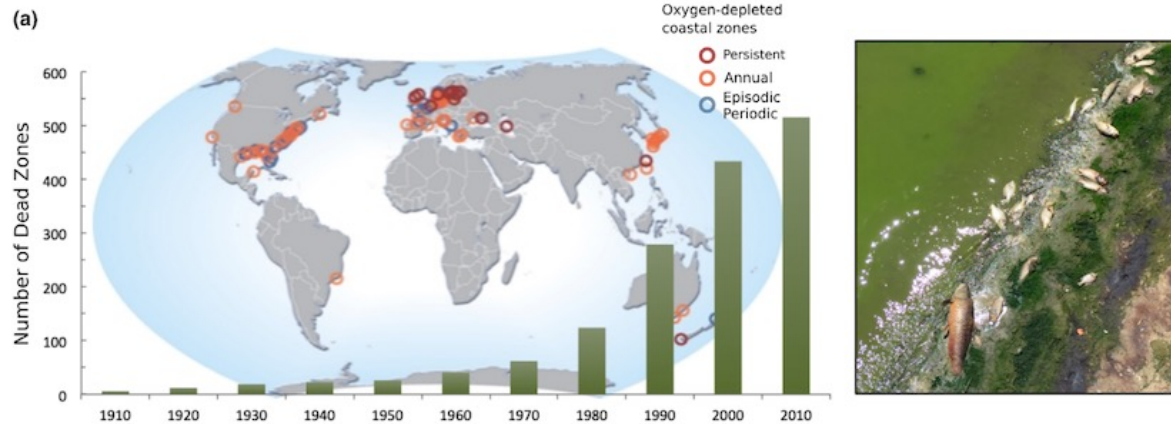
⇒ Multiplication des zones d'hypoxie

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

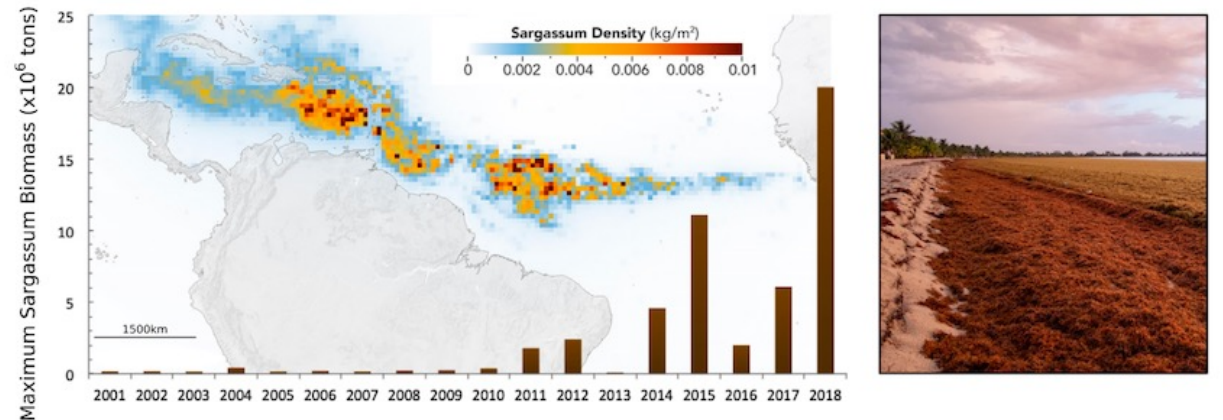
Flux nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants



Wurtsbaugh et al. 2019  
*WIREs Water*



⇒ Multiplication des zones d'hypoxie



⇒ Problèmes d'accumulation de détrit

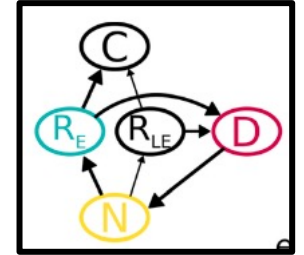
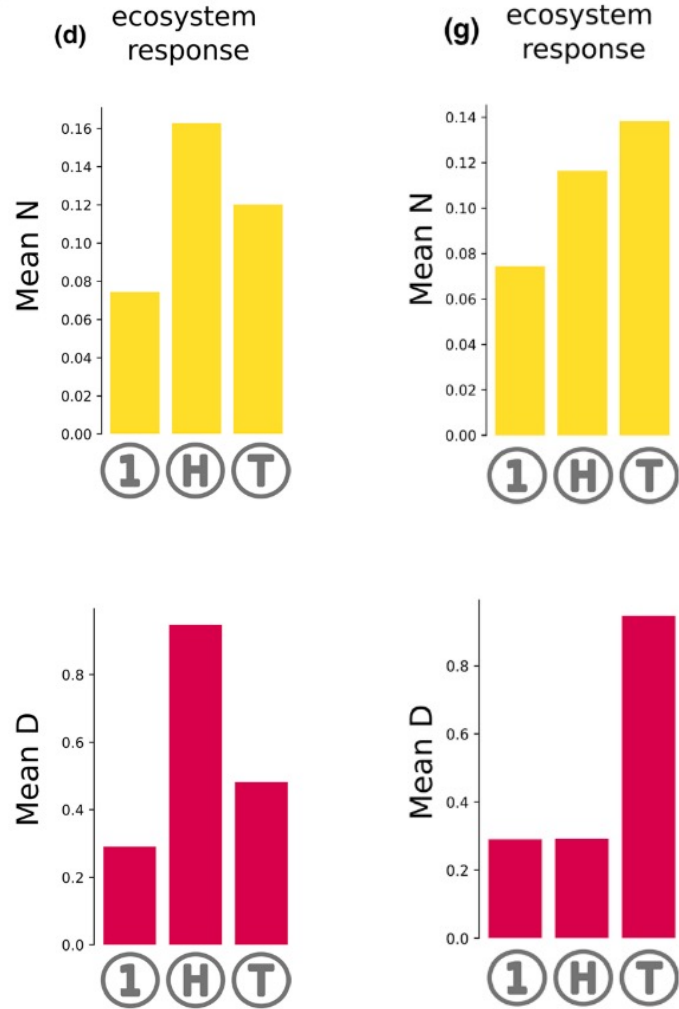
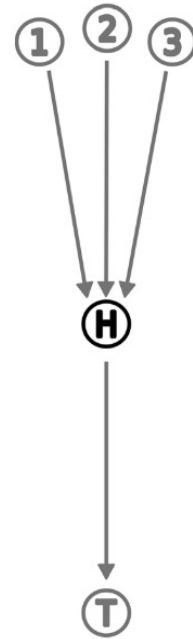
McCann et al. 2021 *Ecology Letters*



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

Flux nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants

⇒ **Solution ?** Ralentissement des flux à des nœuds intermédiaires en créant de l'hétérogénéité



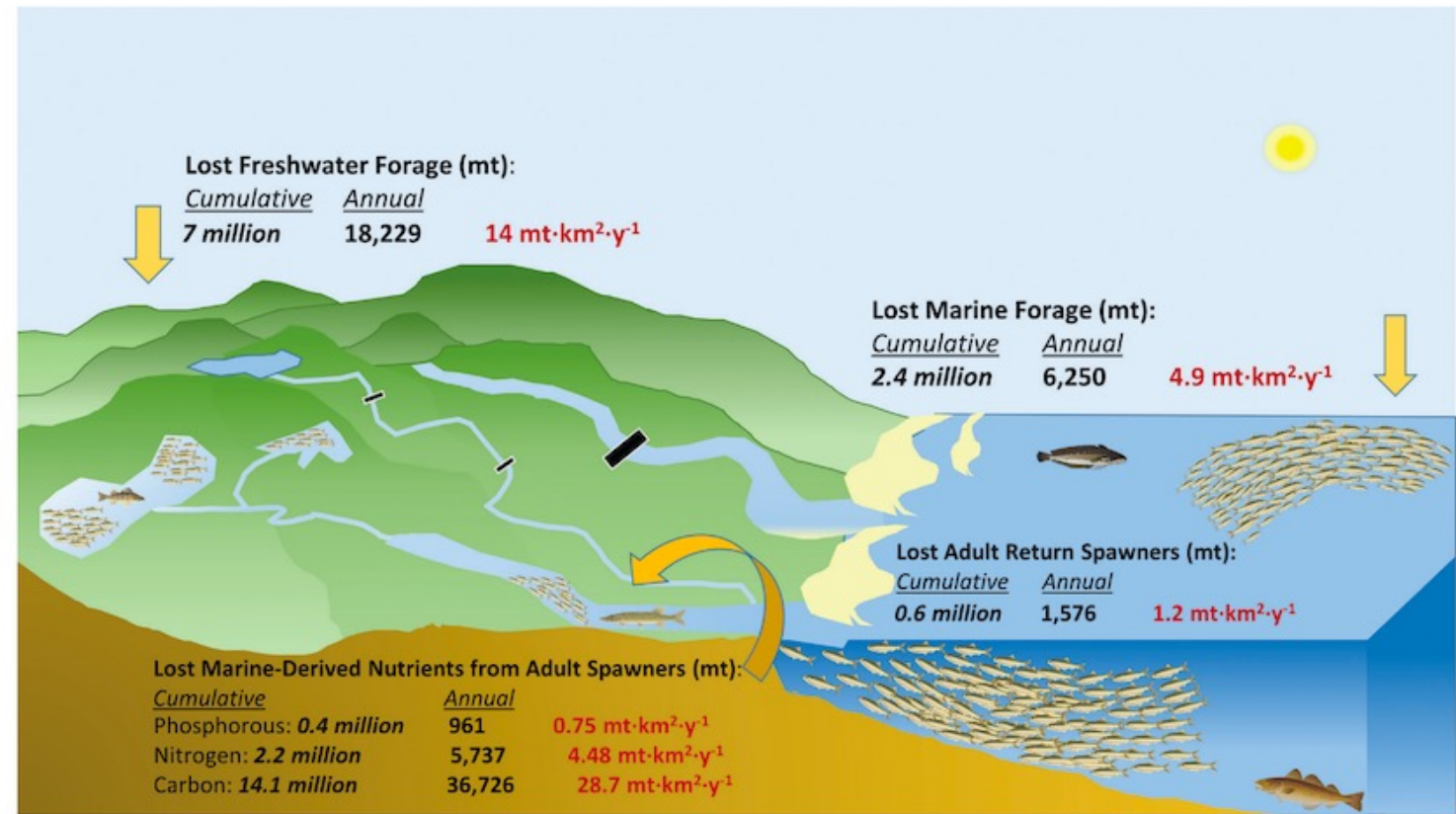
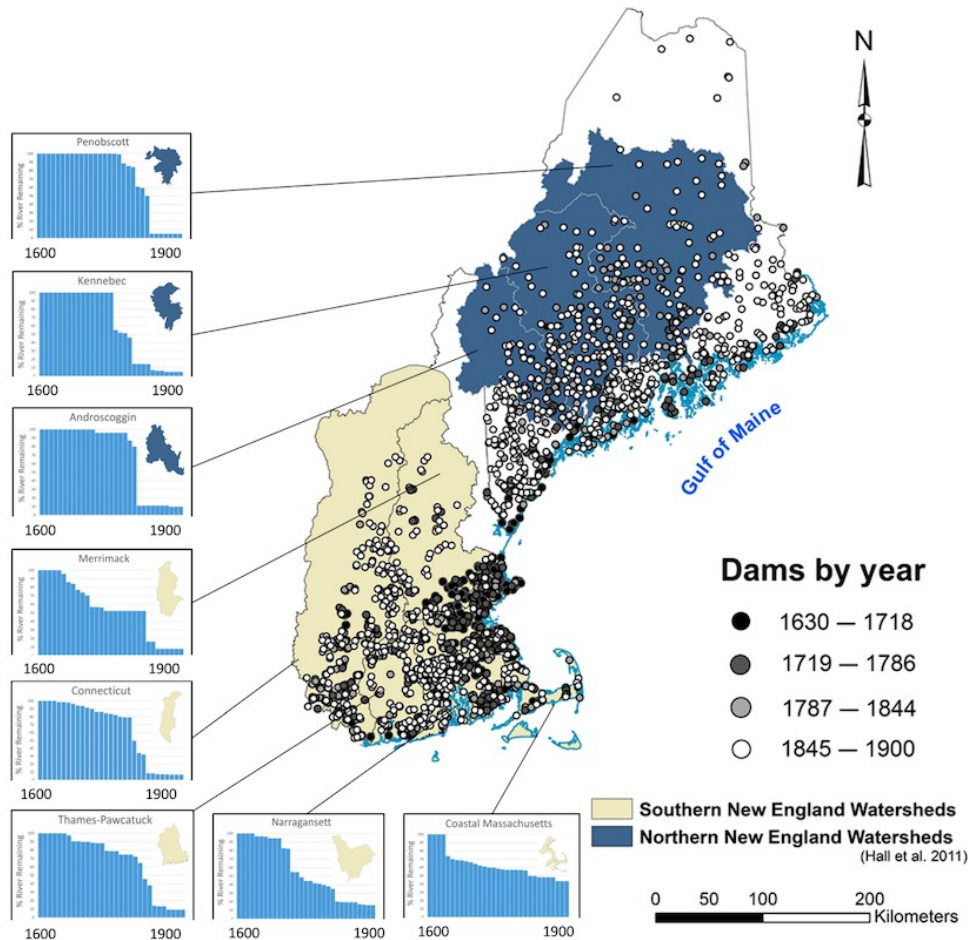
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Flux spatiaux réduits → barrages

