



HAL
open science

Méta-écosystèmes et Changements Globaux

Isabelle Gounand

► **To cite this version:**

Isabelle Gounand. Méta-écosystèmes et Changements Globaux. Master. Physique, Chimie et écologie de l'environnement, Paris, Sorbonne Université, France. 2022, pp.76. hal-04332380

HAL Id: hal-04332380

<https://hal.science/hal-04332380>

Submitted on 8 Dec 2023

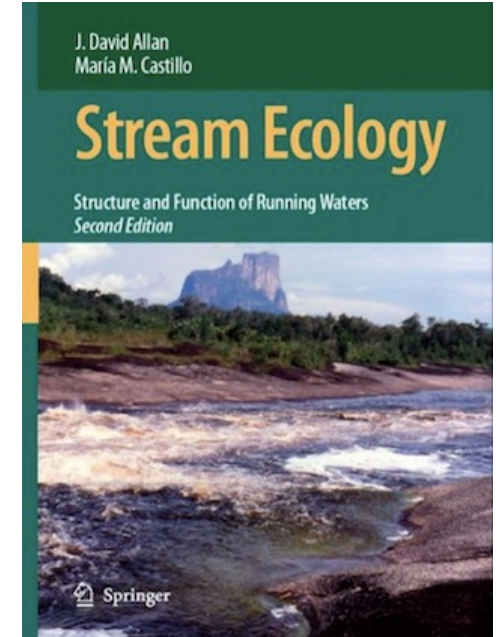
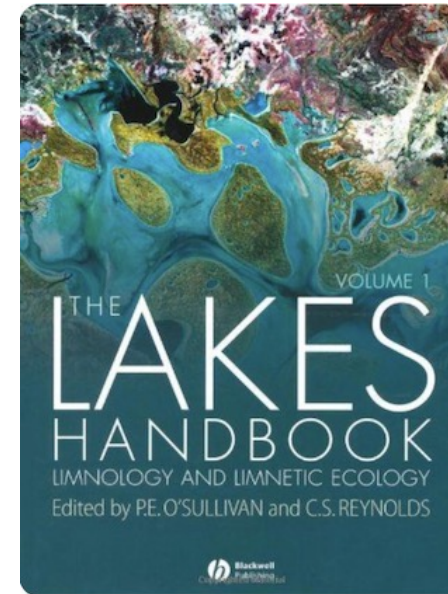
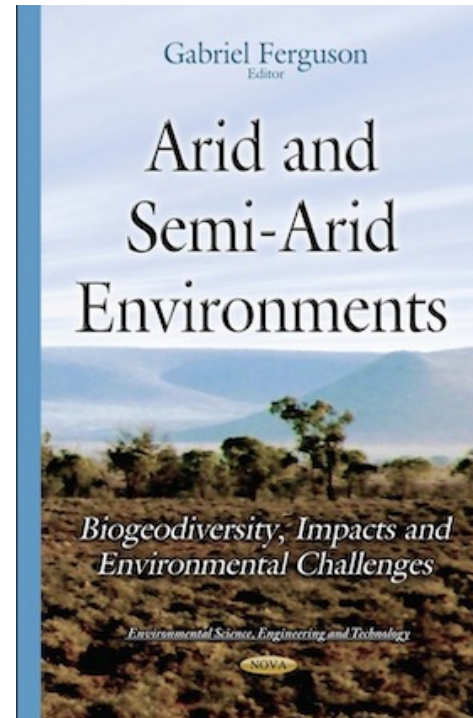
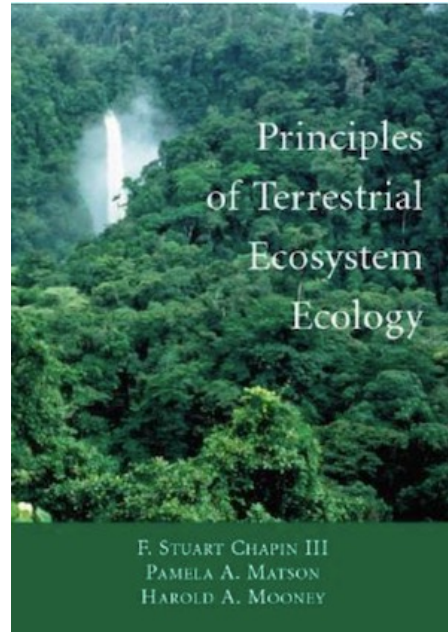
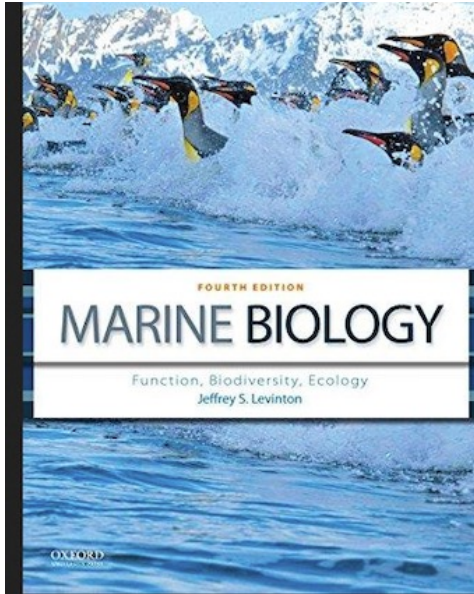
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méta-écosystèmes et Changements Globaux



Les écosystèmes sont souvent étudiés et gérés isolément



Ecosystème: « An ecosystem is a dynamic complex of plant, animal, and microorganism communities and the nonliving environment interacting as a functional unit. » *Millenium Ecosystem Assessment, 2005*

Pourtant les écosystèmes sont interconnectés

Quels Processus?

Abiotiques « passifs »

- courants, lessivage
- vents
- érosion

Biotiques « actifs »

- recherche de nourriture
- migration
- dispersion



Introduction écologie spatiale

Comment étudier la complexité?

- Décrire et expliquer l'hétérogénéité spatiale
- Comment cela varie avec l'échelle spatiale?
- Comment cette hétérogénéité influence les espèces?



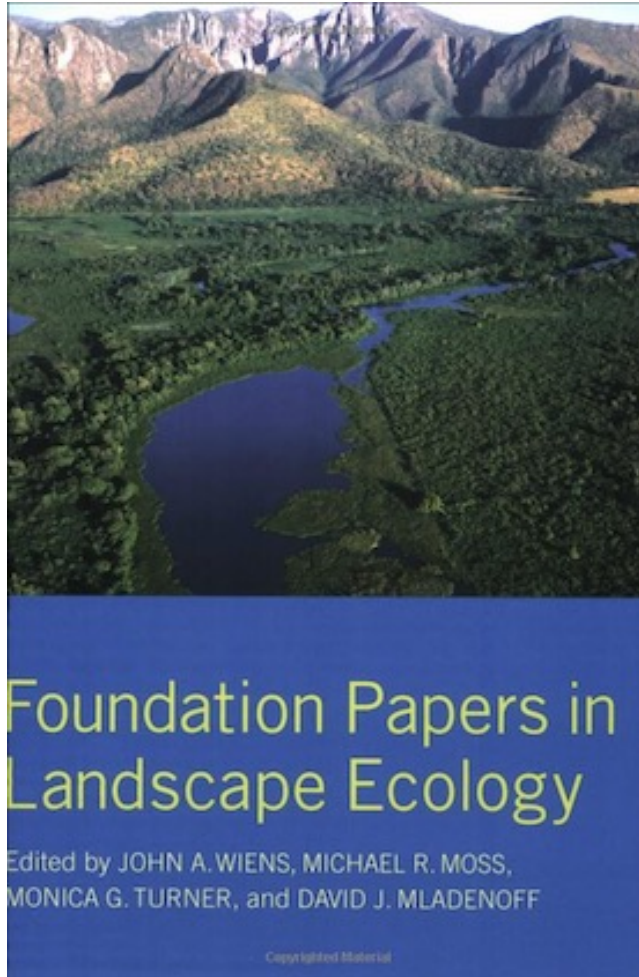
Introduction écologie spatiale



John A. Wiens



Monica G. Turner



Introduction écologie spatiale

Comment étudier la complexité?

- structure spatiale: hiérarchie et hétérogénéité
- processus écologiques locaux
- Dispersion limitée: connectivité
- Modèle simples => prédictions génériques

Approche « méta-écologie »

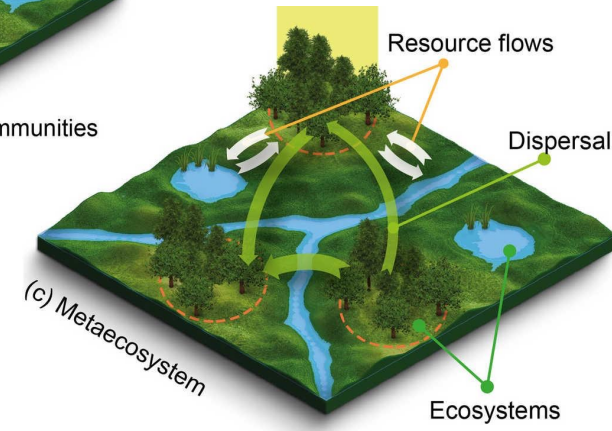
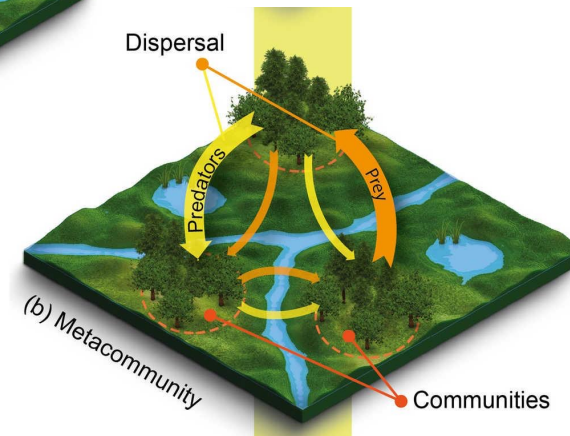
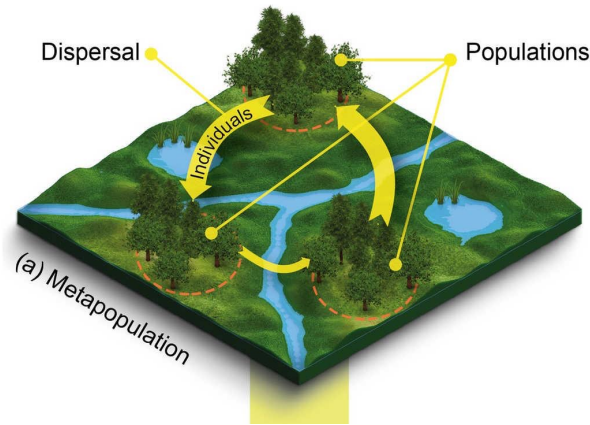


Introduction écologie spatiale

Comment étudier la complexité?

- structure spatiale: hiérarchie et hétérogénéité
- processus écologiques locaux
- Dispersion limitée: connectivité
- Modèle simples => prédictions génériques

Approche « méta-écologie »



complexité
progressivement intégrée

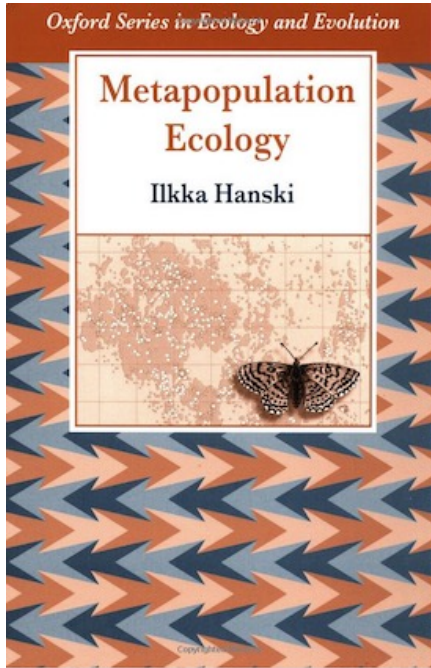
Introduction écologie spatiale

Comment étudier la complexité?

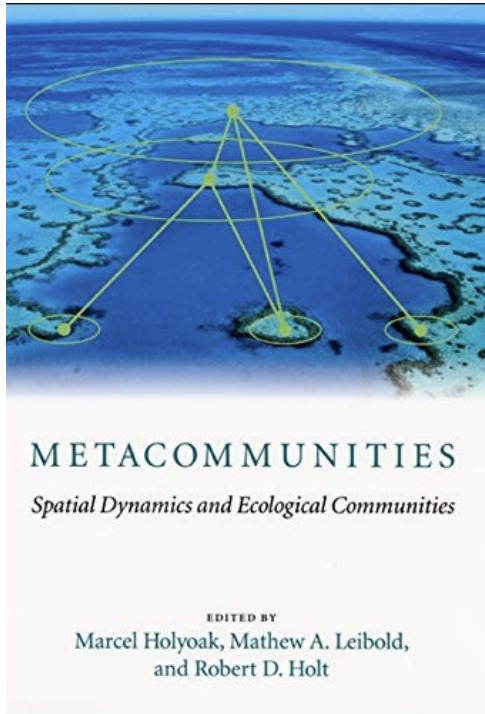
- le paysage vu par les espèces - discrétisation
- Dispersion limitée
- Dynamique de colonisation-extinction
- Comment la connectivité influence la persistance?



Introduction écologie spatiale



I.Hanski



R.Holt

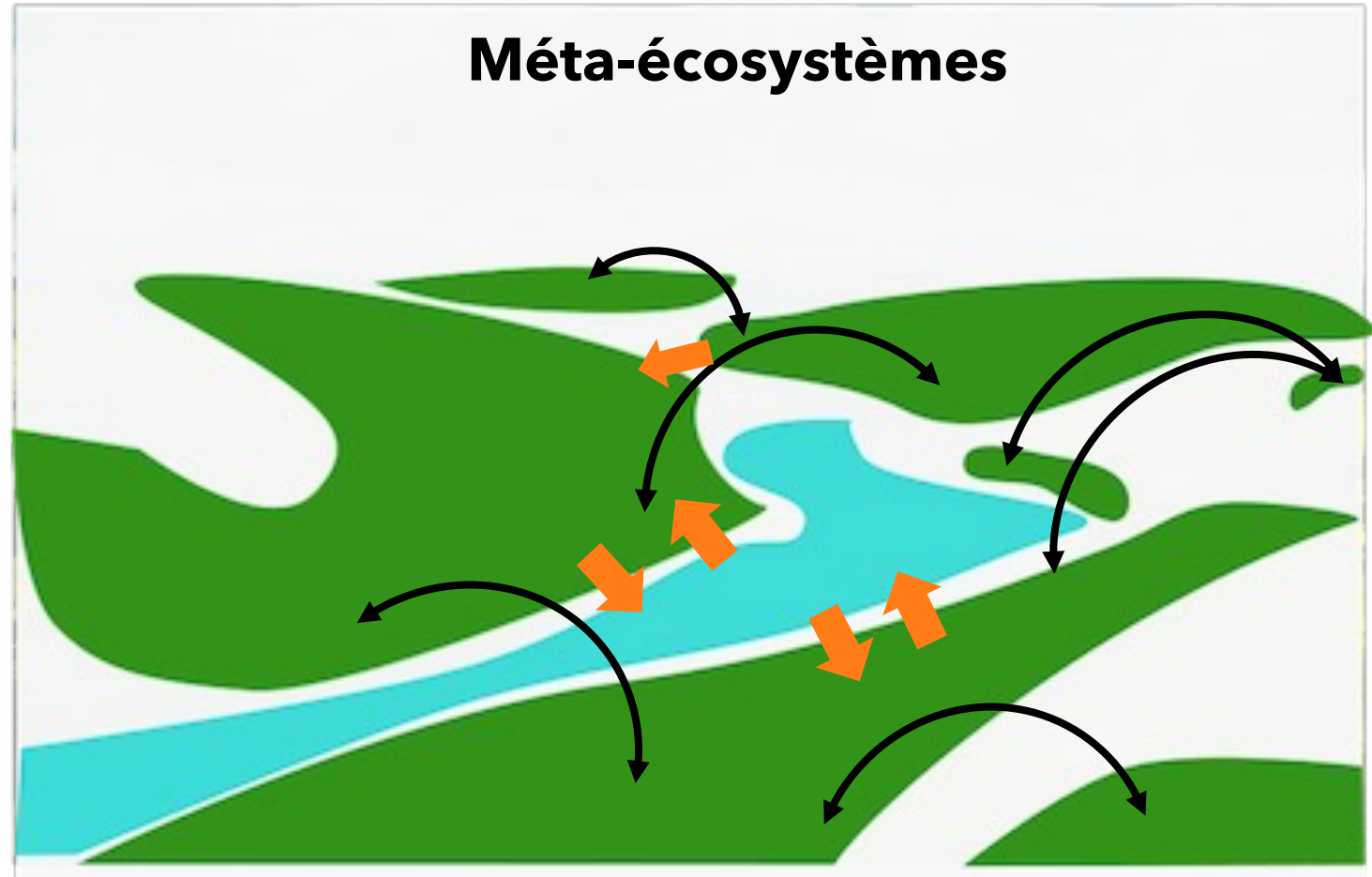


M. Leibold

Introduction écologie spatiale

Comment étudier la complexité?

- Interaction communautés
- cycle des nutriments
- Comment les flux spatiaux de ressources influencent-ils le fonctionnement des communautés et des écosystèmes?



Introduction écologie spatiale

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

Michel Loreau^{1*}, Nicolas
Mouquet^{2,4} and Robert D. Holt³



M. Loreau



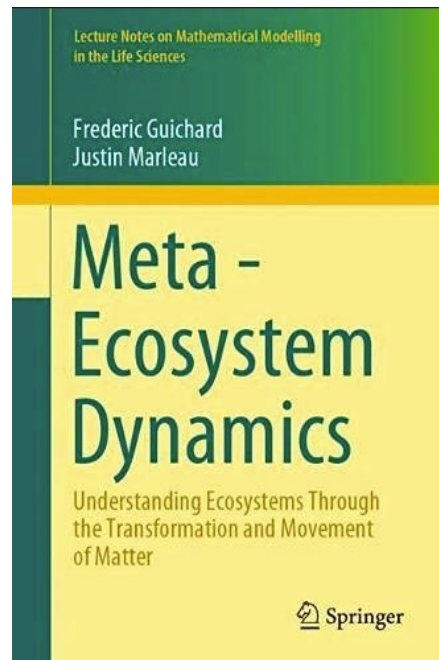
R.Holt

Abstract

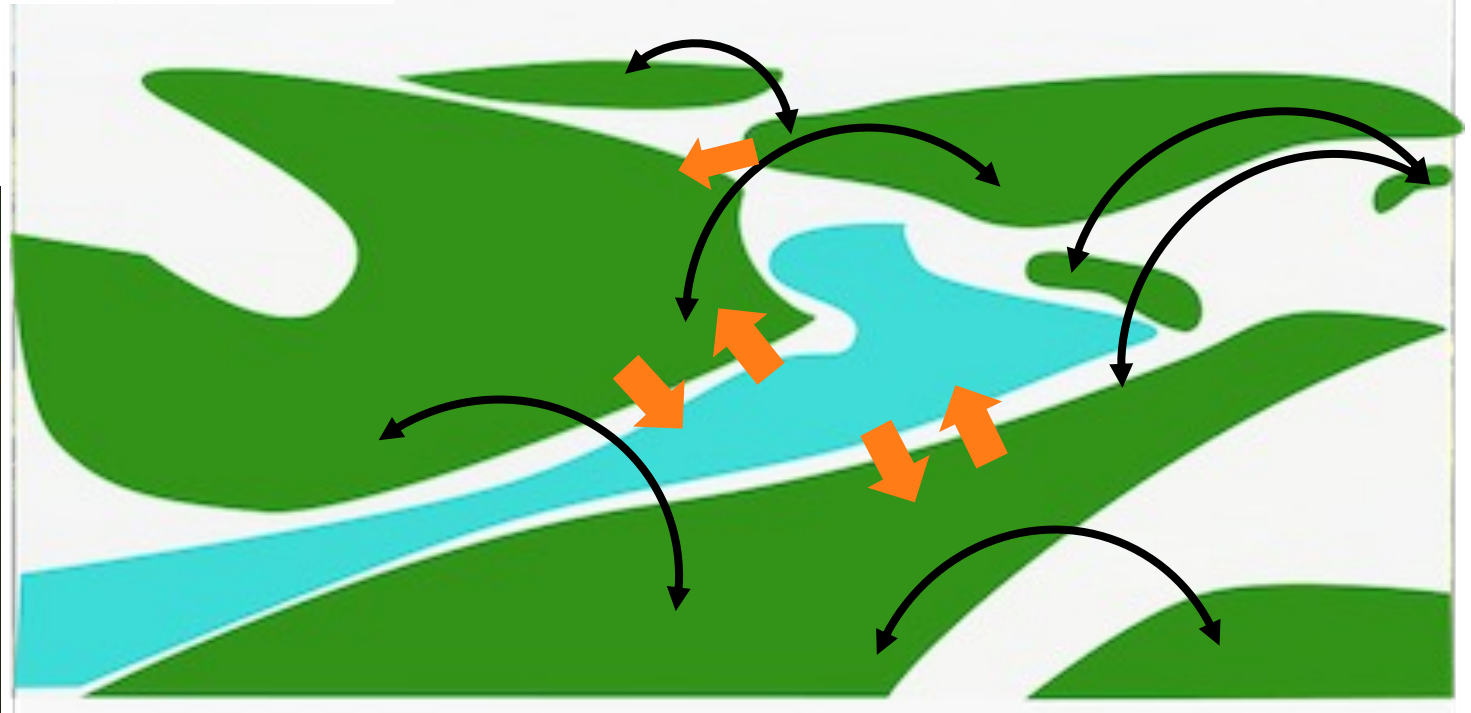
This contribution proposes the meta-ecosystem concept as a natural extension of the metapopulation and metacommunity concepts. A meta-ecosystem is defined as a set of



F. Guichard

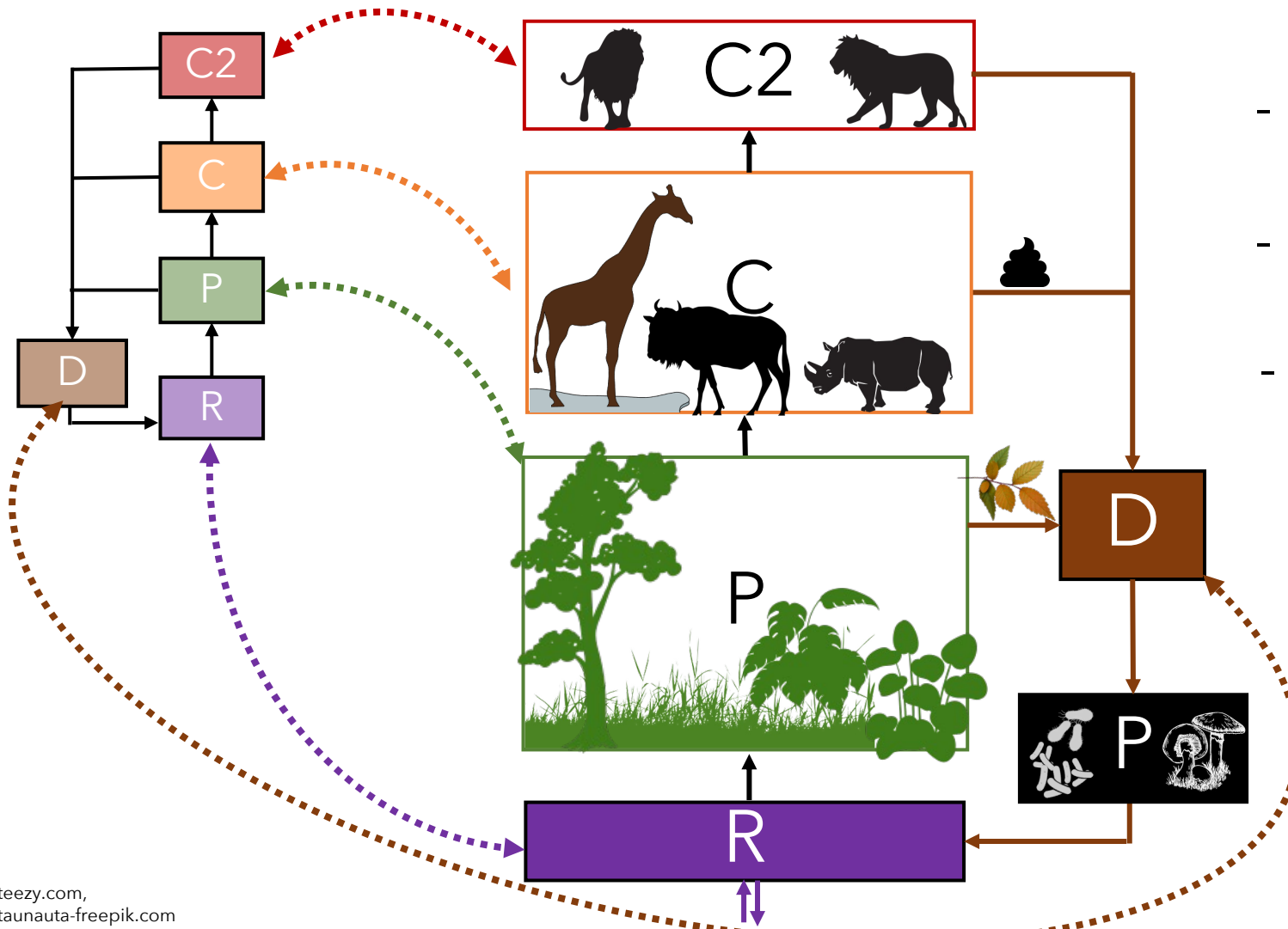


Méta-écosystèmes



Introduction écologie spatiale

Méta-écosystèmes: importance de la dynamique des nutriments



- Ressources variables
- Rétroaction via le recyclage
- Transferts de matière allochtone

=> effets "bottom-up"

- productivité
- stabilité
- structure des communauté

Introduction écologie spatiale

Méta-écosystèmes: importance de la dynamique des nutriments

Flux de ressources

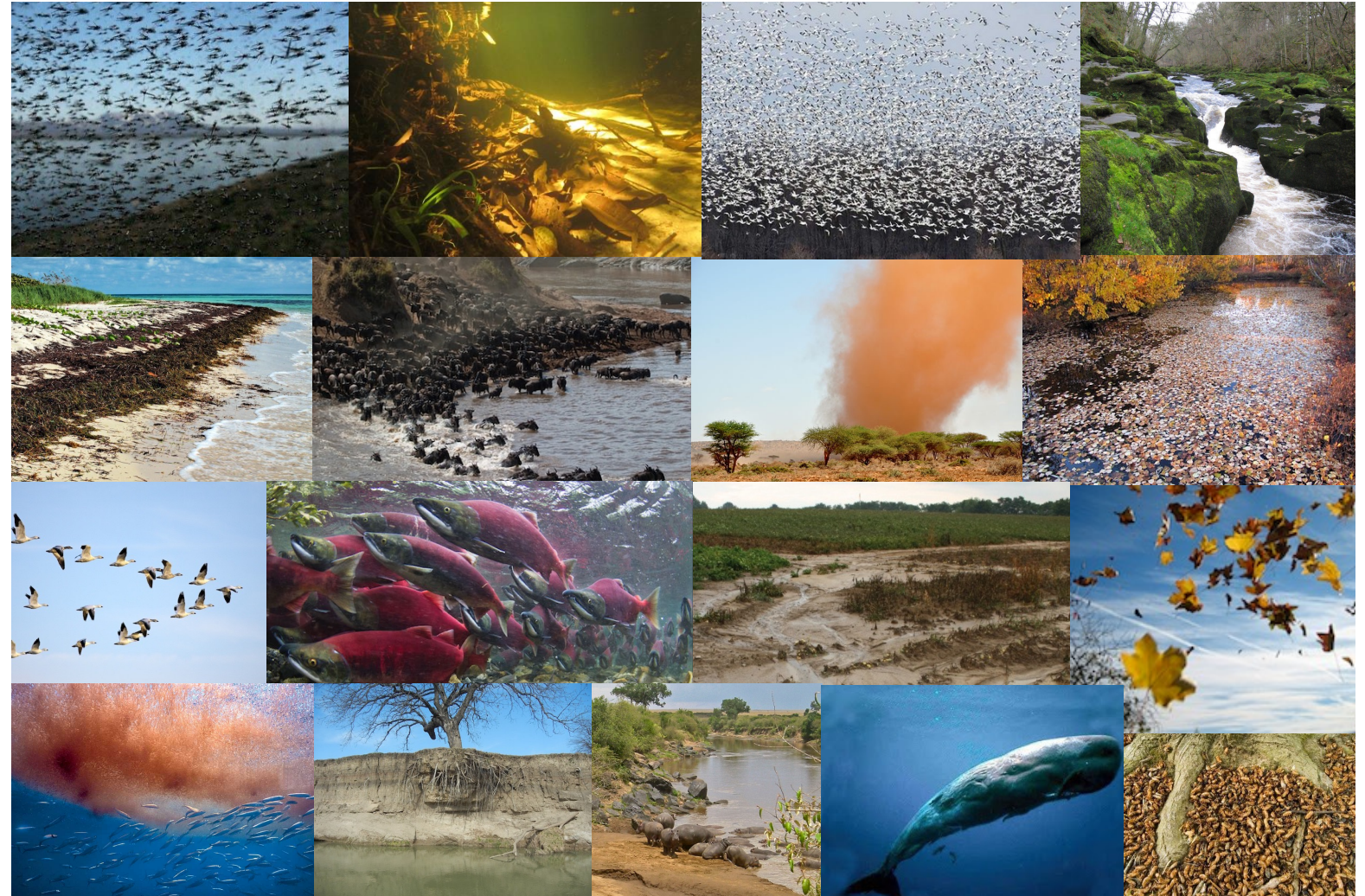
Abiotiques « passifs »

- courants, lessivage
- vents
- érosion

Biotiques « actifs »

- recherche de nourriture
- migration

≠ dispersion



Méta-écosystèmes et changements globaux

Méta-écosystèmes

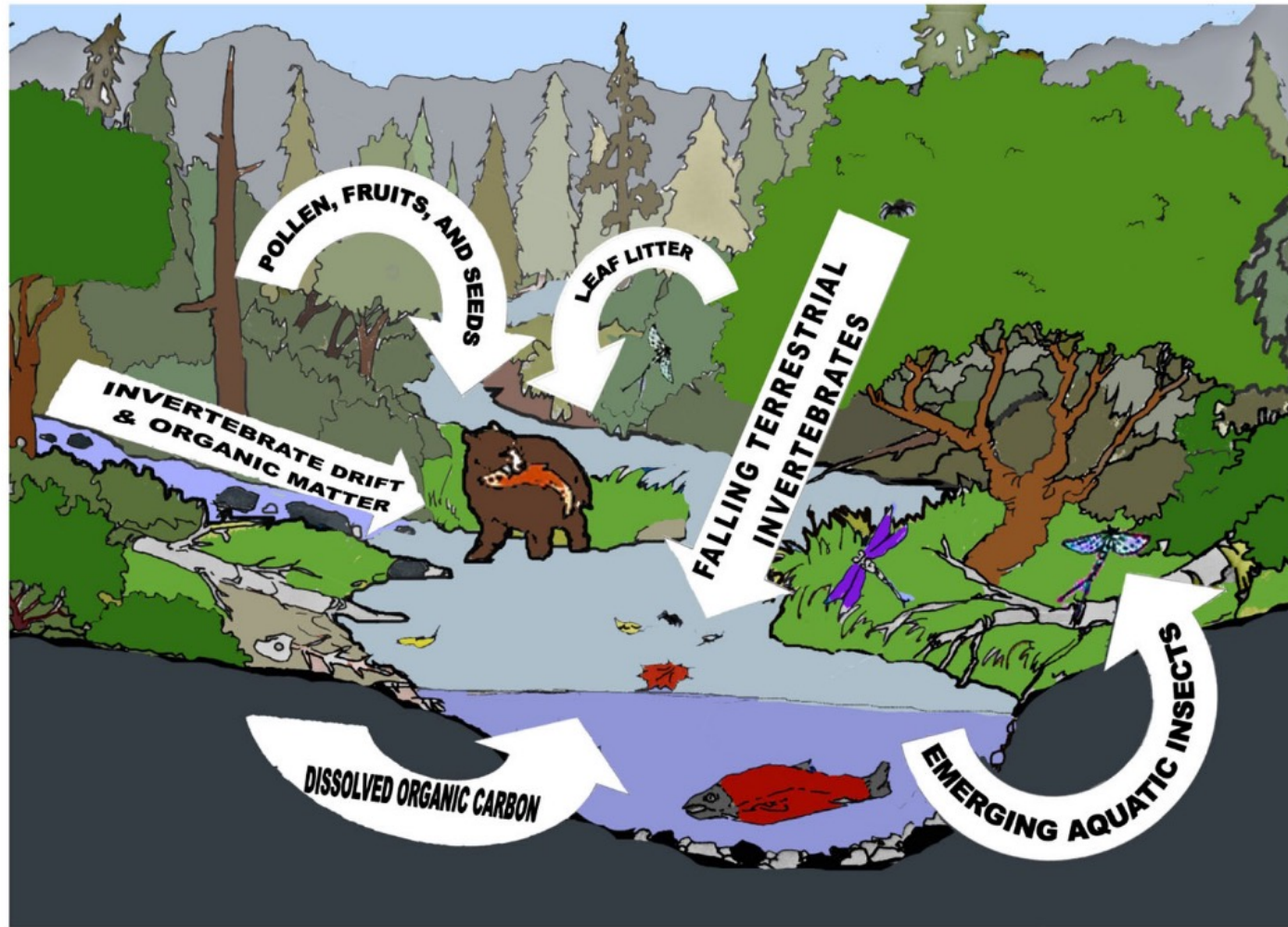
- Deux cas emblématiques d'écosystèmes « subventionnés »
- Quelques résultats théoriques généraux
- Importance quantitative et qualitative des flux de ressources
- Propriétés et effets de flux spatiaux

Changement globaux et flux spatiaux de ressources

- Des équilibres fragiles sujets aux effets indirects
- Redistribution globale des nutriments
- Altération des flux "remontants"
- Propagation des contaminants
- propagation longue distance de perturbations locales

