

Chapitre 3
Fonctionnement
et dynamique des
écosystèmes

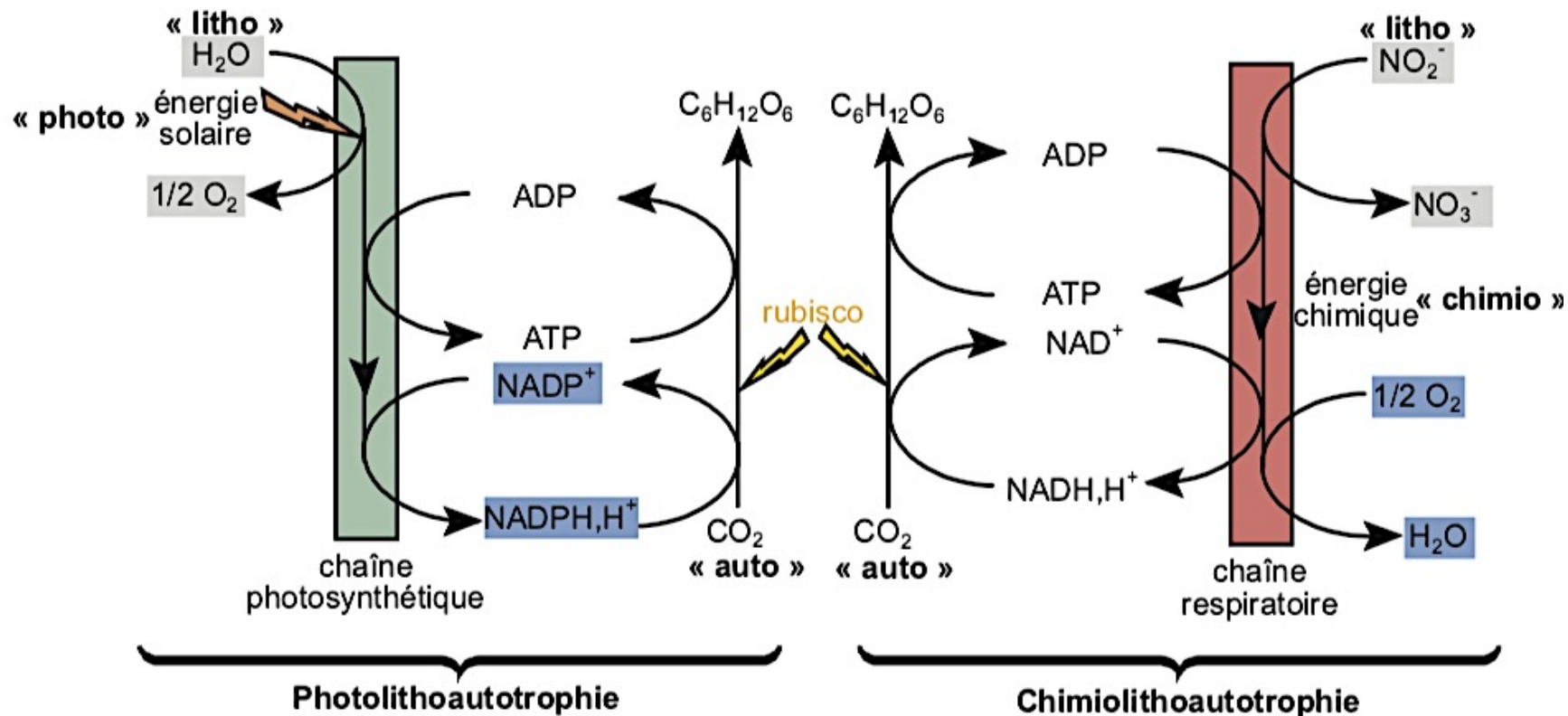


La vie reprend après les incendies australiens

1. Flux de matière et d'énergie au sein des écosystèmes

1.1. Les chaînes et réseaux trophiques

Les producteurs primaires



Production brute – production nette

Production = masse sèche élaborée par unité de temps et de surface

Production primaire = production à partir d'éléments exclusivement minéraux (photolithotrophie et chimiolithotrophie)

Production primaire brute PPB =
production de biomasse par la photosynthèse

Production primaire nette PPN =
PPB – pertes métaboliques (respiration, fermentations...)

La production primaire dépend de facteurs abiotiques

→ TD écosystèmes

Influence des facteurs climatiques, édaphiques ?

Apports de fertilisants ? Lesquels ? Pourquoi ?

La production d'une prairie

Production : en t de MS.ha⁻¹.a⁻¹ au printemps (= 60% valeur annuelle)

Types de sol et conduite		Très bons sols		Bons sols		Sols superficiels		Sols de causses	
Pluviométrie du 01/05 au 30/09 (en mm)	Type de prairie	fertilisation azotée : < 200 N /ha	fertilisation azotée : > 200 N /ha	fertilisation azotée : < 200 N /ha	fertilisation azotée : > 200 N /ha	fertilisation azotée : < 100 N /ha	fertilisation azotée : > 100 N /ha	fertilisation azotée : < 100 N /ha	fertilisation azotée : > 100 N /ha
250 à 300 mm	Prairies temporaires	6,0	8,0	6,0	7,0	5,0	6,0	5,0	6,5
	Prairies naturelles	5,5		5,0		4,0		5,0	
300 à 350 mm	Prairies temporaires	7,0	9,0	6,0	8,0	5,0	7,0	6,0	7,5
	Prairies naturelles	6,0		5,0		4,0		6,0	
350 à 400 mm	Prairies temporaires	8,0	10,0	7,0	9,0	6,0	8,0		
	Prairies naturelles	5,0		6,0		5,0			
plus de 400 mm	Prairies temporaires	9,0	11,0	8,0	10,0	7,0	8,0		
	Prairies naturelles	7,0		6,5		6,0			