Pertes de nutriments et de productions de harengs dûs au barrages en Nouvelle-Angleterre entre 1630 et 2014

Estimation globale Nord pacific: perte de 96% du transport de P par les espèces anadromes

Doughty et al. 2015, PNAS

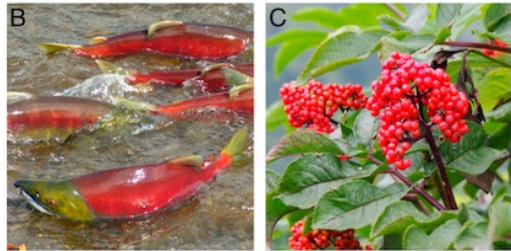


Mattocks et al. 2017 *Biosciences*  
 Hall et al. 2011 *Landscape Ecology*

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

**Changement climatique → phénologie → réduction des flux**

Changement de comportement des grizzly en réponse à la phénologie

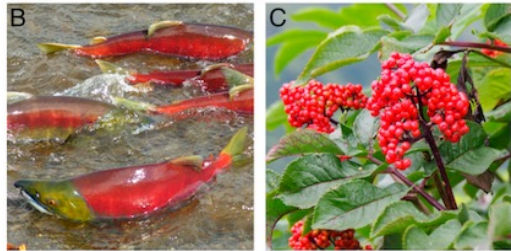


Deacy et al. 2017, *PNAS*

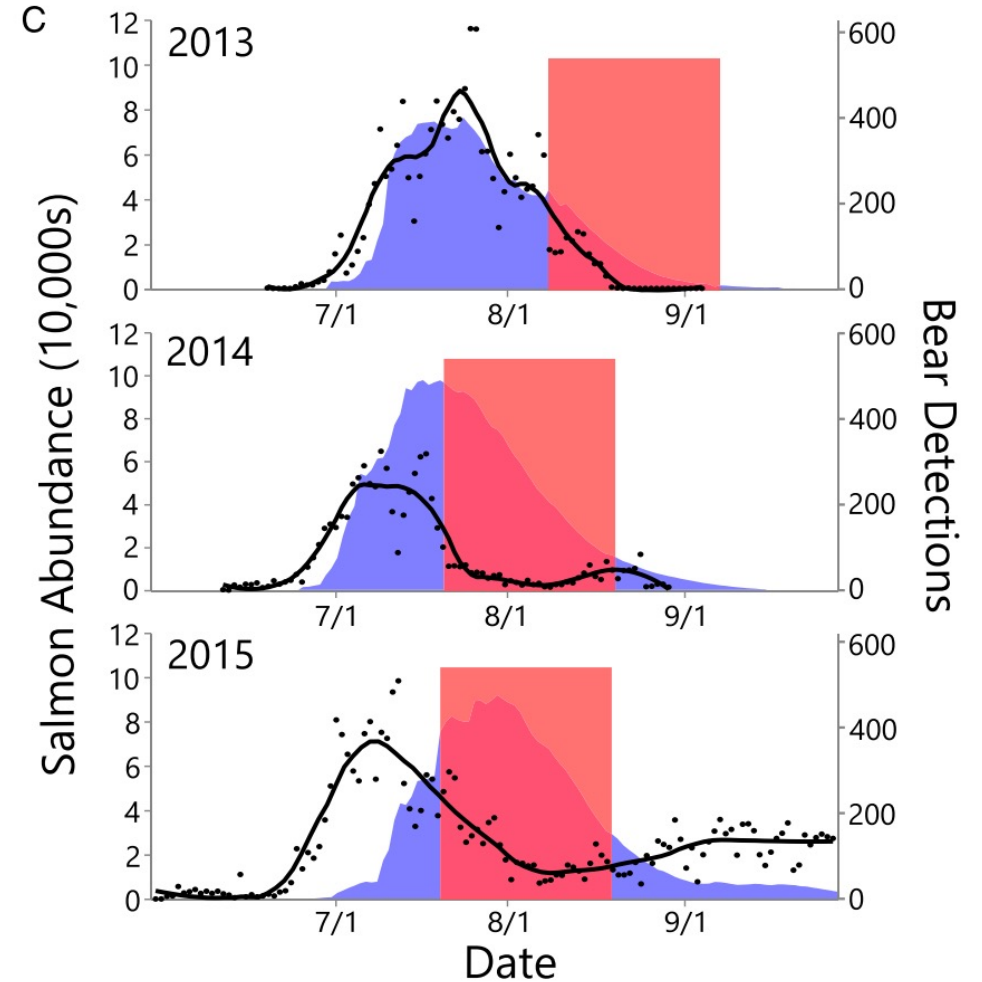
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

**Changement climatique → phénologie → réduction des flux**

Changement de comportement des grizzly en réponse à la phénologie



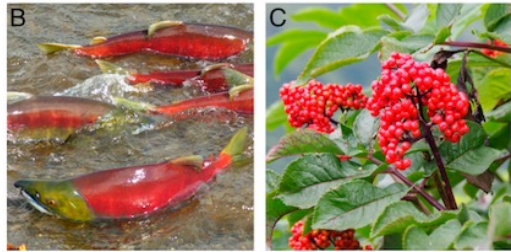
Deacy et al. 2017, PNAS



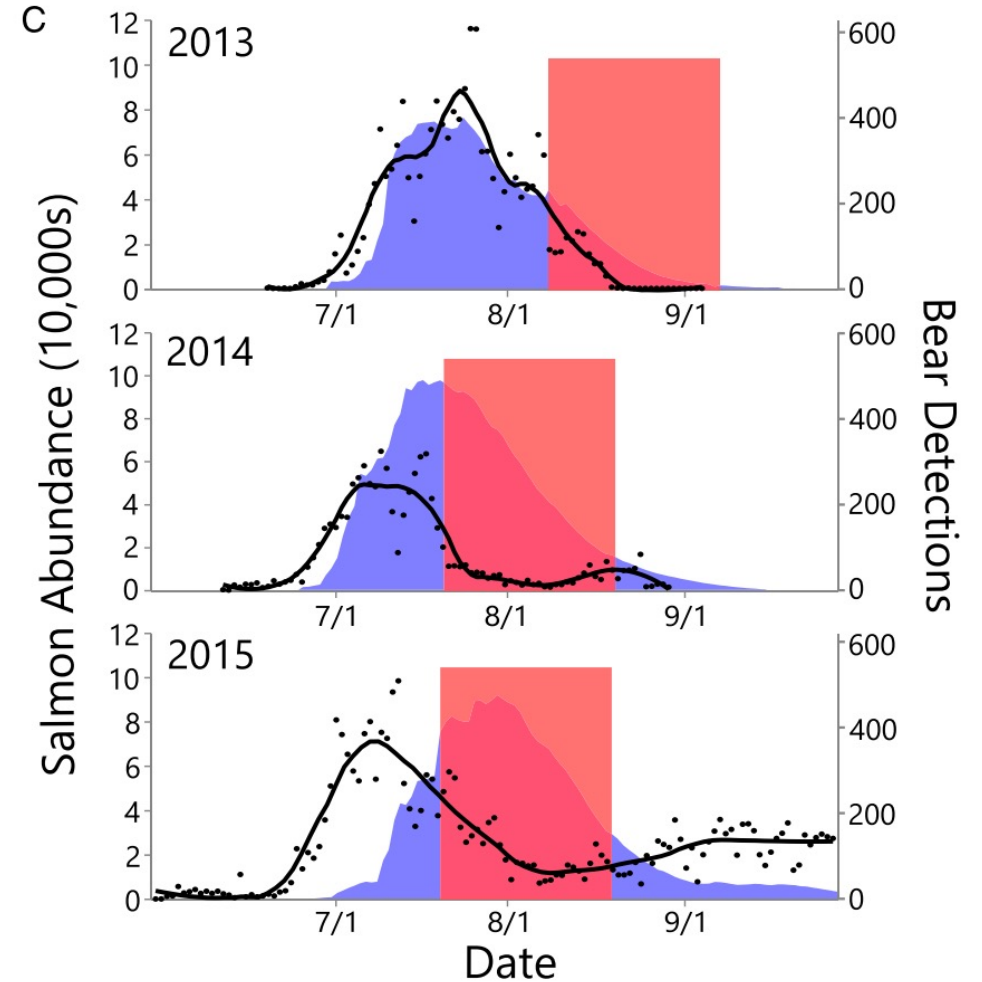
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