Méta-écosystèmes

1. Cas emblématiques, écosystèmes d'eau douce

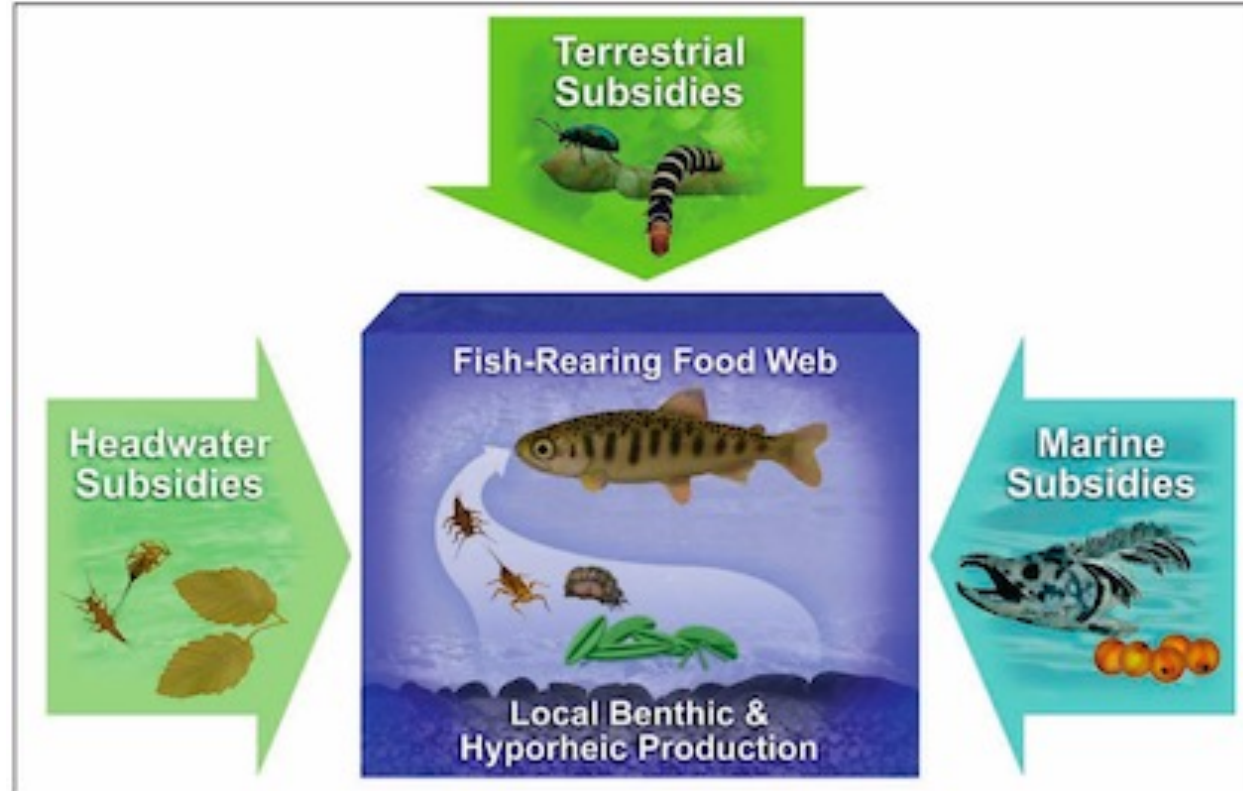


⇒ Importance des apports spatiaux de ressource reconnue depuis longtemps mais **dynamique spatiale intégrée depuis peu**

Méta-écosystèmes

1. Cas emblématiques, écosystèmes d'eau douce

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

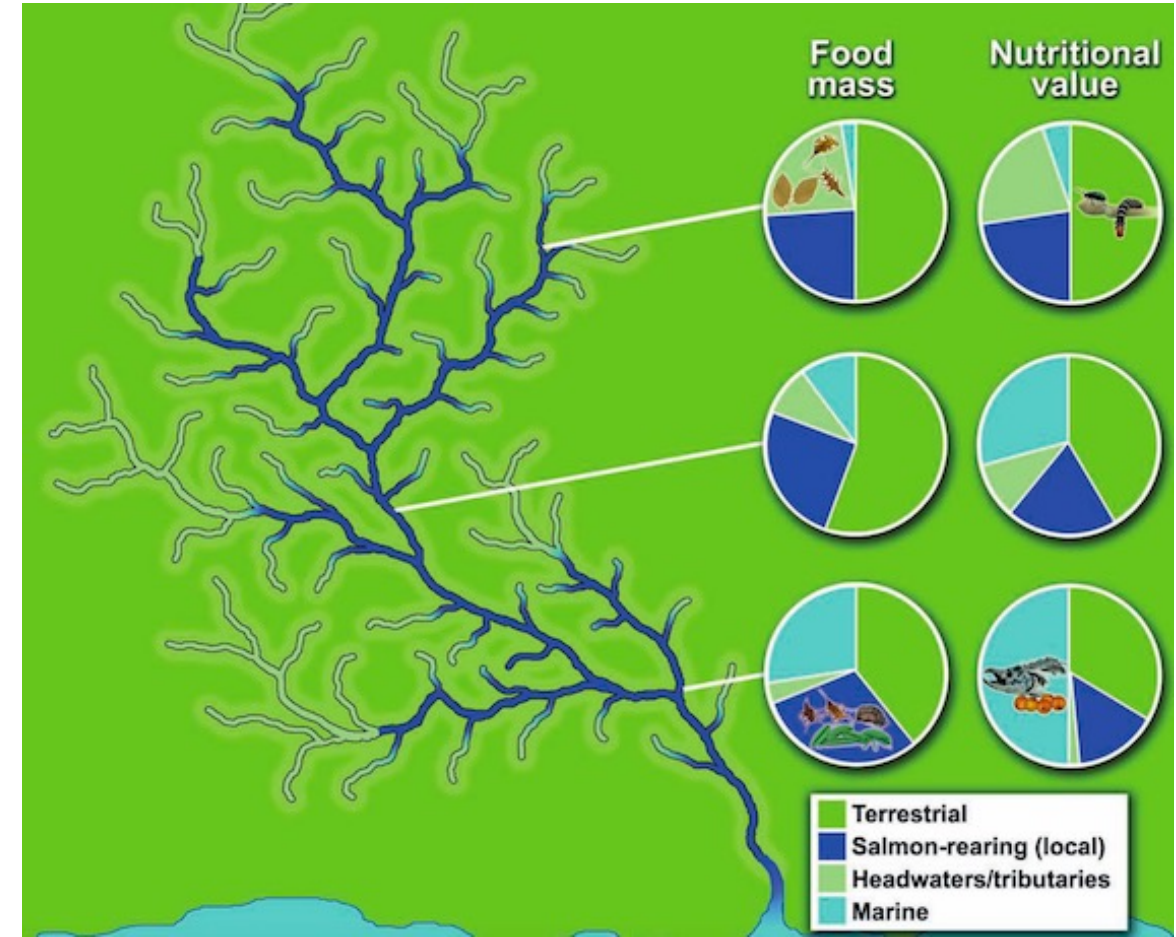
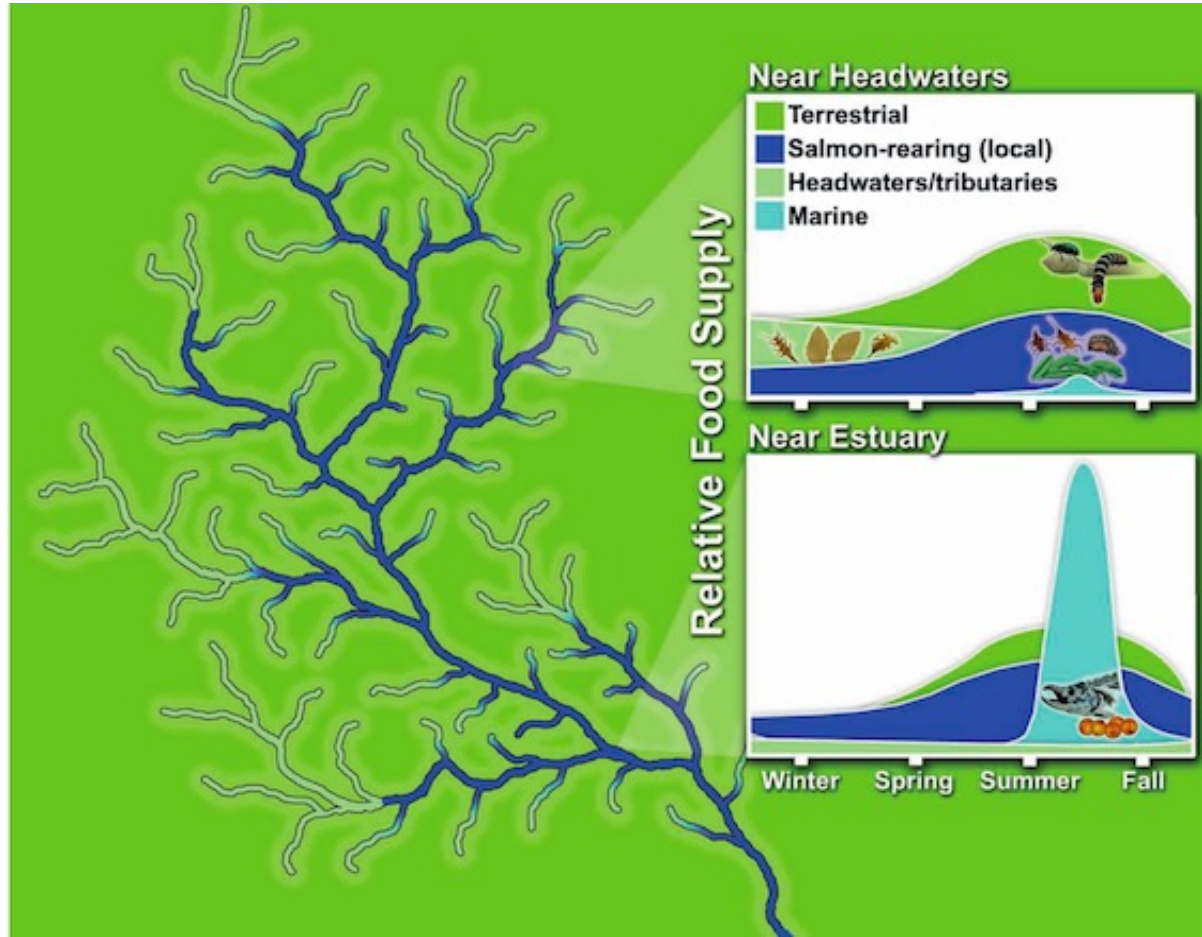


Wipfli and Baxter 2010, *Fisheries*

Méta-écosystèmes

1. Cas emblématiques, écosystèmes d'eau douce

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

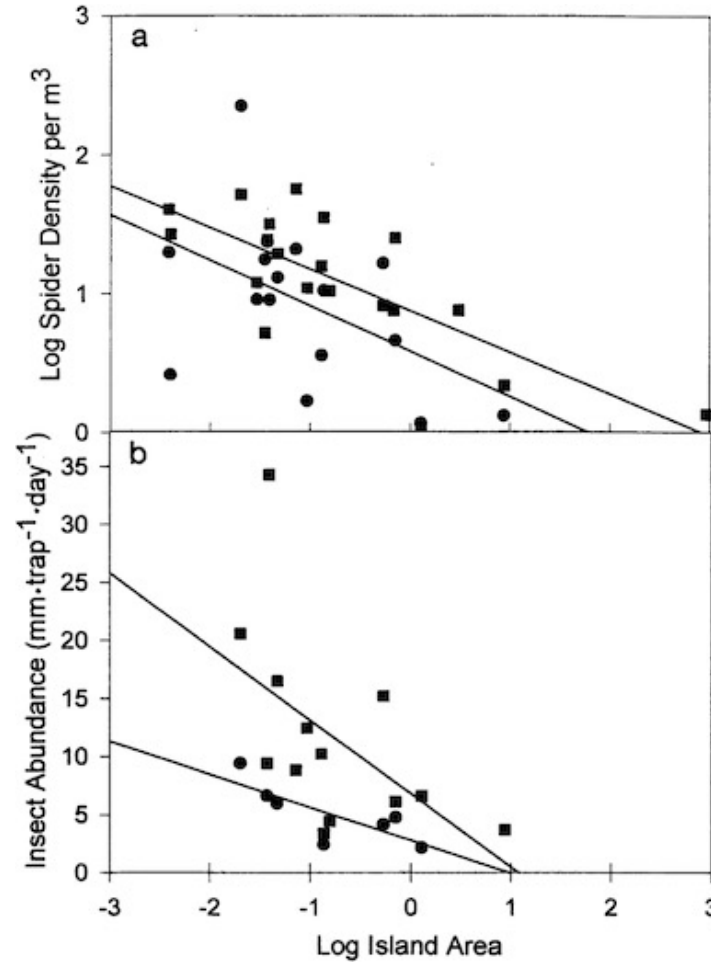


Wipfli and Baxter 2010, *Fisheries*

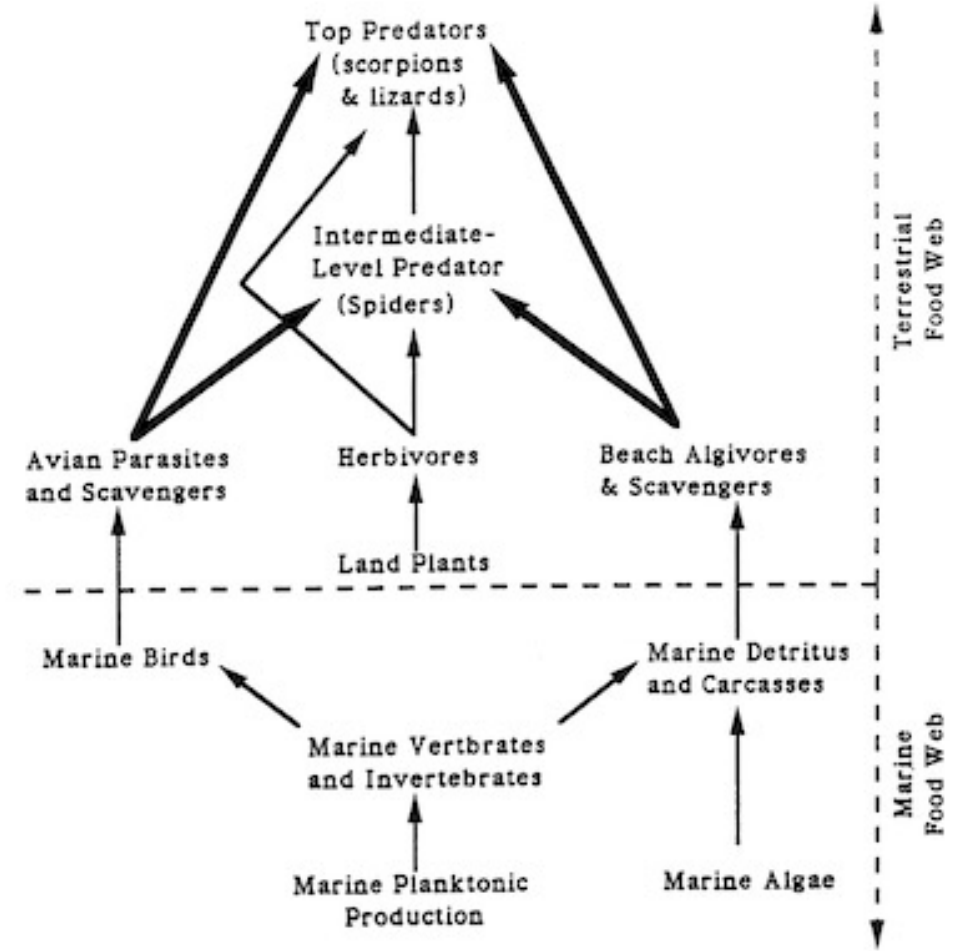
⇒ Dépend pour + de 50% d'autres écosystèmes, avec des variations saisonnières

Méta-écosystèmes

1. Cas emblématiques, îles désertiques



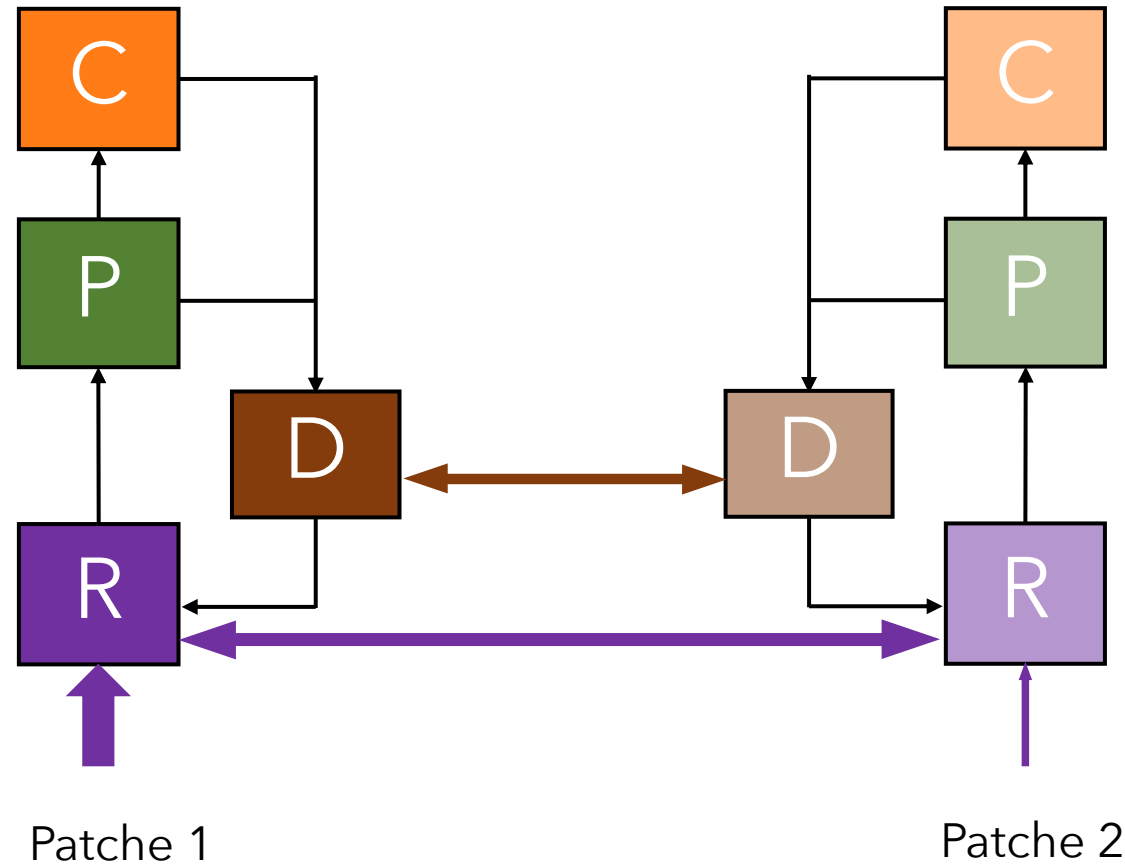
Polis and Hurd 1995, *PNAS*



Polis and Hurd 1996, *The American Naturalist*

⇒ des communautés qui n'existeraient pas autrement

Modèle simple à deux patches



$$\frac{dR_x}{dt} = I_x - eR_x - f_{Px}(R_x, P_x) + r(1 - e_D)D_x + \Delta_{R_x}$$

$$\frac{dP_x}{dt} = f_{Px}(R_x, P_x) - m_p P_x - f_{Hx}(P_x, H_x)$$

$$\frac{dH_x}{dt} = f_{Hx}(P_x, H_x) - m_h H_x$$

$$\frac{dD_x}{dt} = m_p P_x + m_h H_x - rD_x + \Delta_{D_x}$$

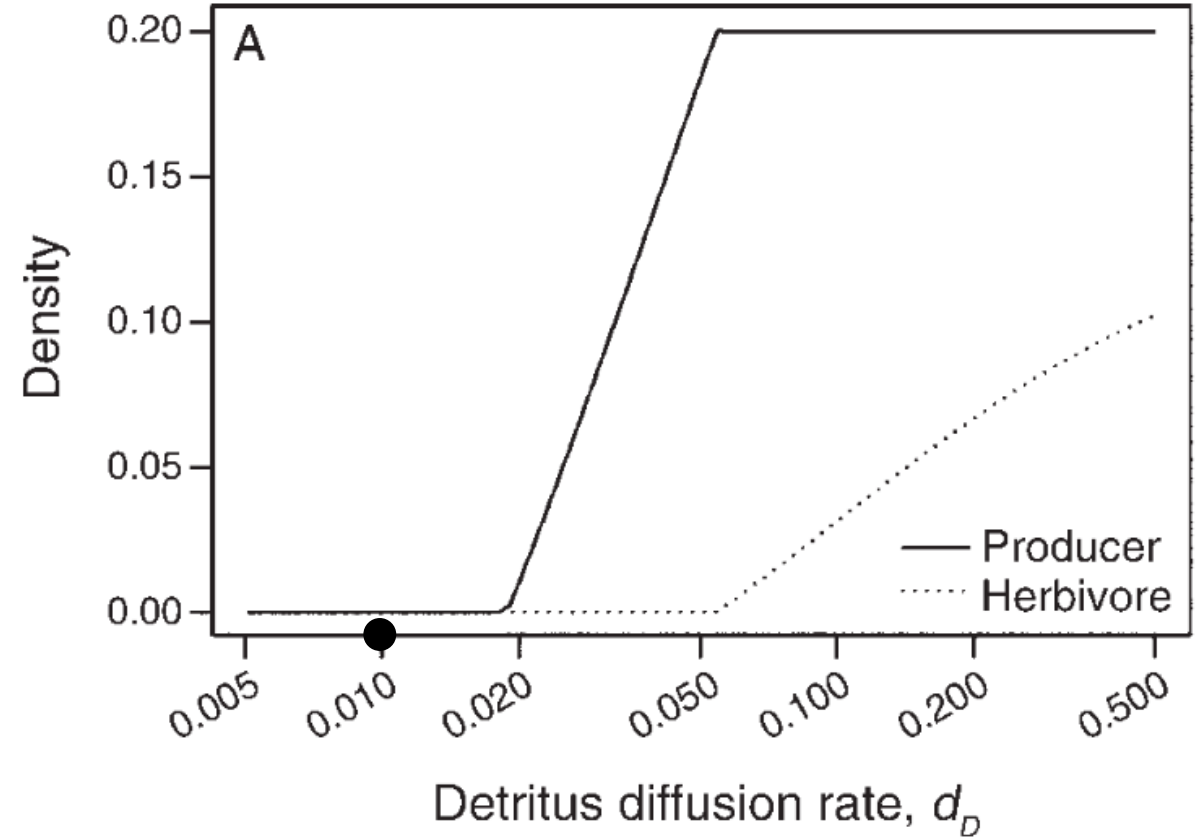
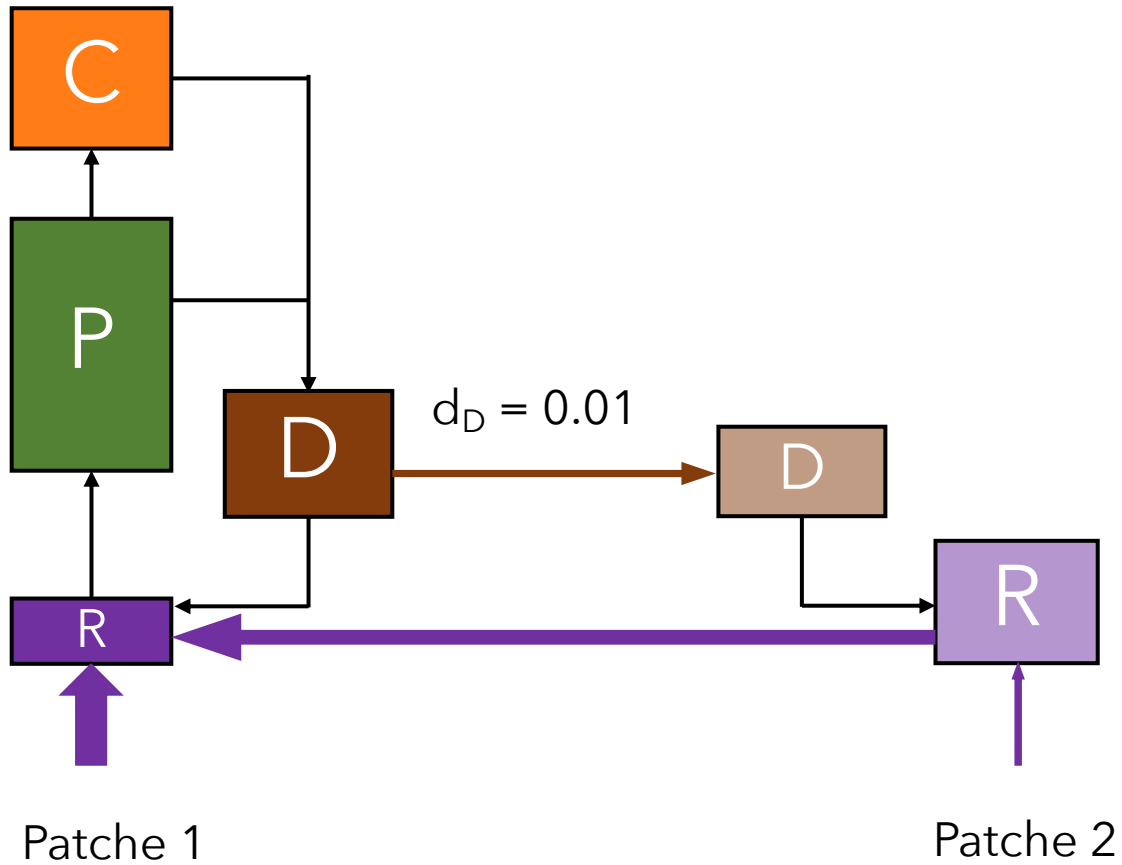
Diffusion

$$\Delta_{R_1} = d_R(R_2 - R_1)$$

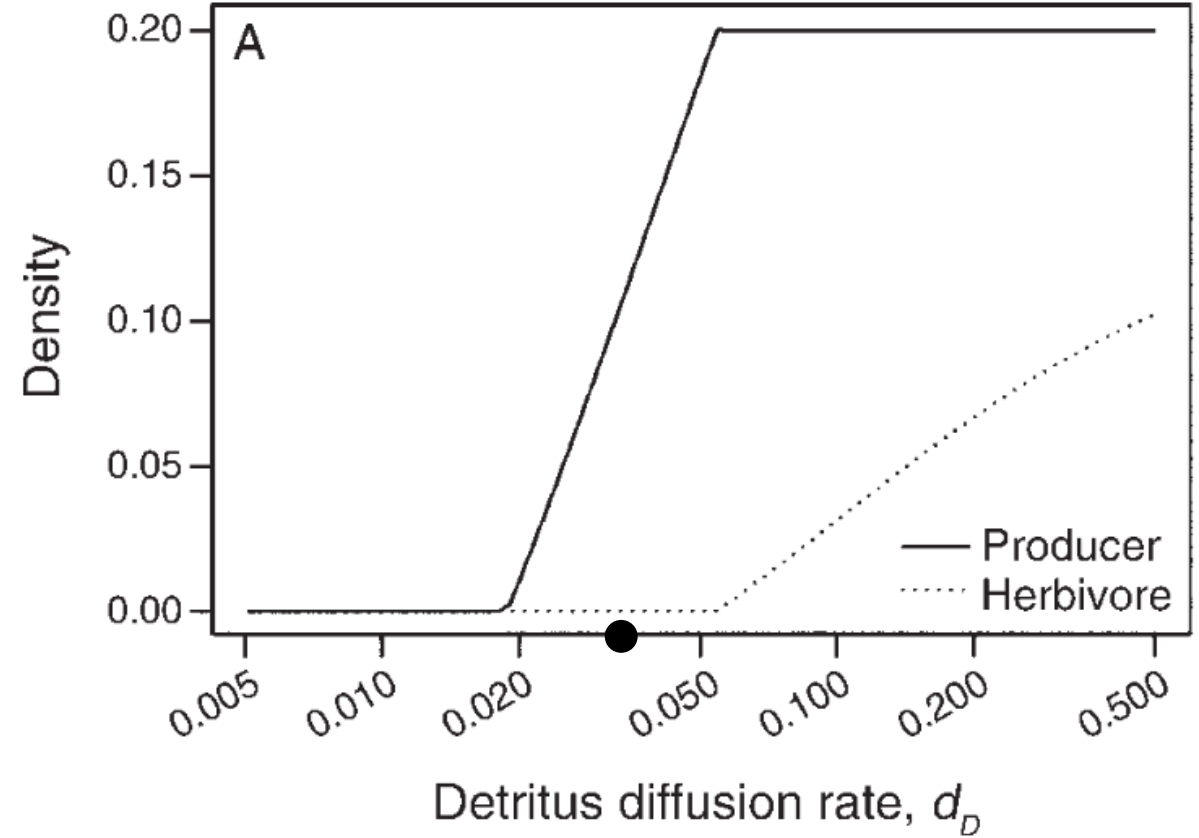
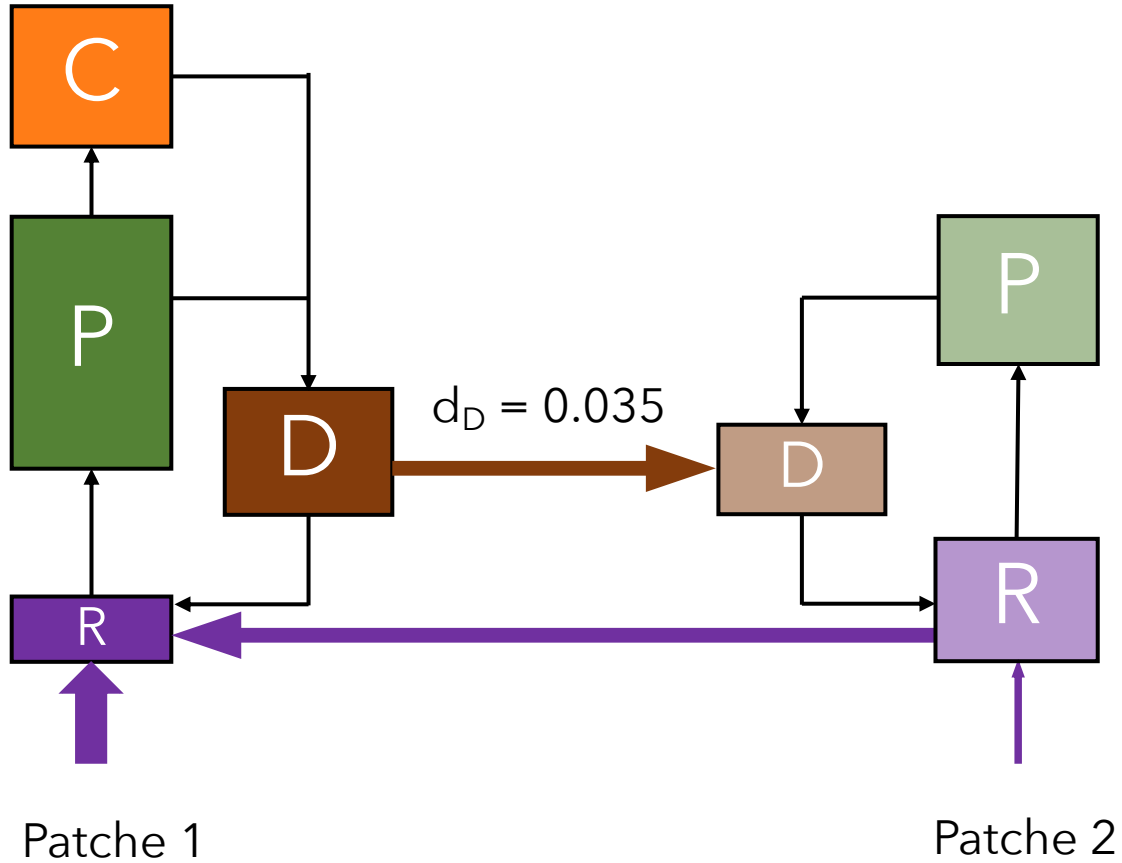
Gravel et al. 2010, *Ecology*

Méta-écosystèmes

2. Résultats théoriques généraux - persistance



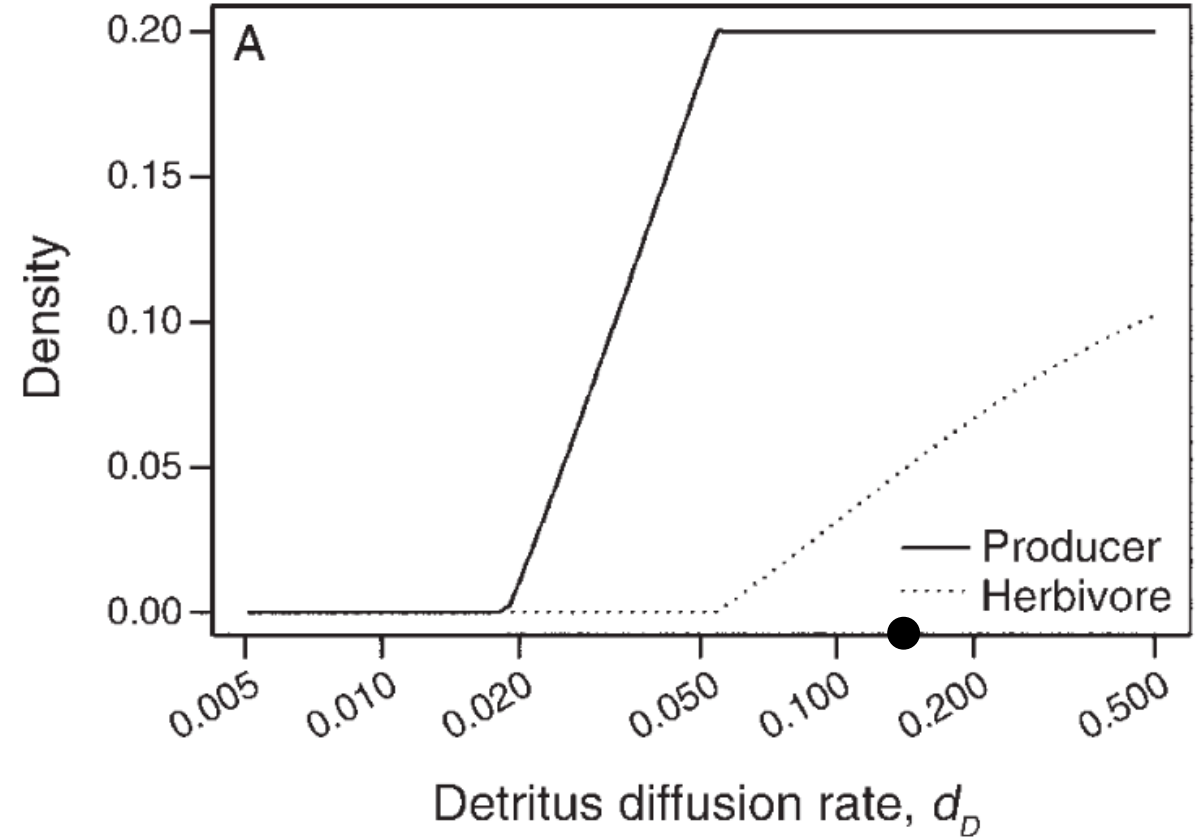
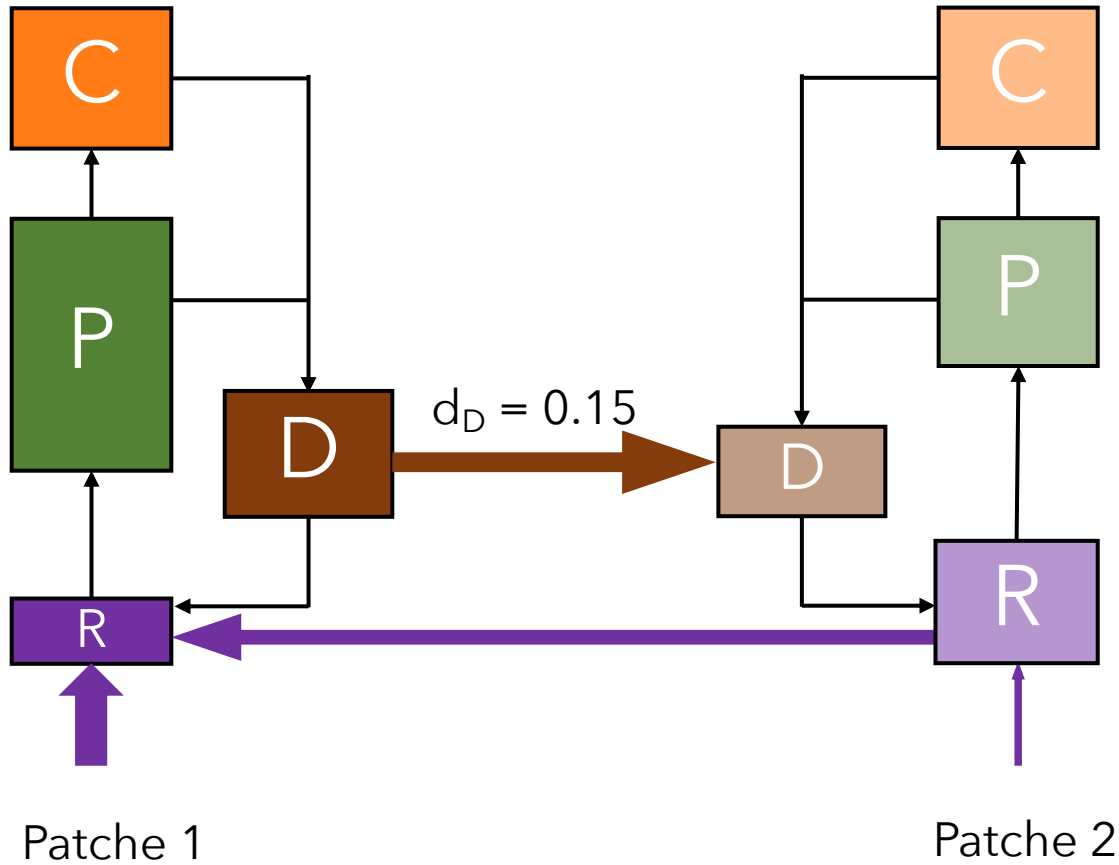
Gravel et al. 2010, *Ecology*