La notion de facteur limitant

Effet de l'addition de phosphate au sol sur la croissance de l'Ortie

Poids sec des plants en mg	Témoin	Ajout de 5 g.m ⁻² de phosphate
Sous faible éclaircissement	2,0 +/- 0,2	10,5 +/- 1,1
Sous fort éclaircissement	15,2 +/- 2,5	177,7 +/- 24,0

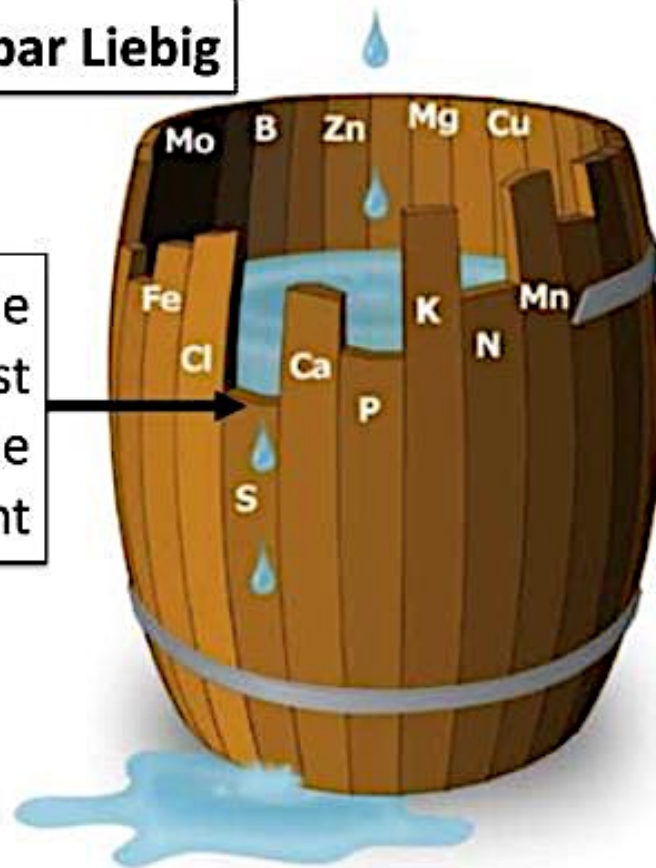
Facteur limitant = facteur du milieu le plus éloigné de son optimum et qui donc limite le développement du végétal, et ce quelle que soit la variation des autres facteurs du milieu.

SOUVENT AZOTE ou PHOSPHATE

Notion de facteur limitant

« Loi du minimum » par Liebig

La croissance optimale des plantes est déterminée par le facteur le plus limitant



La production primaire dépend de facteurs abiotiques

→ TD écosystèmes

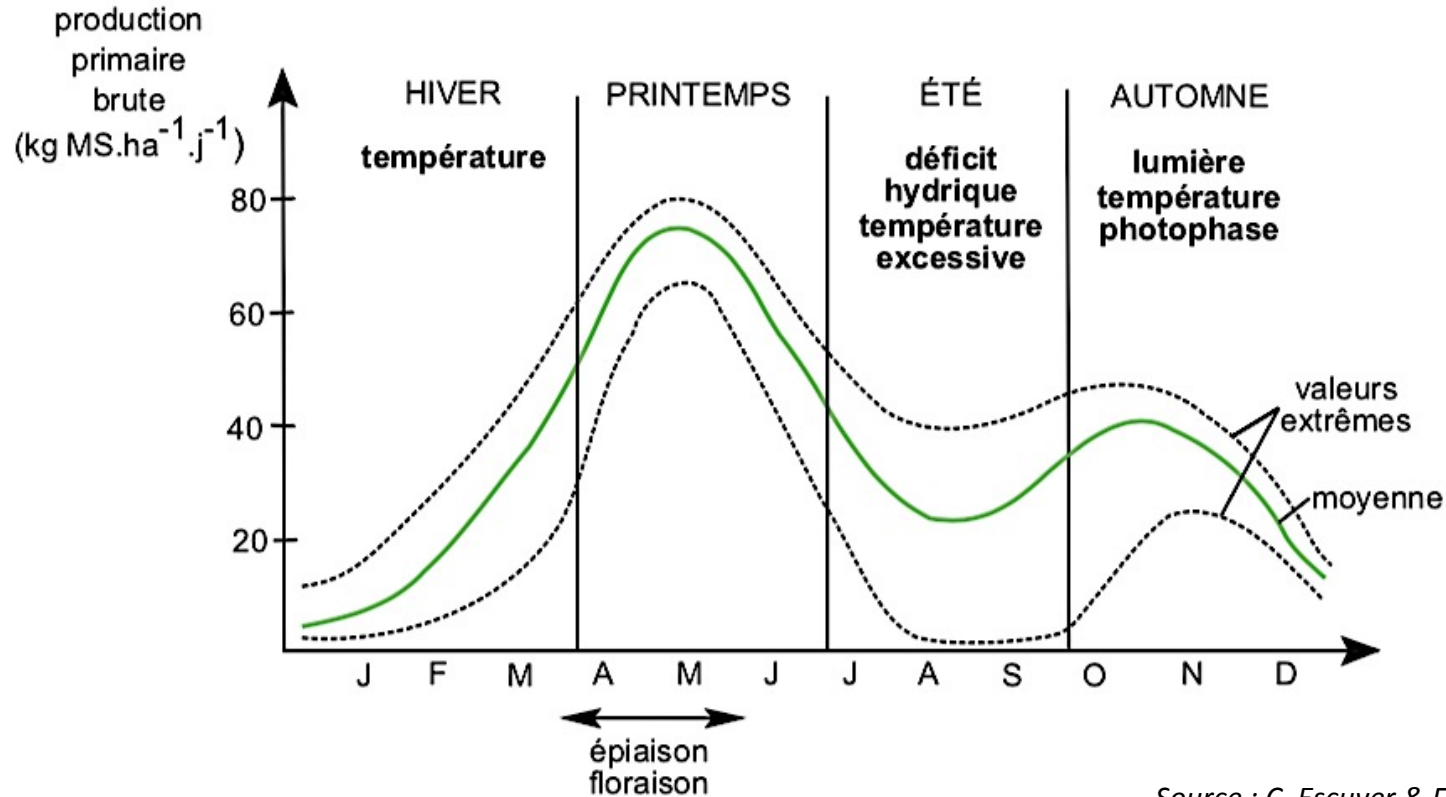
Influence des facteurs climatiques et édaphiques