**Changement climatique → phénologie → réduction des flux**

Changement de comportement des grizzly en réponse à la phénologie



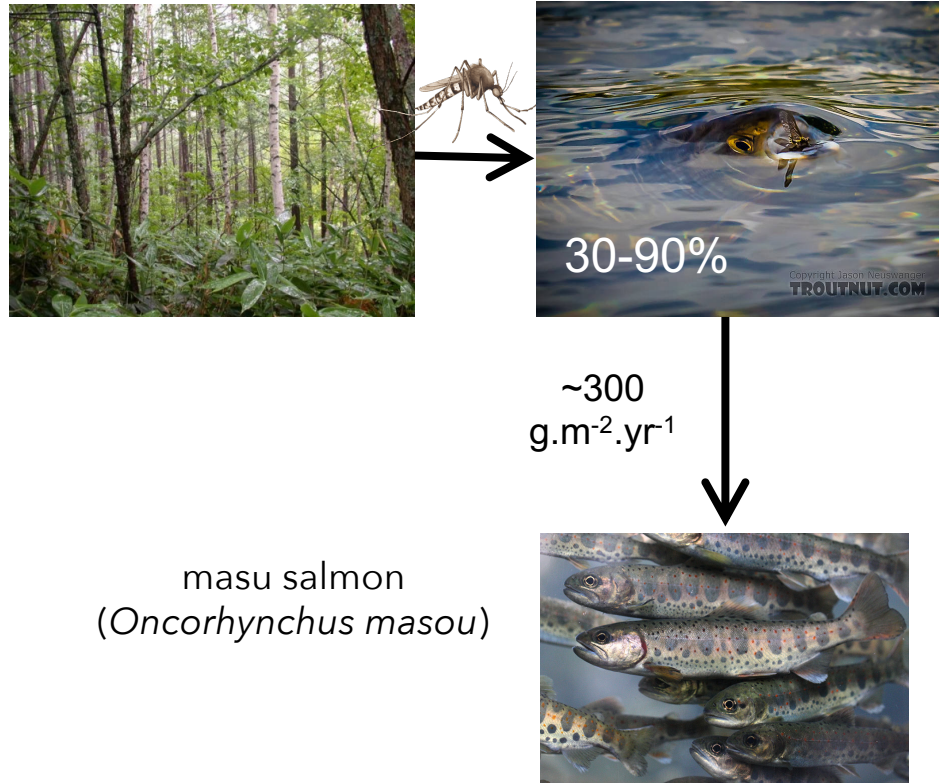
Deacy et al. 2017, PNAS



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

**Exploitation des espèces → réduction des flux**

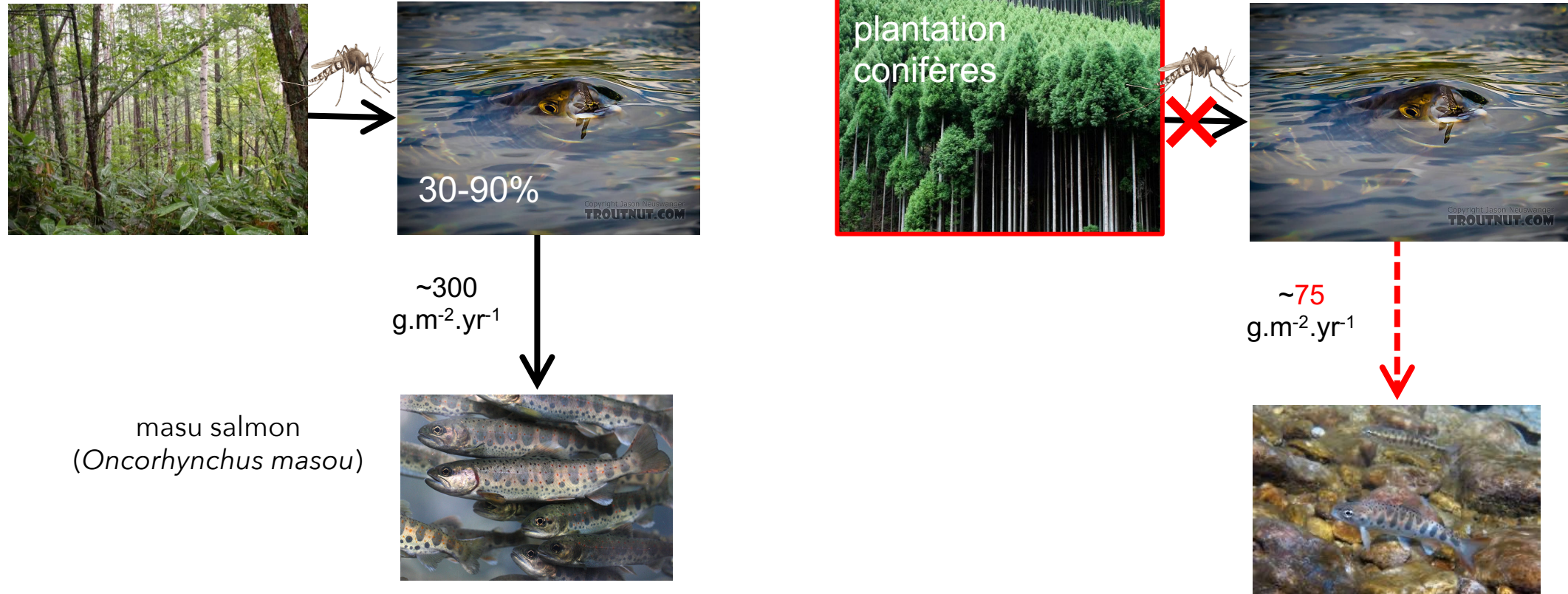
Changement d'usage des terres: diminution des arthropodes terrestres



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Exploitation des espèces → réduction des flux

Changement d'usage des terres: diminution des arthropodes terrestres



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

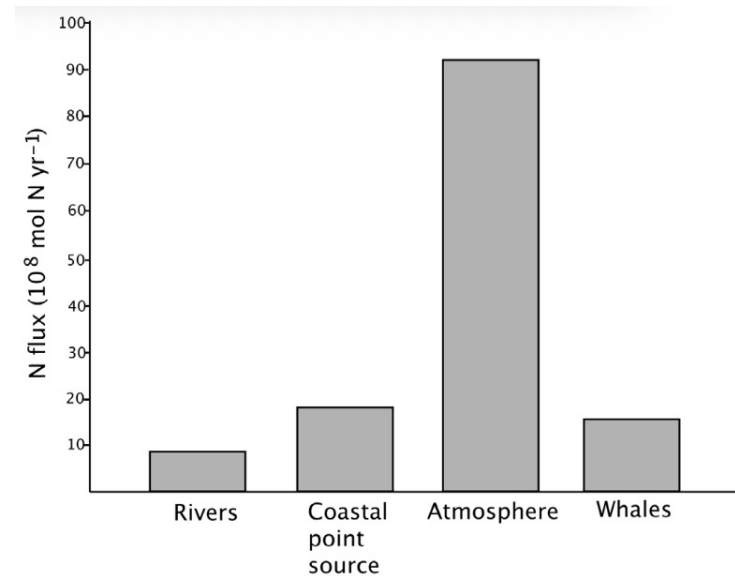
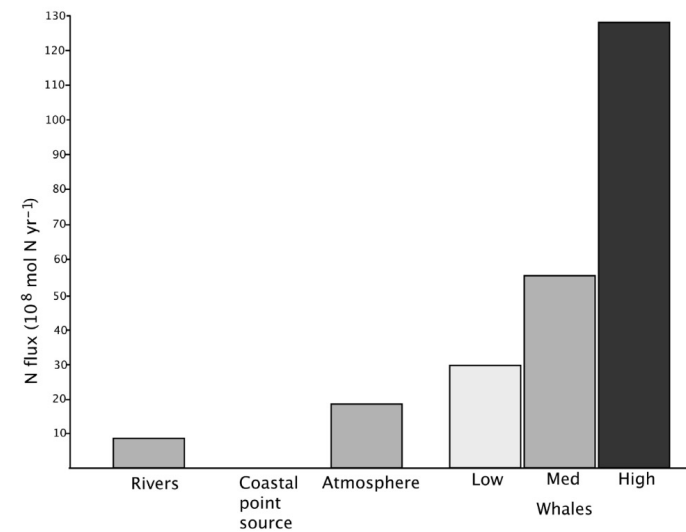
## Exploitation des espèces → réduction des flux

Ralentissement de la « pompe baleine »

Flux d'azote dans le golf du Maine

Avant la pêche industrielle

Après la pêche industrielle



Roman and McCarthy 2010, PloS One



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

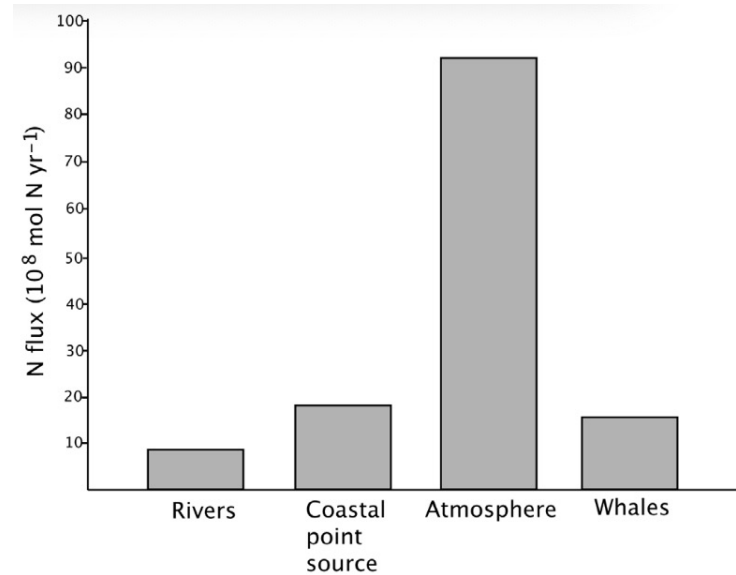
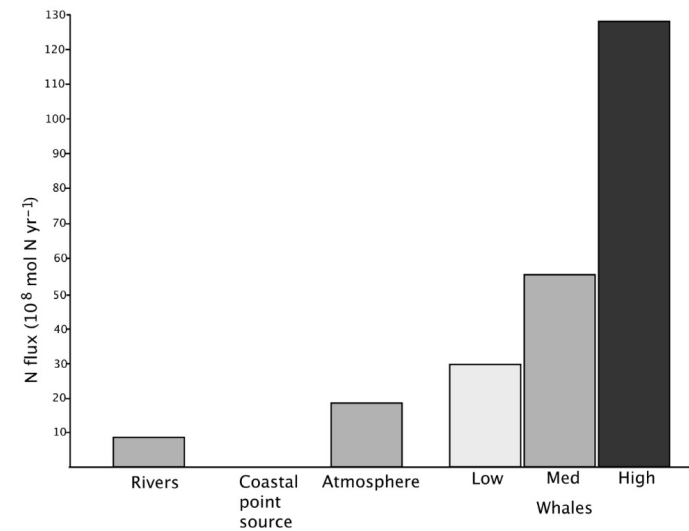
Exploitation des espèces → réduction des flux

Ralentissement de la « pompe baleine »

Flux d'azote dans le golf du Maine

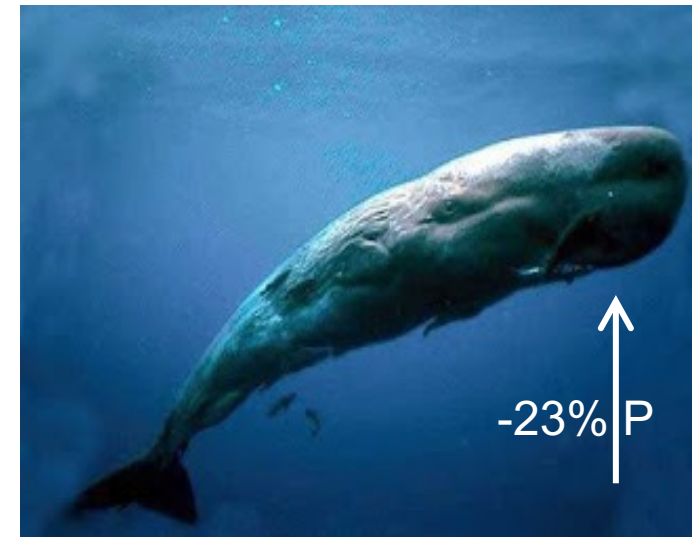
Avant la pêche industrielle

Après la pêche industrielle



Roman and McCarthy 2010, PloS One

Déclin des baleines de 66% à 99% des effectifs selon les espèces



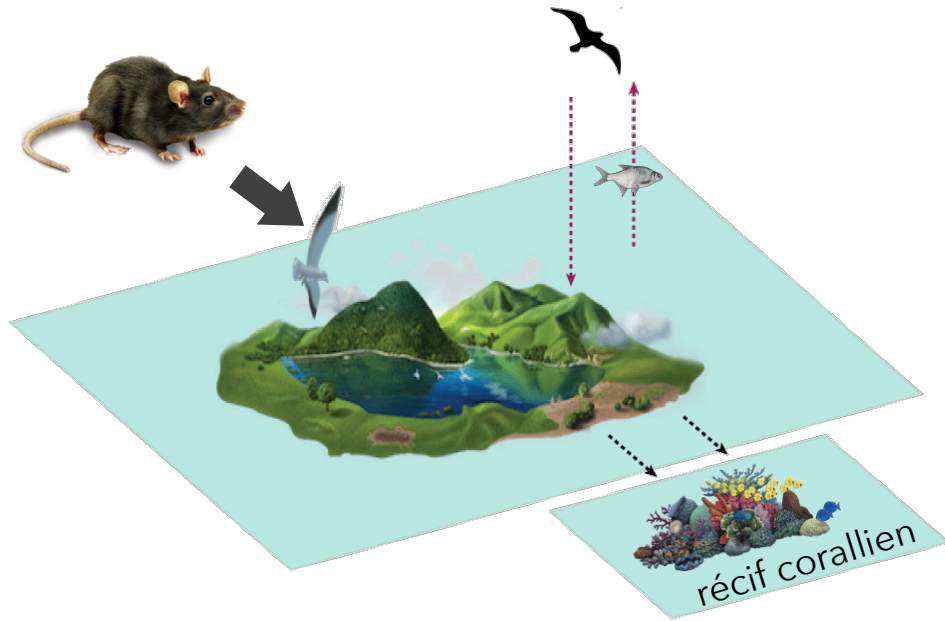
Doughty et al. 2015, PNAS

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Invasion biologique → réduction des flux

=> Impact de rats sur les récifs coralliens

Atolls de l'archipel Chagos, Océan Indien central  
6 îles avec rats / 6 îles sans rats