Gravel et al. 2010, *Ecology*

Méta-écosystèmes

2. Résultats théoriques généraux - persistance



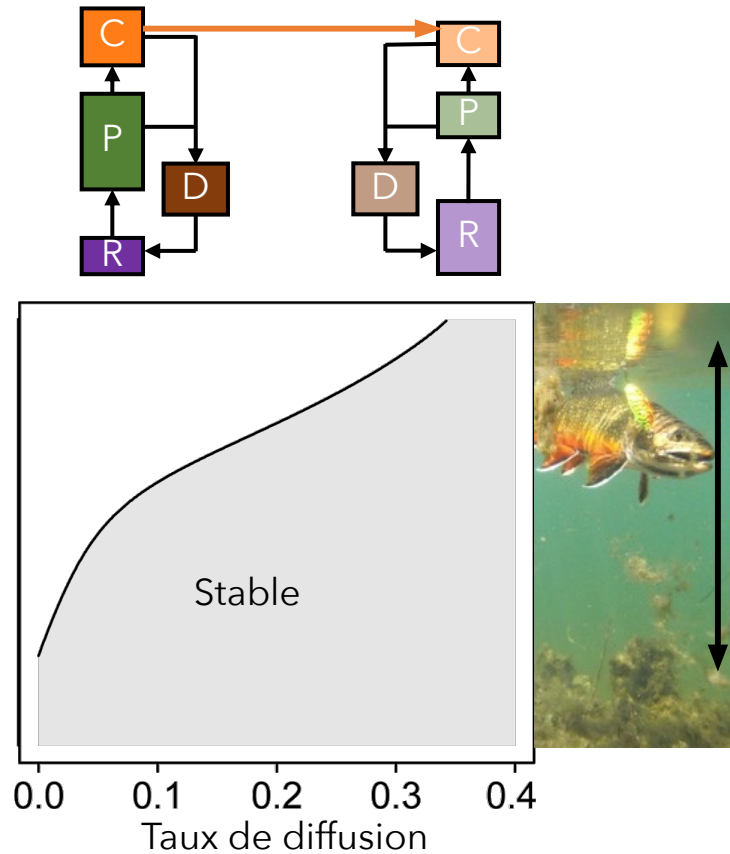
Gravel et al. 2010, *Ecology*

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

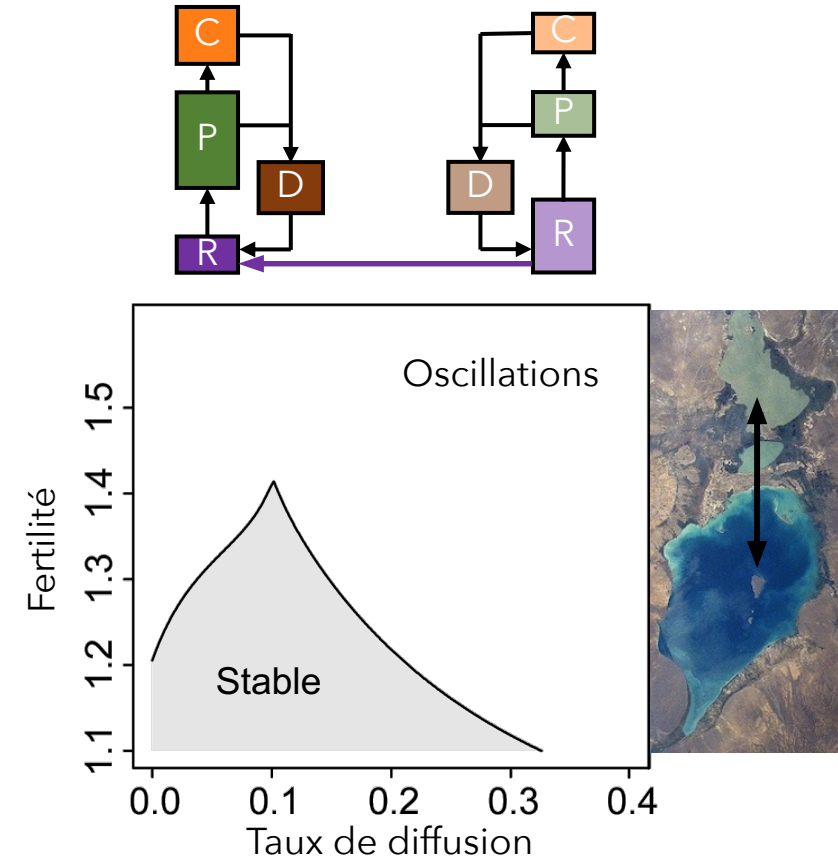
Méta-écosystèmes

2. Résultats théoriques généraux - stabilité

Flux de consommateurs



Flux de nutriments



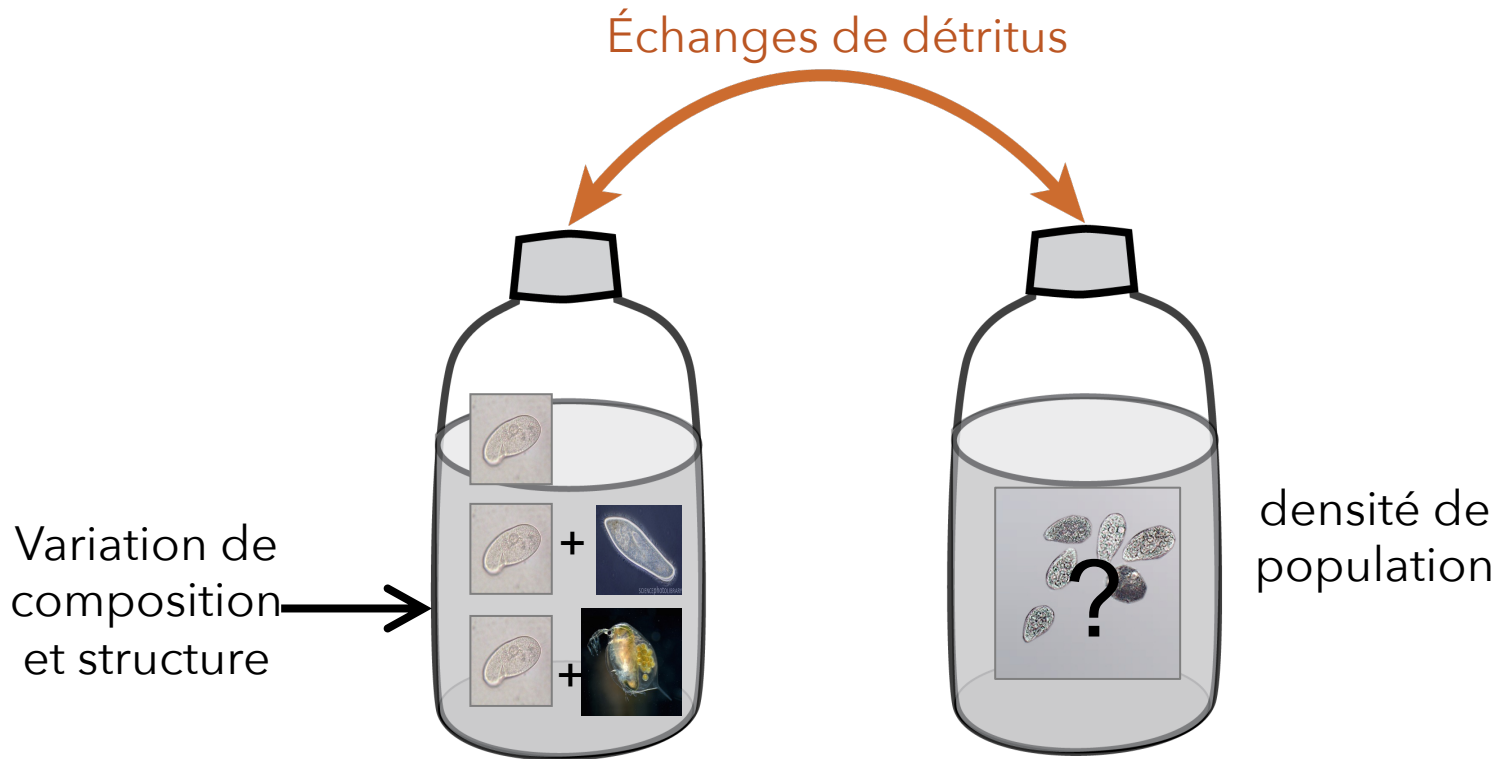
- ⇒ Les flux de ressources peuvent être déstabilisants
- ⇒ Les flux de consommateurs peuvent être stabilisants

Gounand et al. 2014
The American Naturalist

Méta-écosystèmes

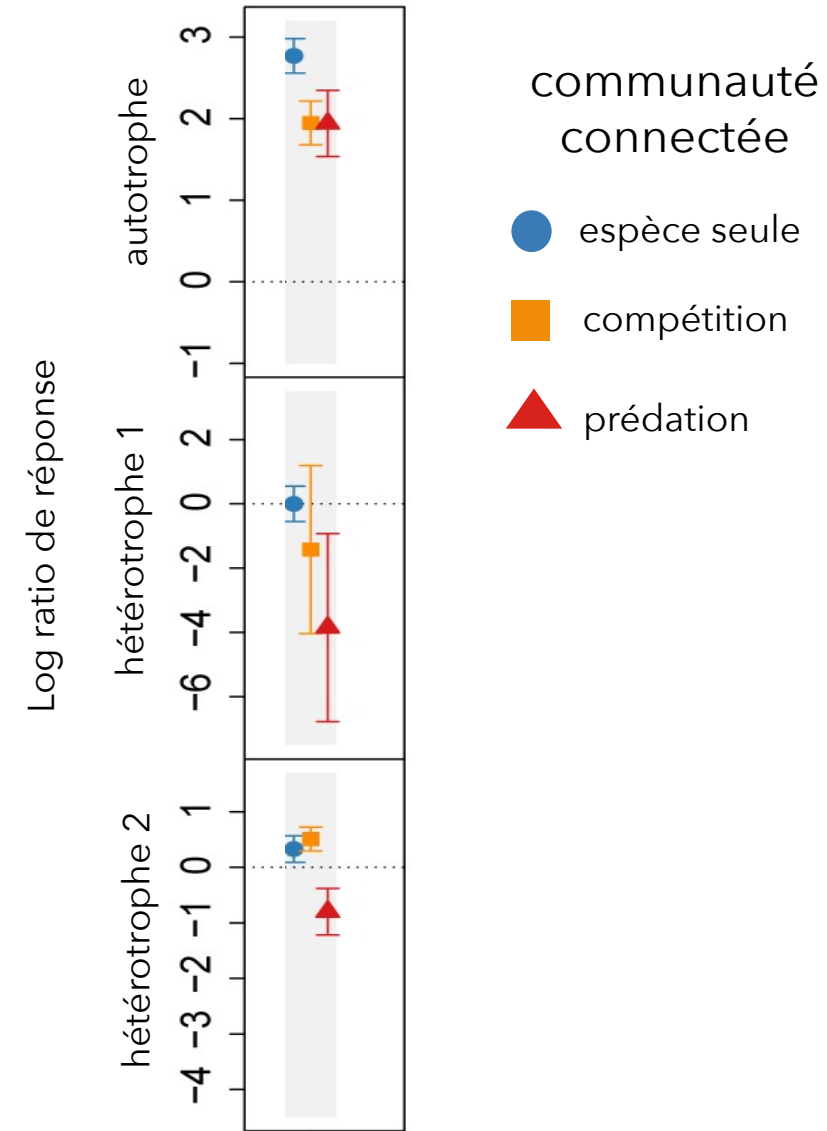
2. Résultats théoriques généraux - communautés

Expérience en laboratoire en milieu contrôlé

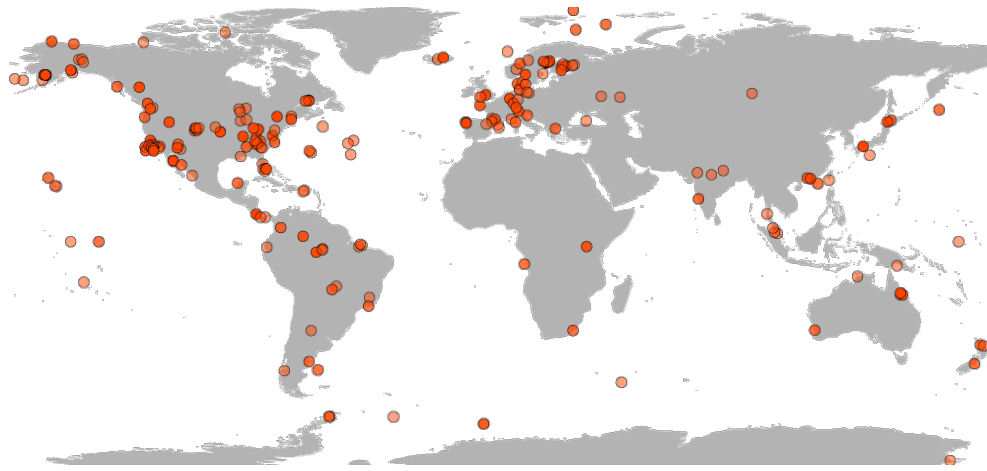


Gounand et al. 2017, *Oikos*

- ⇒ La qualité des flux de ressource est importante
- ⇒ Une communauté peut influencer une autre via les flux de ressource



Données empiriques



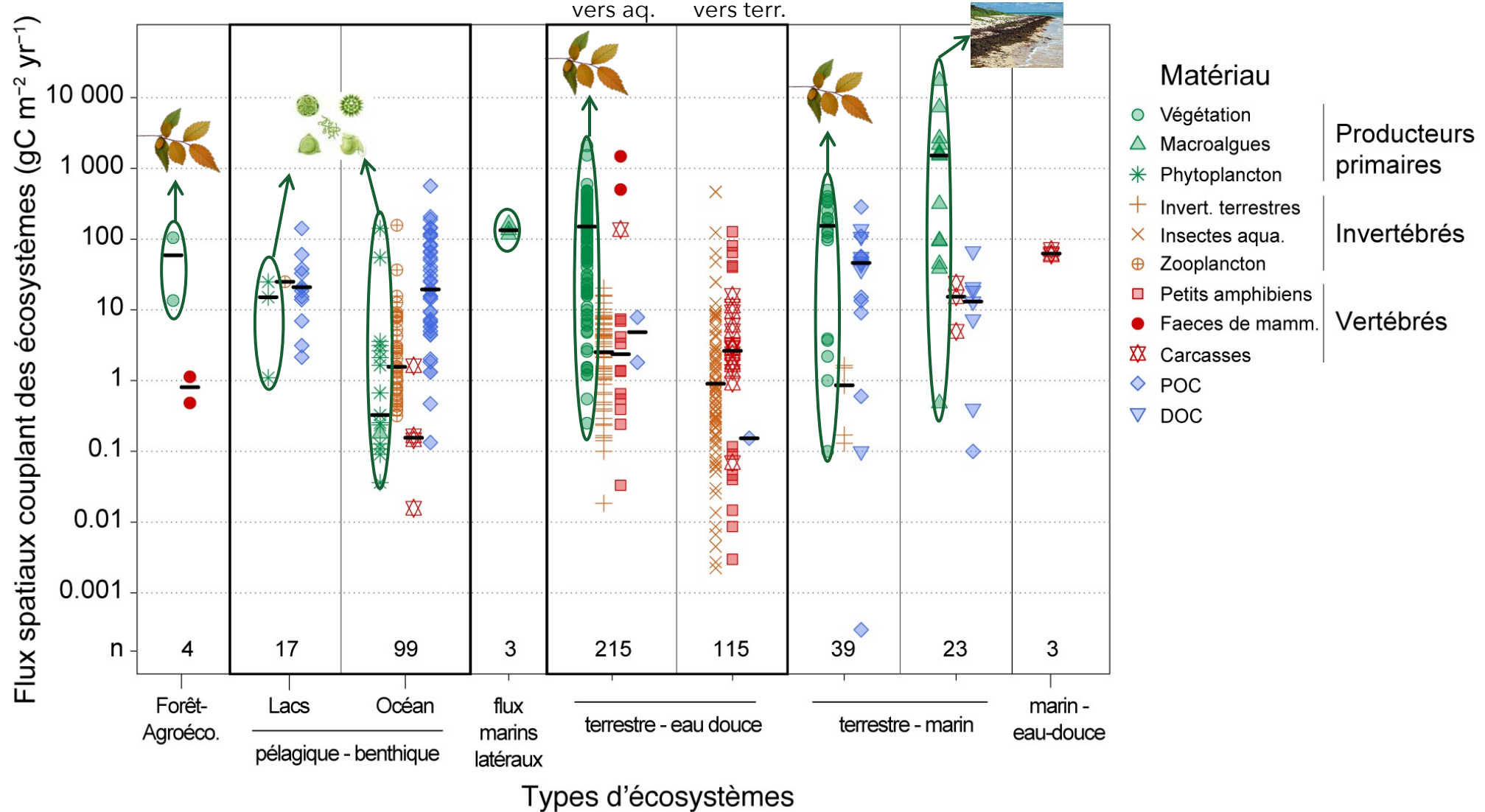
Flux de carbone (n=518)
+ Flux locaux (n=2516)

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



Méta-écosystèmes

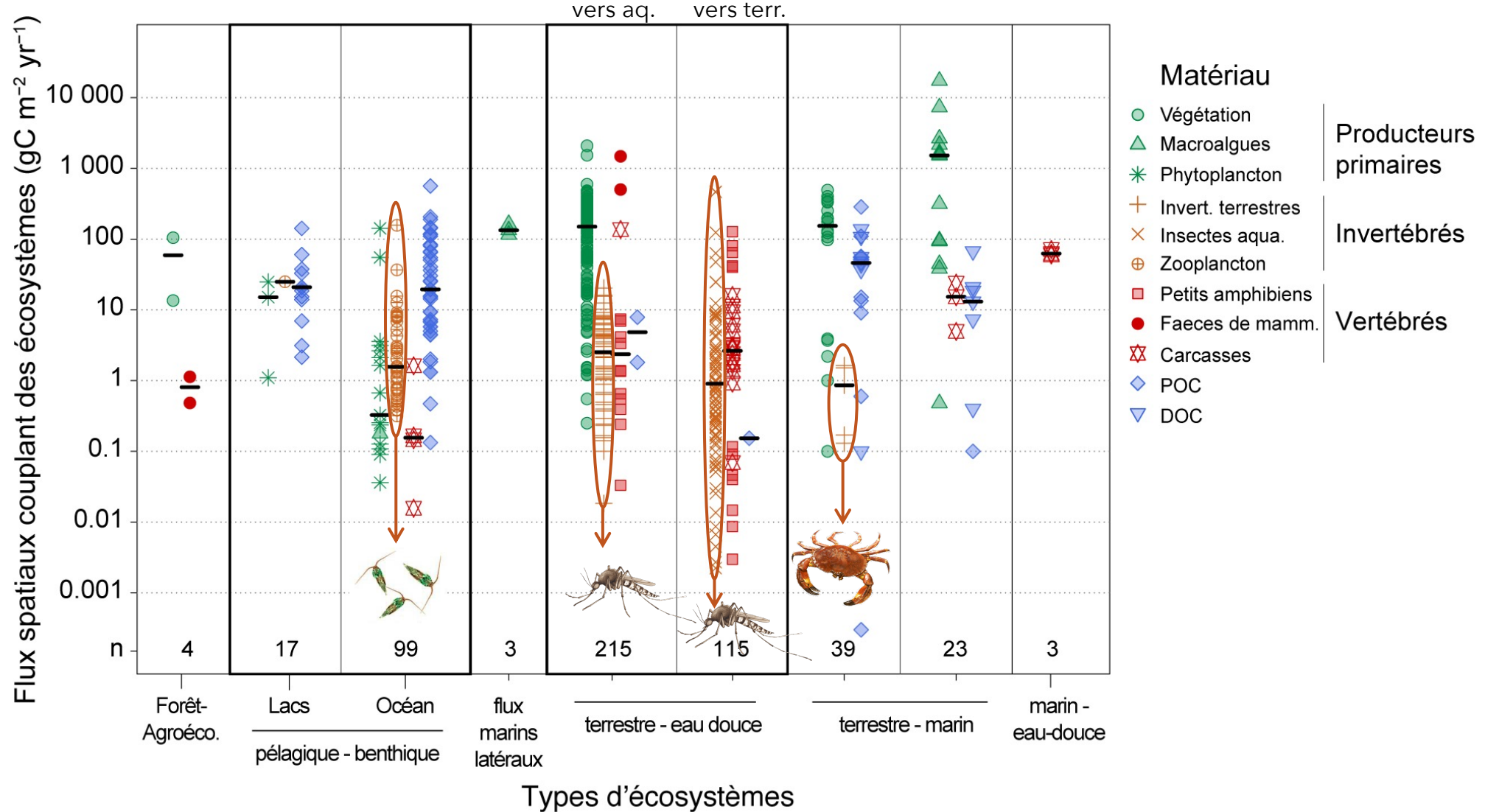
3. Importance quantitative des flux (C)



⇒ 8 ordres de grandeur

Méta-écosystèmes

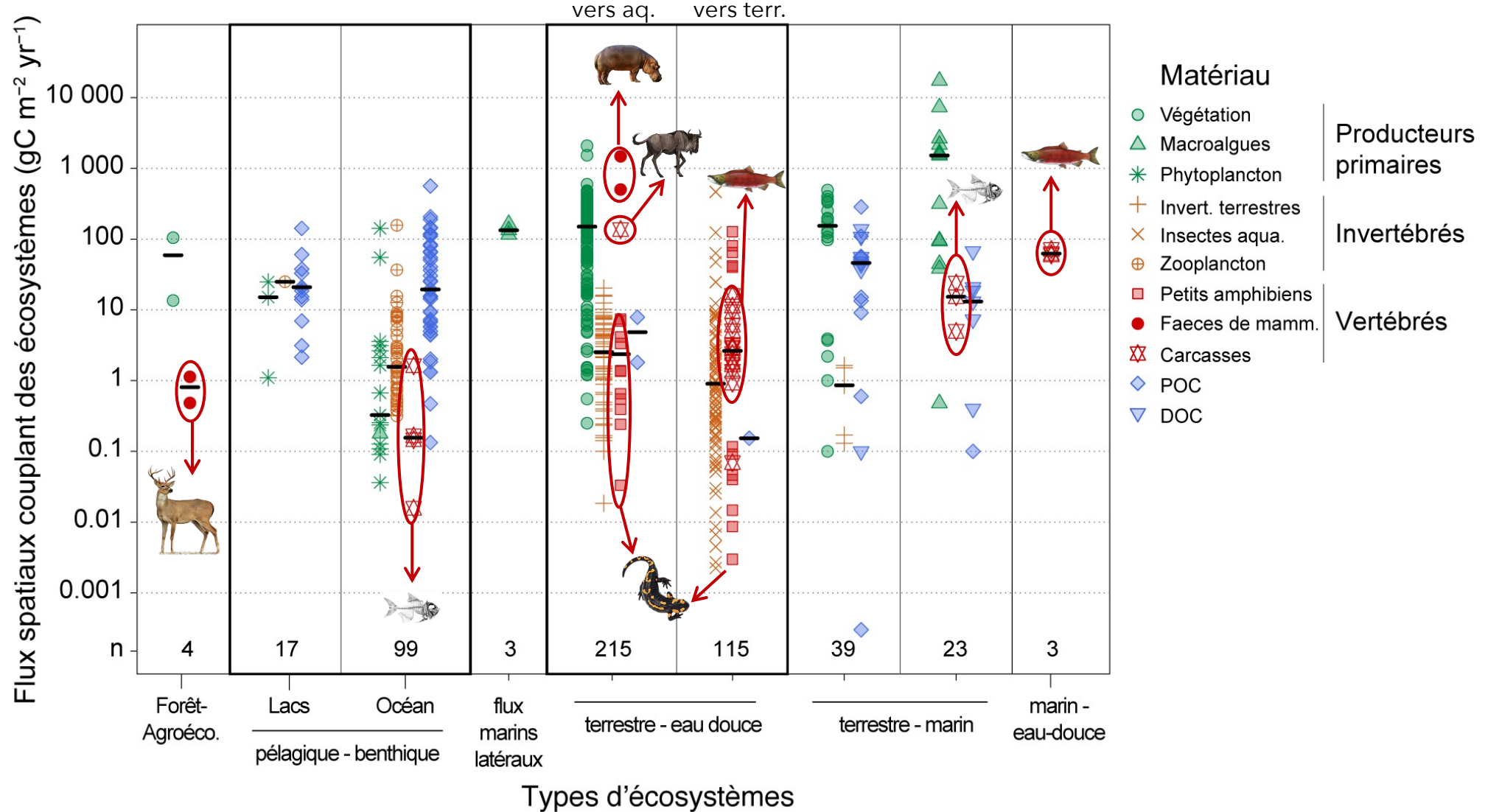
3. Importance quantitative des flux (C)



⇒ 8 ordres de grandeur

Méta-écosystèmes

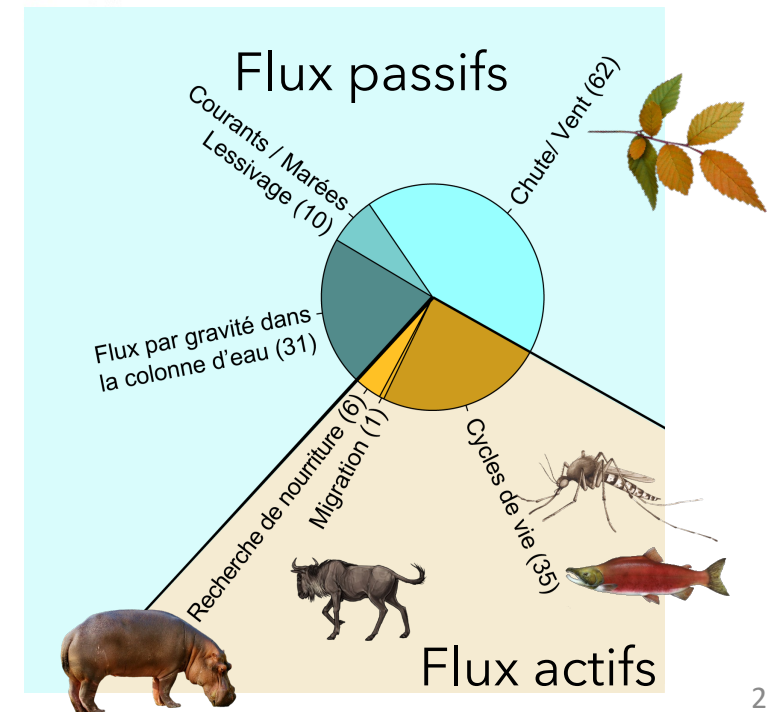
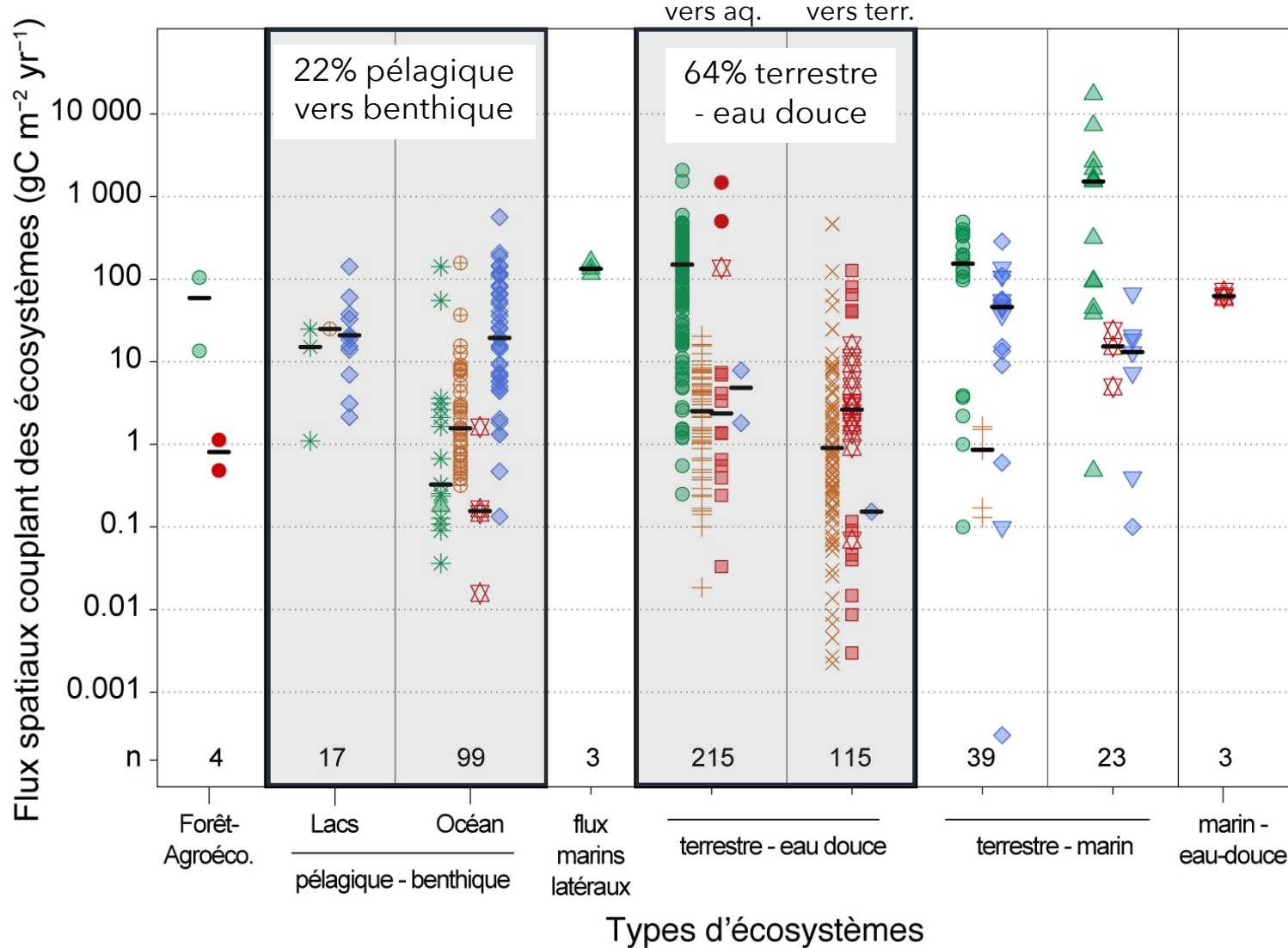
3. Importance quantitative des flux (C)