- lumière
- température
- composition des sols

Apports de fertilisants permettant de remonter le facteur limitant

La production primaire varie dans l'année

Production primaire brute sur une année : cas d'une prairie



Étude des forêts et prairies

	Type d'écosystème	Biomasse moyenne (t.ha ⁻¹)	Production nette moyenne (g.m ⁻² .a ⁻¹)
FORÊTS	Forêts tropicales humides	450	2200
	Forêts tropicales caducifoliées	350	1600
	Forêts tempérées caducifoliées	300	1200
	Forêts boréales (taïga)	200	800
PRAIRIES	Savanes	40	900
	Steppes tempérées	16	600
	Toundra	6	140
	Agroécosystèmes	10	650

La productivité (écologique)

Productivité = rapport $\frac{\text{masse de production nette par unité de temps}}{\text{biomasse à l'origine de cette production}}$

C'est l'inverse du **taux de renouvellement τ = turnover**.

Productivité

Forêt tropicale : $0,05 \text{ a}^{-1}$

Forêt tempérée : $0,04 \text{ a}^{-1}$

Forêt boréale : $0,04 \text{ a}^{-1}$

Calculer τ

Productivité

Savane : $0,22 \text{ a}^{-1}$

Steppe : $0,37 \text{ a}^{-1}$

Toundra : $0,23 \text{ a}^{-1}$

Agrosystème : $0,65 \text{ a}^{-1}$

La productivité (écologique)

taux de renouvellement τ = turnover.

Productivité et turn-over

Forêt tropicale : $0,05 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 20 \text{ ans}$

Forêt tempérée : $0,04 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 25 \text{ ans}$

Forêt boréale : $0,04 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 35 \text{ ans}$

Productivité et turn-over

Savane : $0,22 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 4,55 \text{ ans}$

Steppe : $0,37 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 2,7 \text{ ans}$

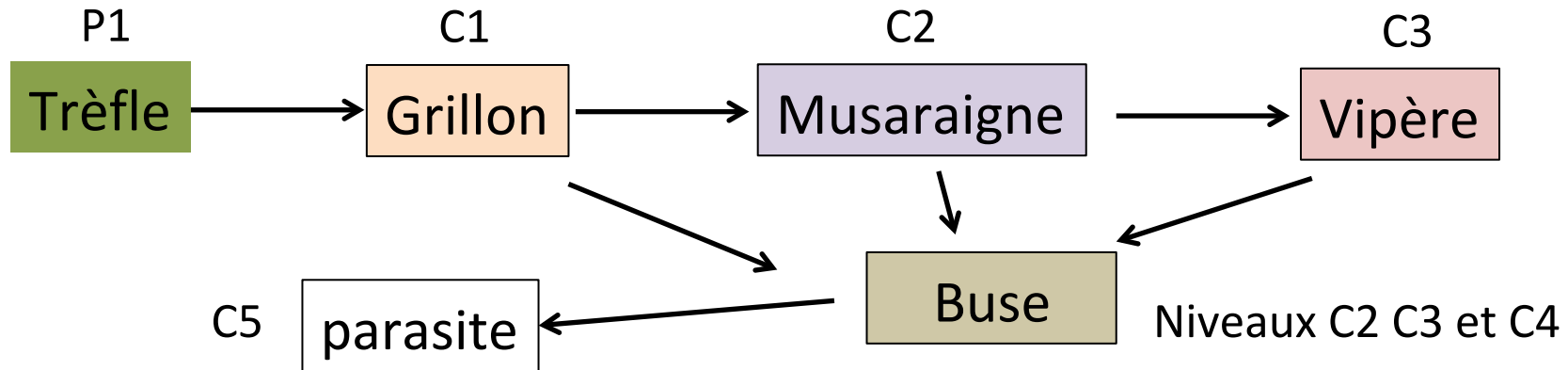
Toundra : $0,23 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 4,35 \text{ ans}$

Agrosystème : $0,65 \text{ a}^{-1}$ $\tau = 1,54 \text{ ans}$

Les consommateurs...