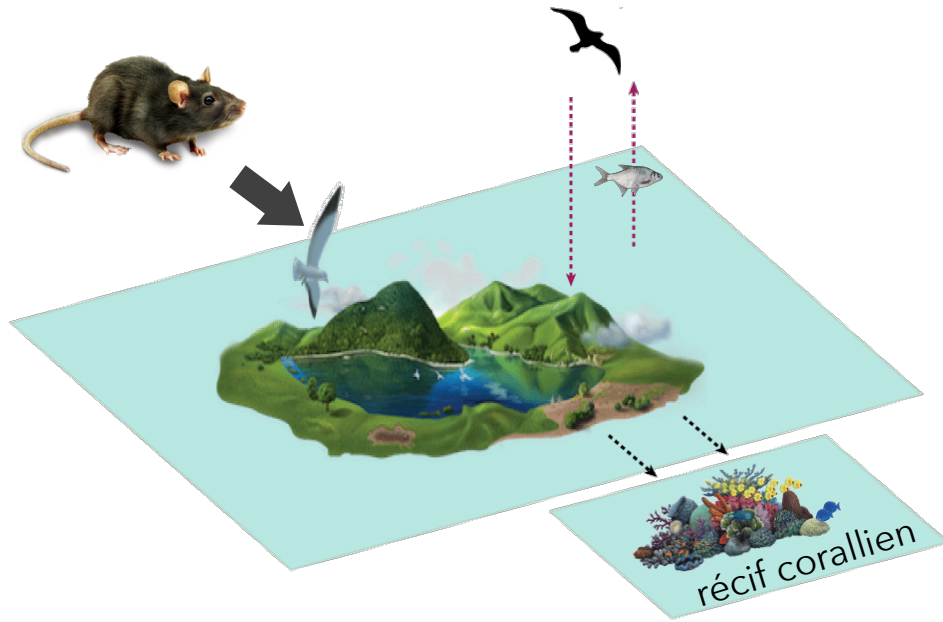


# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

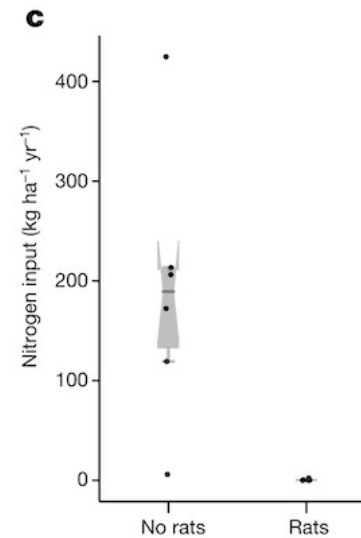
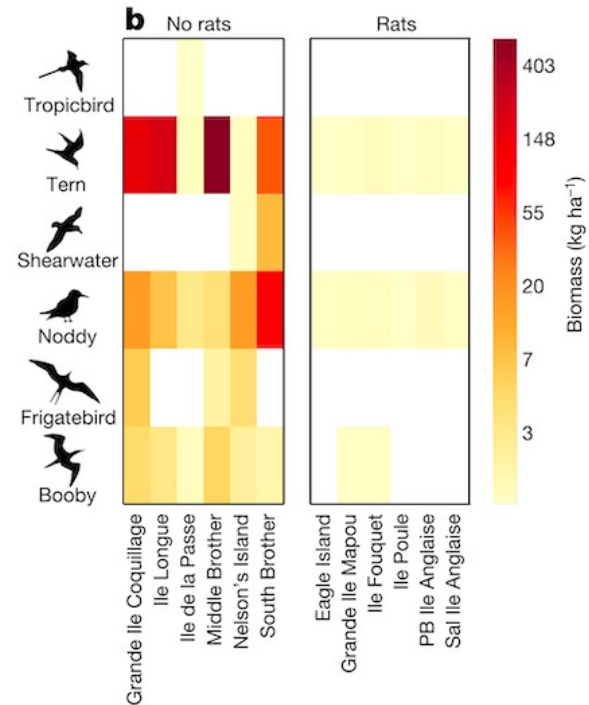
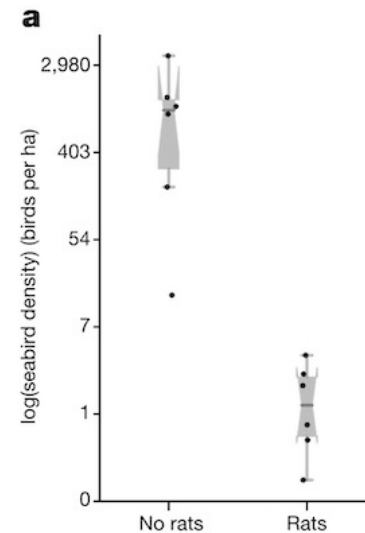
## Invasion biologiques → réduction des flux

=> Impact de rats sur les récifs coralliens

Atolls de l'archipel Chagos, Océan Indien central  
6 îles avec rats / 6 îles sans rats



## Impacts sur les oiseaux

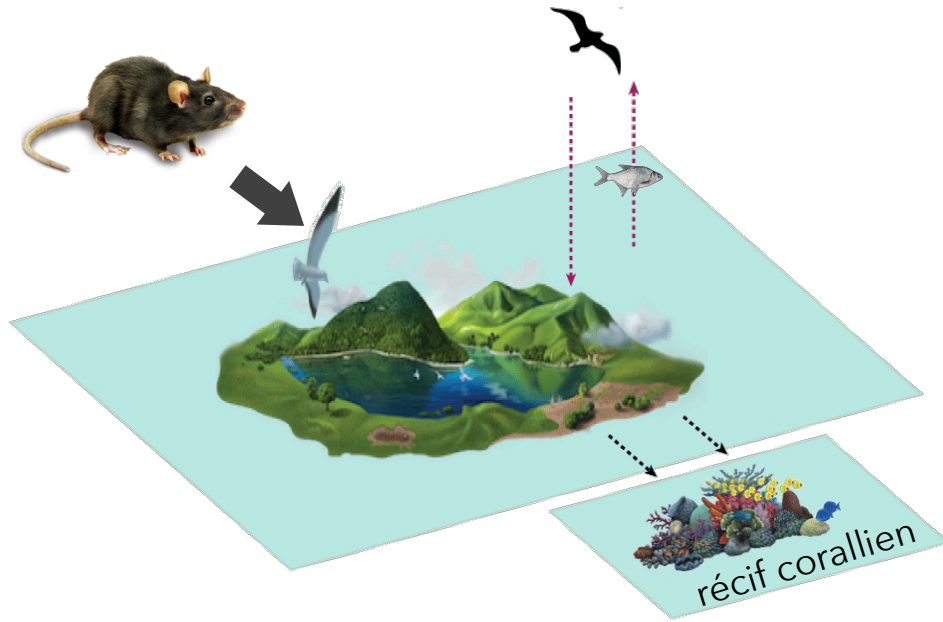


# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

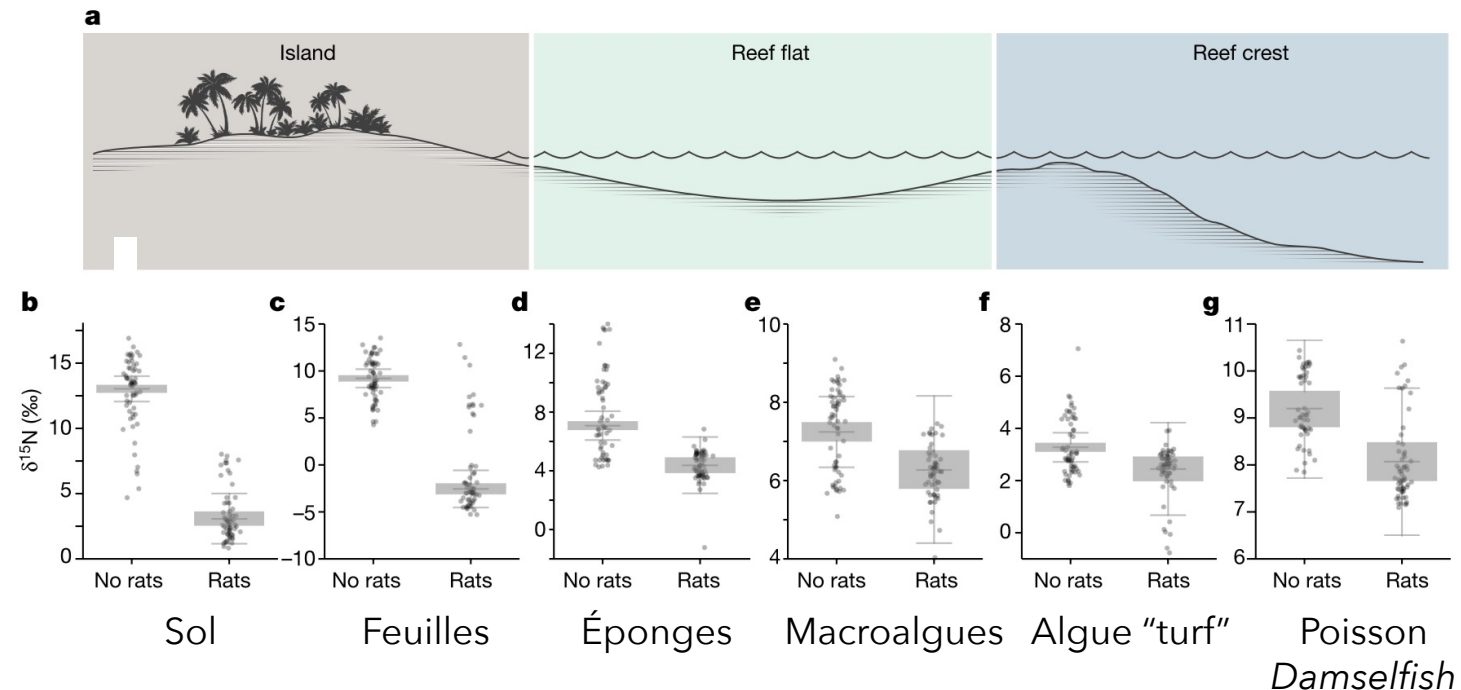
## Invasion biologique → réduction des flux

=> Impact de rats sur les récifs coralliens

Atolls de l'archipel Chagos, Océan Indien central  
6 îles avec rats / 6 îles sans rats



## Impacts sur le sol, producteurs primaires, poissons



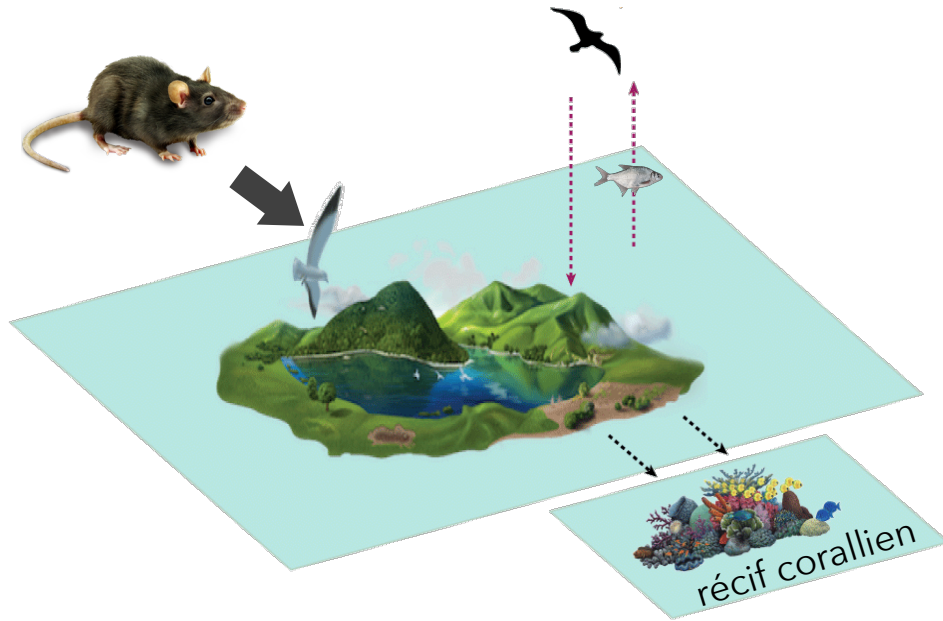
Graham et al. 2018, Nature

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

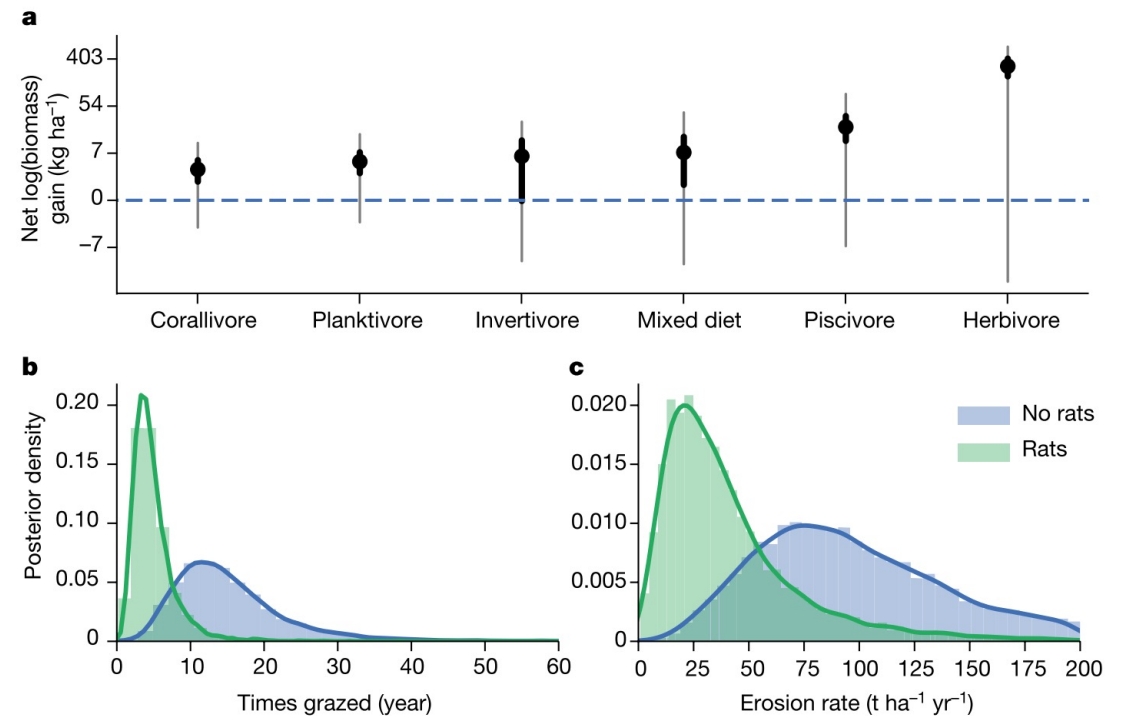
## Invasion biologique → réduction des flux