⇒ 8 ordres de grandeur

Méta-écosystèmes

3. Importance quantitative des flux (C)



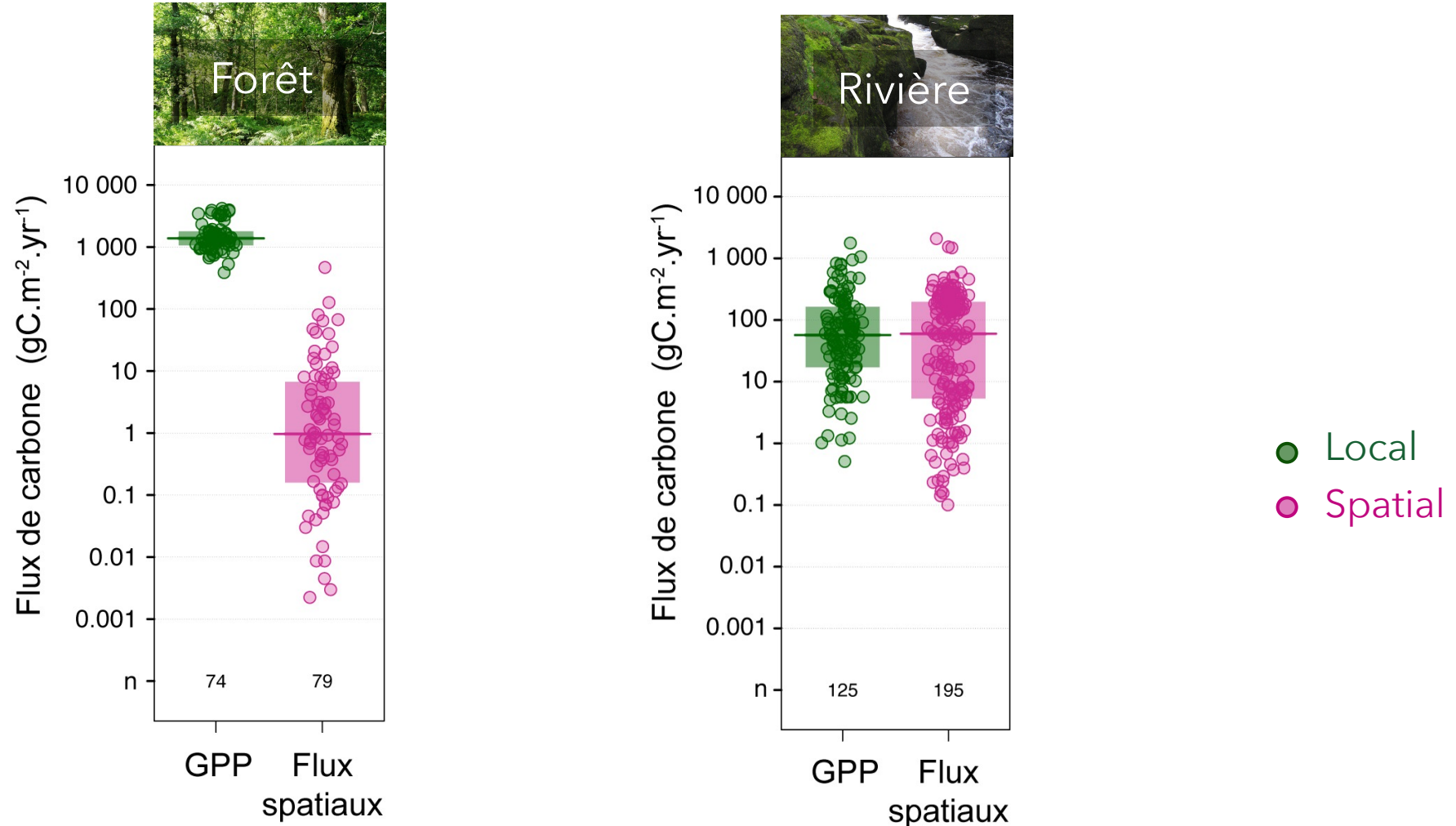
=> Biais dans la documentation des flux

Méta-écosystèmes

3. Importance quantitative des flux (C)

Terrestre

Comparaison avec les flux locaux



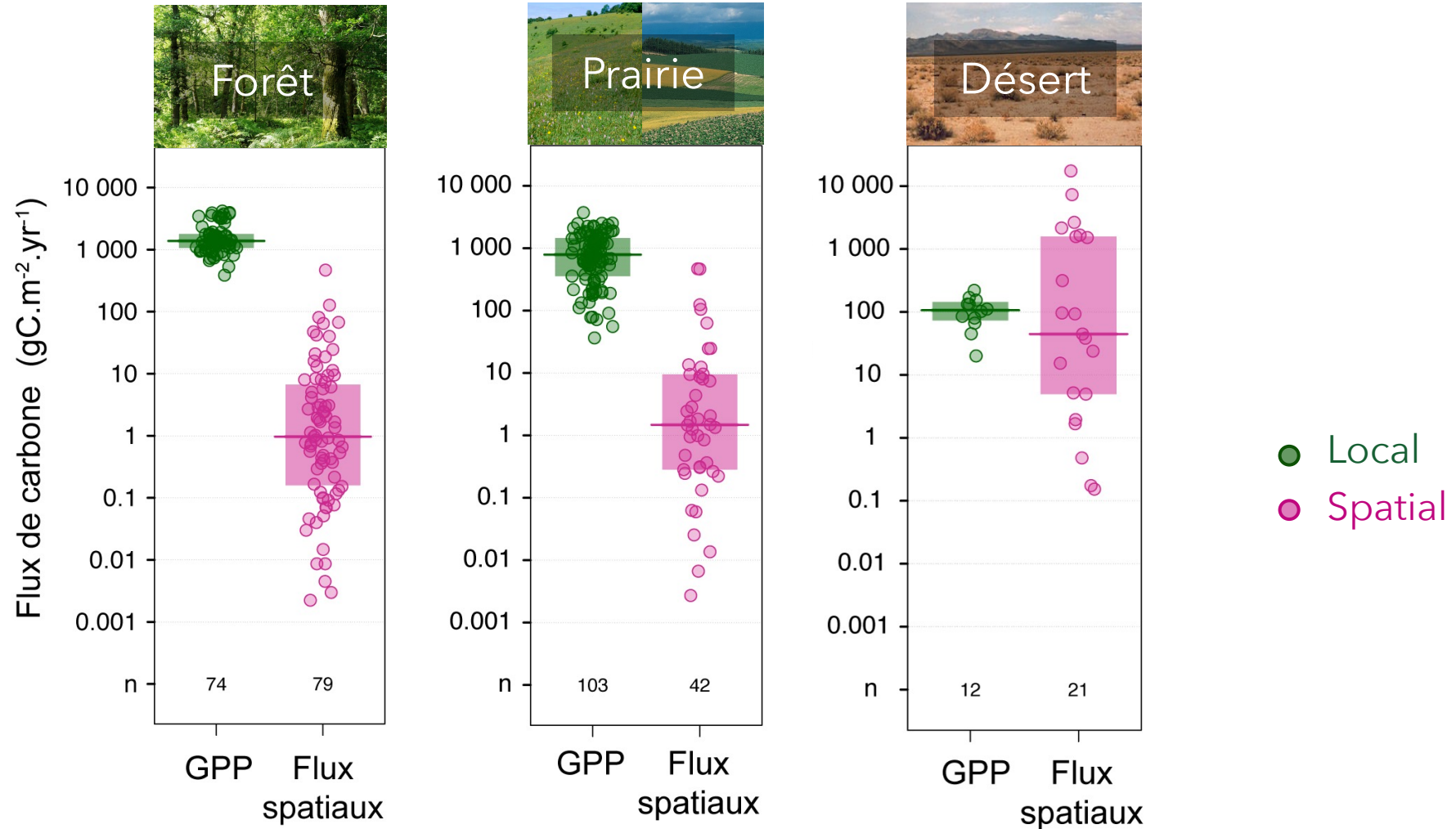
⇒ Quantitativement plus important pour aquatique que terrestre

Méta-écosystèmes

3. Importance quantitative des flux (C)

Terrestre

Comparaison avec les flux locaux



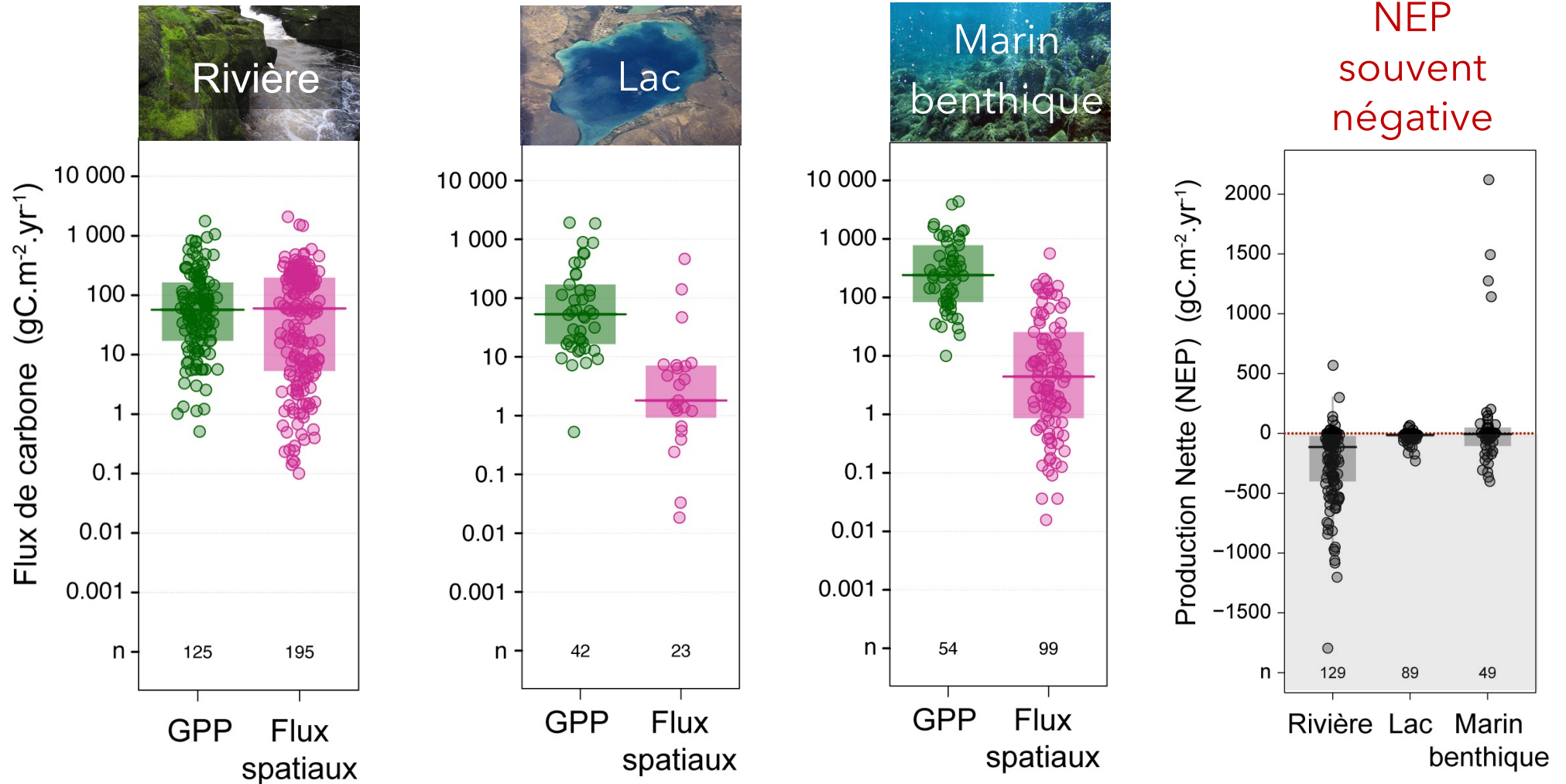
⇒ Une importance potentiellement variable en fonction du degré d'autotrophie

Méta-écosystèmes

3. Importance quantitative des flux (C)

Aquatique

Comparaison avec les flux locaux

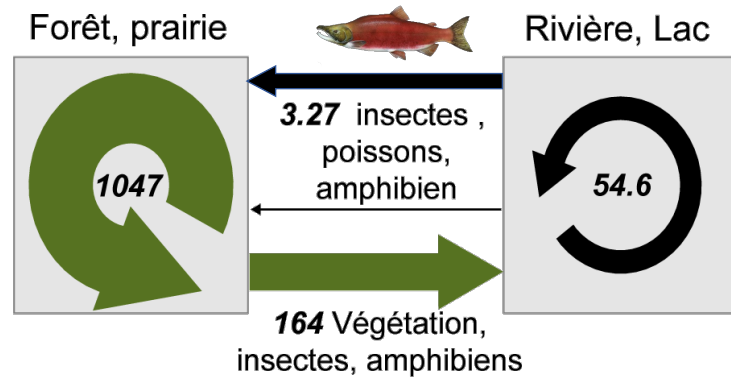


⇒ Une importance potentiellement variable en fonction du degré d'autotrophie

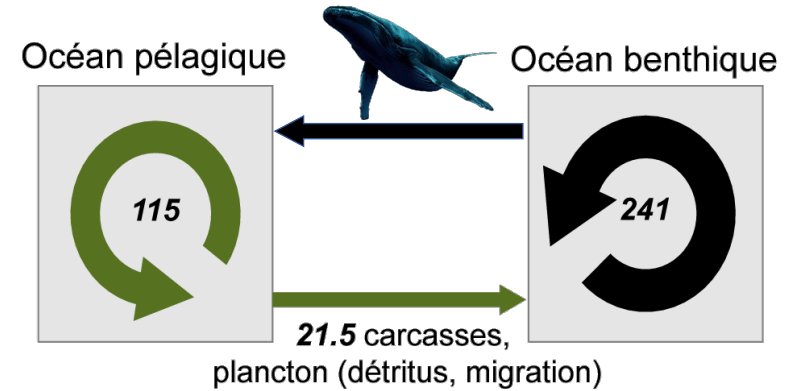
Méta-écosystèmes

3. Importance quantitative des flux (C)

Couplage terrestre-eau douce



Couplage pélagique-benthique



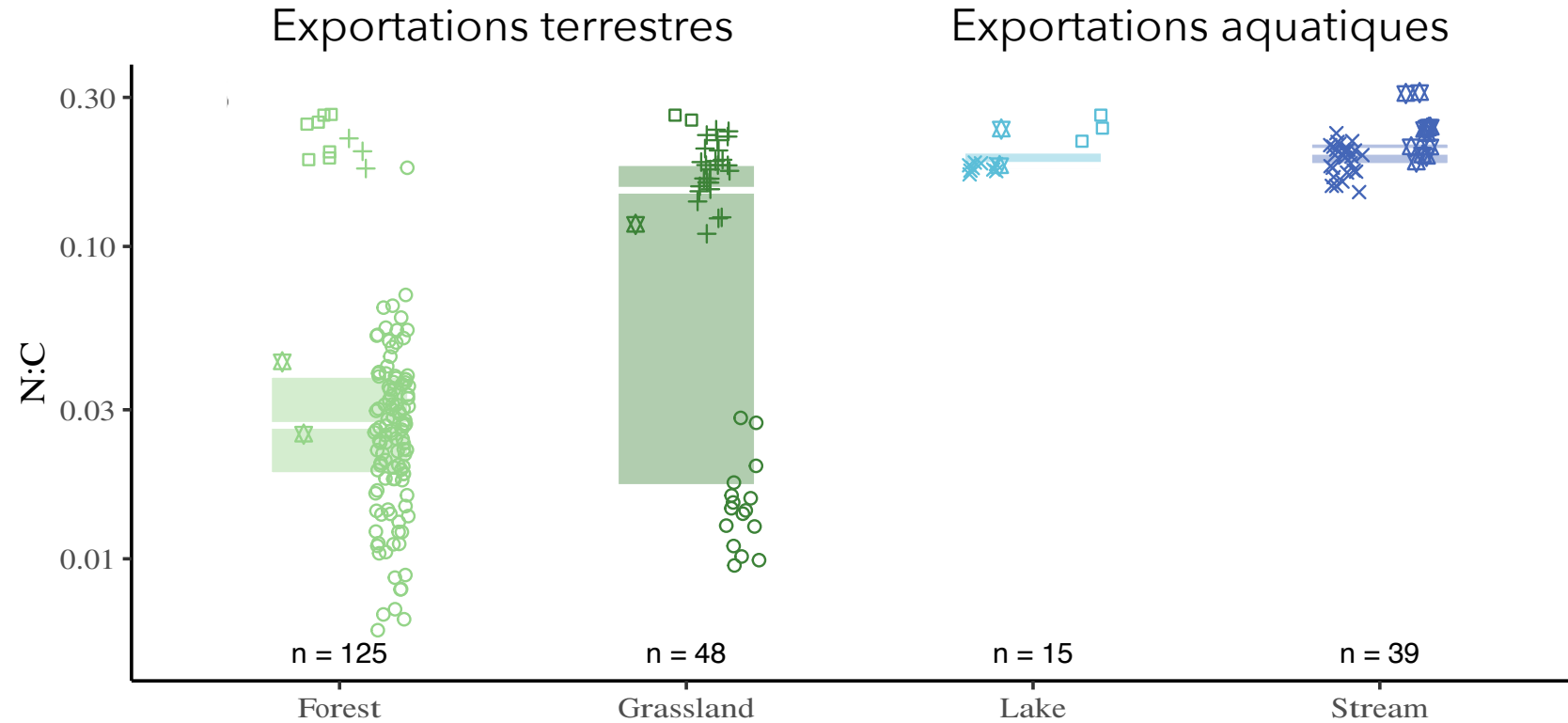
(valeurs médianes en gC.m⁻².yr⁻¹)

⇒ Les couplages par les flux de carbone sont unidirectionnels
Qu'en serait-il avec les flux de nutriments?

Méta-écosystèmes

4. Importance qualitative des flux (N,P)

Stœchiométrie des exportations à l'interface terrestre-eau douce

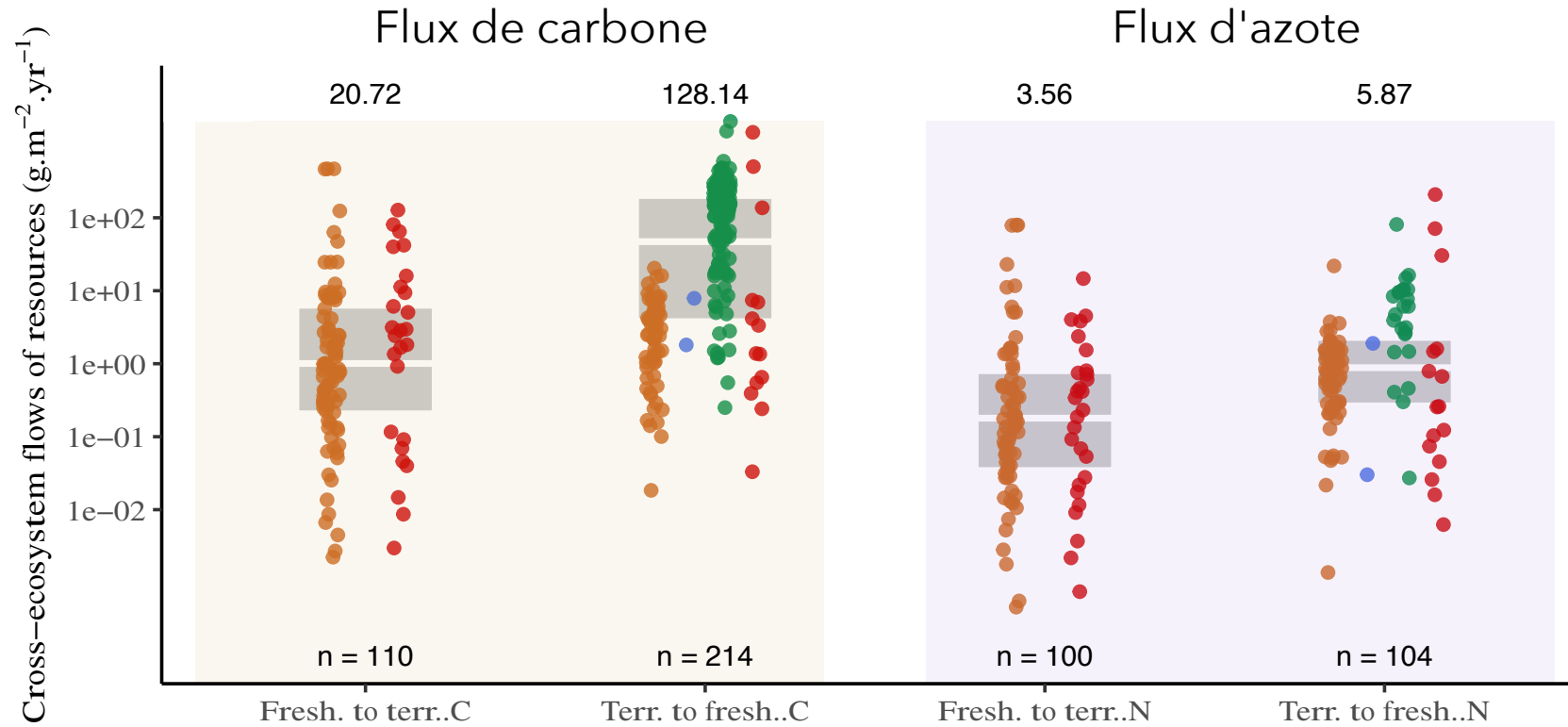


× Aqu. insects ⊗ Carcass □ Small amphib. ○ Terr. plants + Terr. inverteb.

⇒ Exportations aquatiques plus riches en nutriments

Pichon et al, in prep

Stœchiométrie des exportations à l'interface terrestre-eau douce



● Primary producers ● Invertebrates ● Vertebrates ● POC-DOC

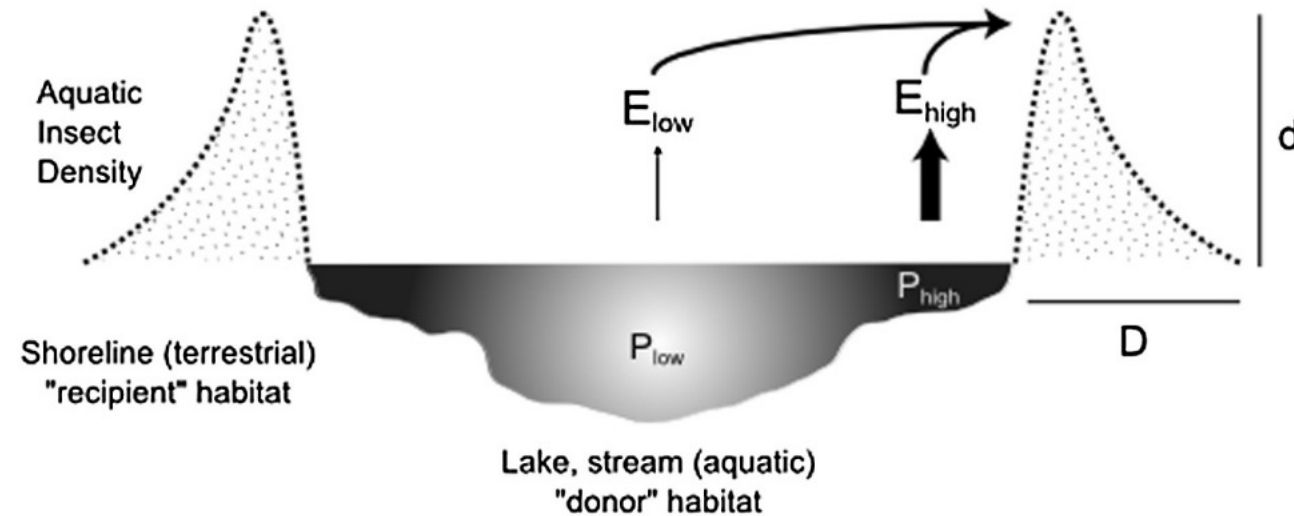
⇒ Flux d'azote équivalent dans les deux sens

Méta-écosystèmes

4. Importance qualitative des flux (N,P) Flux eaux douces → terrestre

Emergence d'insectes

Lac Myvatyn de 2008 à 2011, entre 4 et 100 kg d'insectes déposés par m² et par an, dans les 50m autour



Dreyer and Gratton 2014, *Biological Control*

Dreyer et al. 2015, *Ecology*

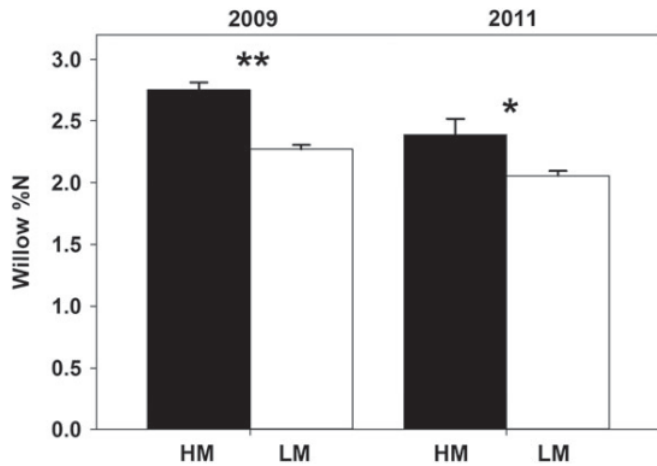
Méta-écosystèmes

4. Importance qualitative des flux (N,P) Flux eaux douces → terrestre

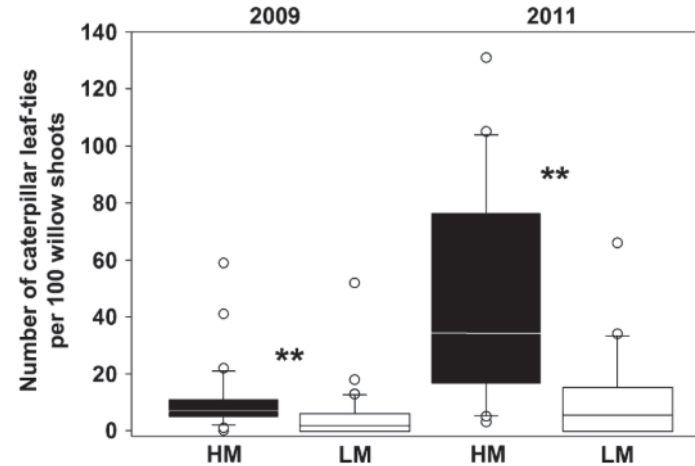
Emergence d'insectes

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*

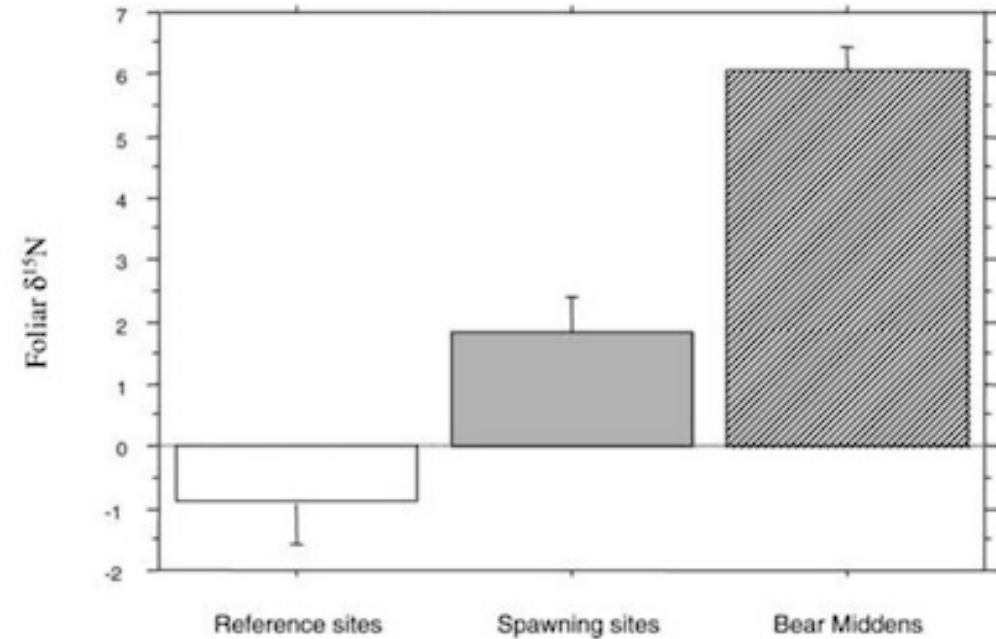


⇒ Les flux de ressources peuvent modifier la structure des communautés en relâchant les limitations locales

Méta-écosystèmes

4. Importance qualitative des flux (N,P) Flux eaux douces → terrestre

Espèces anadromes: connexion océan- eaux douces ~5600 t P/an (Doughty et al 2015 PNAS)



Helfied & Naiman 2002 Oecologia

⇒ Les activité des animaux peuvent transférer des nutriments entre habitats

Méta-écosystèmes

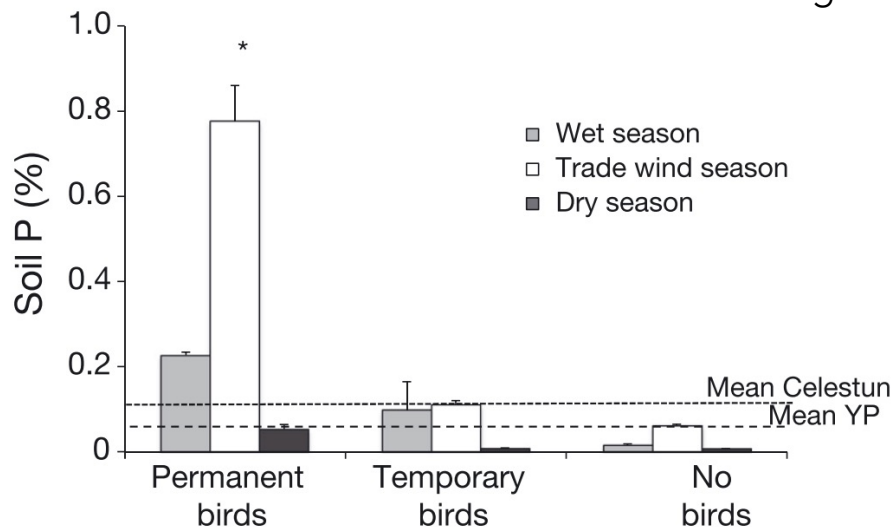
4. Importance qualitative des flux (N,P)

Les oiseaux marins: un fort potentiel de fertilisation

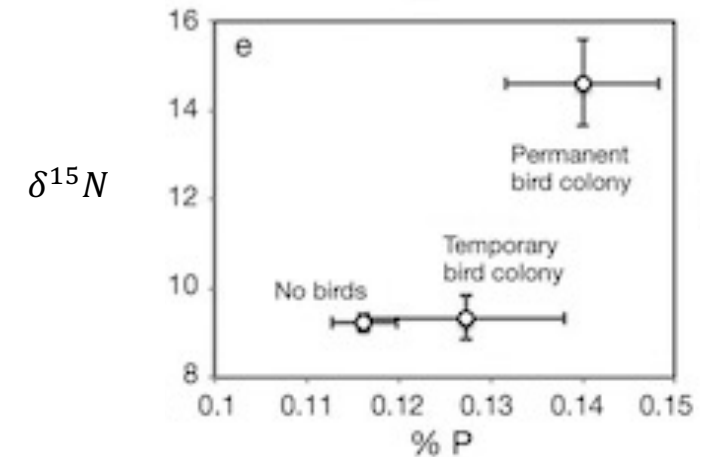
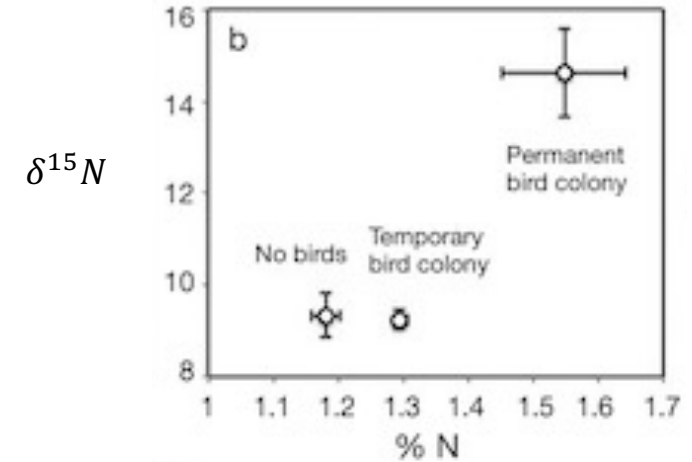
Cas de 6 îles - mangroves dans le Golfe du Mexique



McInturf et al. 2019 Biological Reviews



Adame et al. 2015
Marine Ecology Progress Series

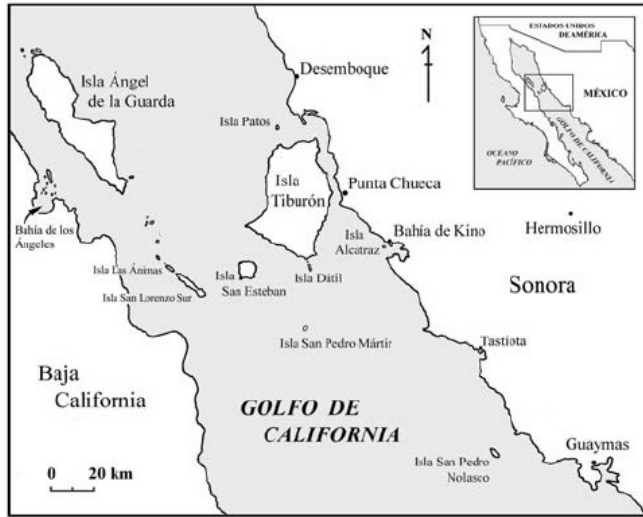


Contenu en nutriments des
feuilles d'arbres

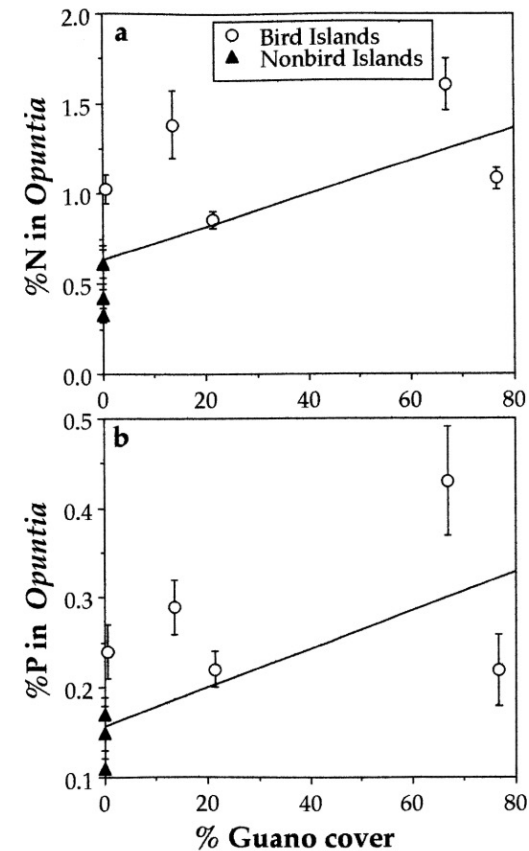
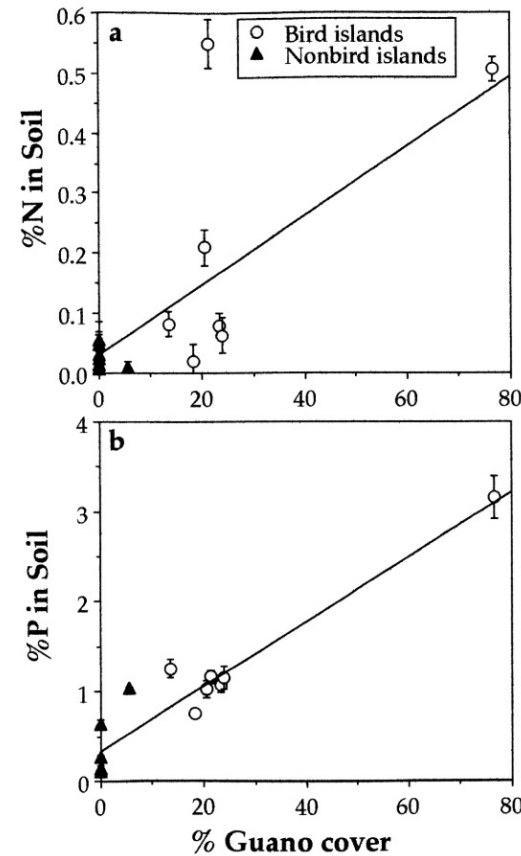
Méta-écosystèmes

4. Importance qualitative des flux (N,P)

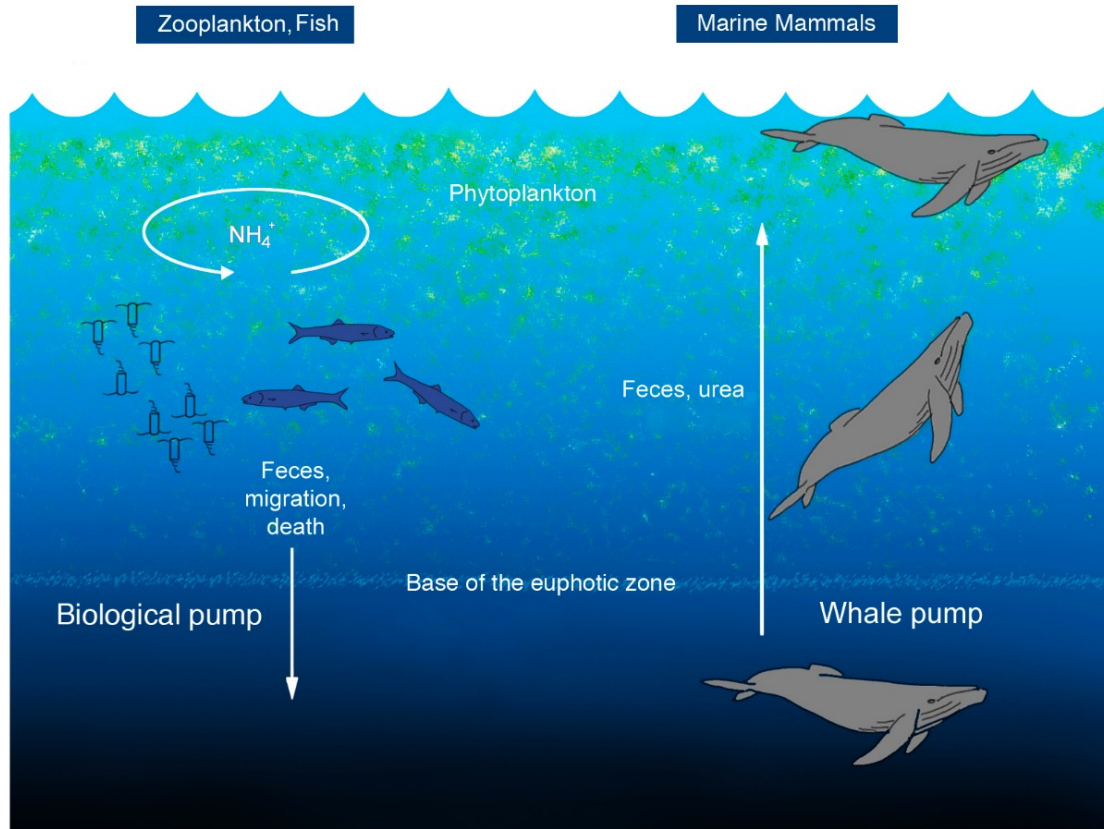
Les oiseaux marins: un fort potentiel de fertilisation