... se nourrissent de matière organique vivante

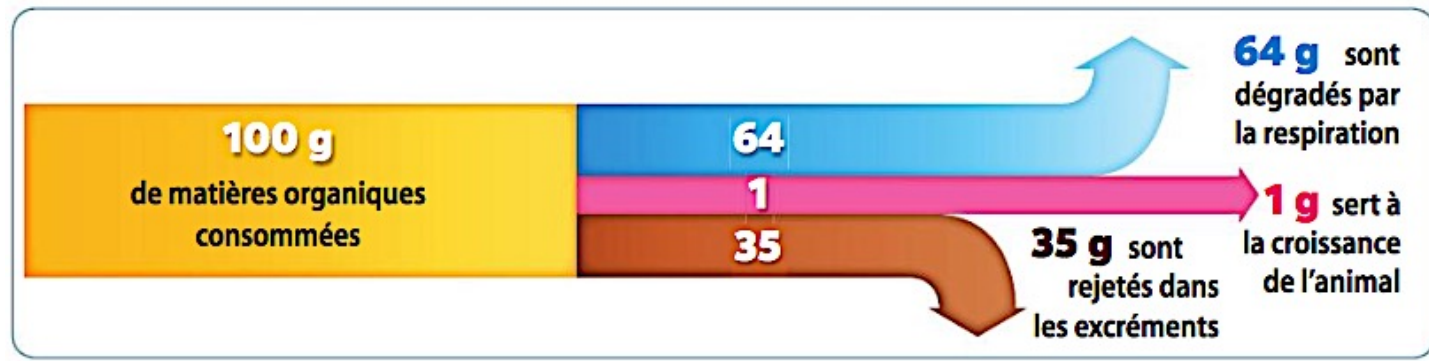
- Consommateur I^{aire} = herbivore
- Consommateur II^{aire} = prédateur
- Consommateur III^{aire} = superprédateur



Les consommateurs, des producteurs secondaires

Consommation de matière organique

- une part non assimilée
- une part décomposée et minéralisée par le métabolisme
- une part assimilée dans la matière organique = **production**