=> Impact de rats sur les récifs coralliens

Atolls de l'archipel Chagos, Océan Indien central  
6 îles avec rats / 6 îles sans rats



## Impacts sur la biomasse de poisson et le maintien du récif

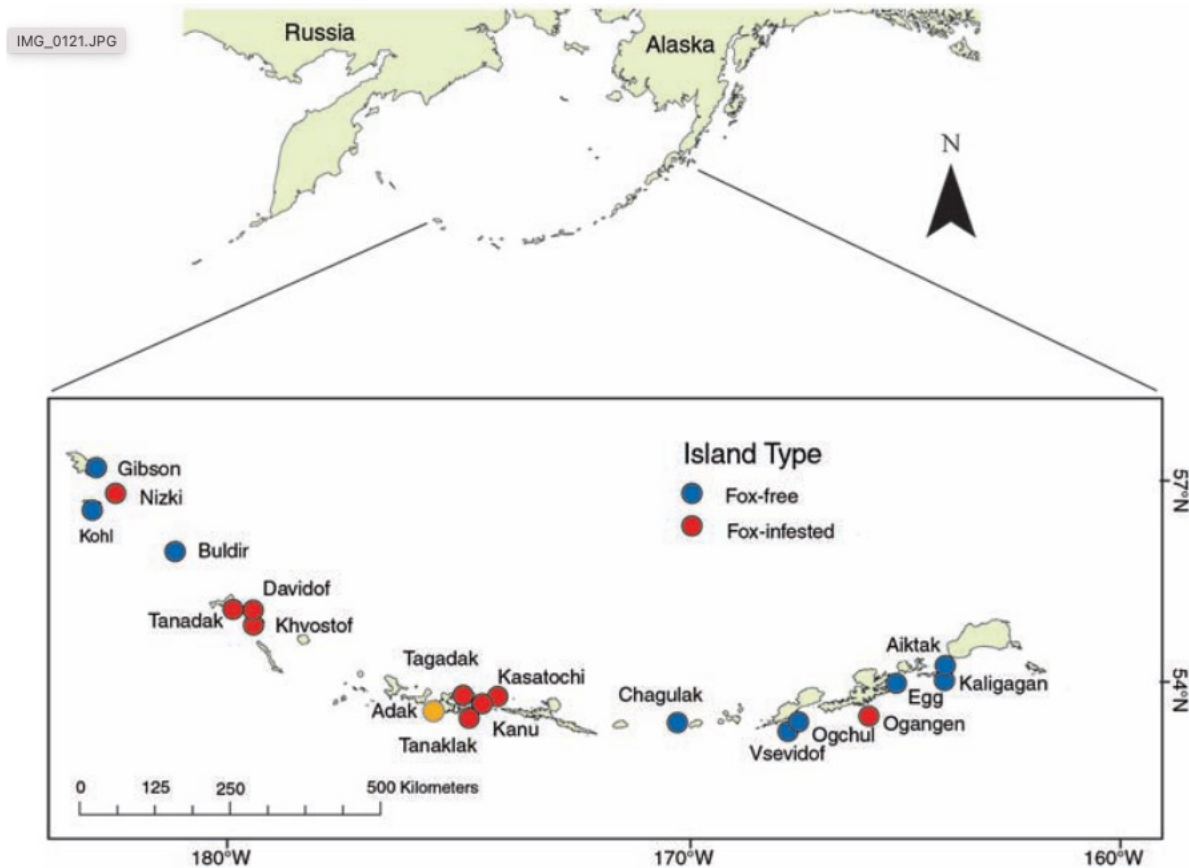


Graham et al. 2018, Nature

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Invasion biologique → réduction des flux

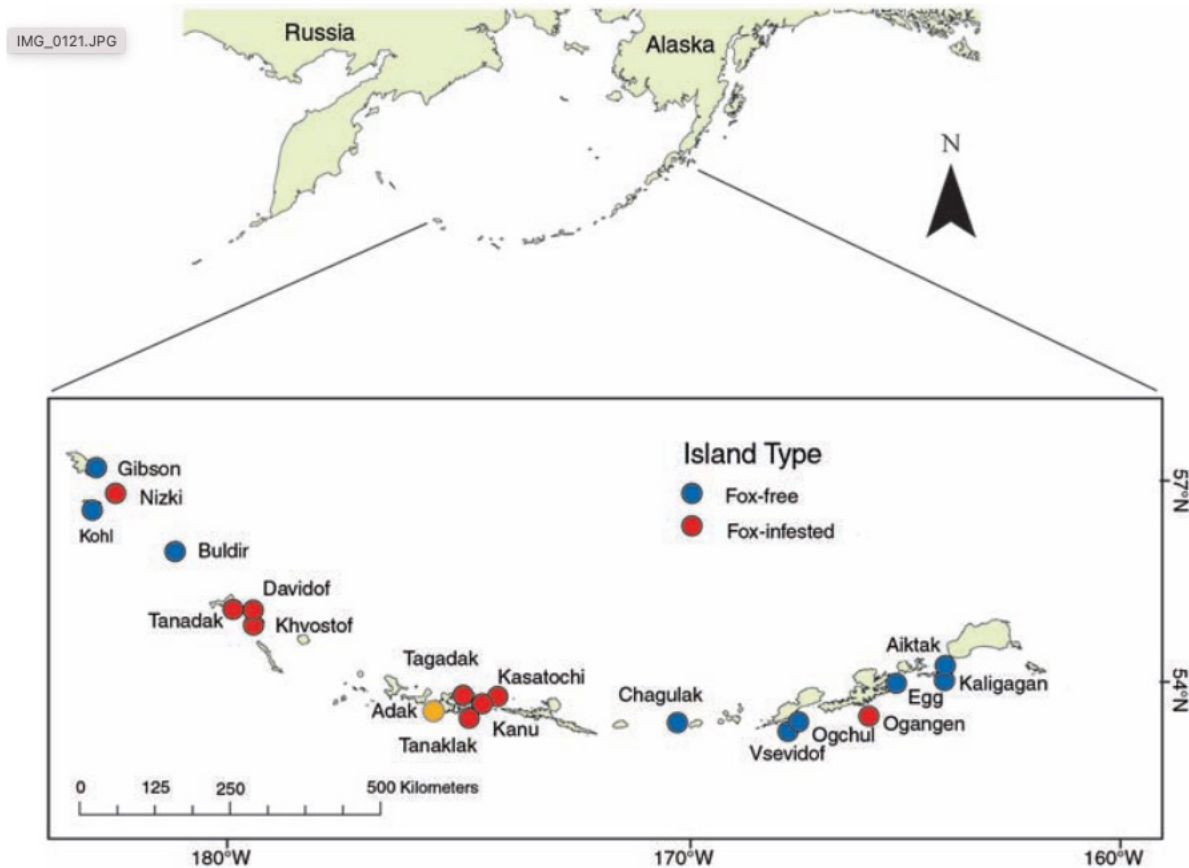
=> Impact des renards sur les écosystèmes arctiques



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Invasion biologique → réduction des flux

=> Impact des renards sur les écosystèmes arctiques



guano  
~360  
g.m<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>

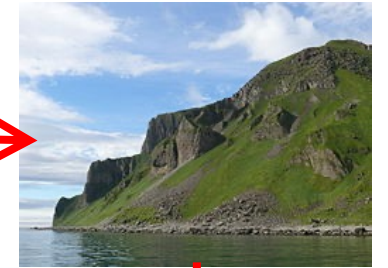
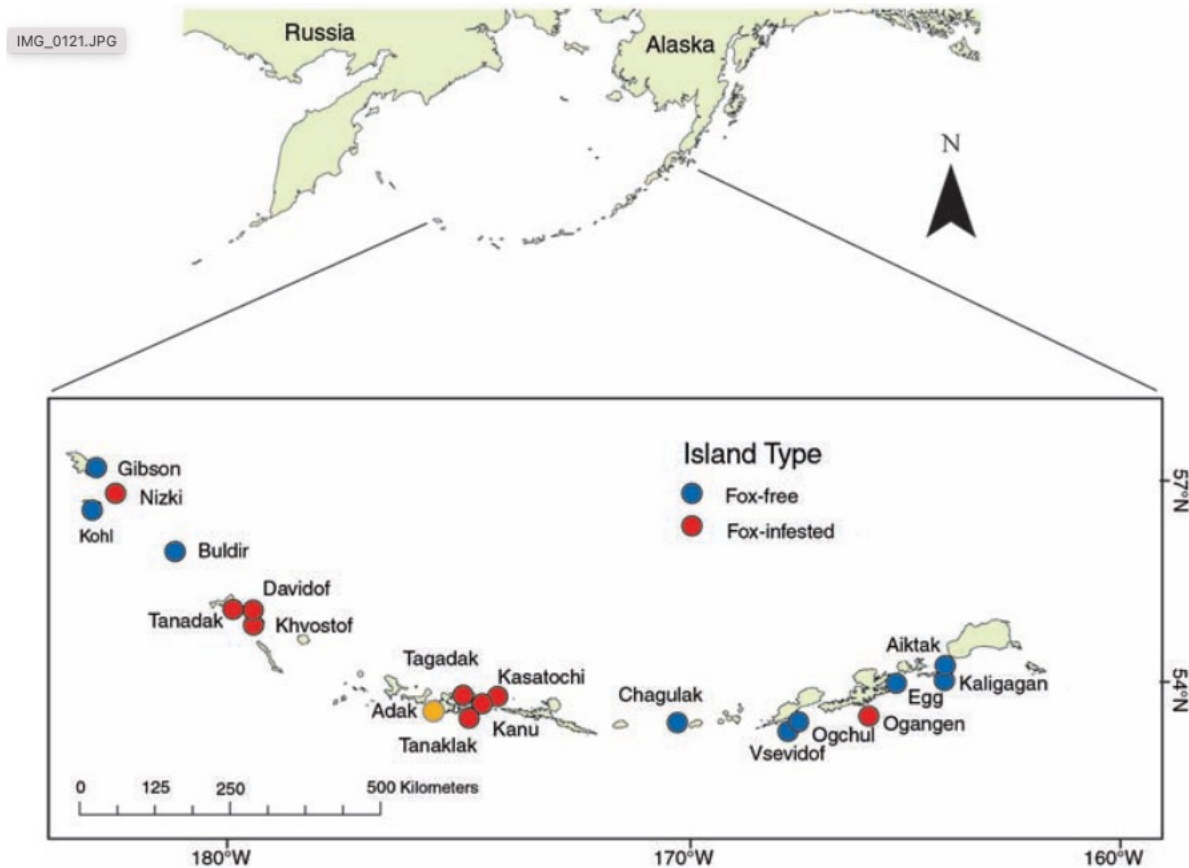


**prairie fertile**

# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Invasion biologique → réduction des flux