Cas des îles désertiques du Golf de Californie

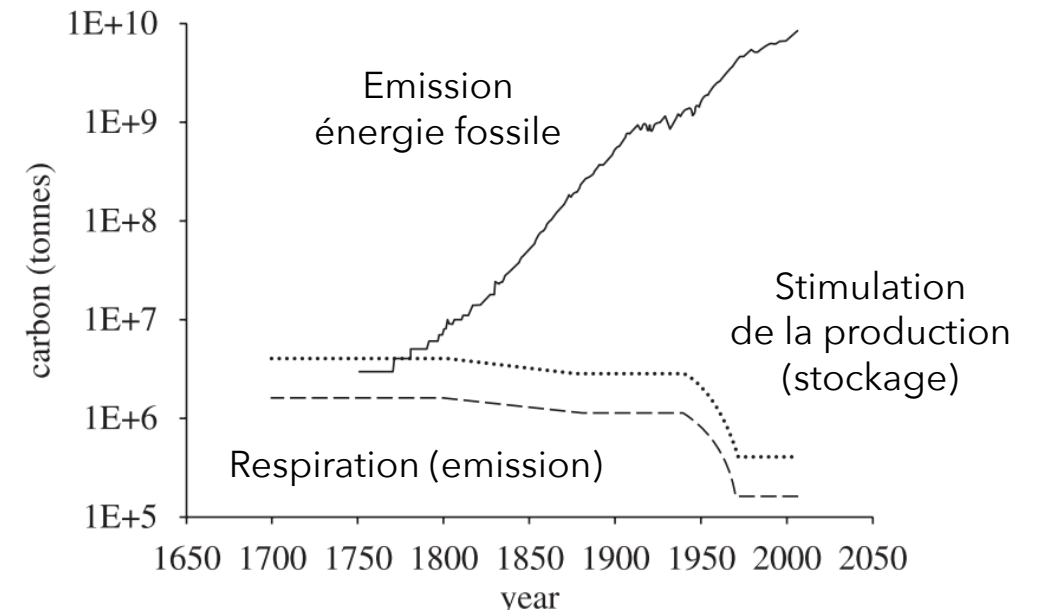


Flux spatiaux d'azote dans les systèmes oligotrophiques marins



Roman and McCarthy 2010, PloS One

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



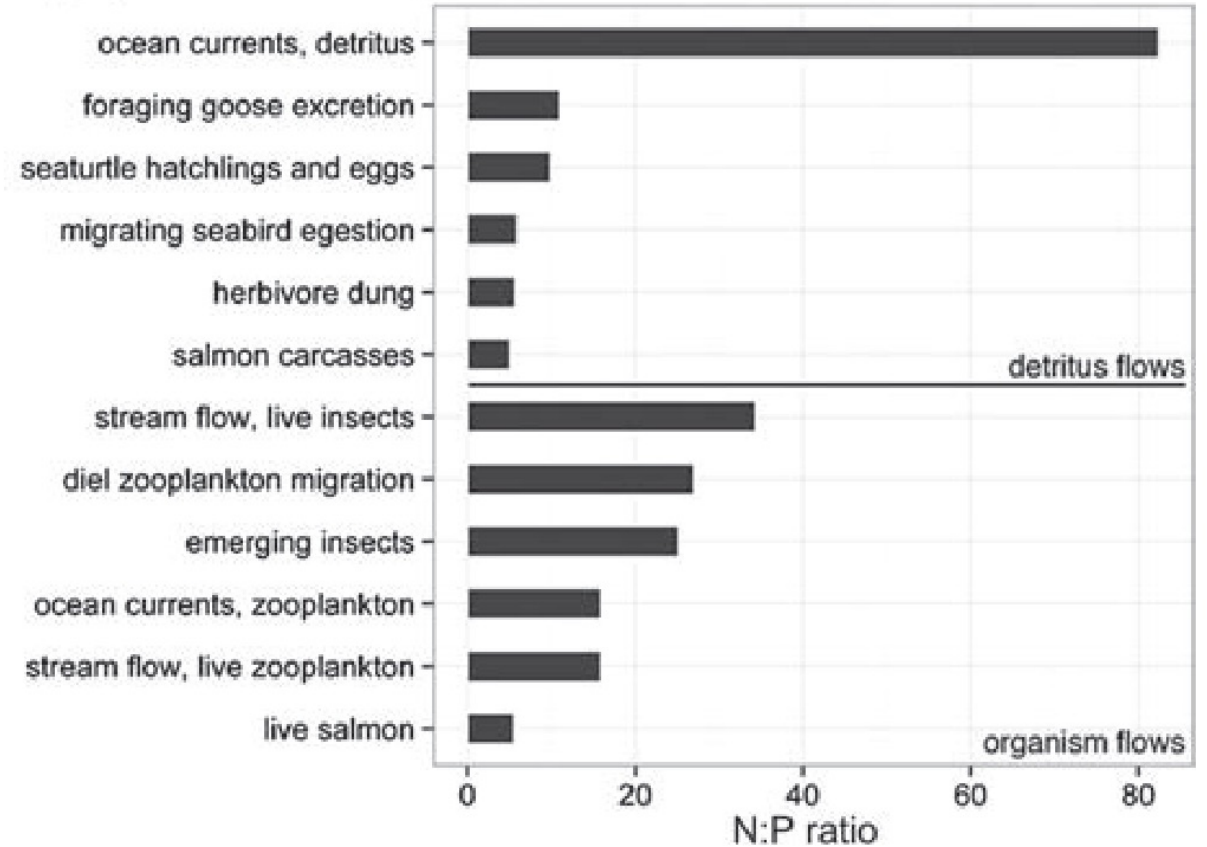
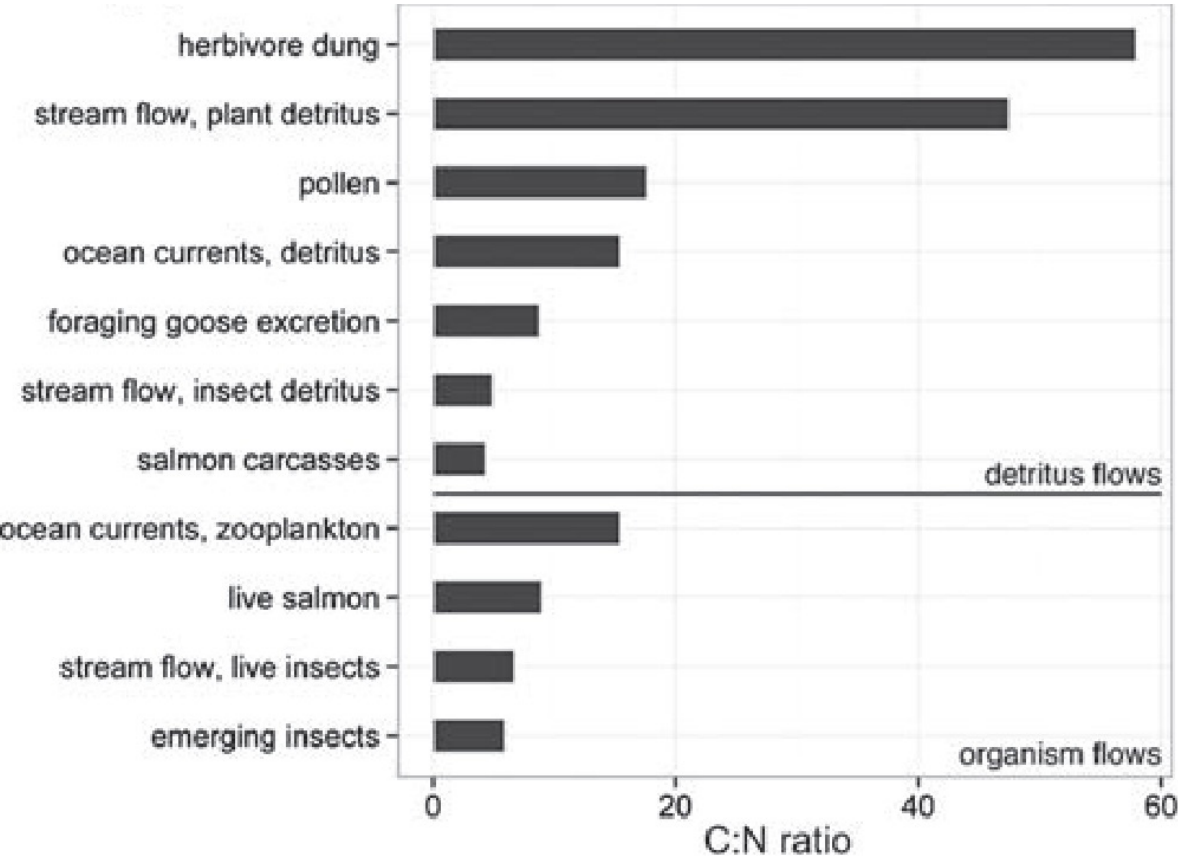
Laverty et al. 2010, PRSLB

- ⇒ Les communautés peuvent être spatialement structurées (stratification)
- ⇒ La "pompe baleine" contribue à relâcher les limitations en N, Fe

Méta-écosystèmes

5. Propriétés et effets des flux spatiaux

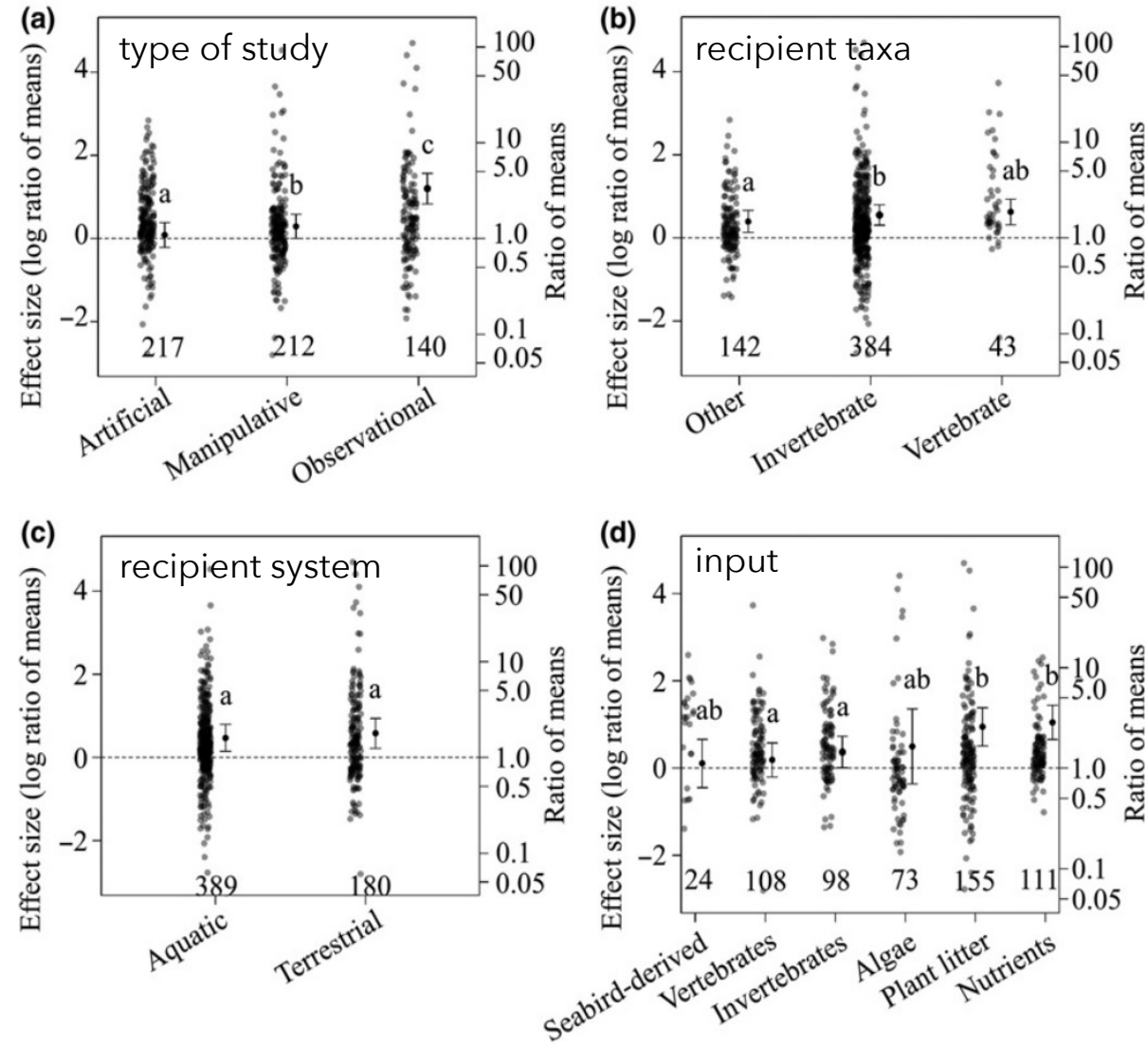
Des différences de qualité de ressources (importance selon limitations)



Méta-écosystèmes

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

5. Propriétés et effets des flux spatiaux



Montagano et al. 2019
Ecology Letters

⇒ Des effets positifs: relâchement des limitations ...
⇒ Mais aussi négatifs ??

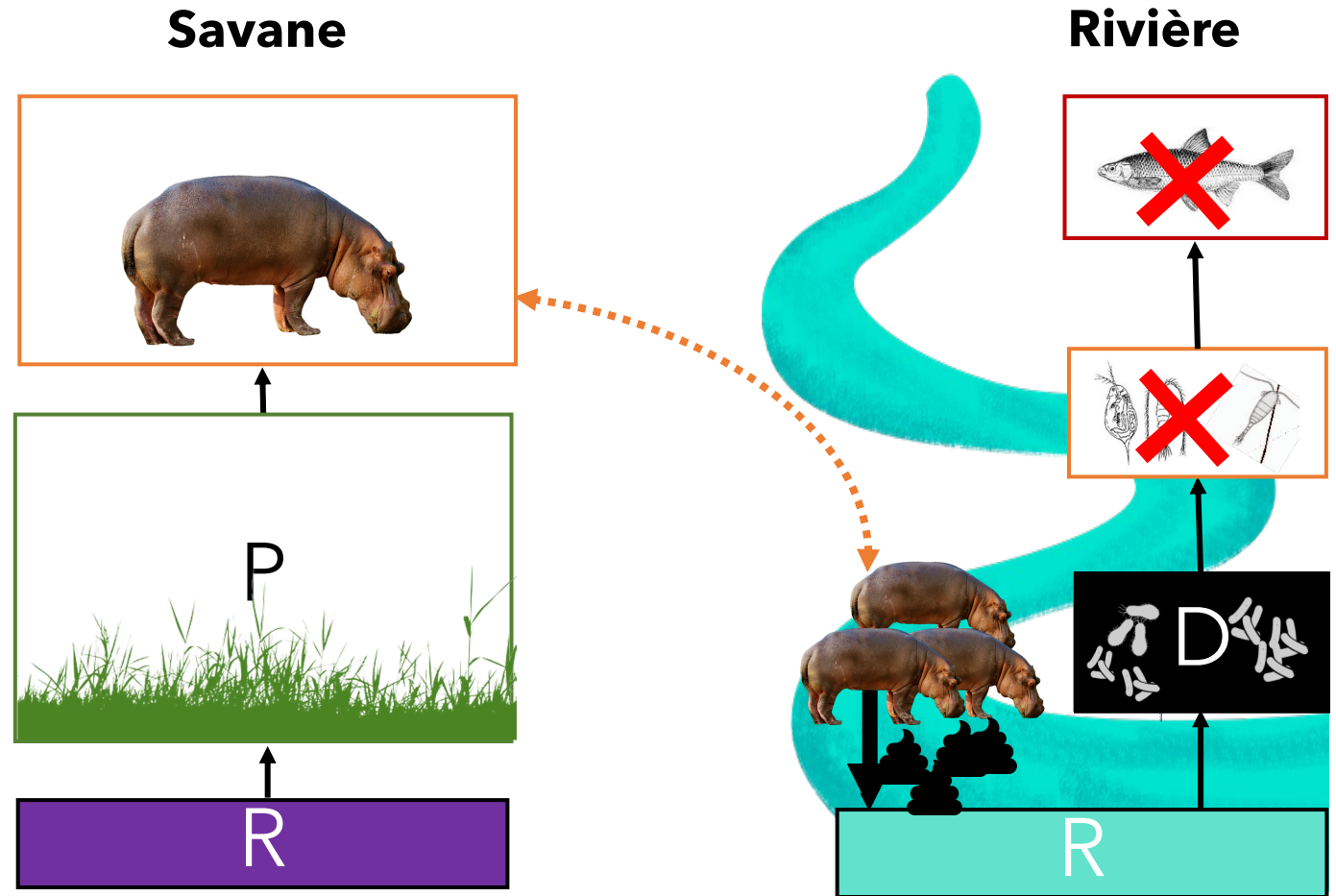
Méta-écosystèmes

5. Propriétés et effets des flux spatiaux



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*
Subalusky et al. 2018, *Ecology*

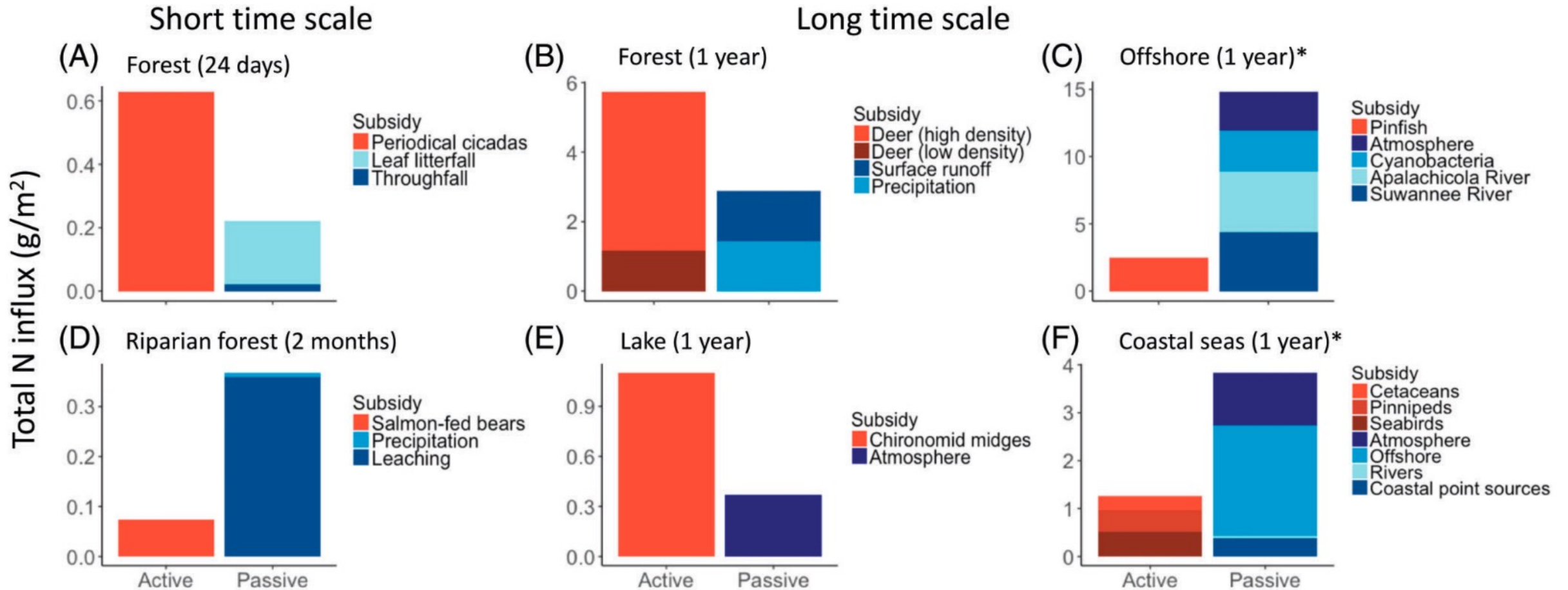


⇒ Flux de nutriments générés par des asymétries spatiales d'activité
⇒ Evènements d'hypoxie : effet négatif de flux de ressources

Dutton et al. 2018,
Nature Communications

Méta-écosystèmes

5. Propriétés et effets des flux spatiaux

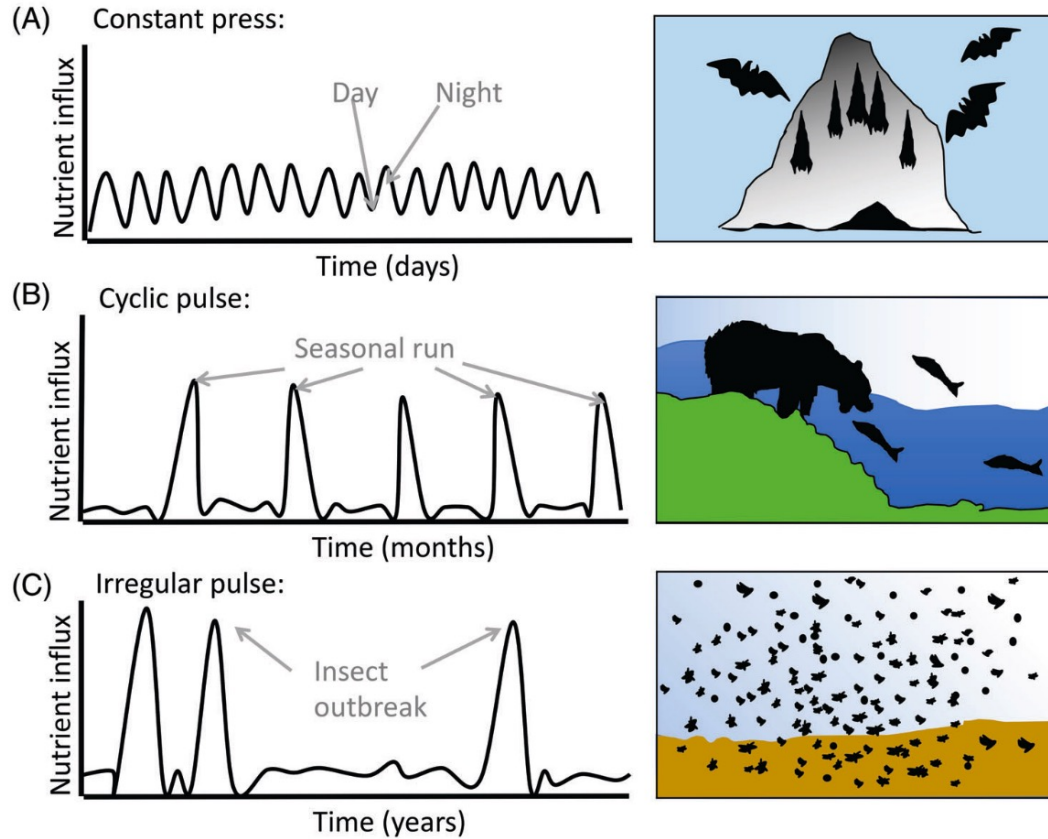


McInturf et al. 2019 Biological Reviews

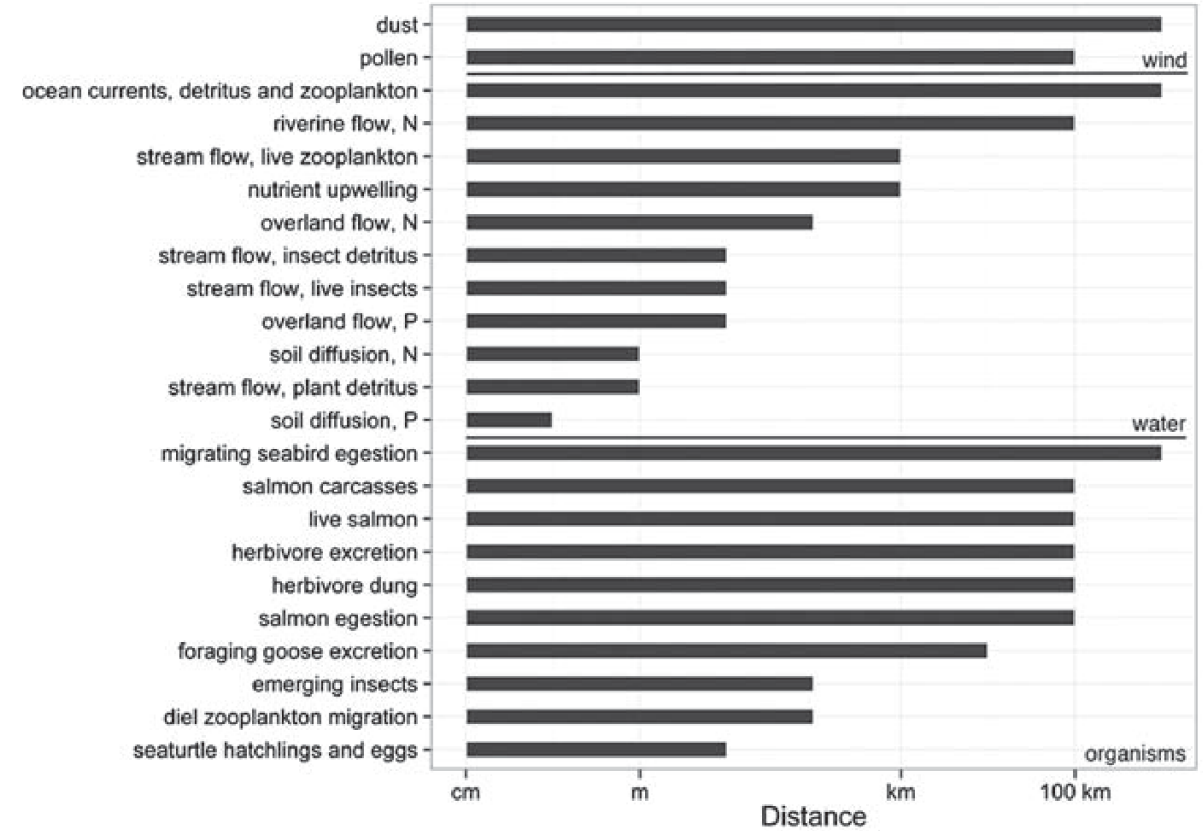
⇒ Des ressources passives et actives, d'importance relative variable en fonction de l'écosystème et de l'échelle de temps

Méta-écosystèmes

5. Propriétés et effets des flux spatiaux



McInturf et al. 2019 Biological Reviews



Sitters et al. 2015 Oikos

⇒ Des ressources variables en termes de régularité et synchronisation

⇒ Et qui peuvent connecter des écosystèmes sur de longues distances

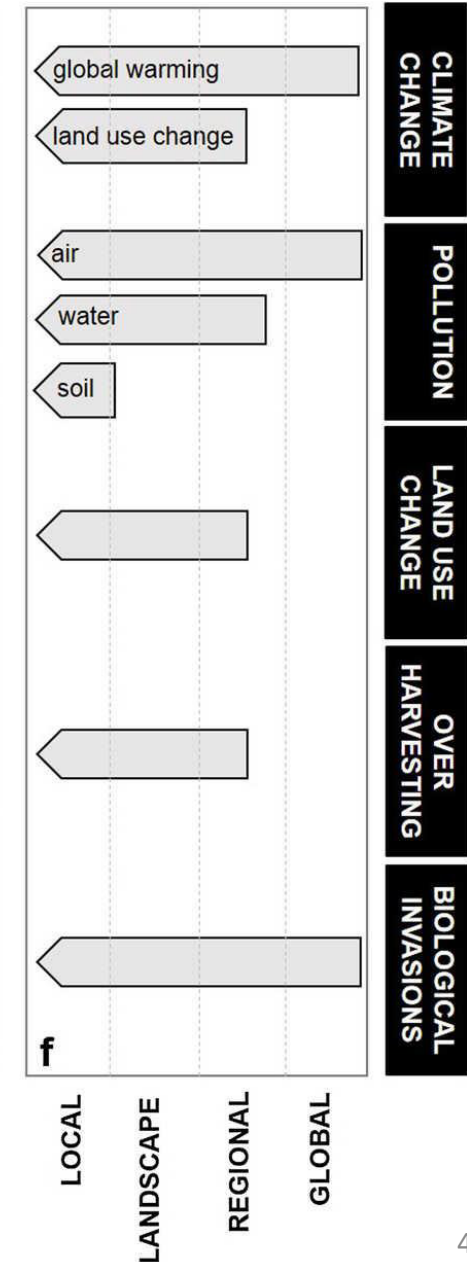
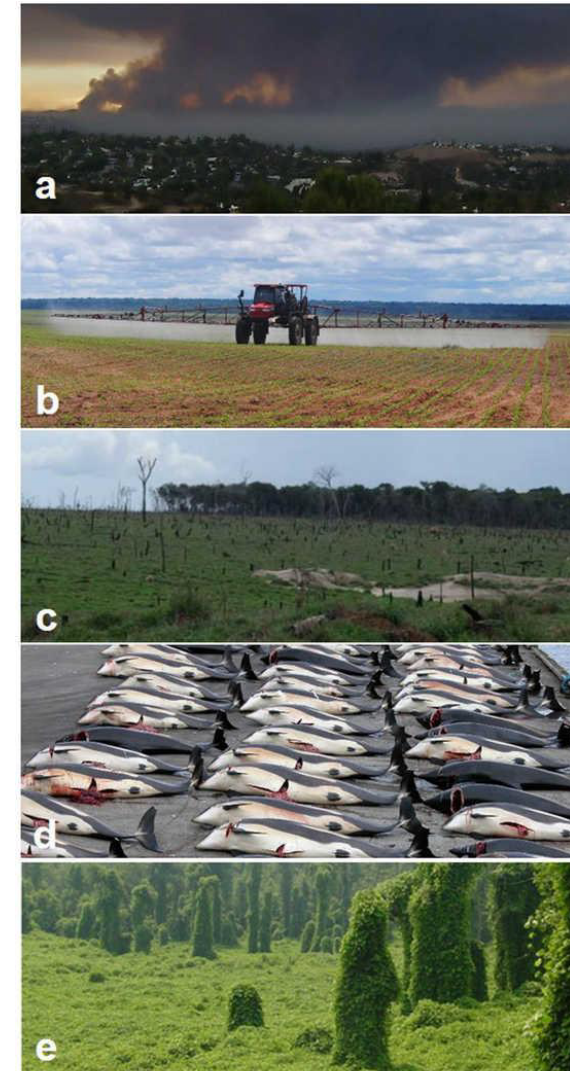
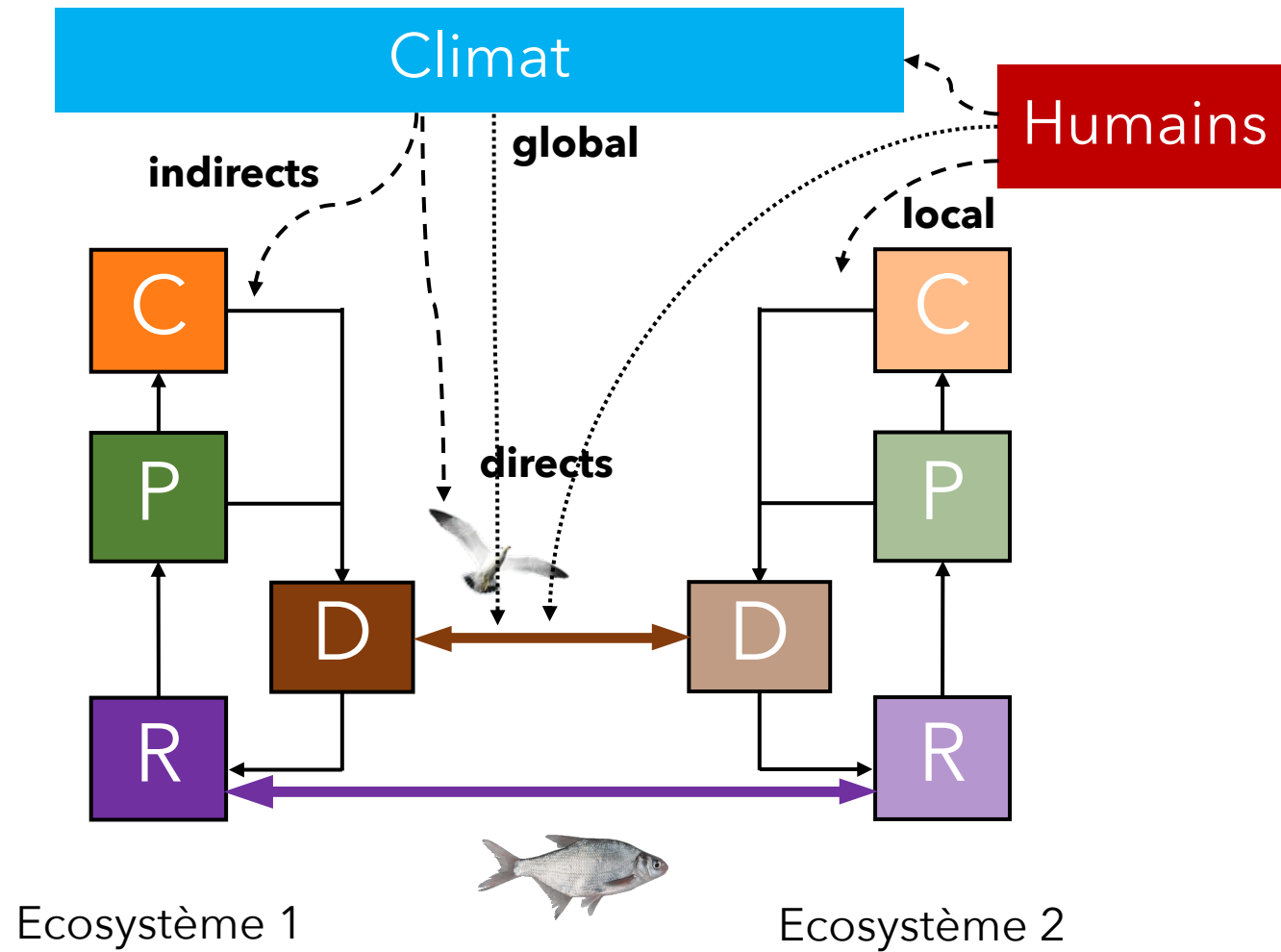
Méta-écosystèmes - bilan

- ⇒ Une dépendance des écosystèmes variable en fonction du degré d'autotrophie
- ⇒ Des différences de qualité de ressources (importance selon limitations)
- ⇒ Des ressources passives et actives dont l'échelle spatio-temporelle est variable

Les choses potentiellement importantes pour la gestion de l'environnement

- ⇒ Des **cascades spatiales** bottom-up avec de gros effets écosystémiques: préserver la productivité des écosystèmes nécessite de préserver ces flux, notamment pour les écosystèmes les plus hétérotrophes
- ⇒ **Interdépendance des écosystèmes** => meilleure productivité (meilleure utilisation des ressources) + vulnérabilité
- ⇒ **Des équilibres dynamiques fragiles:** connexion indirecte des dynamiques de communautés, et pulses saisonniers