Exemple de la vache

Les consommateurs, des producteurs secondaires

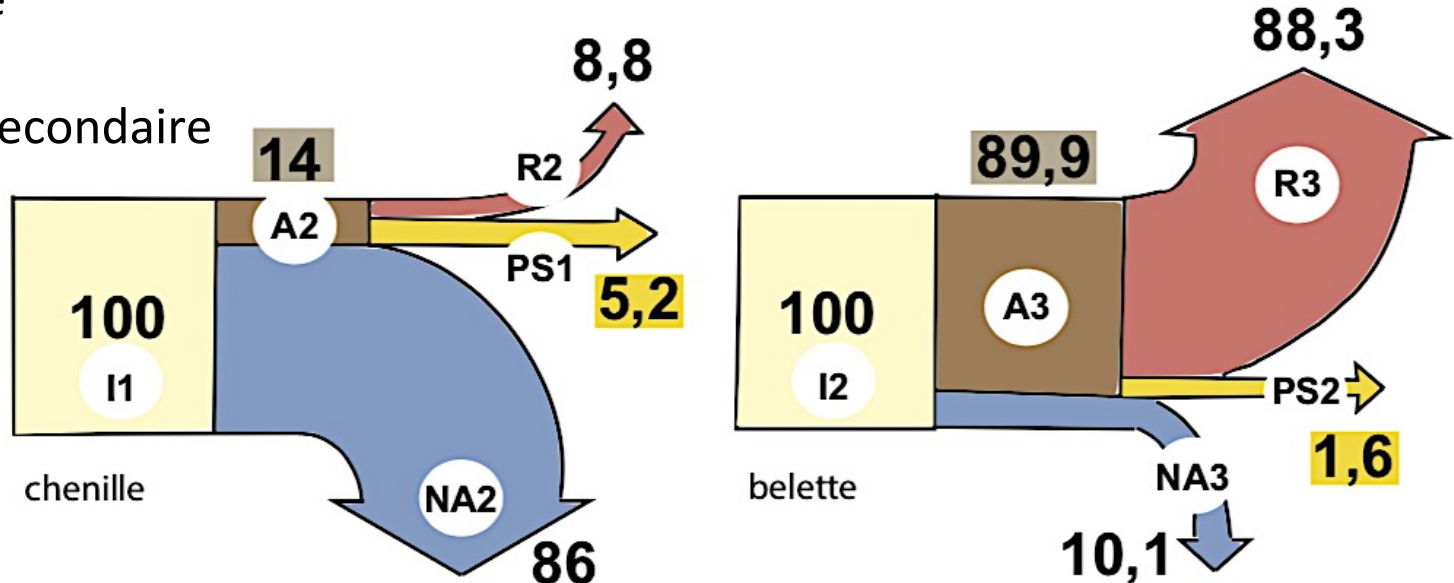
I = ingéré

NA = non assimilé

A = assimilé

PS = production secondaire

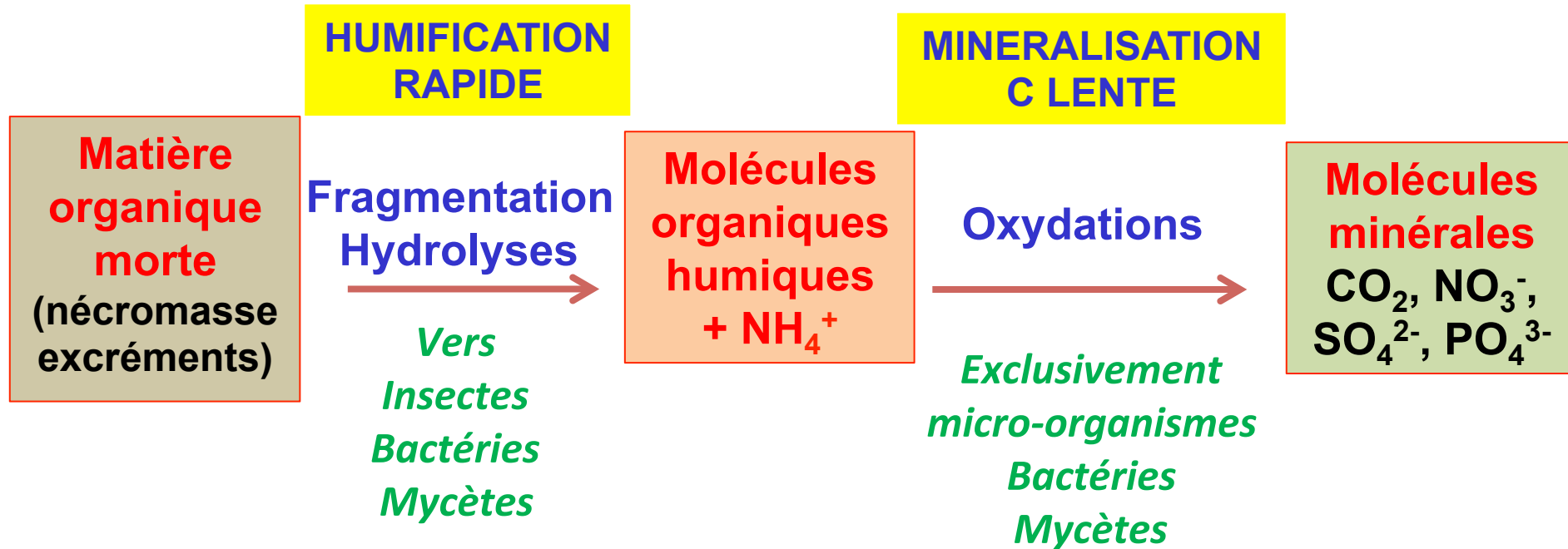
R = respiration



- La part non assimilée dépend de la nourriture (cellulose vs viande)
- La part du métabolisme est plus importante pour les endothermes

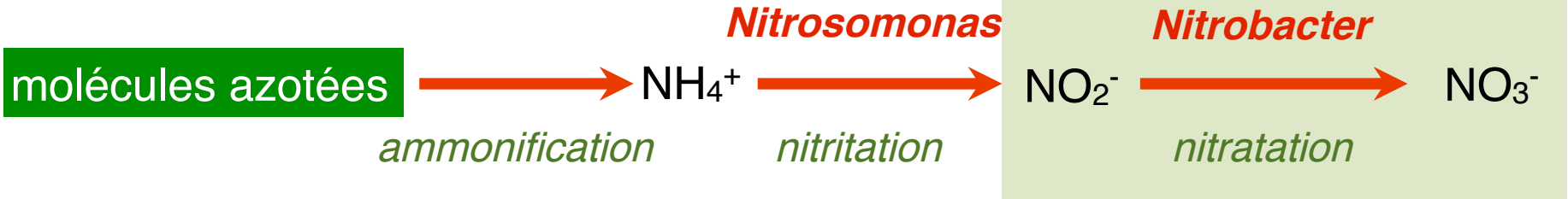
Les décomposeurs

décomposeur = consommateur de matière organique morte



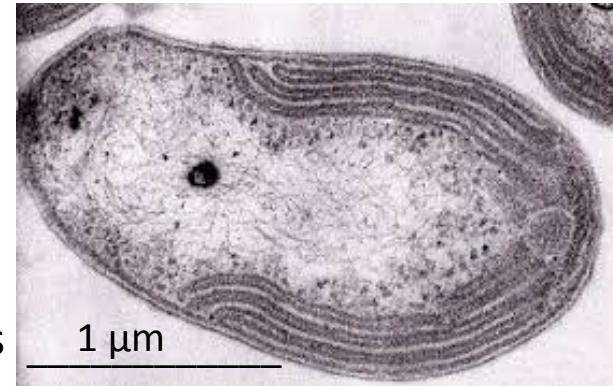
Nitrobacter, une bactérie du sol

La **nitrification** est un processus de minéralisation qui a lieu dans le sol, lors de la décomposition des molécules azotées par **chimolithotrophie**