=> Impact des renards sur les écosystèmes arctiques



guano  
~6  
g.m<sup>-2</sup>.yr<sup>-1</sup>



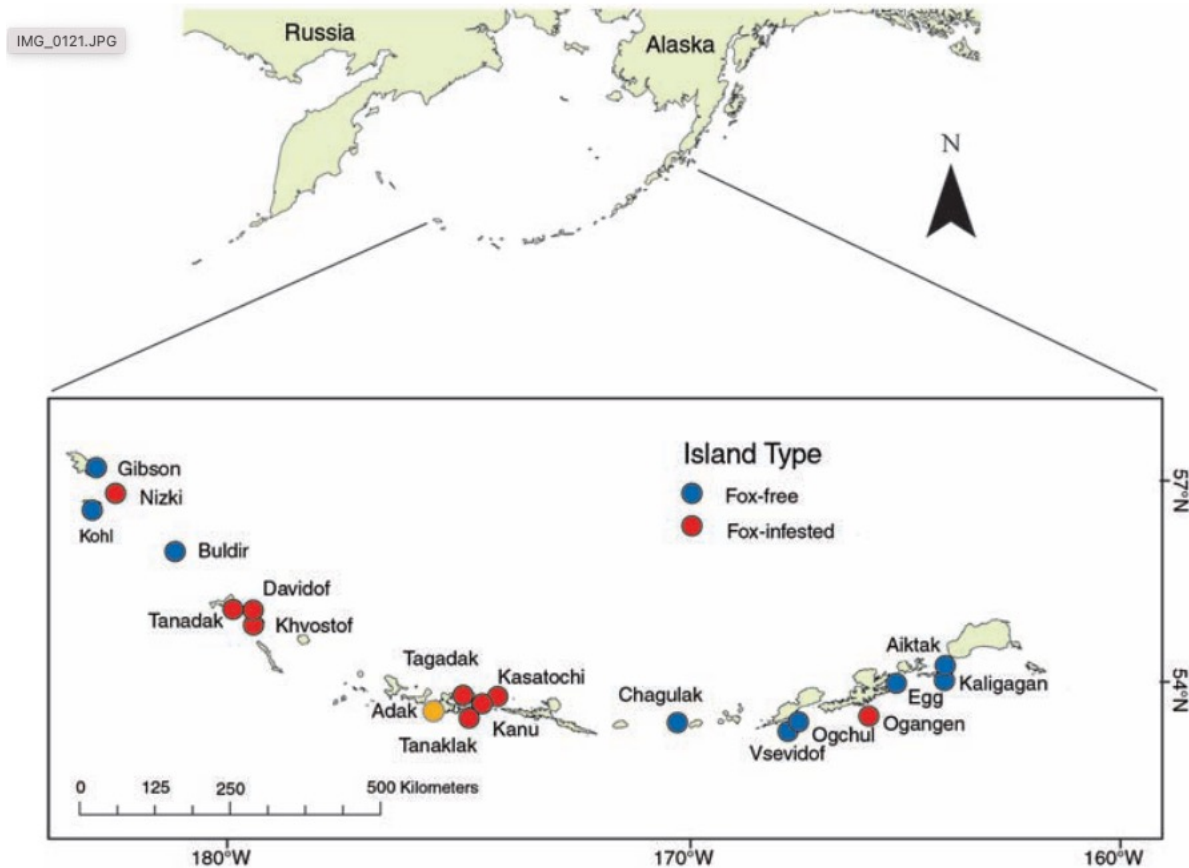
introduits début  
XXème siècle  
pour la fourrure



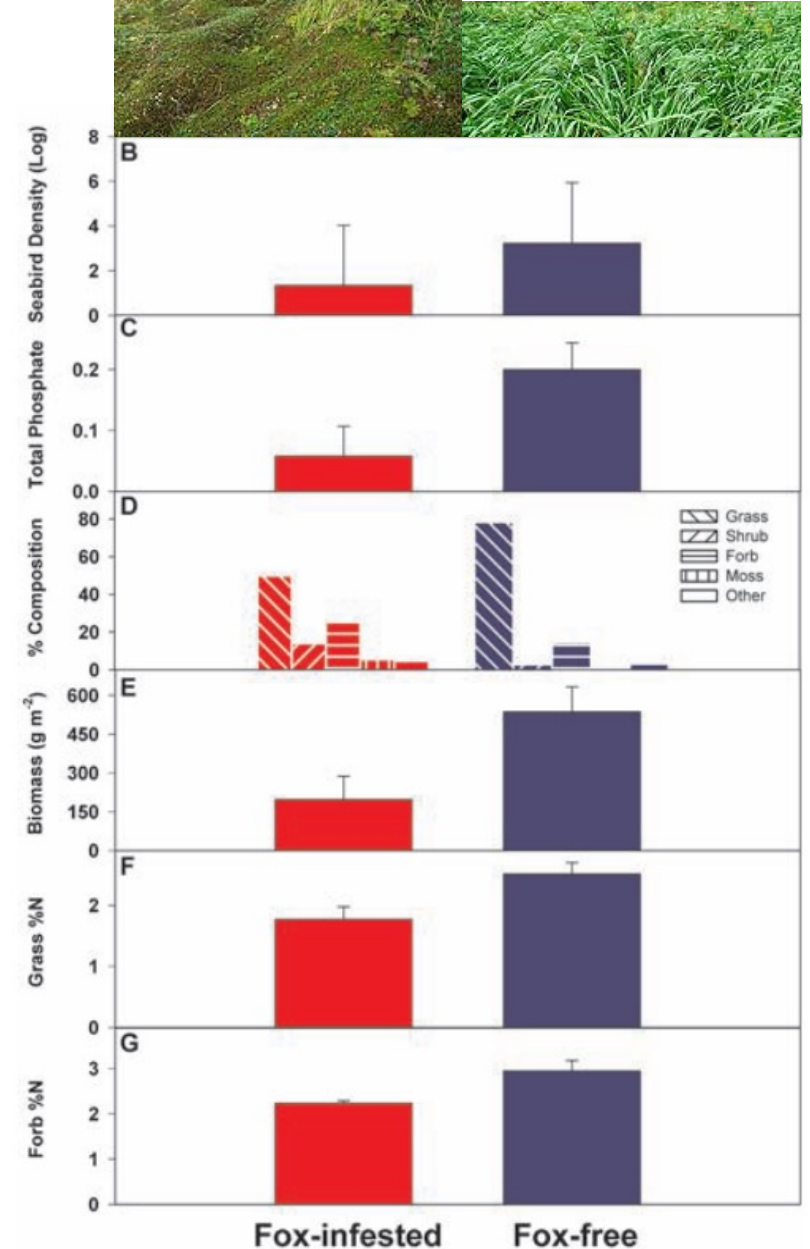
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

Invasion biologiques → réduction des flux

=> Impact des renards sur les écosystèmes arctiques



introduits début  
XXème siècle  
pour la fourrure



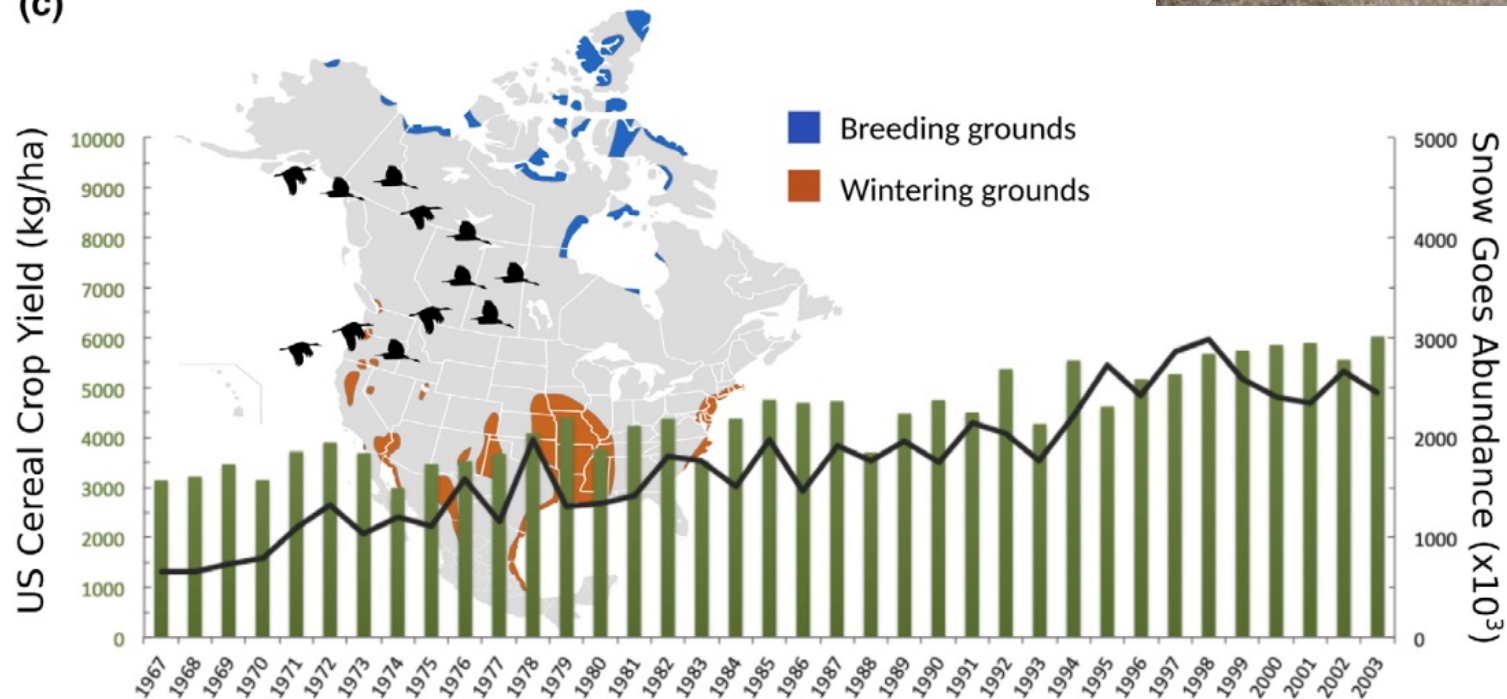
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Démographie des migrateurs → des effets grande distance

=> Le cas d'école des oies des neiges



(c)



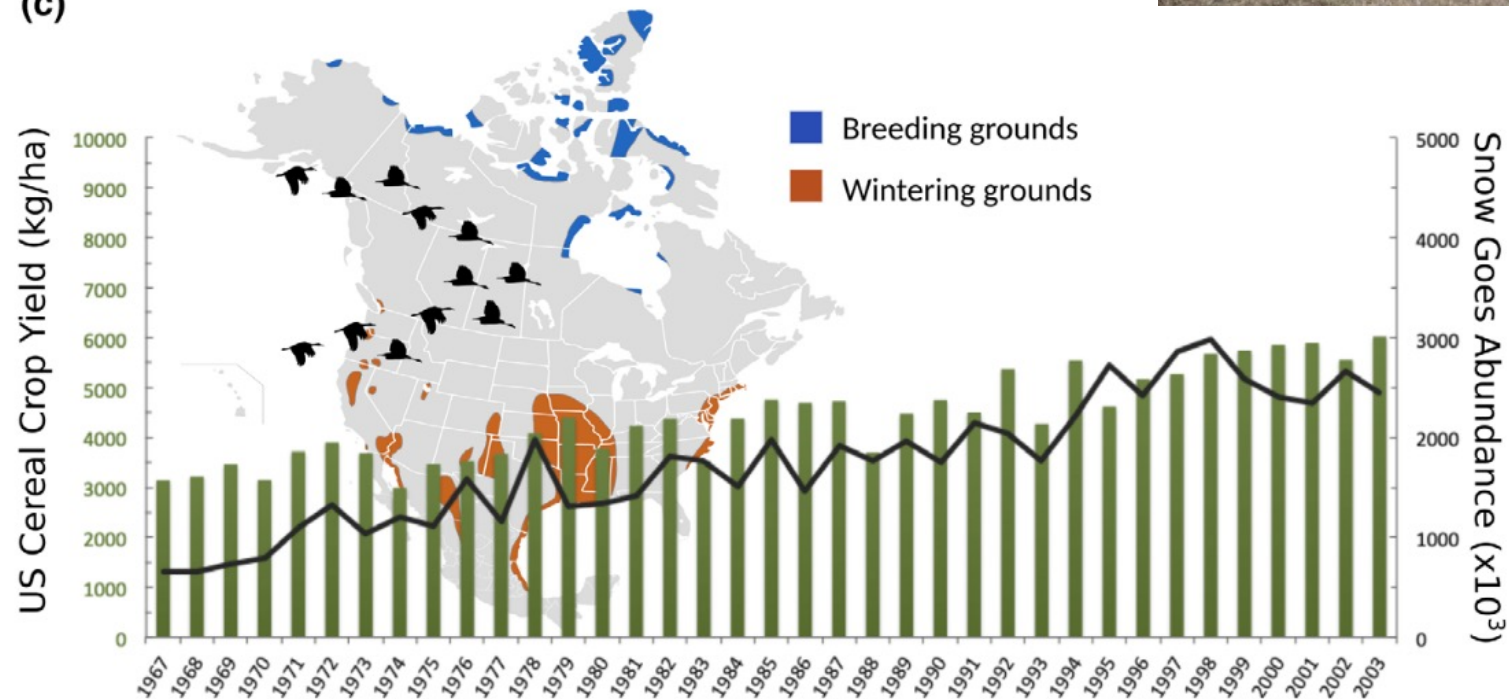
# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Démographie des migrateurs → des effets grande distance