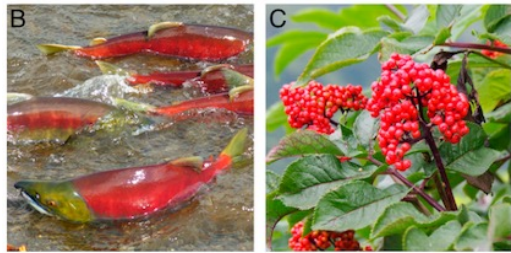
Changement globaux et dynamiques spatiales



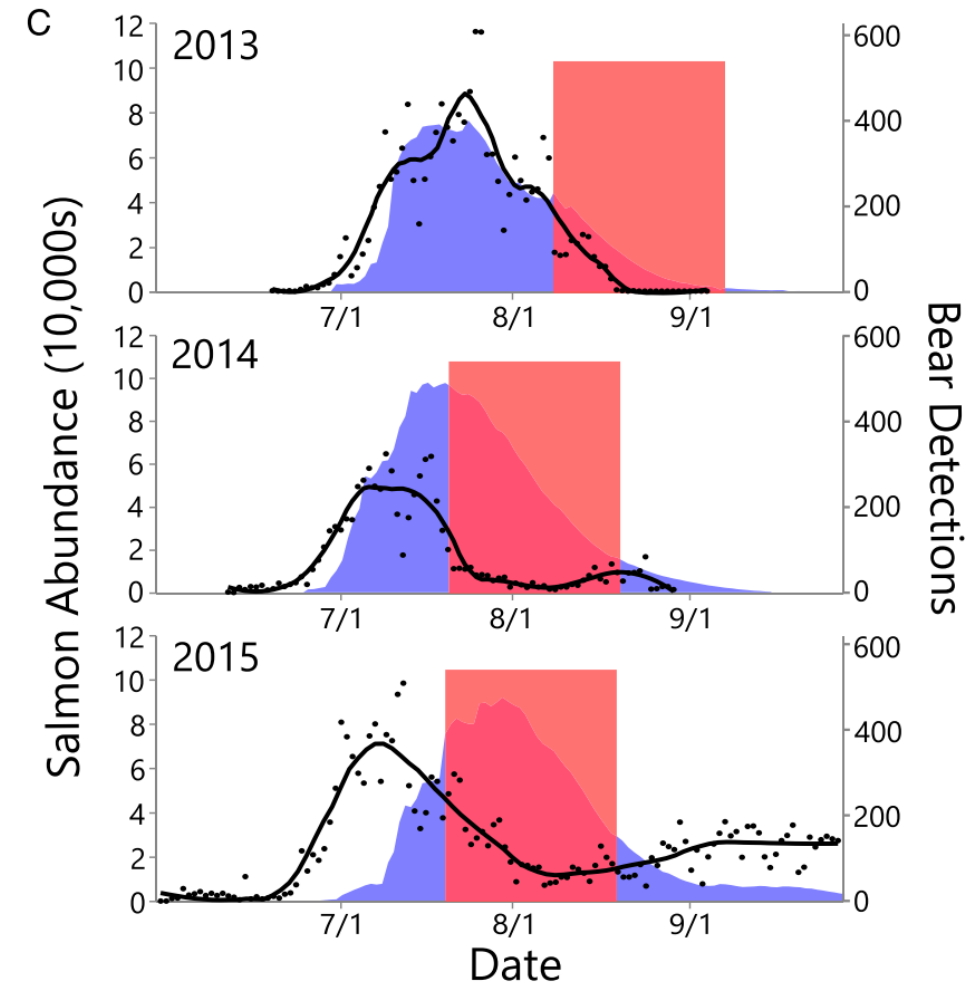
⇒ Impacts directs et indirects sur les flux de ressources

Changement global Des équilibres fragiles sujets aux effets indirects

Changement de comportement des ours en réponse à la phénologie



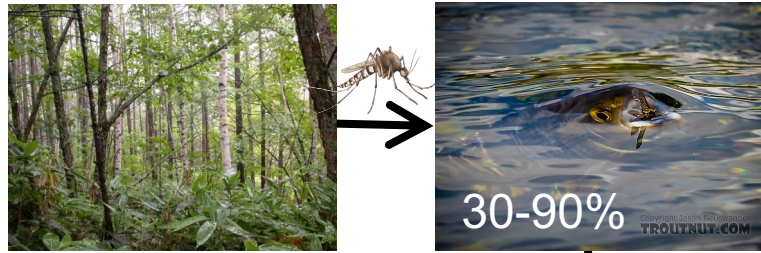
Deacy et al. 2017, PNAS



⇒ le climat réorganise les interactions spécifiques, et influx sur les flux de nutriments

Changement global Des équilibres fragiles sujets aux effets indirects

Changement d'usage des terres → diminution des arthropodes terrestres

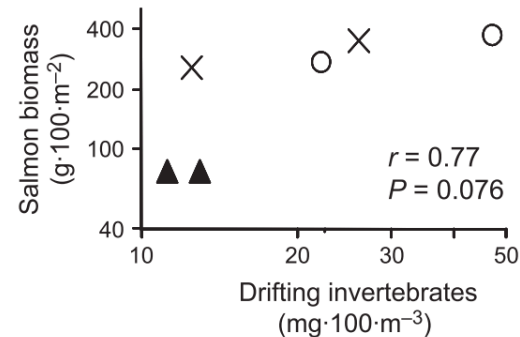
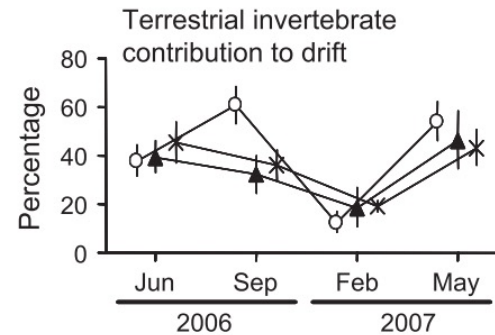
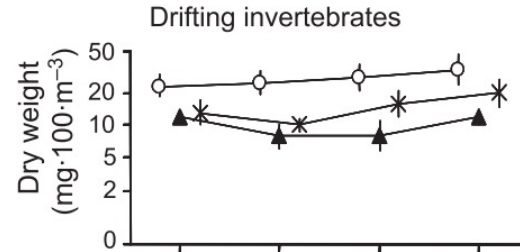


~300
g.m⁻².yr⁻¹



masu salmon
(*Oncorhynchus masou*)

Inoue et al. 2013, *Ecology of Freshwater Fish*



~75
g.m⁻².yr⁻¹

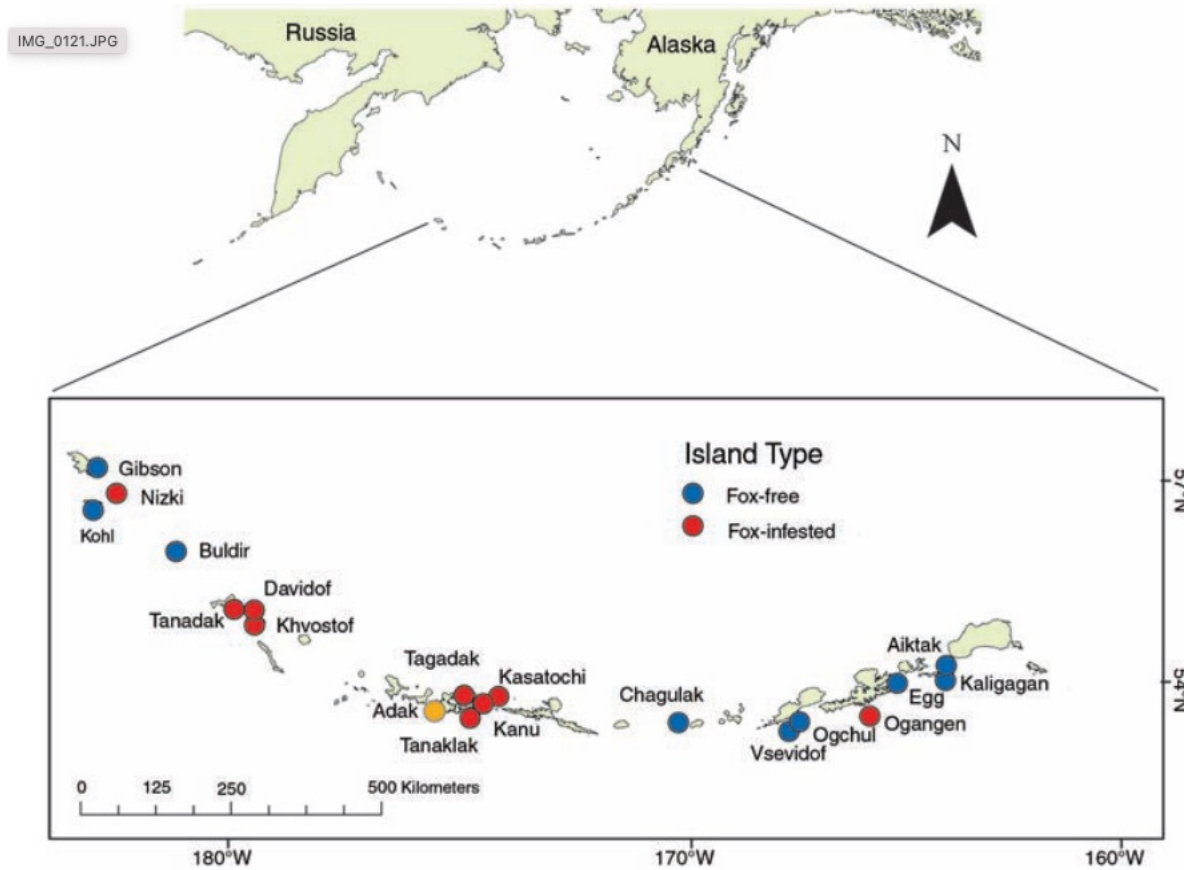


- Broadleaved
- ▲ Plantation
- × Clear-cut

⇒ la gestion des terres se répercute sur les communautés aquatiques

Changement global Des équilibres fragiles sujets aux effets indirects

Impact des invasions biologiques sur les flux de nutriments

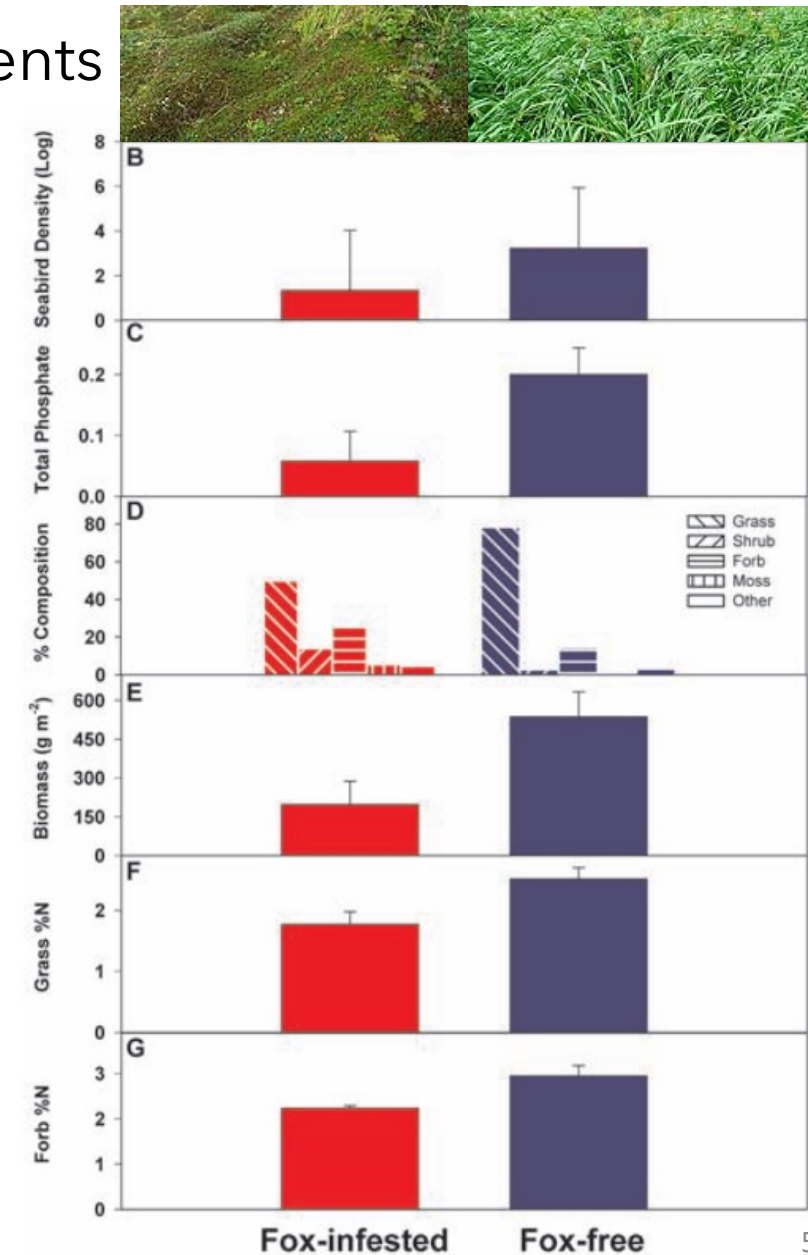


Croll et al. 2005 Science

⇒ Effet à l'échelle d'écosystèmes entiers en Arctique



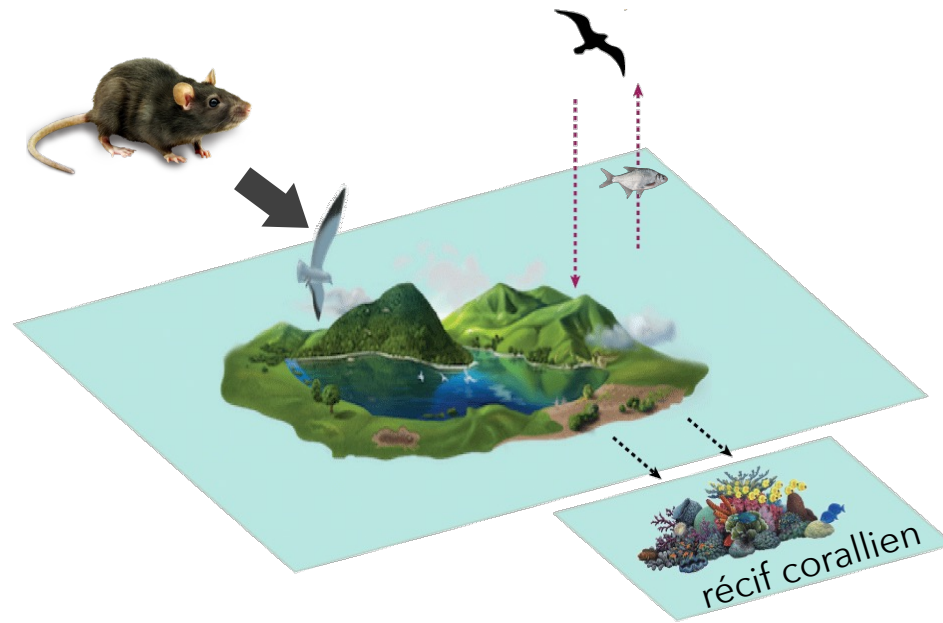
introduits début XXème siècle pour la fourrure



Changement global Des équilibres fragiles sujets aux effets indirects

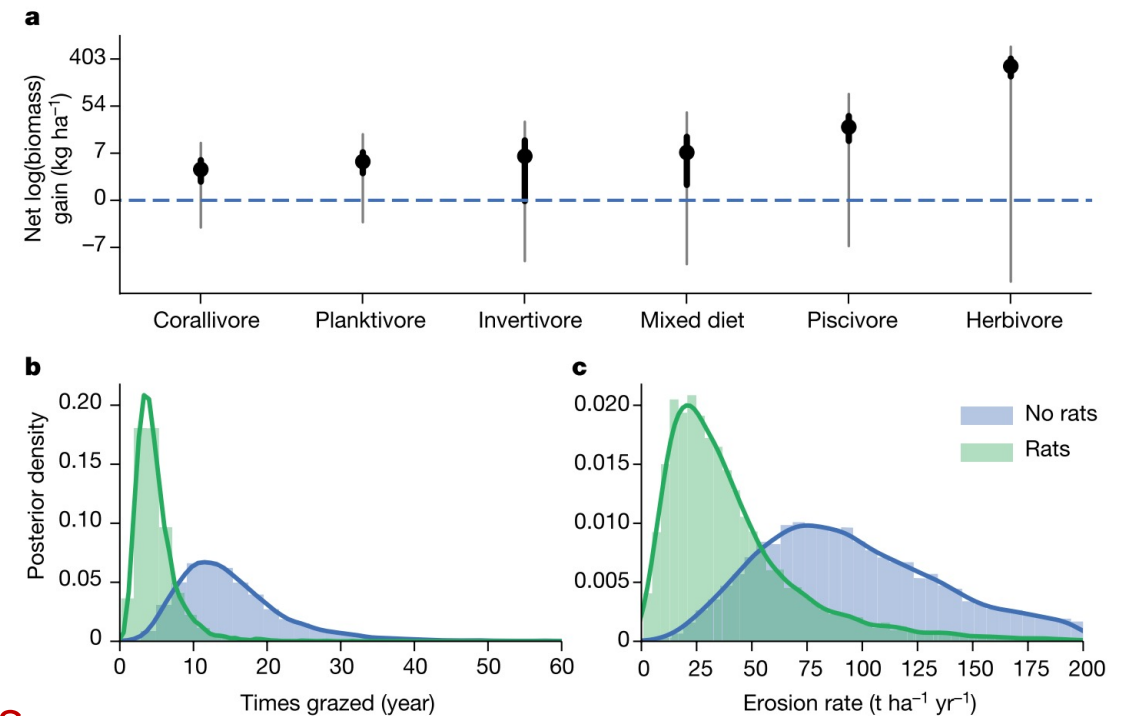
Impact des invasions biologiques sur les flux de nutriments

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



Graham et al. 2018, Nature

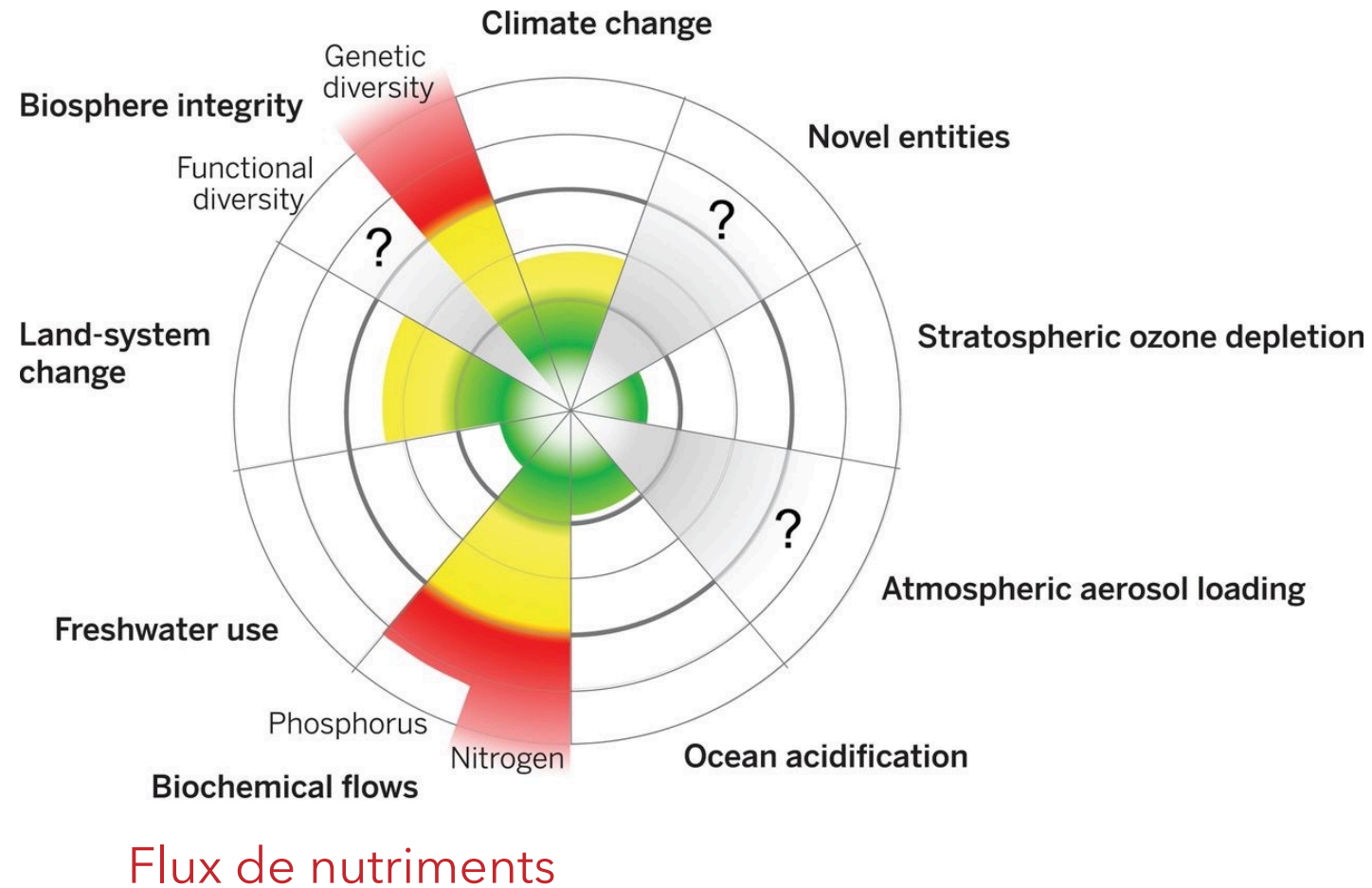
Impacts sur la biomasse de poisson et le maintien du récif



⇒ Cascade spatiales sur les récifs coraliens

Changement globaux

Une redistribution globale des nutriments



Steffen et al 2015 *Science*

Changement globaux

Une redistribution globale des nutriments

Dépôts d'azote réactif découlant des activités humaines

(all in Tg N yr ⁻¹)	1970	2000
natural N ₂ fixation	102	99
crop N ₂ fixation	27	30
fertilizer application	27	80
atmospheric deposition (oxidized N) ^a	28	34
total NANI	82	144
commercial exchange of food and feed ^b	11	16
river delivery to the sea	37	43

NANI: Net Anthropogenic N input

Billen et al 2013 *Phil Trans*

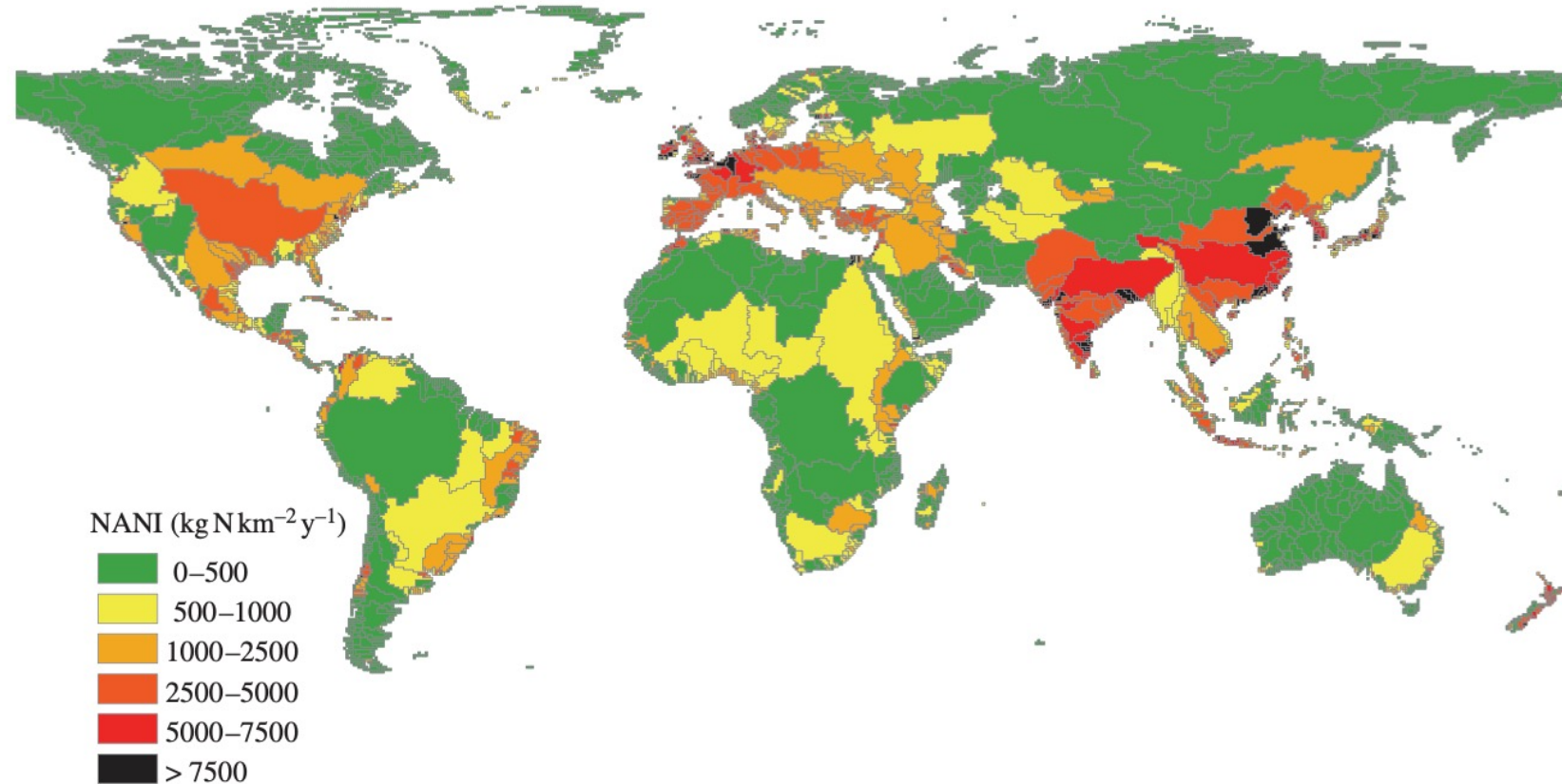


Figure 1. Distribution of NANI at the scale of the world's watersheds. Data from GlobalNEWS.

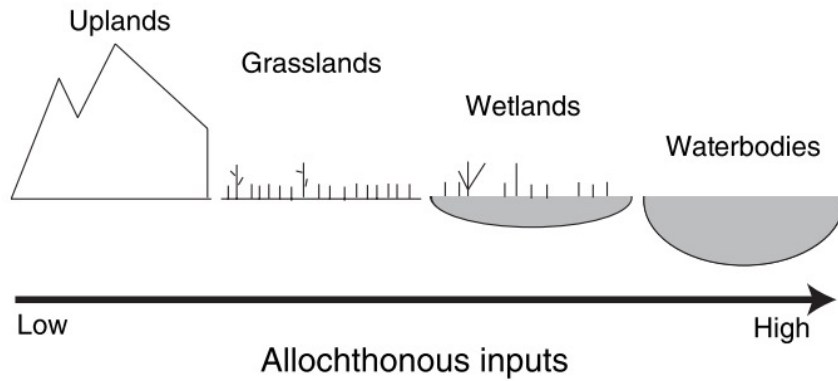
⇒ Des dépôts du même ordre de grandeur que la fixation biotique non agricoles
⇒ Beaucoup se retrouvent dans la mer

Changement globaux

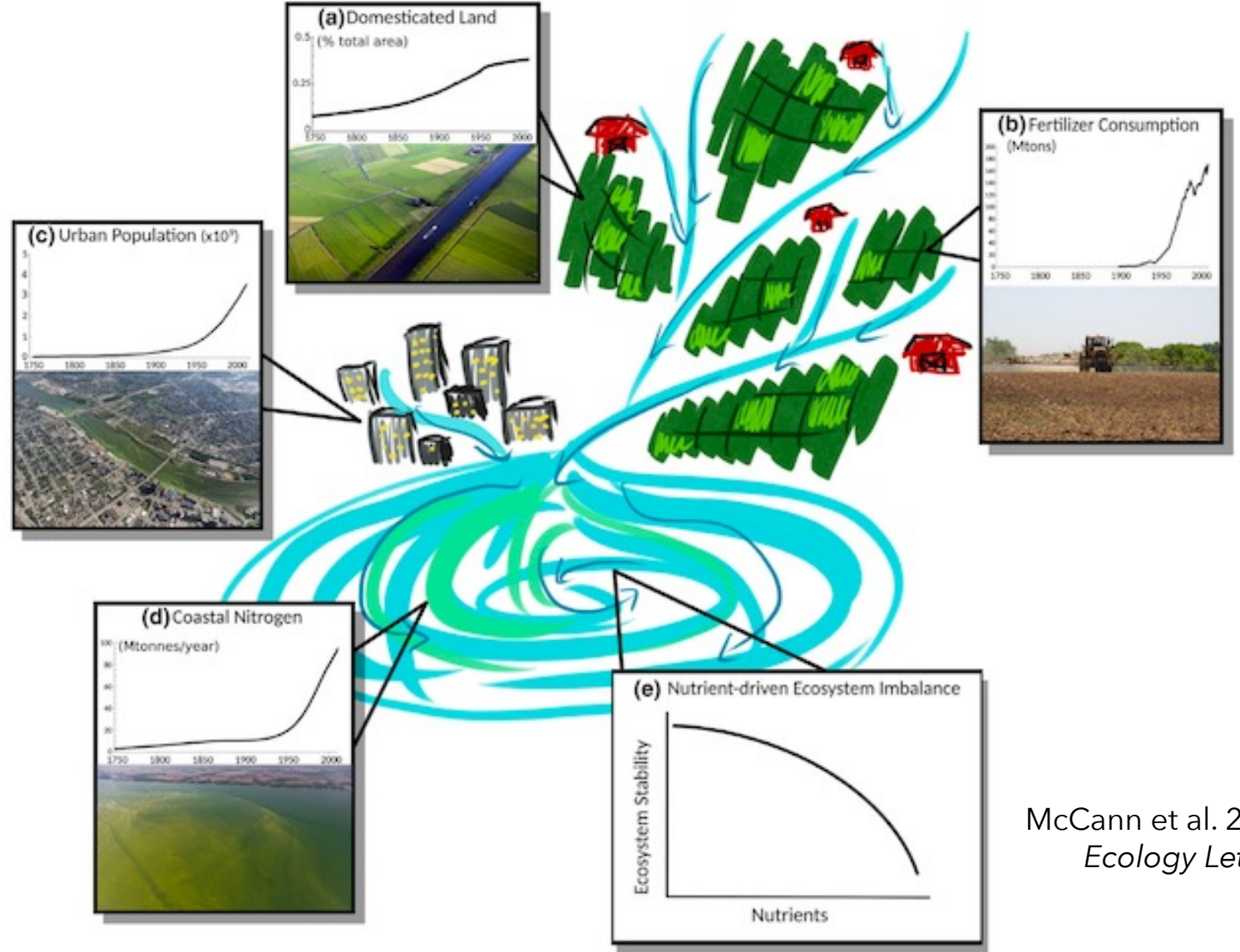
Une redistribution globale des nutriments

Flux de nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants et estuaires

Effet d'accumulation



Leroux and Loreau 2008, *Ecology Letters*

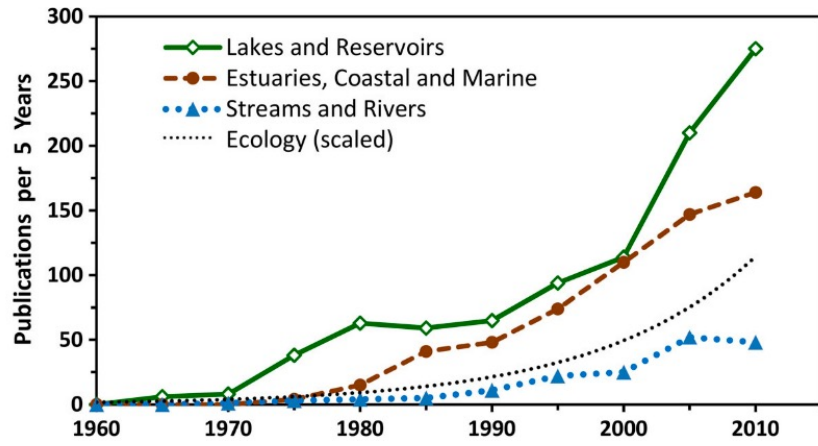


McCann et al. 2021
Ecology Letters

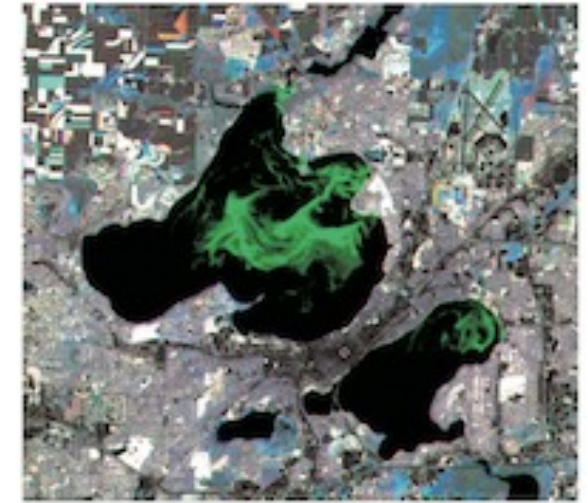
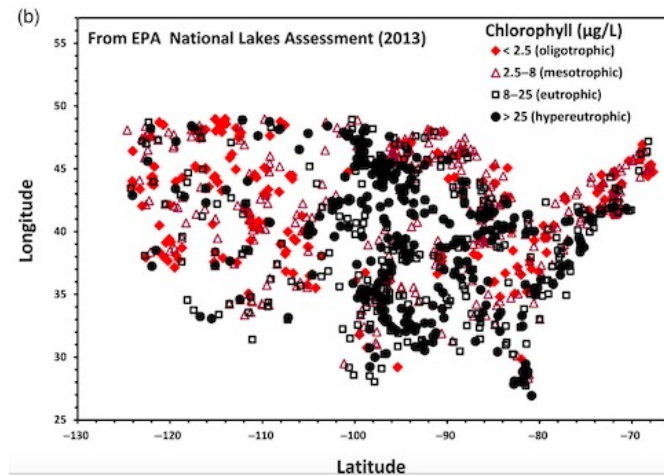
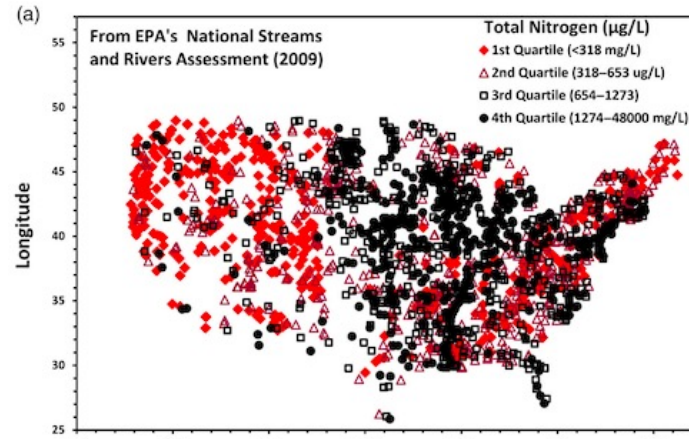
Changement globaux