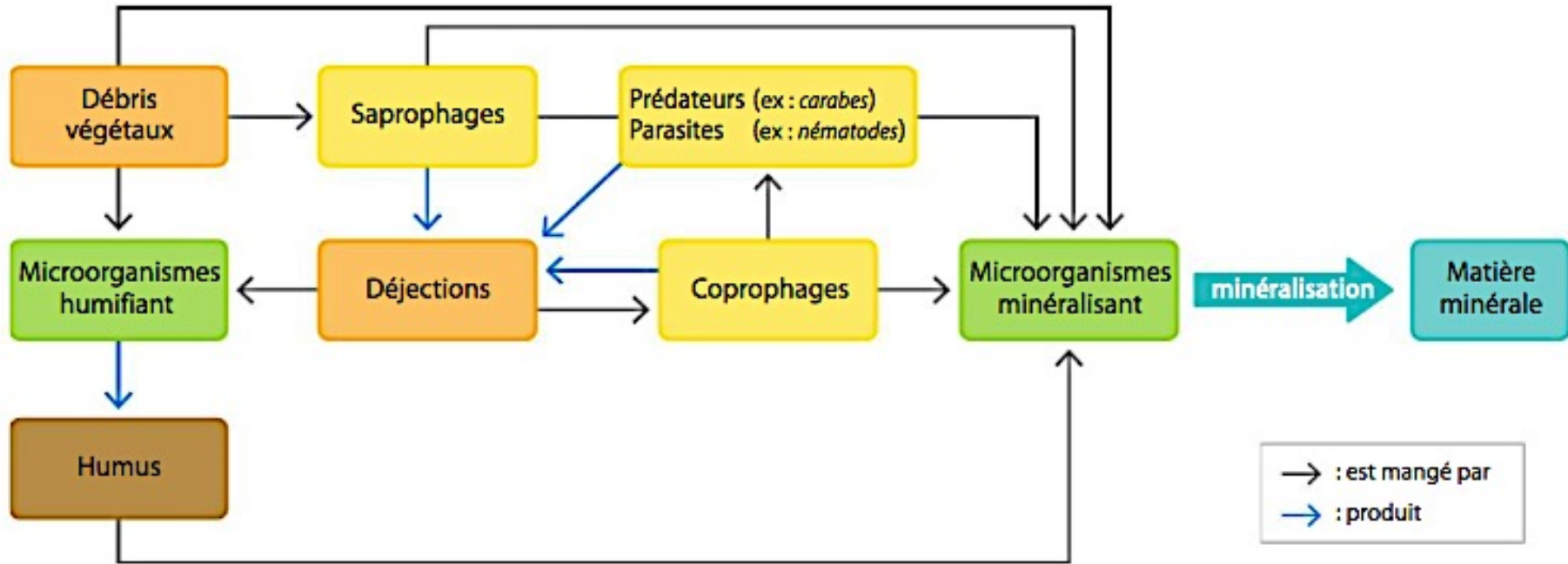


Nitrification = nitritation + nitratation
= de NH_4^+ à NO_3^-

MET en fausses couleurs
X 6 000

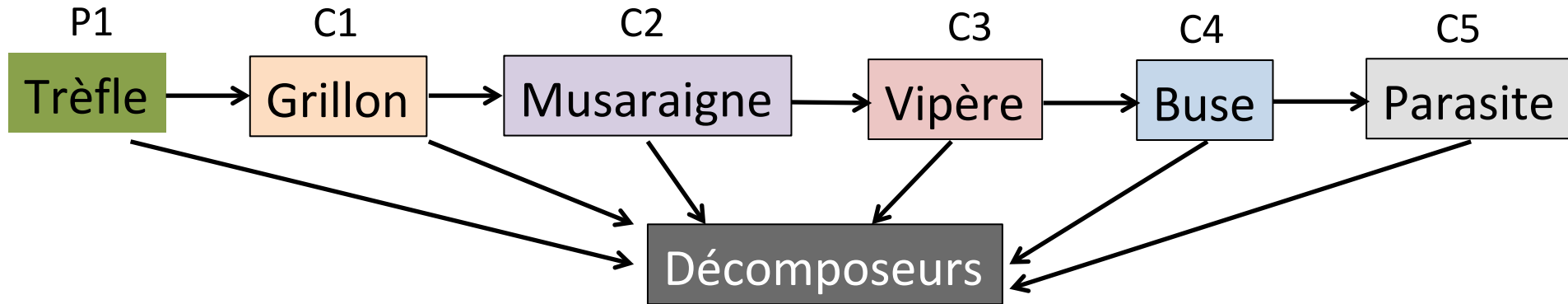


Les décomposeurs



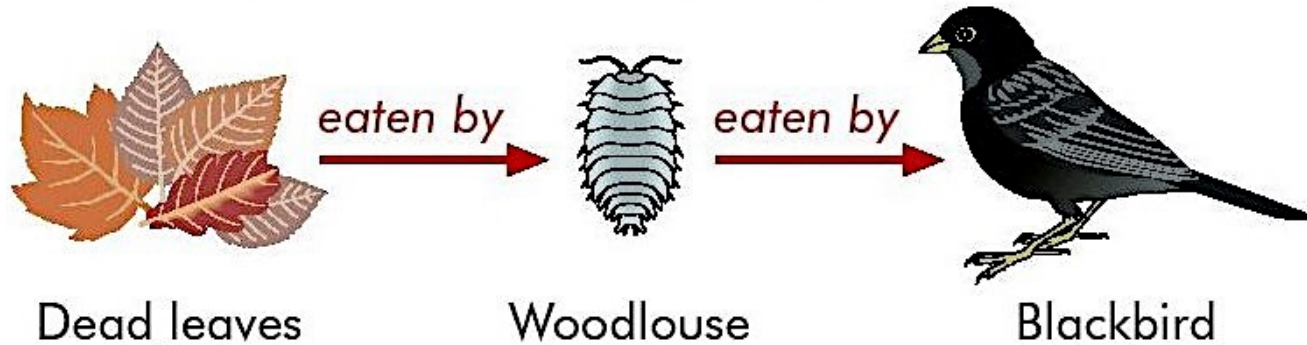