=> Le cas d'école des oies des neiges



(c)



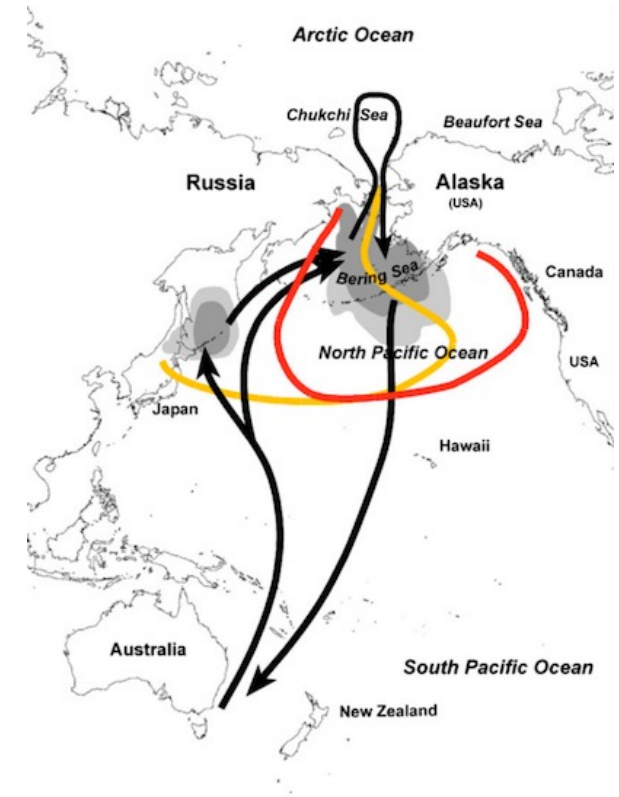
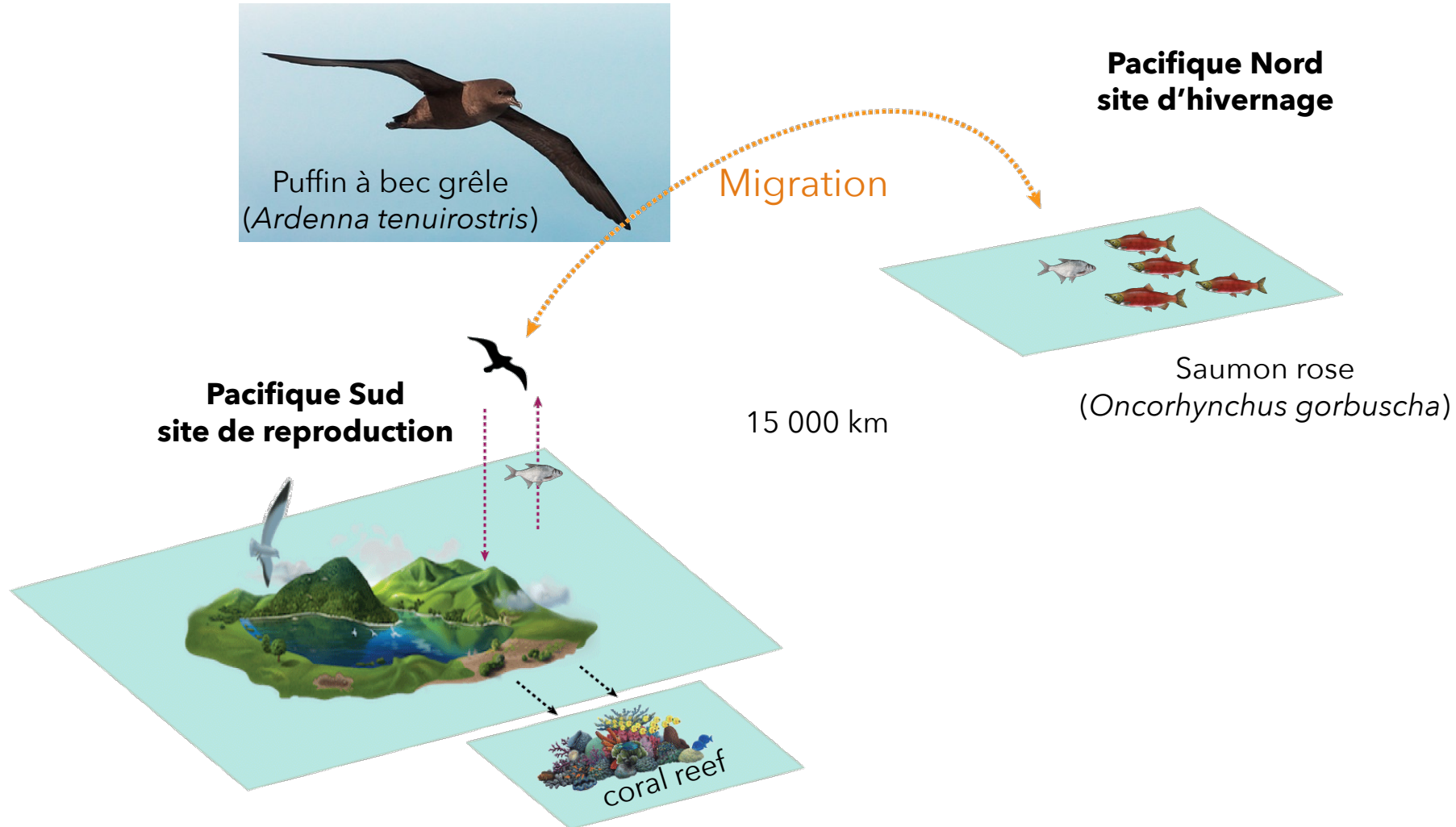
érosion et salinisation en Arctique



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Démographie des migrateurs → des effets grande distance

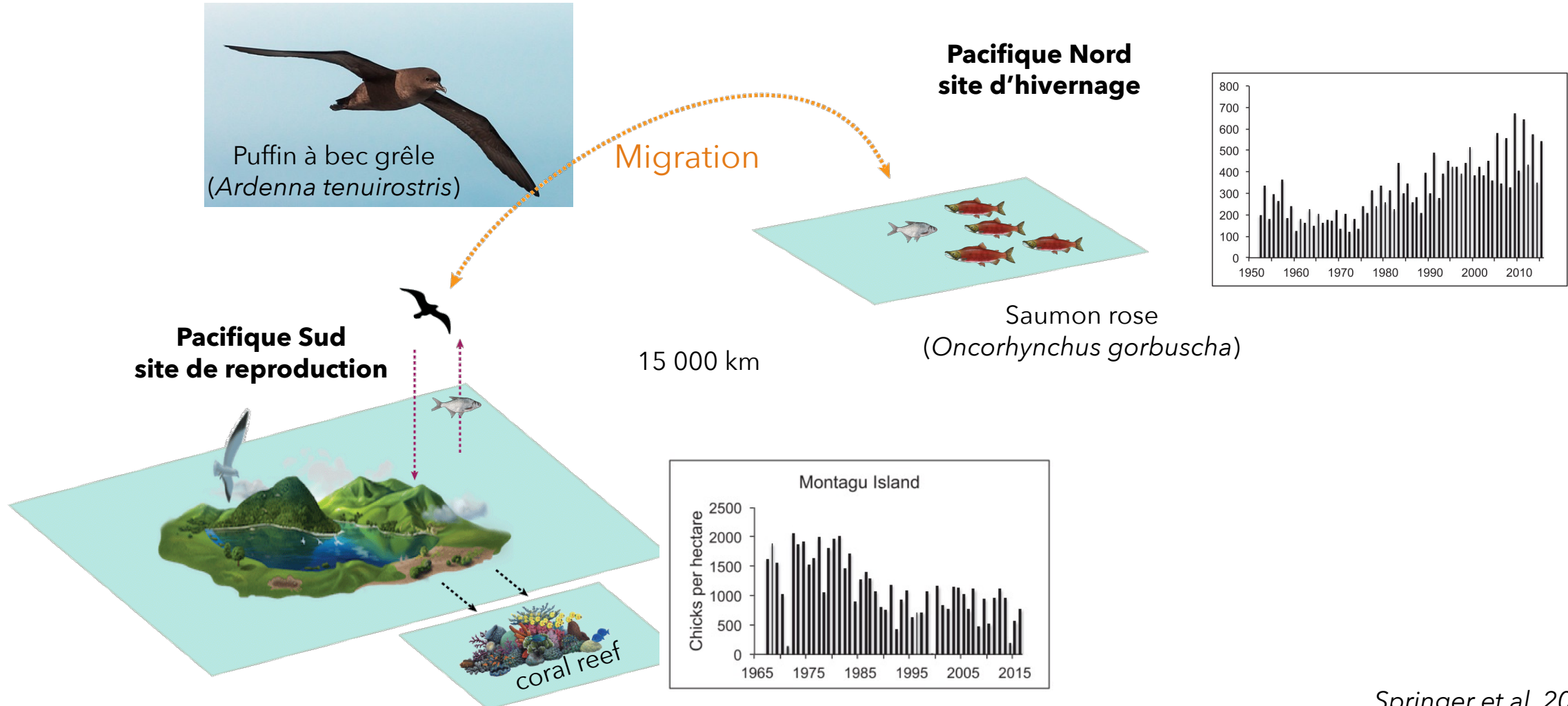
=> Impact du saumon pacifique sur les oiseaux migrateurs



# C) Méta-écosystèmes et changements globaux

## Démographie des migrateurs → des effets grande distance

=> Impact du saumon pacifique sur les oiseaux migrateurs

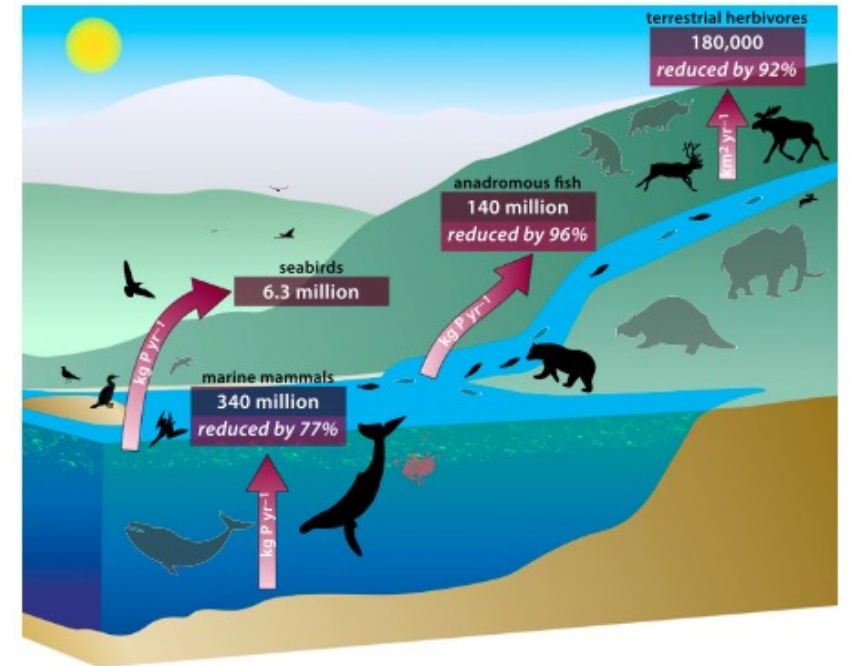


# C) Conclusion Changement globaux

## Conséquences des modifications de flux spatiaux

- ⇒ Propagation de perturbations locales
- ⇒ Changements inattendus via cascades indirectes
- ⇒ Modification des équilibres de fonctionnement
- ⇒ Des états alternatifs indésirables
- ⇒ Effet d'accumulation et propagation des toxiques
- ⇒ Des conséquences à grande échelle: P cycle

Flux vers la terre diminués



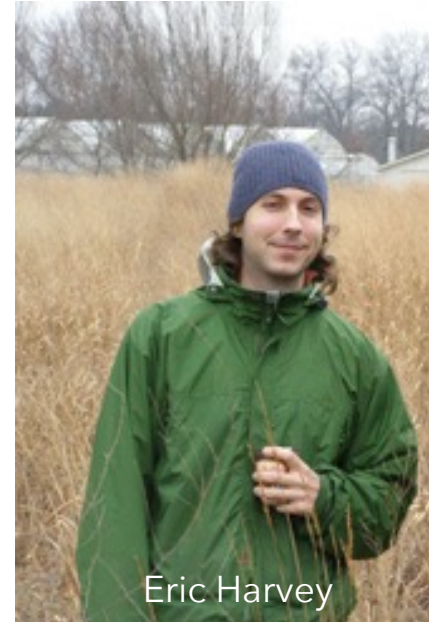
Doughty et al. 2015, *PNAS*

- ⇒ **Penser à une échelle spatiale supérieure à celle du problème observé: la gestion environnementale au sens large doit être holistique et multi-échelle**