Une redistribution globale des nutriments

Flux de nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants et estuaires



Wurtsbaugh et al. 2019 *WIREs Water*



Bloom de cyanobactéries
Lake Mendota and Monona,
Madison, Wisconsin
in Carpenter 2008 PNAS

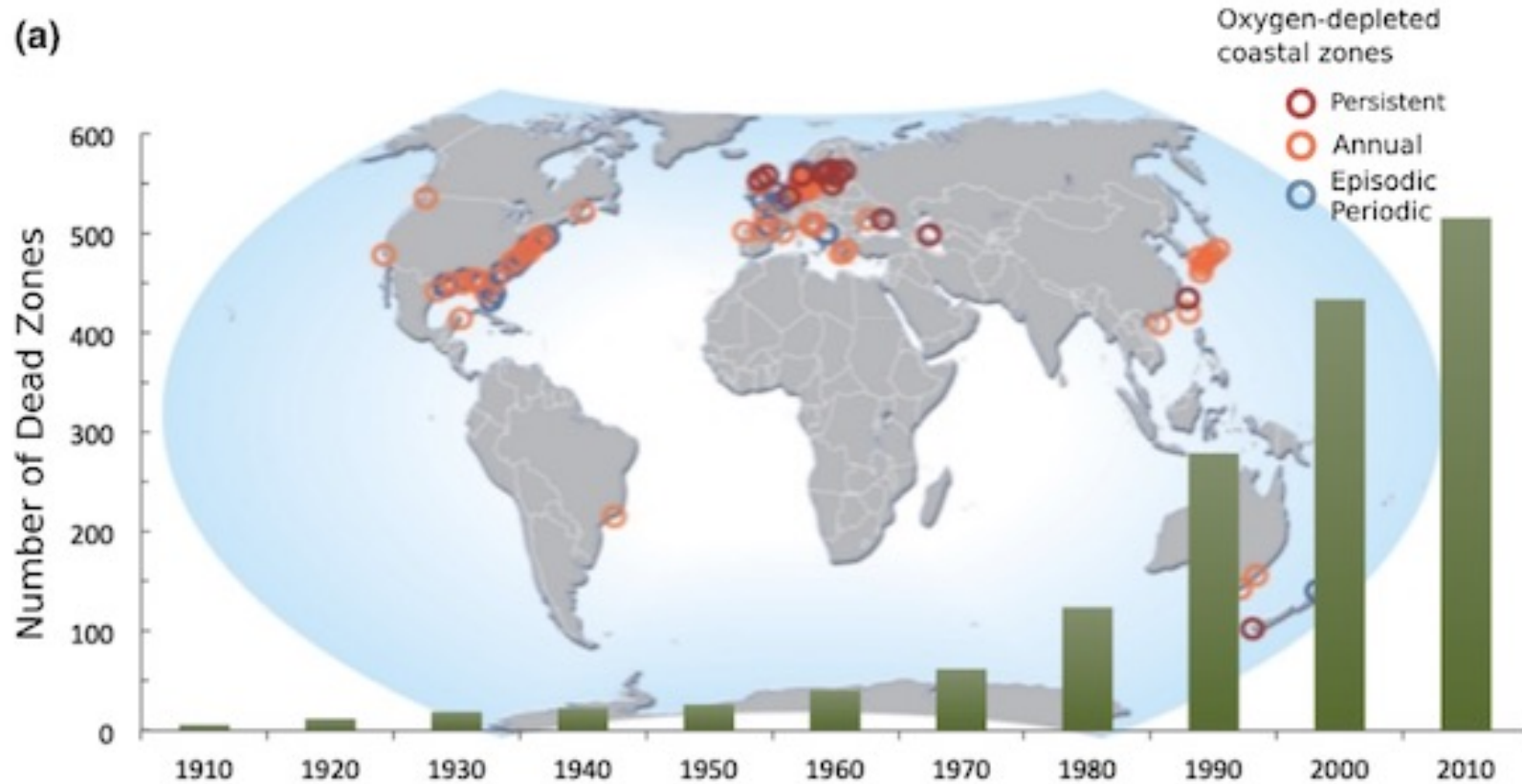
⇒ Déstabilisation des équilibres entre production primaire et secondaire

⇒ Changement possible de limitation en faveur de cyanobactéries (N-lim)

Changement global

Une redistribution globale des nutriments

Flux de nutriments accrus → eutrophisation des bassins versants et estuaires



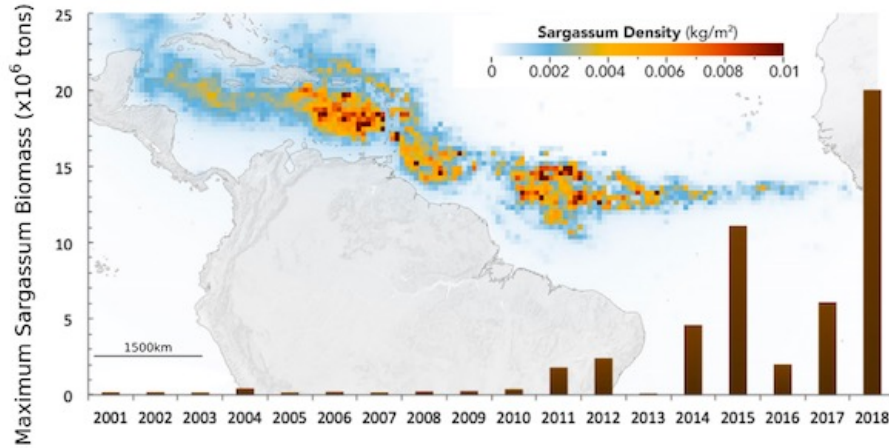
McCann et al. 2021 *Ecology Letters*
données: Convention on Biological Diversity Secretariat 2010 Photo

⇒ Multiplication des zones d'hypoxie dans les estuaires

Changement globaux

Une redistribution globale des nutriments

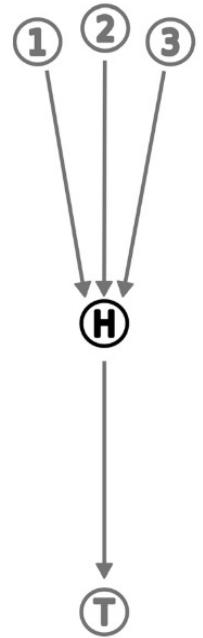
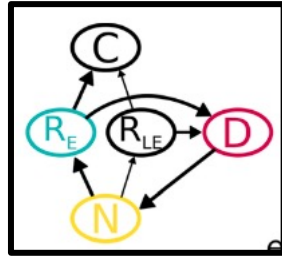
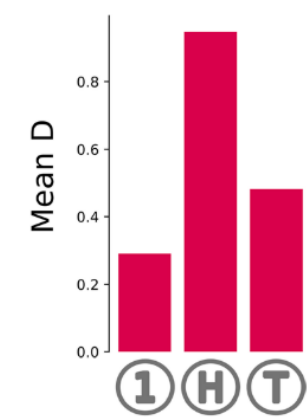
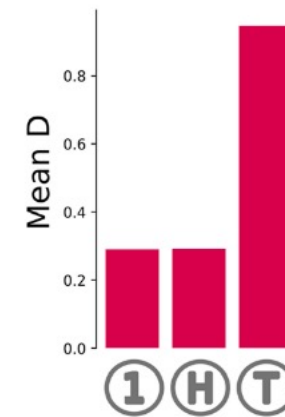
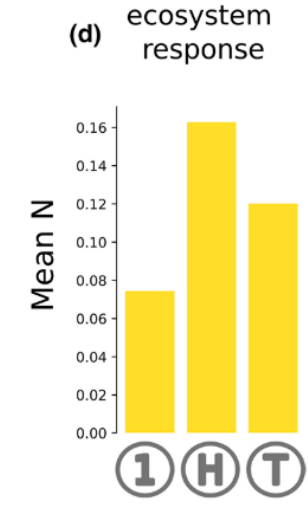
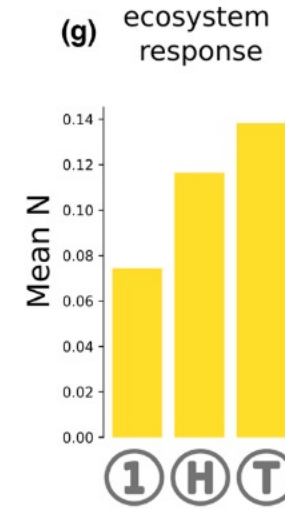
Flux de nutriments accrus → problèmes d'accumulation de détritux



McCann et al. 2021 *Ecology Letters*
d'après des données de Wang et al. 2019

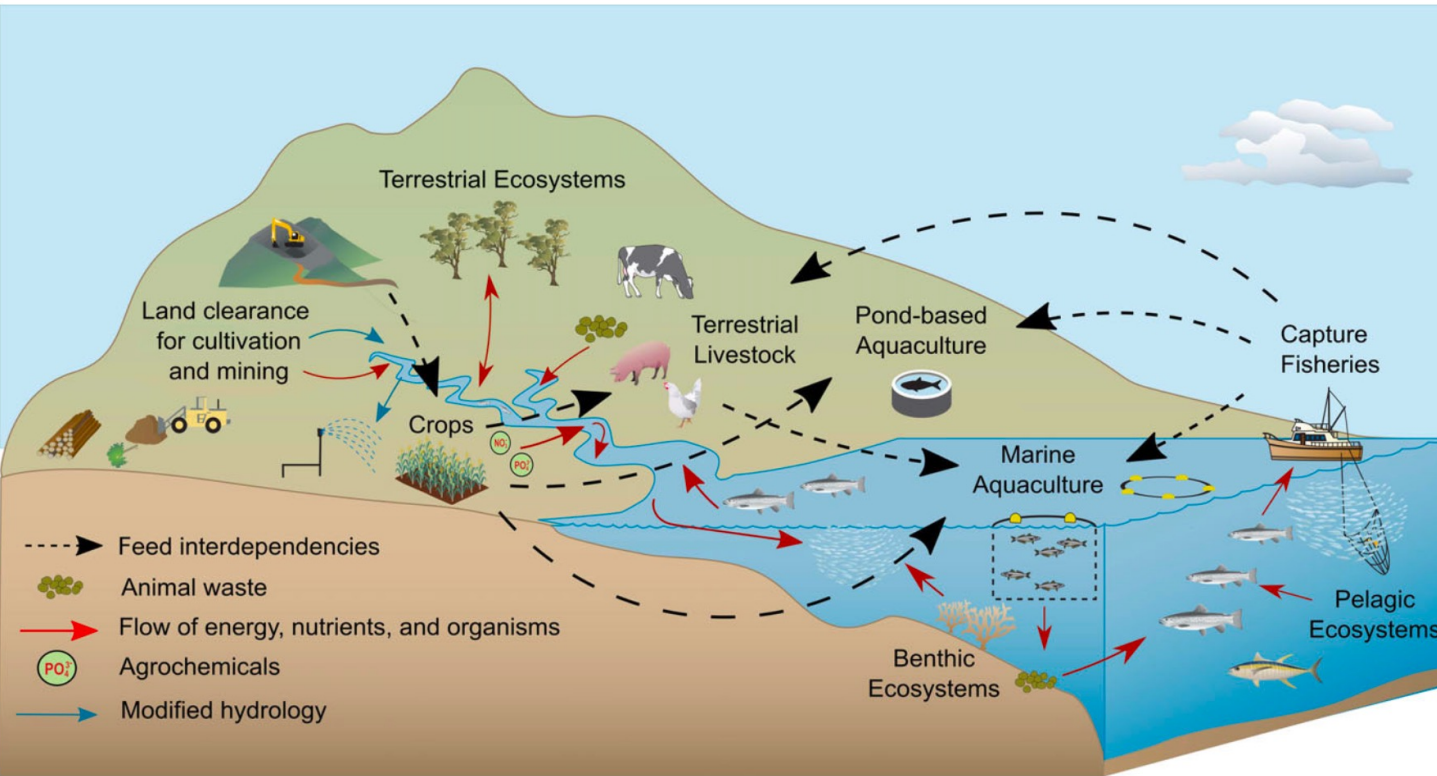


⇒ **Solution ?**
Ralentissement des flux à des nœuds intermédiaires en créant de l'hétérogénéité



Changement global

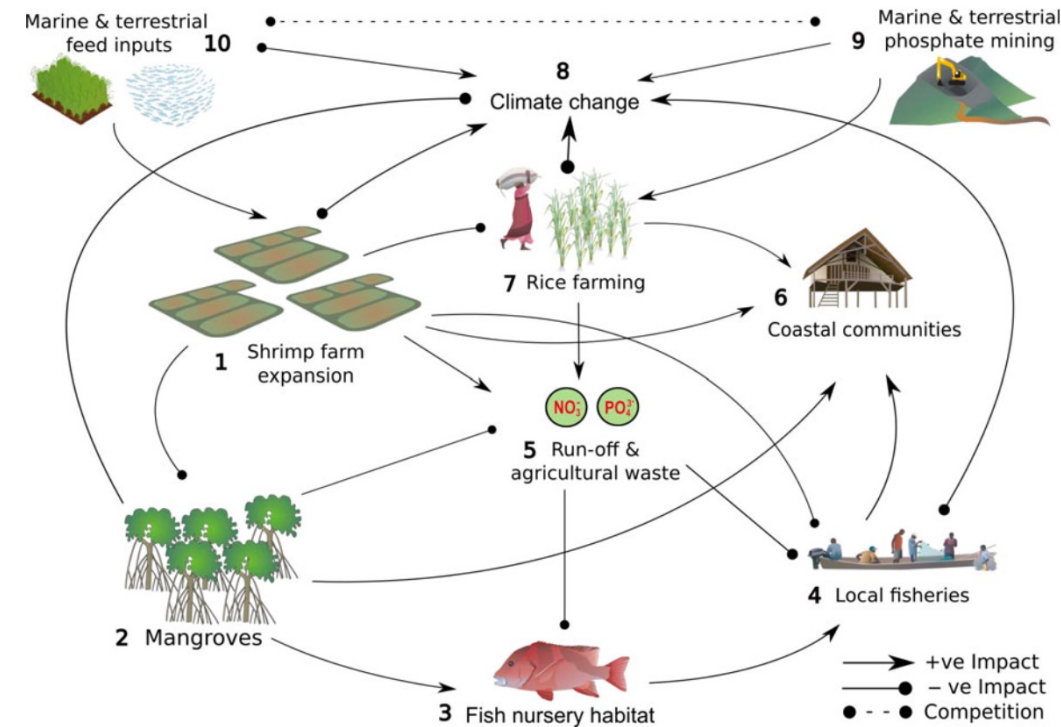
Une redistribution globale des nutriments



Cottrell et al. 2017 *Global Change Biology*

⇒ Les flux spatiaux rendent les secteurs économiques interdépendants

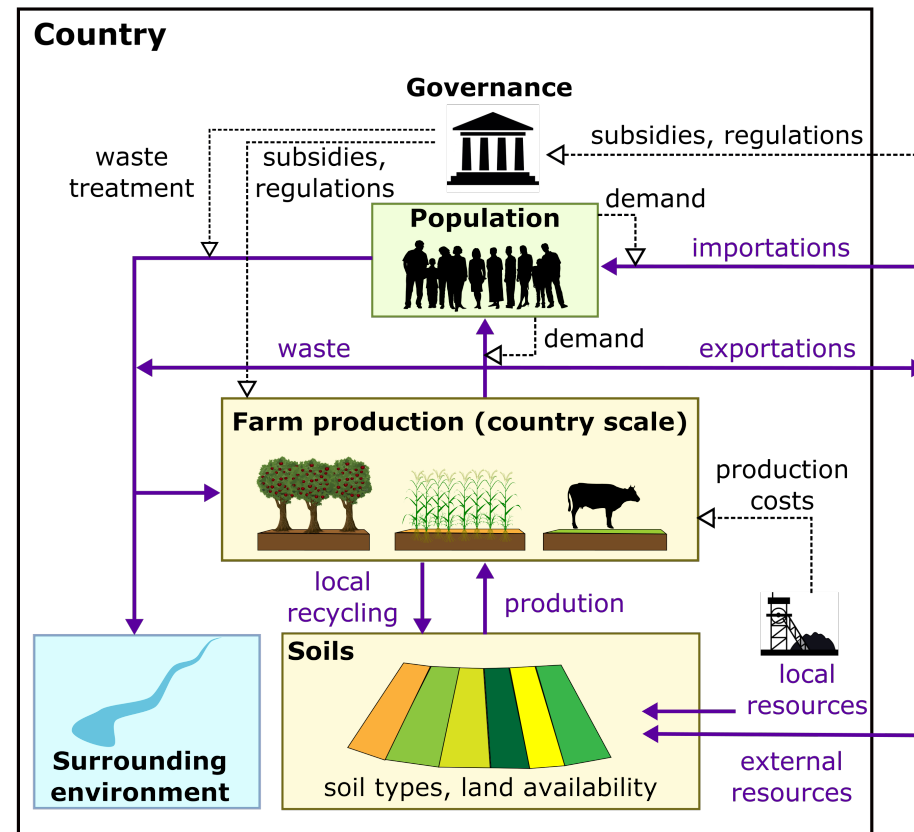
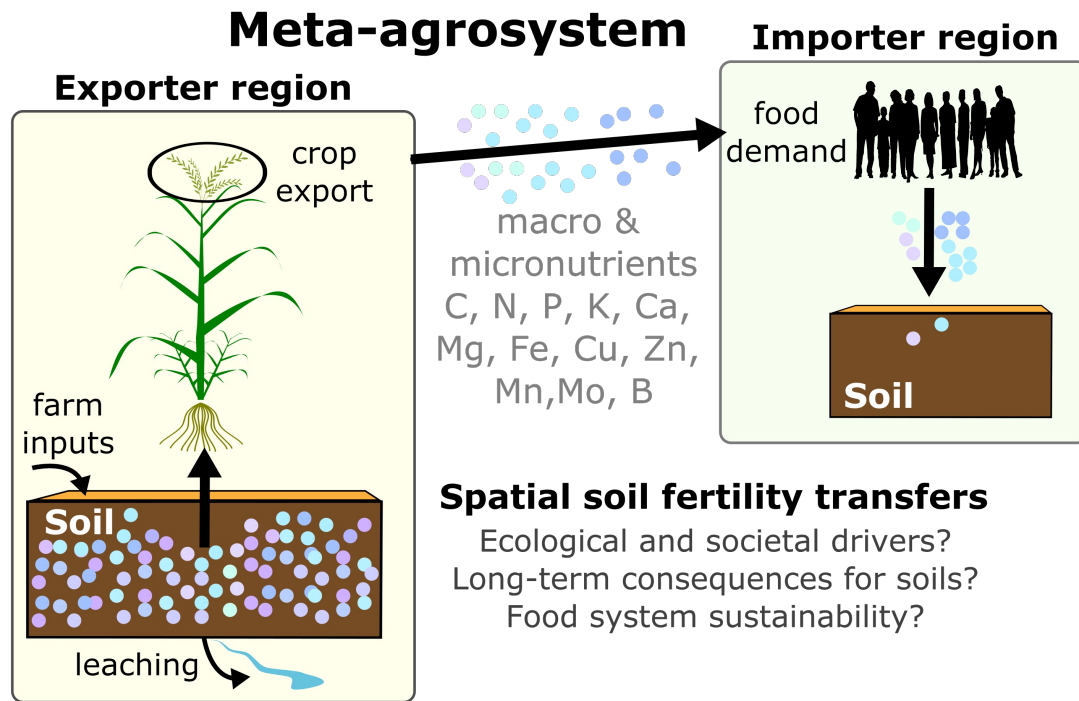
Exemple d'interactions dans le cadre de l'expansion d'aquaculture intensive de crevettes en Indonésie



Changement global

Une redistribution globale des nutriments

Projet en cours: comment les exportations de nutriments liés au marché des denrées alimentaires redistribue les nutriments et impactent les capacités de production à long-terme ?



Anne-Sophie Lafuite

⇒ Quels scénarios de pratiques et systèmes agricoles, et de consommation réduisent les inégalités et les problèmes environnementaux ?

Changement globaux

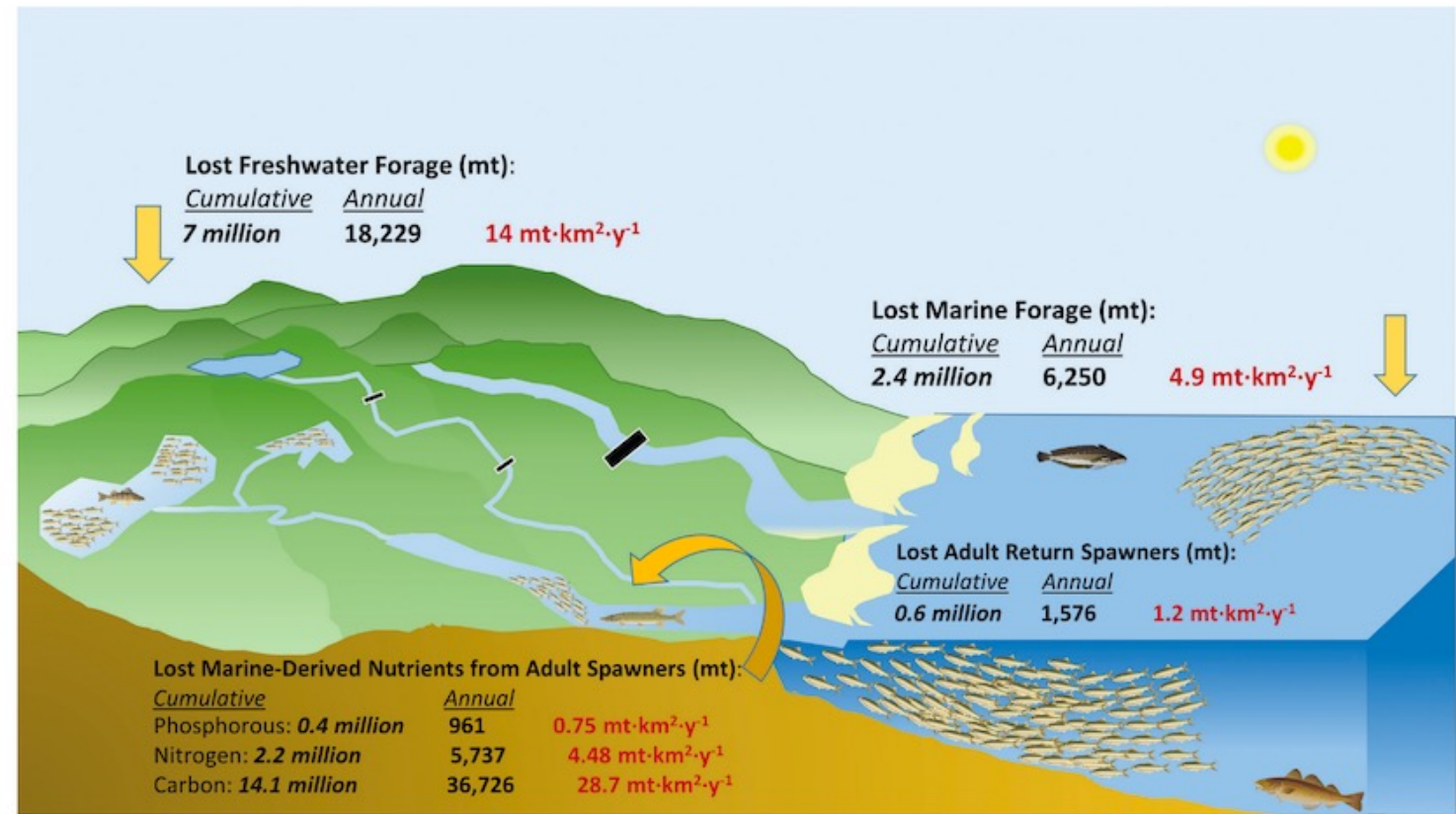
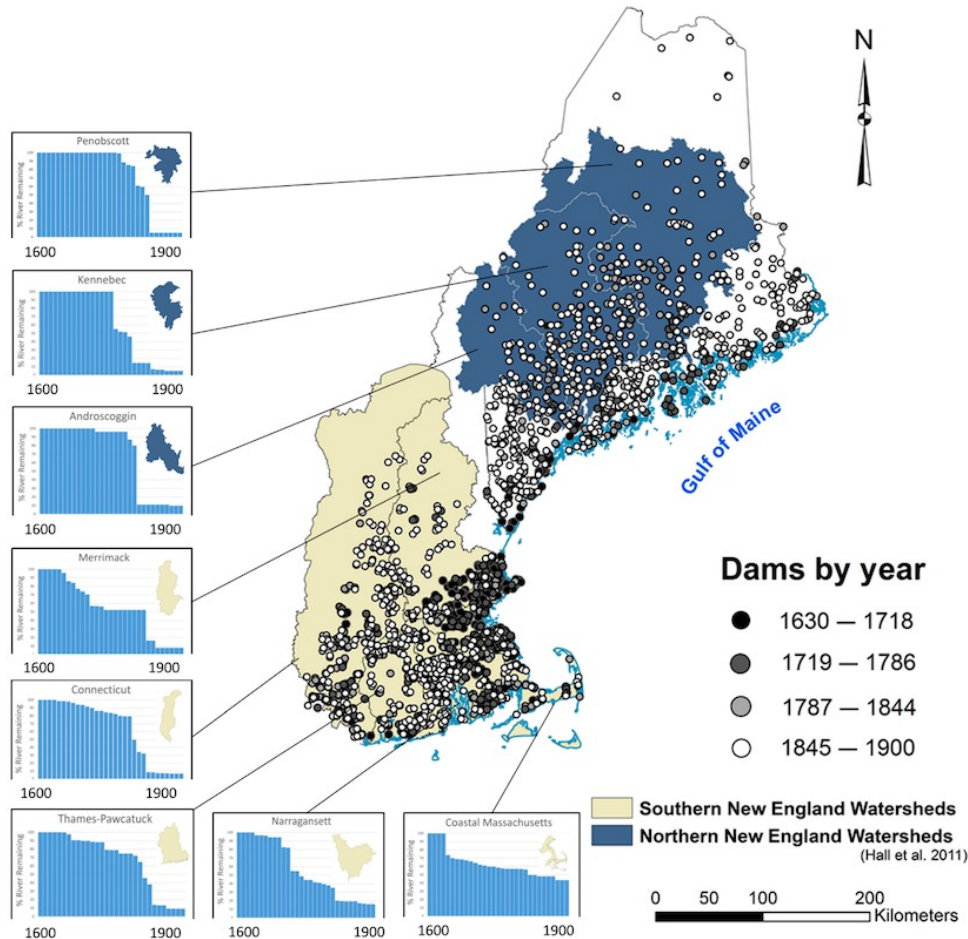
Une altération des flux "remontants"

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*

Changement globaux

Une altération des flux "remontants"

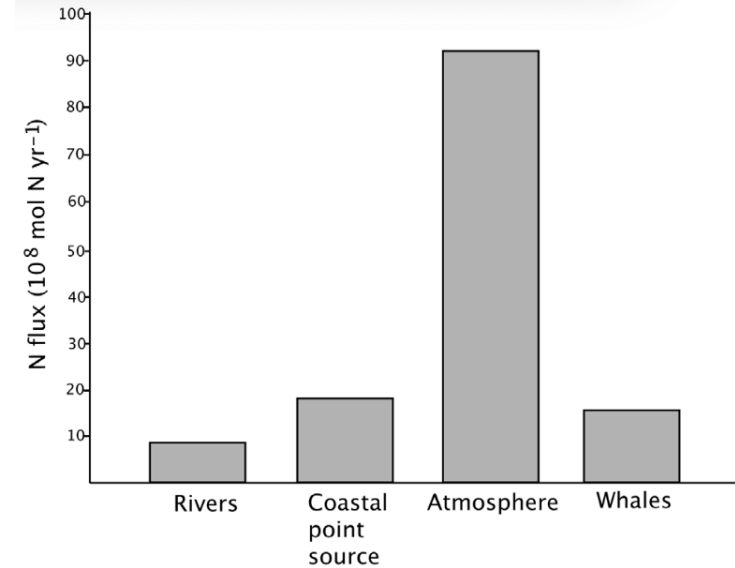
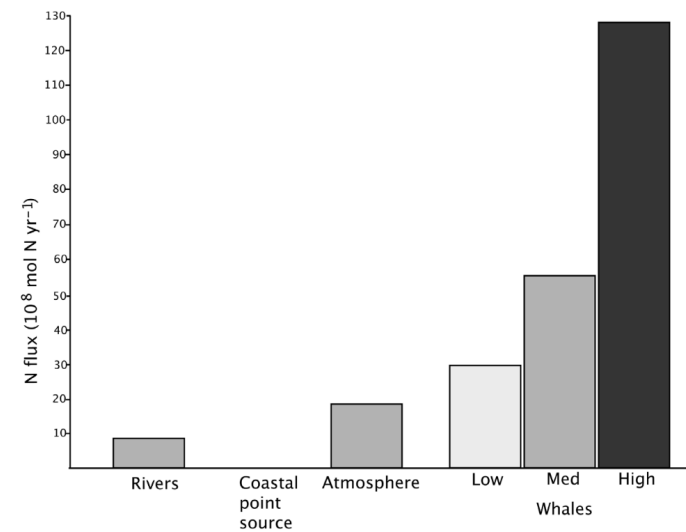
Exploitation des espèces → réduction des flux

Ralentissement de la « pompe baleine »

Flux d'azote dans le golf du Maine

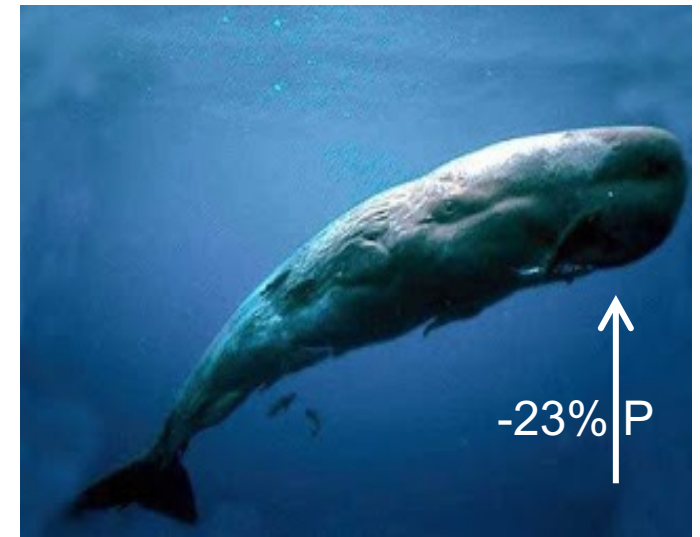
Avant la pêche industrielle

Après la pêche industrielle



Roman and McCarthy 2010, PloS One

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



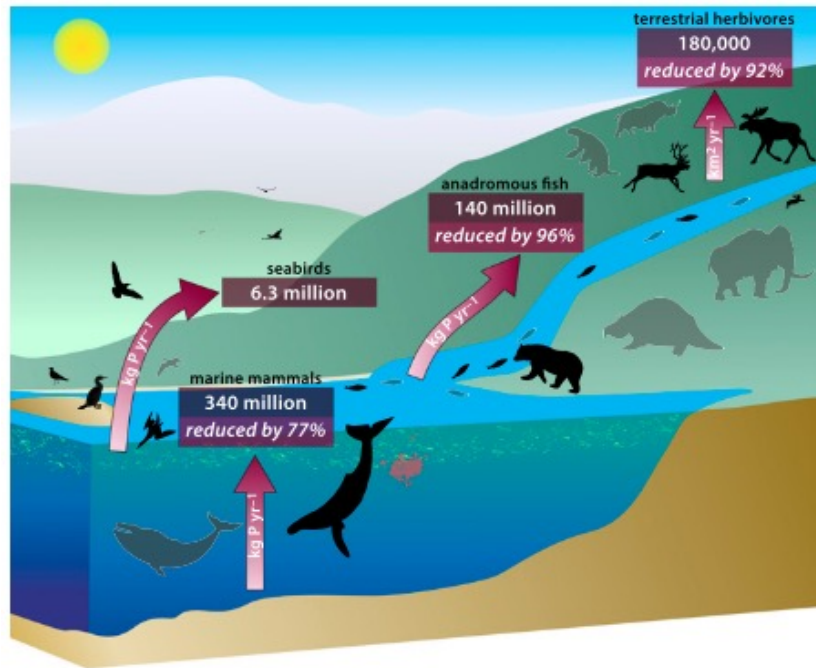
Doughty et al. 2015, PNAS

Changement globaux

Une altération des flux "remontants"

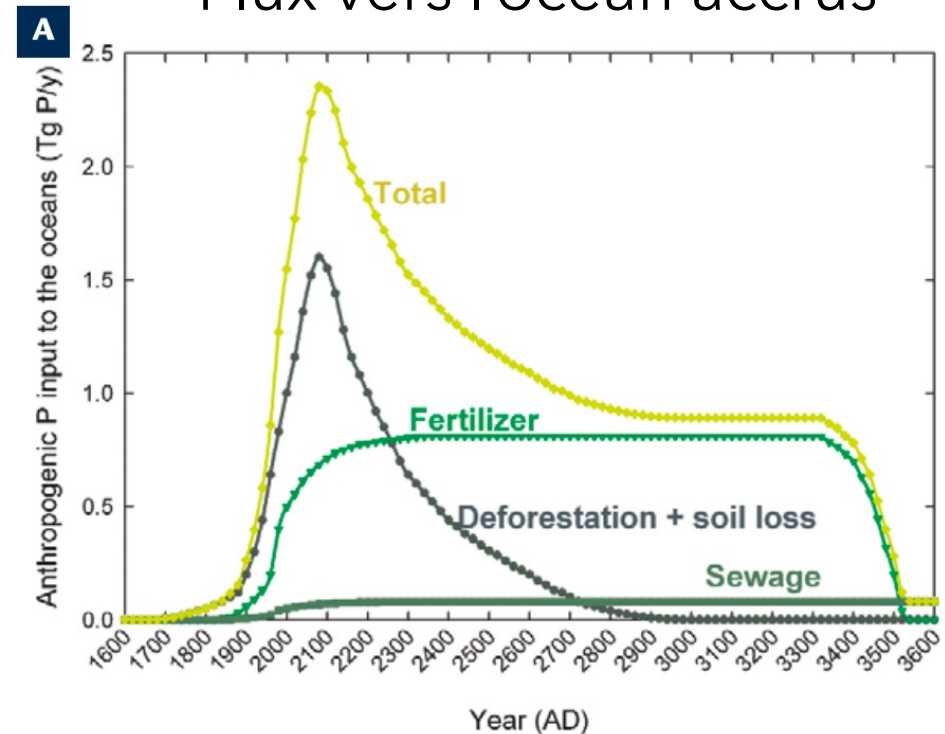
⇒ Effets sur le cycle globale du Phosphore des modifications de flux