Les chaînes trophiques

Chaîne alimentaire = succession d'organismes se consommant

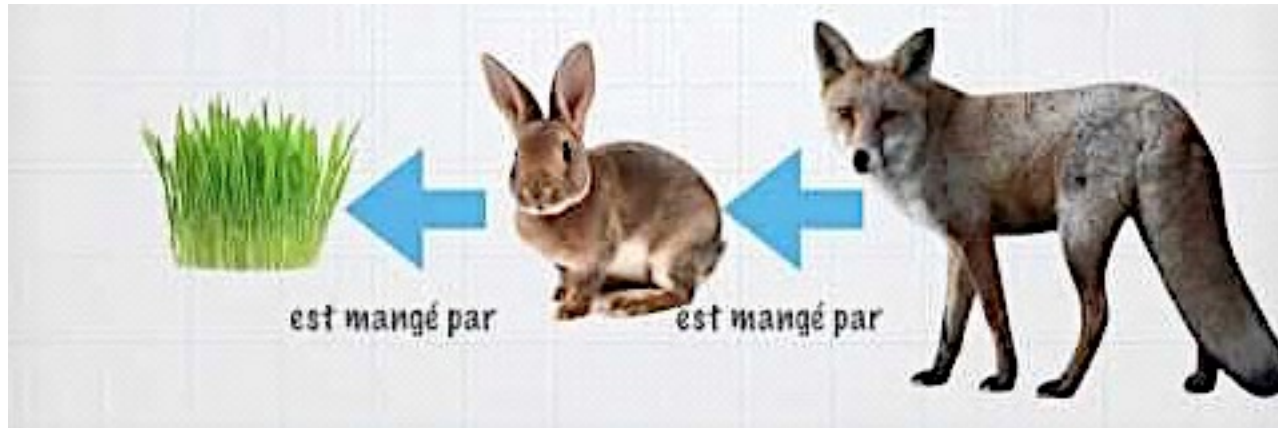


Niveau trophique = position occupée par un organisme dans une chaîne alimentaire (P1 – C3 – D...). En moyenne, une chaîne à 4 niveaux