**Merci  
pour votre attention !**

## Remerciements



Eric Harvey



Chelsea J. Little



Florian Altermatt



**Universität  
Zürich**<sup>UZH</sup>



SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

# Références

- Adame, M., Fry, B., Gamboa, J., & Herrera-Silveira, J. (2015). Nutrient subsidies delivered by seabirds to mangrove islands. *Marine Ecology Progress Series*, 525, 15–24. <https://doi.org/10.3354/meps11197>
- Allgeier, J. E., Burkepille, D. E., & Layman, C. A. (2017). Animal pee in the sea: consumer-mediated nutrient dynamics in the world's changing oceans. *Global Change Biology*, 23(6), 2166–2178. <https://doi.org/10.1111/gcb.13625>
- Anderson, W. B., & Polis, G. a. (1999). Nutrient fluxes from water to land : seabirds affect plant nutrient status on Gulf of California islands. *Oecologia*, 118(3), 324–332. <https://doi.org/10.1007/s004420050733>
- Bultman, H., Hoekman, D., Dreyer, J., & Gratton, C. (2014). Terrestrial deposition of aquatic insects increases plant quality for insect herbivores and herbivore density. *Ecological Entomology*, 39(4), 419–426. <https://doi.org/10.1111/een.12118>
- Chumchal, M. M., & Drenner, R. W. (2015). An environmental problem hidden in plain sight? Small Human-made ponds, emergent insects, and mercury contamination of biota in the Great Plains. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(6), 1197–1205. <https://doi.org/10.1002/etc.2954>
- Croll, D. A., Maron, J. L., Estes, J. A., Danner, E. M., & Byrd, G. V. (2005). Introduced Predators Transform Subarctic Islands from Grassland to Tundra. *Science*, 307(2005), 1959–1961. <https://doi.org/10.1126/science.1108485>
- Deacy, W. W., Armstrong, J. B., Leacock, W. B., Robbins, C. T., Gustine, D. D., Ward, E. J., Erlenbach, J. A., & Stanford, J. A. (2017). Phenological synchronization disrupts trophic interactions between Kodiak brown bears and salmon. *Proceedings of the National Academy of Science*, 1–6. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705248114>
- Doughty, C. E., Roman, J., Faurby, S., Wolf, A., Haque, A., Bakker, E. S., Malhi, Y., Dunning, J. B., & Svenning, J.-C. (2015). Global nutrient transport in a world of giants. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 113(4), 1–6. <https://doi.org/10.1073/pnas.1502549112>
- Dreyer, J., & Gratton, C. (2014). Habitat linkages in conservation biological control: Lessons from the land-water interface. *Biological Control*, 75(May 2017), 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2013.11.006>
- Filippelli, G. M. (2008). The global phosphorus cycle: Past, present, and future. *Elements*, 4(2), 89–95. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.2.89>



# Références

- Gounand, I., Harvey, E., Ganesanandamoorthy, P., & Altermatt, F. (2017). Subsidies mediate interactions between communities across space. *Oikos*, 126(7), 972–979. <https://doi.org/10.1111/oik.03922>
- Gounand, I., Little, C. J., Harvey, E., & Altermatt, F. (2018). Cross-ecosystem carbon flows connecting ecosystems worldwide. *Nature Communications*, 9(1), 4825. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07238-2>
- Gounand, I., Mouquet, N., Canard, E., Guichard, F., Hauzy, C., & Gravel, D. (2014). The Paradox of Enrichment in Metaecosystems. *The American Naturalist*, 184(6), 752–763. <https://doi.org/10.1086/678406>
- Graham, N. A. J., Wilson, S. K., Carr, P., Hoey, A. S., Jennings, S., & MacNeil, M. A. (2018). Seabirds enhance coral reef productivity and functioning in the absence of invasive rats. *Nature*, 559(7713), 250–253. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0202-3>
- Gravel, D., Guichard, F., Loreau, M., & Mouquet, N. (2010). Source and sink dynamics in meta-ecosystems. *Ecology*, 91(7), 2172–2184. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20715639>
- Helfield, J. M., & Naiman, R. J. (2002). Salmon and alder as nitrogen sources to riparian forests in a boreal Alaskan watershed. *Oecologia*, 133, 573–582. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1070-x>
- Helm, A., Hanski, I., & Pärtel, M. (2006). Slow response of plant species richness to habitat loss and fragmentation. *Ecology Letters*, 9(1), 72–77. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00841.x>
- Inoue, M., Sakamoto, S., & Kikuchi, S. (2013). Terrestrial prey inputs to streams bordered by deciduous broadleaved forests, conifer plantations and clear-cut sites in southwestern Japan: Effects on the abundance of red-spotted masu salmon. *Ecology of Freshwater Fish*, 22(3), 335–347. <https://doi.org/10.1111/eff.12029>
- Jefferies, R. L., Rockwell, R. F., & Abraham, K. F. (2004). Agricultural Food Subsidies, Migratory Connectivity and Large-Scale Disturbance in Arctic Coastal Systems: A Case Study. *Integrative and Comparative Biology*, 44(2), 130–139. <https://doi.org/10.1093/icb/44.2.130>
- Lamberti, G. A., Chaloner, D. T., & Hershey, A. E. (2010). Linkages among aquatic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 29(1), 245–263. <https://doi.org/10.1899/08-166.1>
- Lavery, T. J., Roudnew, B., Gill, P., Seymour, J., Seuront, L., Johnson, G., Mitchell, J. G., & Smetacek, V. (2010). Iron defecation by sperm whales stimulates carbon export in the Southern Ocean. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 277(1699), 3527–3531. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0863>

# Références

- Leibold, M. A., Holyoak, M., Mouquet, N., Amarasekare, P., Chase, J. M., Hoopes, M. F., Holt, R. D., Shurin, J. B., Law, R., Tilman, D., Loreau, M., & Gonzalez, A. (2004). The metacommunity concept: a framework for multi-scale community ecology. *Ecology Letters*, 7(7), 601–613. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00608.x>
- Leroux, S. J., & Loreau, M. (2008). Subsidy hypothesis and strength of trophic cascades across ecosystems. *Ecology Letters*, 11, 1147–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01235.x>
- Loreau, M., Mouquet, N., & Holt, R. D. (2003). Meta-ecosystems: a theoretical framework for a spatial ecosystem ecology. *Ecology Letters*, 6(8), 673–679. <https://doi.org/doi:10.1046/j.1461-0248.2003.00483.x>
- Mattocks, S., Hall, C. J., & Jordaan, A. (2017). Damming, lost connectivity, and the historical role of anadromous fish in freshwater ecosystem dynamics. *BioScience*, 67(8), 713–728. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix069>
- McCann, K. S., Cazelles, K., MacDougall, A. S., Fussmann, G. F., Bieg, C., Cristescu, M., Fryxell, J. M., Gellner, G., Lapointe, B., & Gonzalez, A. (2021). Landscape modification and nutrient-driven instability at a distance. *Ecology Letters*, 24(3), 398–414. <https://doi.org/10.1111/ele.13644>
- McInturf, A. G., Pollack, L., Yang, L. H., & Spiegel, O. (2019). Vectors with autonomy: what distinguishes animal-mediated nutrient transport from abiotic vectors? *Biological Reviews*, 94(5), 1761–1773. <https://doi.org/10.1111/brv.12525>
- Montagano, L., Leroux, S. J., Giroux, M. A., & Lecomte, N. (2019). The strength of ecological subsidies across ecosystems: a latitudinal gradient of direct and indirect impacts on food webs. In *Ecology Letters* (Vol. 22, Issue 2, pp. 265–274). <https://doi.org/10.1111/ele.13185>
- Polis, G. A., & Hurd, S. D. (1995). Extraordinarily high spider densities on islands: flow of energy from the marine to terrestrial food webs and the absence of predation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(10), 4382–4386. <https://doi.org/10.1073/pnas.92.10.4382>
- Polis, Gary A., Hurd, S. D., The, S., Naturalist, A., Mar, N., Polis, G. A., & Hurdt, S. D. (1996). Linking Marine and Terrestrial Food Webs: Allochthonous Input from the Ocean Supports High Secondary Productivity on Small Islands and Coastal Land Communities. *The American Naturalist*, 147(3), 396–423. <http://www.jstor.org/stable/10.2307/2463215>

# Références

- Richardson, J. S., & Sato, T. (2015). Resource subsidy flows across freshwater-terrestrial boundaries and influence on processes linking adjacent ecosystems. *Ecohydrology*, 8(3), 406–415. <https://doi.org/10.1002/eco.1488>
- Roman, J., & McCarthy, J. J. (2010). The Whale Pump: Marine Mammals Enhance Primary Productivity in a Coastal Basin. *PloS One*, 5(10), 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013255>
- Schiesari, L., Matias, M. G., Prado, P. I., Leibold, M. A., Albert, C. H., Howeth, J. G., Leroux, S. J., Pardini, R., Siqueira, T., Brancalion, P. H. S., Cabeza, M., Coutinho, R. M., Diniz-Filho, J. A. F., Fournier, B., Lahr, D. J. G., Lewinsohn, T. M., Martins, A., Morsello, C., Peres-Neto, P. R., ... Vázquez, D. P. (2019). Towards an applied metaecology. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17(4), 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.11.001>
- Sitters, J., Atkinson, C. L., Guelzow, N., Kelly, P., & Sullivan, L. L. (2015). Spatial stoichiometry: Cross-ecosystem material flows and their impact on recipient ecosystems and organisms. *Oikos*, 124(7), 920–930. <https://doi.org/10.1111/oik.02392>
- Springer, A. M., Vliet, G. B. Van, Bool, N., Crowley, M., Fullagar, P., Lea, M.-A., Monash, R., Price, C., Vertigan, C., & Woehler, E. J. (2018). Transhemispheric ecosystem disservices of pink salmon in a Pacific Ocean macrosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(22), E5039. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720577115>
- Stepanian, P. M., Entekin, S. A., Wainwright, C. E., Mirkovic, D., & Tank, J. L. (2020). Declines in an abundant aquatic insect , the burrowing mayfly , across major North American waterways. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 2987–2992. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913598117>
- Subalusky, A. L., Dutton, C. L. C. L., Rosi-Marshall, E. J., Post, D. M., Subaluski, A. L., Dutton, C. L. C. L., Rosi-Marshall, E. J., & Post, D. M. (2015). The hippopotamus conveyor belt: vectors of carbon and nutrients from terrestrial grasslands to aquatic systems in sub-Saharan Africa. *Freshwater Biology*, 60(3), 512–525. <https://doi.org/10.1111/fwb.12474>
- Subalusky, A. L., Dutton, C. L., Rosi-marshall, E. J., Post, D. M., Rosi, E. J., & Post, D. M. (2017). Annual mass drownings of the Serengeti wildebeest migration influence nutrient cycling and storage in the Mara River. *Proceedings of the National Academy of Science*, 114(29), 7647–7652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614778114>

# Références

- Tilman, D. (1994). Competition and biodiversity in spatially structured habitats. *Ecology*, 75(1), 2-16.  
<http://www.esajournals.org/doi/abs/10.2307/1939377>
- Tilman, D., May, R. M. R. M., Lehman, C. L., & Nowak, M. A. (1994). Habitat destruction and the extinction debt. *Nature*, 371(1), 65-66.  
<papers://aa15ed4a-8b41-4036-84a6-41087bba0cd6/Paper/p2371>
- Wurtsbaugh, W. A., Paerl, H. W., & Dodds, W. K. (2019). Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum. *WIREs Water*, 6(5), 1-27. <https://doi.org/10.1002/wat2.1373>
- Yamamuro, M., Komuro, T., Kamiya, H., Kato, T., Hasegawa, H., & Kameda, Y. (2019). Neonicotinoids disrupt aquatic food webs and decrease fishery yields. *Science*, 366(6465), 620-623. <https://doi.org/10.1126/science.aax3442>
- Bauer, S., & Hoyer, B. J. (2014). Migratory animals couple biodiversity and ecosystem functioning worldwide. *Science*, 344(6179), 1242552.  
<https://doi.org/10.1126/science.1242552>
- Schiesari, L., Leibold, M. A., & Burton, G. A. (2018). Metacommunities, metaecosystems and the environmental fate of chemical contaminants. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), 1553-1563. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13054>





# A) Introduction - Méta-communautés

- Expliquer la coexistence régionale : 4 paradigmes

Leibold et al. et al 2004, *Ecology Letters*