Flux vers la terre diminués



Doughty et al. 2015, *PNAS*

Flux vers l'océan accru



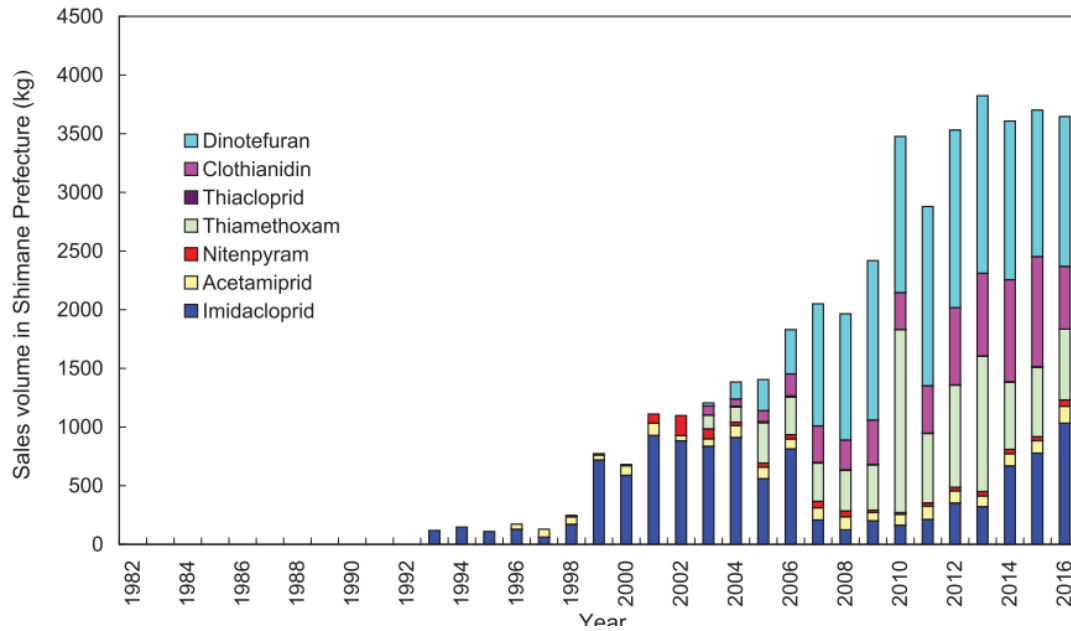
Philippelli 2008, *Elements*

- ⇒ **Penser à long terme:**
- Protection des sols / Circularité de l'utilisation de P
 - Protéger les espèces qui remettent P à disposition

Changement global flux spatiaux → propagation des contaminants

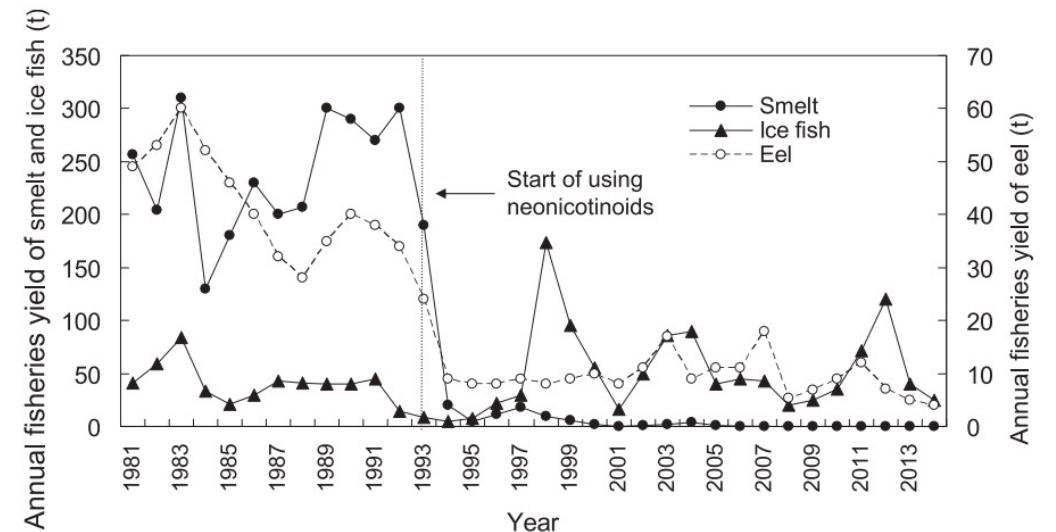
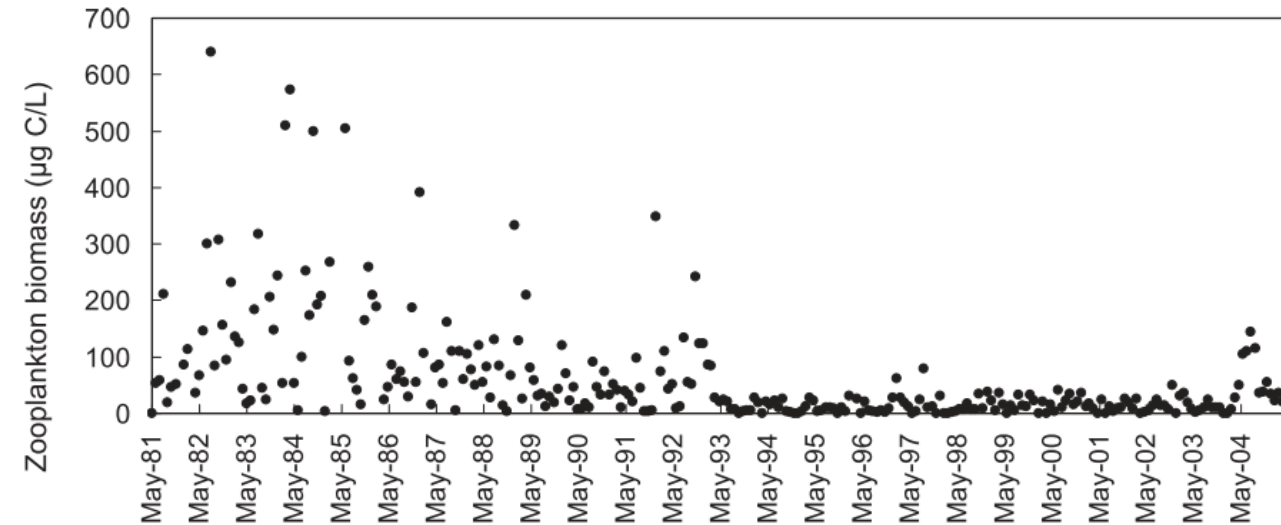
=> Néonicotinoïdes - propagation aux communautés lacustres

Lac Shinji, Japon



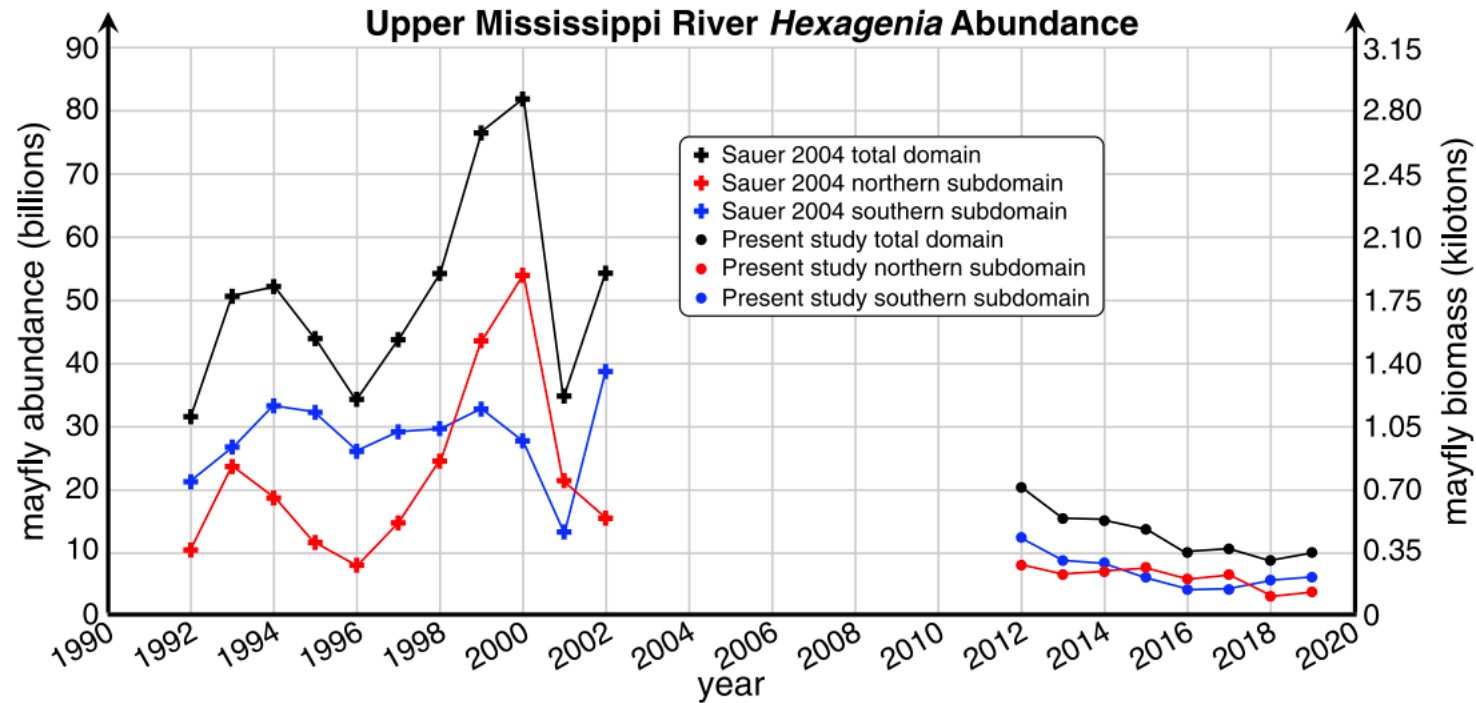
Yamamuro et al. 2019, *Science*

=> Impact négatif sur les populations de poissons



Changement globaux flux spatiaux → propagation des contaminants

=> Néonicotinoïdes - propagation aux communautés lacustres



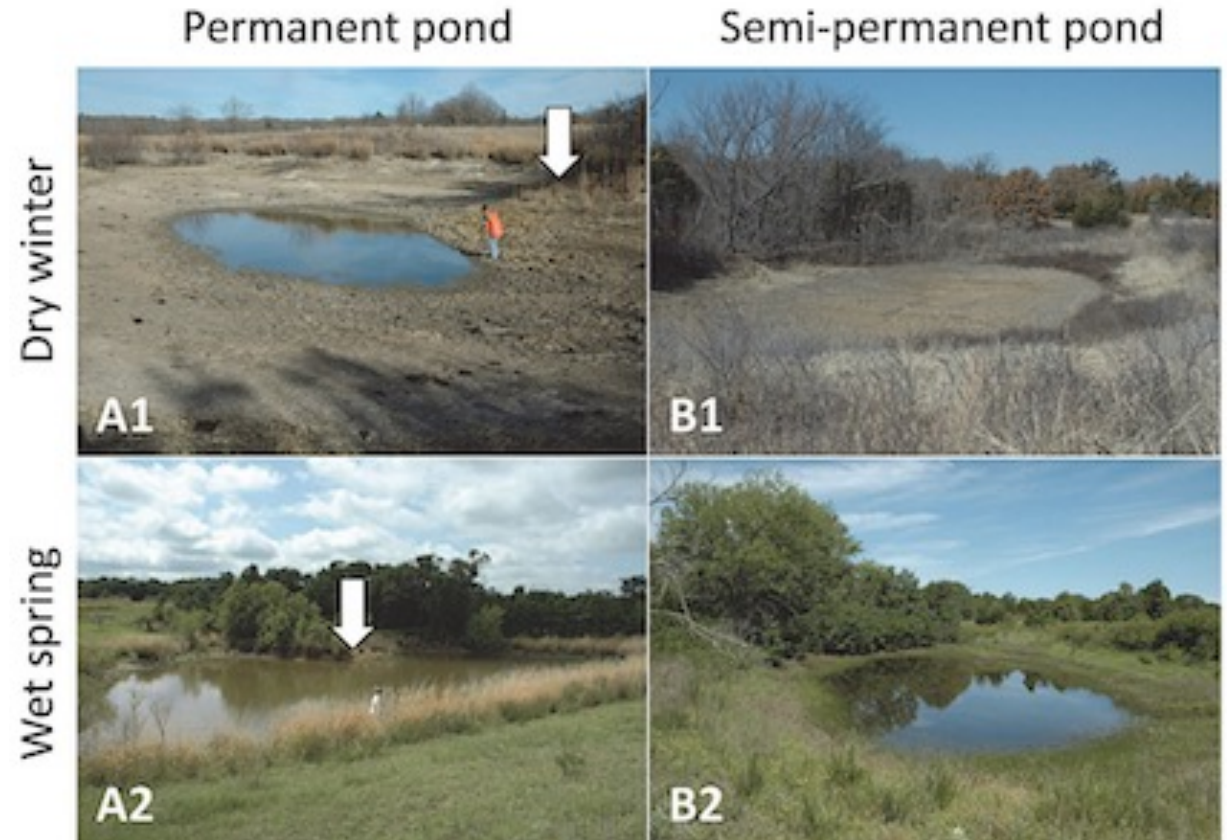
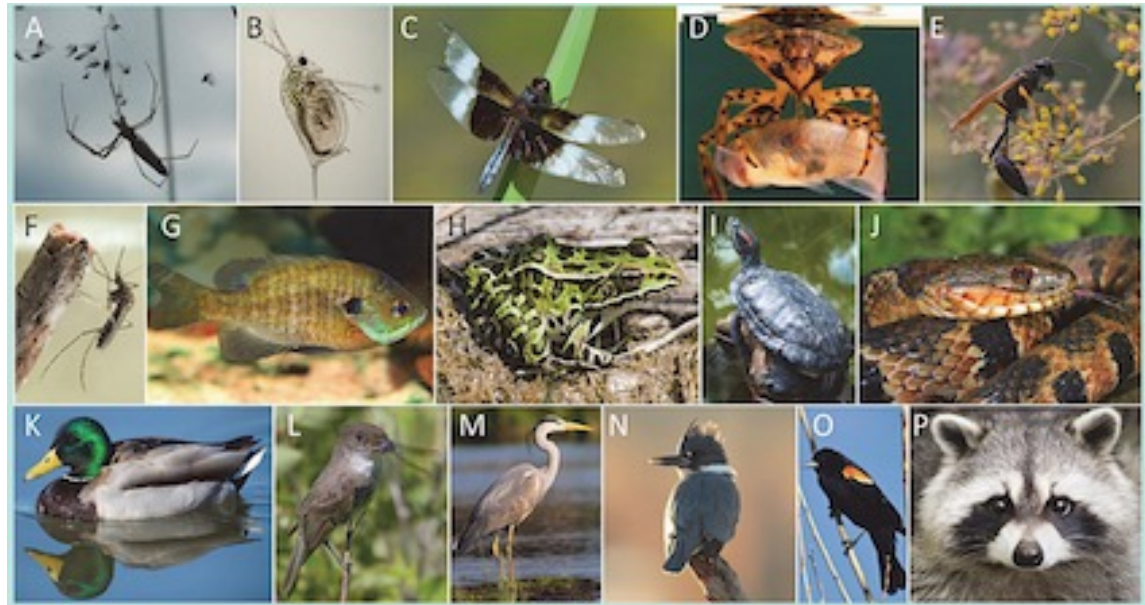
Stepanian et al. 2020, PNAS

=> Impact négatif sur les émergence massive d'insectes aquatiques

Changement global flux spatiaux → propagation des contaminants

=> Contamination au mercure - Exemple des mares des grandes plaines

Petites mares ~0,5-1 ha, creusées depuis le début XXème dans les zones agricoles => 8-9 millions actuellement



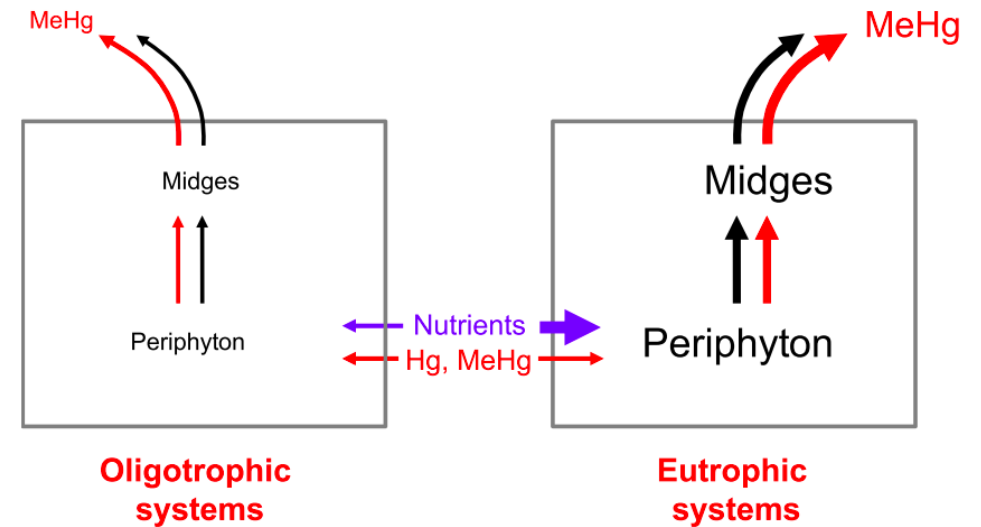
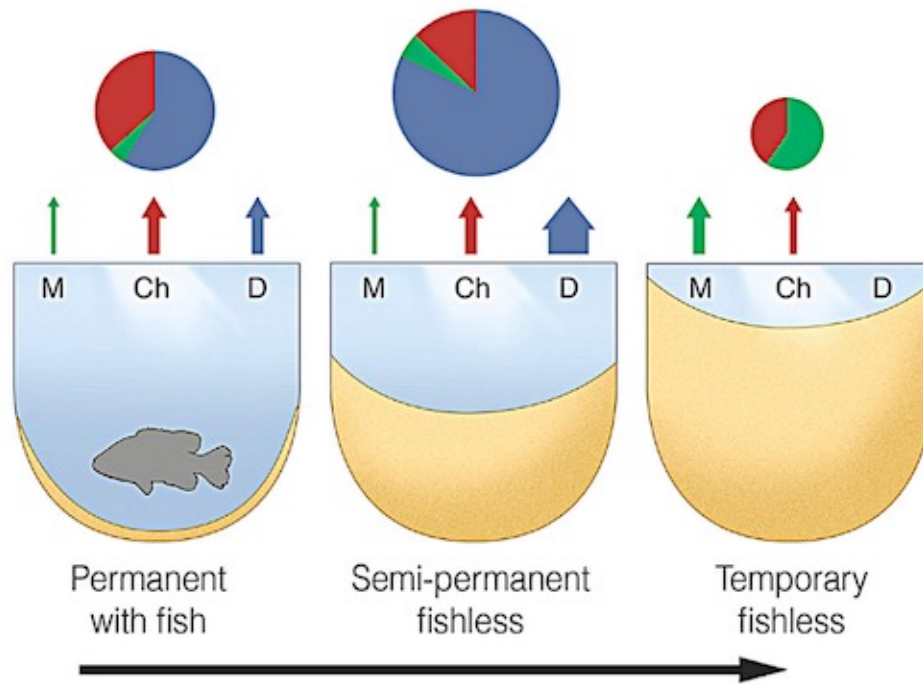
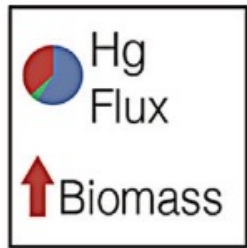
Chumchal and Drenner 2015, *Environmental Toxicology and Chemistry*

Changement global flux spatiaux → propagation des contaminants

=> Contamination au mercure - Exemple des mares des grandes plaines

- Dépôts atmosphérique de mercure issu de la combustion d'énergie fossiles, et lessivage
- Transformation microbienne en MeHg, très toxique et bio-accumulation dans la chaîne alimentaire
- Propagation de cette forme toxique dans les écosystèmes terrestres via l'émergence d'insectes

M Moustique
Ch Chironomid
D Damesfly



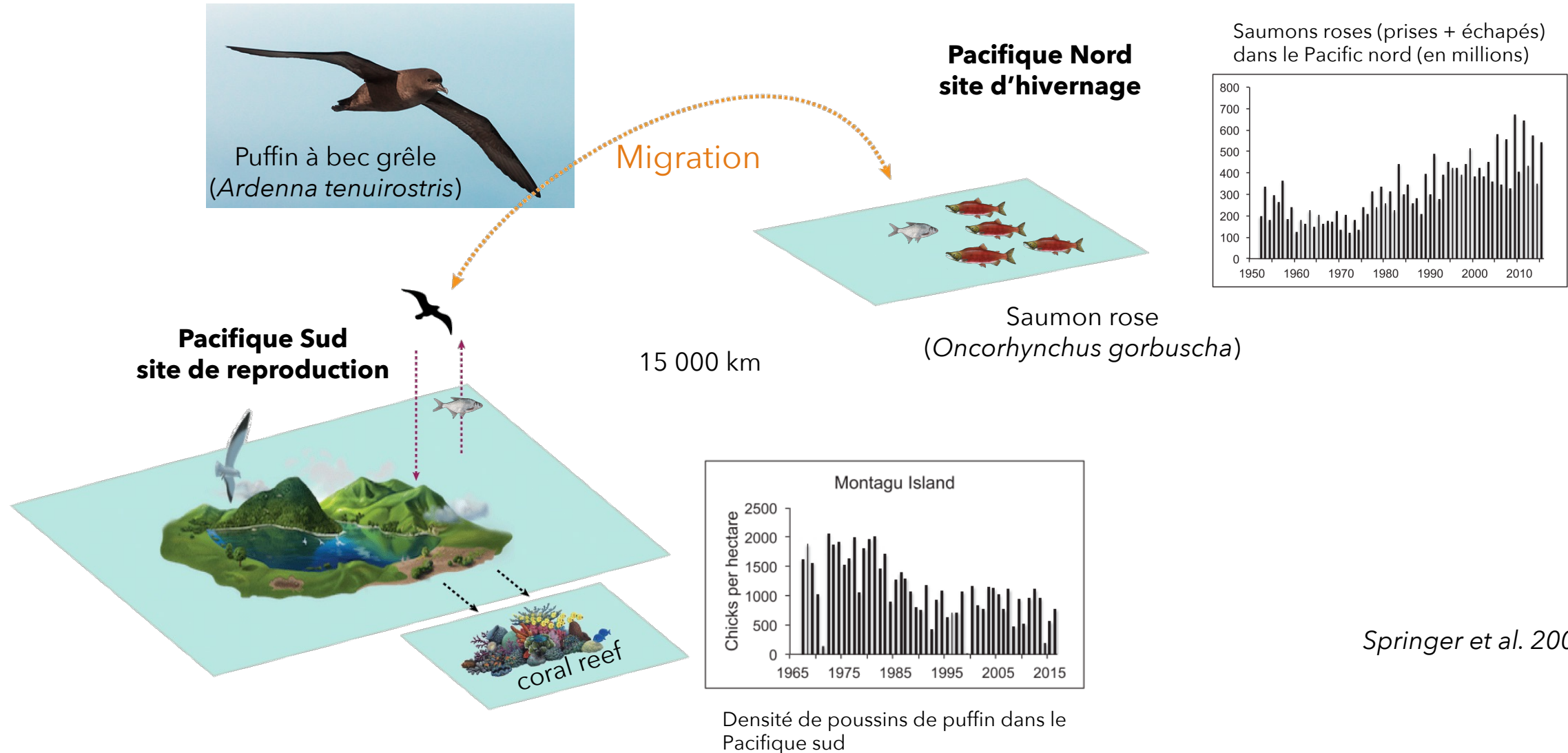
Schiesari et al. 2018, *Journal of applied ecology*

Chumchal and Drenner 2015, *Environmental Toxicology and Chemistry*

Changement globaux

Migrateurs → propagation longue distance

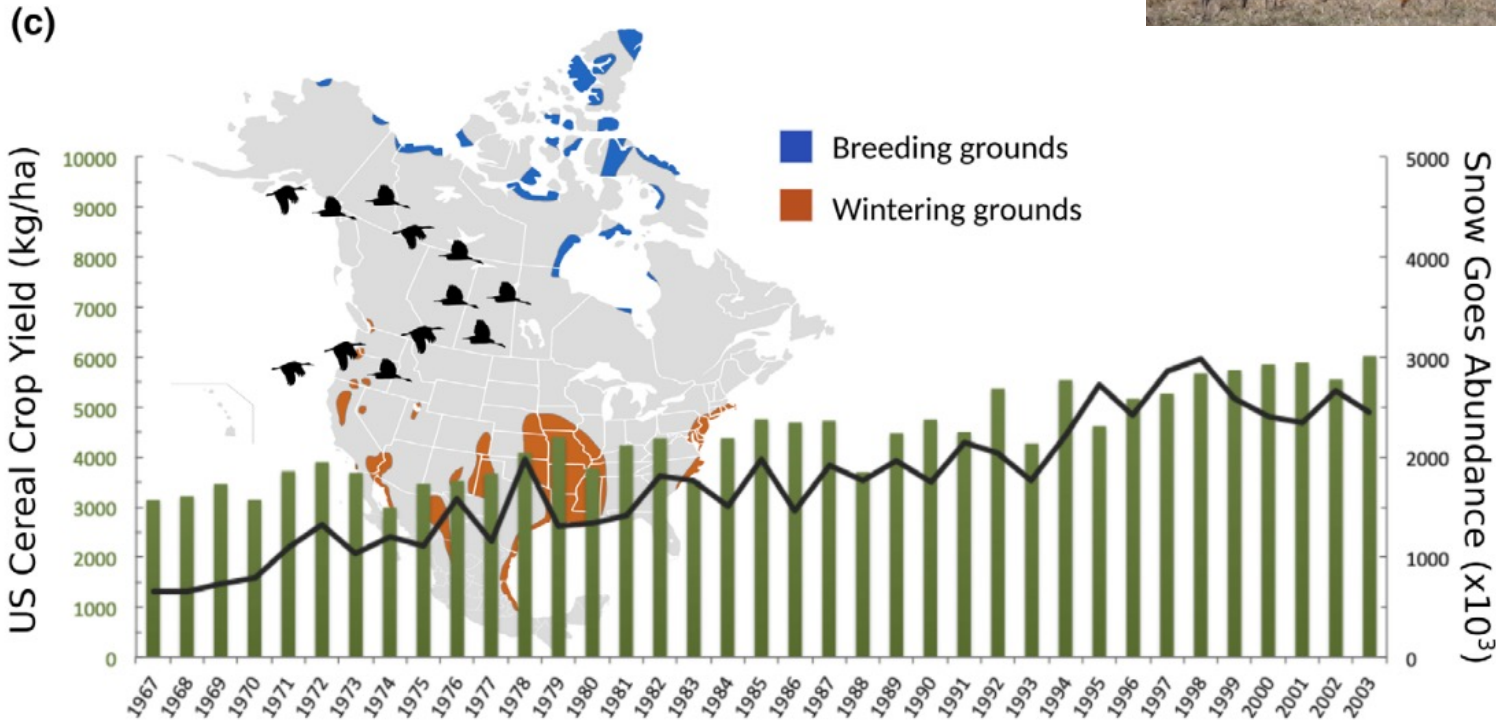
=> Impact du saumon pacifique sur les oiseaux migrants



Changement globaux

Migrateurs → des impacts longue distance

=> Le cas d'école des oies des neiges



McCann et al. 2021 *Ecology Letters*
données: Jefferies et al 2004, ICB;

Érosion en Arctique



→ Salinisation

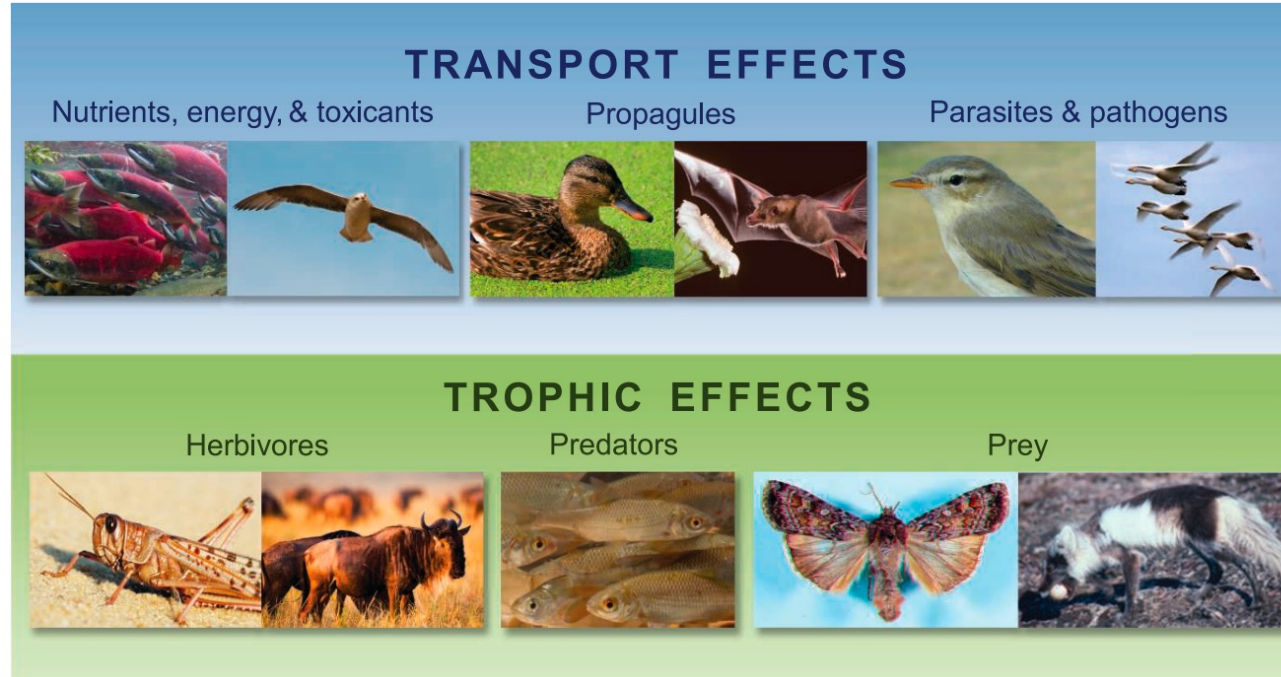
[+ d'évaporation des sols nus
(Srivastava & Jefferies 1995)]

[Les oies changent leur régime pour les résidus de culture de riz, maïs et blé (Abraham et al 2005 GCB)]

Changement globaux

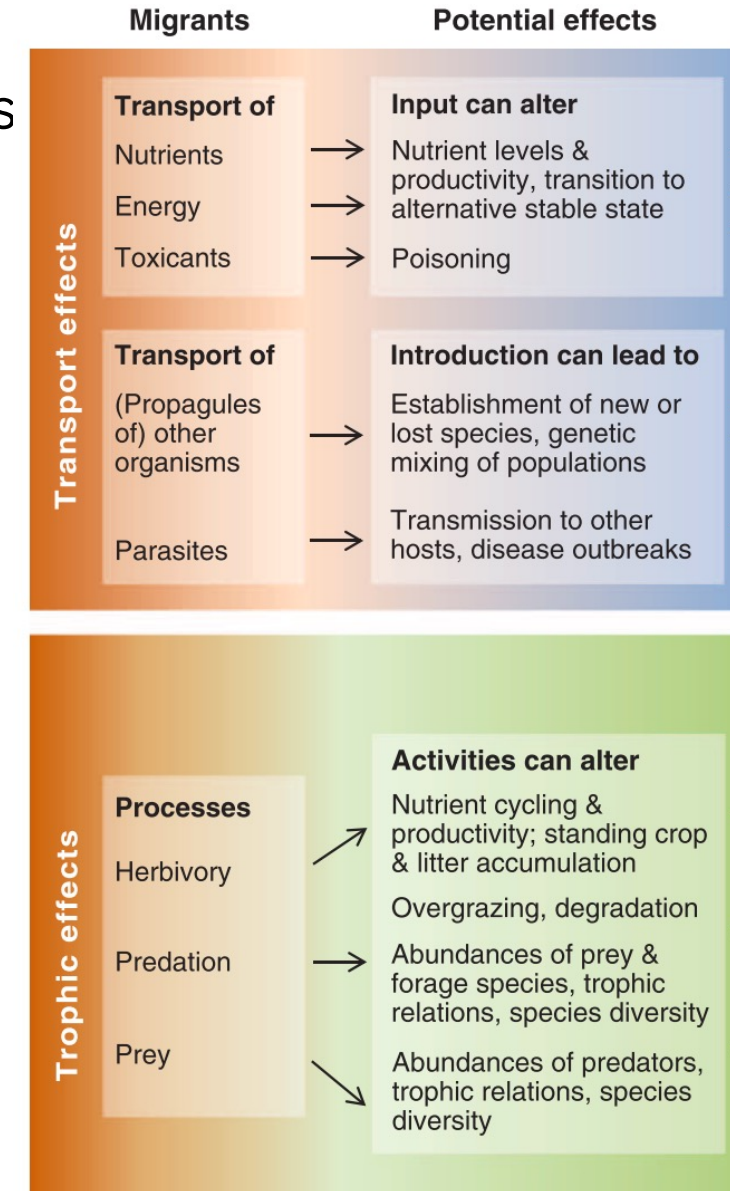
Migrateurs → des impacts longue distance

⇒ Les migrateurs connectent des communautés distantes



Bauer and Hoyer 2014, *Science*

⇒ **Nécessité de régulations à l'échelle internationale**



Changement globaux

Conséquences des modifications de flux spatiaux

- ⇒ Propagation de perturbations locales à d'autres habitats
- ⇒ Changements inattendus via des cascades d'effets indirectes
- ⇒ Modification des équilibres de fonctionnement des écosystèmes
- ⇒ Avec risque d'engendrer des états dégradés durables
- ⇒ Effet d'accumulation et propagation des toxiques
- ⇒ Perturbations des équilibres entre différents secteurs économiques connectés
- ⇒ **Penser à une échelle spatiale supérieure à celle du problème observé: la gestion environnementale au sens large doit être holistique et multi-échelle**

Références

- Abraham, K. F., Jefferies, R. L., & Alisauskas, R. T. (2005). The dynamics of landscape change and snow geese in mid-continent North America. *Global Change Biology*, 11(6), 841–855. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00943.x>
- 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>
- 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>
- 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>
- Billen, G., Garnier, J., & Lassaletta, L. (2013). The nitrogen cascade from agricultural soils to the sea: Modelling nitrogen transfers at regional watershed and global scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0123>
- 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>
- Carpenter, S. R. (2008). Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(32), 11039–11040. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806112105>
- 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>
- Cottrell, R. S., Fleming, A., Fulton, E. A., Nash, K. L., Watson, R. A., & Blanchard, J. L. (2018). Considering land-sea interactions and trade-offs for food and biodiversity. *Global Change Biology*, 24(2), 580–596. <https://doi.org/10.1111/gcb.13873>
- 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>

Références

- 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>
- Dreyer, J., Townsend, P. A., Hook, J. C., Hoekman, D., Vander Zanden, M. J., & Gratton, C. (2015). Quantifying aquatic insect deposition from lake to land. *Ecology*, 96(2), 499–509. <https://doi.org/10.1890/14-0704.1>
- Dutton, C. L., Subalusky, A. L., Hamilton, S. K., Rosi, E. J., & Post, D. M. (2018). Organic matter loading by hippopotami causes subsidy overload resulting in downstream hypoxia and fish kills. *Nature Communications*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04391-6>
- 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>
- 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>

Références

- 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>
- 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>
- 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>

Références

- 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>
- 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>
- 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>
- 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>

Références

- 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>
- Srivastava, D. S., & Jefferies, R. L. (1996). A positive feedback: herbivory, plant growth, salinity, and the desertification of an Arctic salt-marsh. *Journal of Ecology*, 84, 31-42.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. De, Wit, C. A. De, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 736. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- 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>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., & Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*, 364(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- Wipfli, M. S., & Baxter, C. V. (2010). Linking Ecosystems, Food Webs, and Fish Production: Subsidies in Salmonid Watersheds. *Fisheries*, 35(March 2015), 373-387. <https://doi.org/10.1577/1548-8446-35.8.373>
- 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>