Chaîne trophique autotrophe ou détritique



détritique

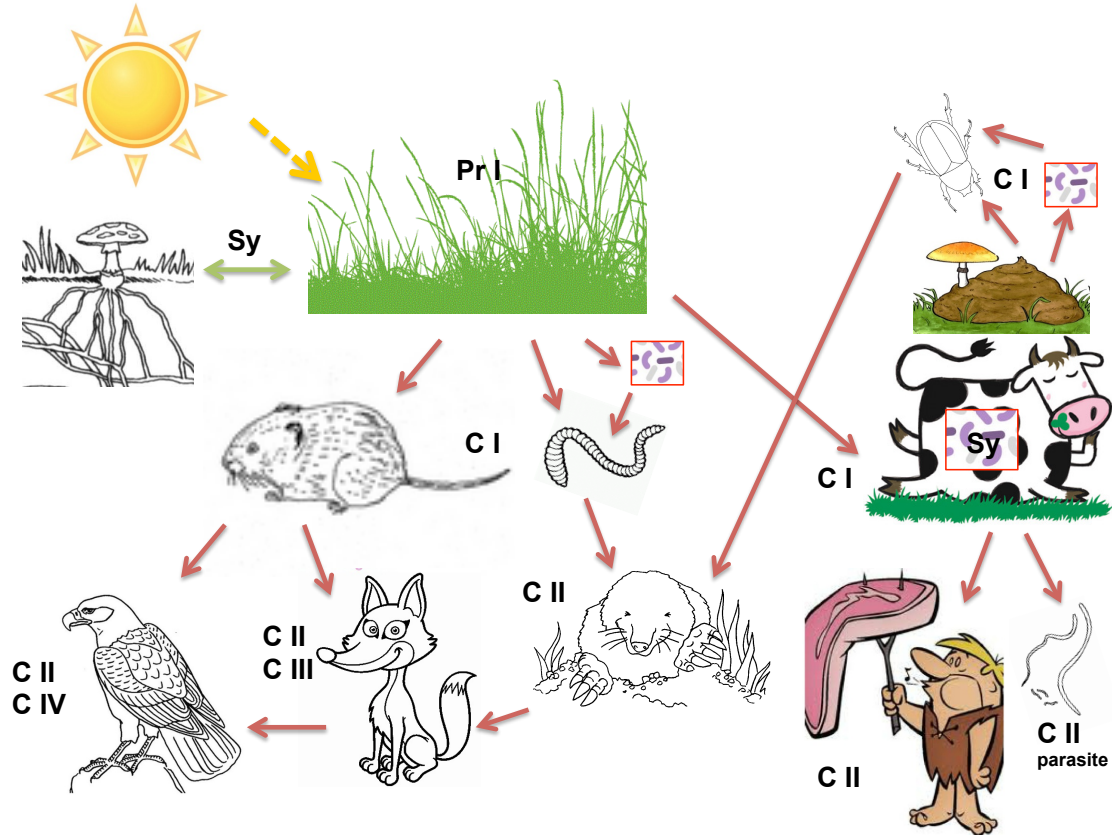


autotrophe

Les réseaux trophiques

Réseau trophique = ensemble des chaînes trophiques

Réseau de
la prairie



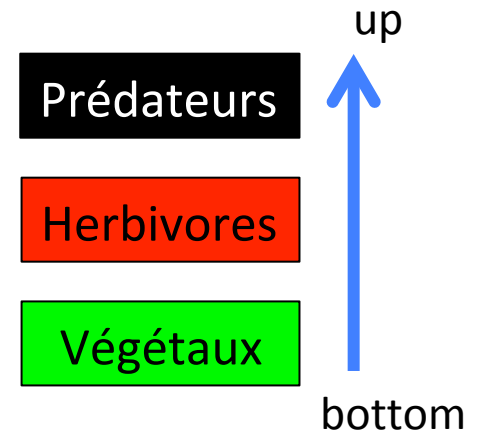
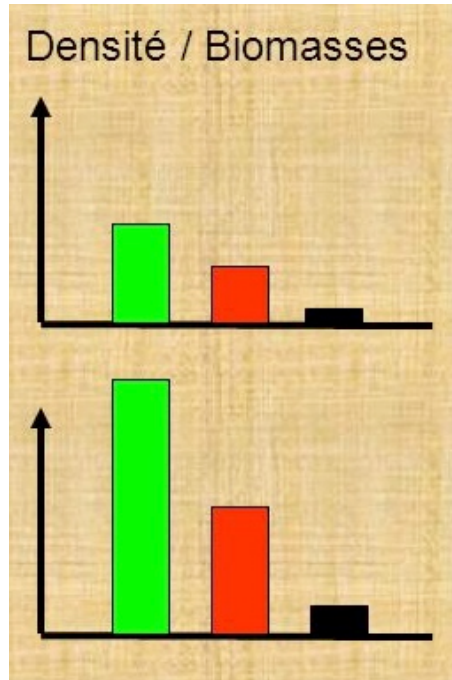
Les effets régulateurs

bottom-up = contrôle par les ressources = cascade trophique

La présence et l'abondance des espèces sont sous l'influence directe des facteurs abiotiques.

Biotope peu favorable au développement des plantes

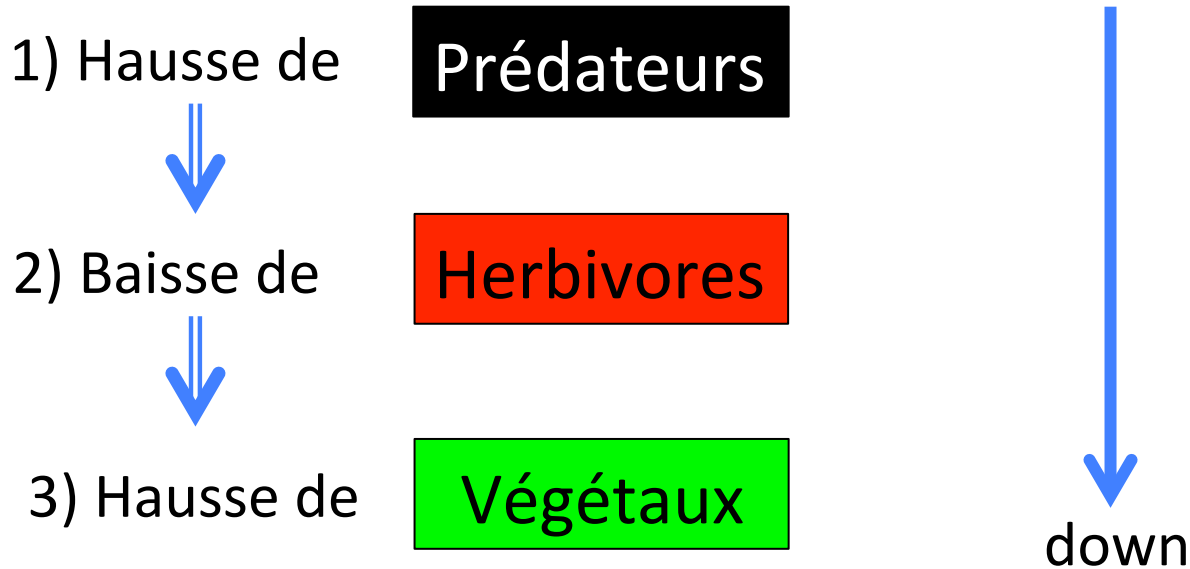
Biotope très favorable au développement des plantes



Les effets régulateurs

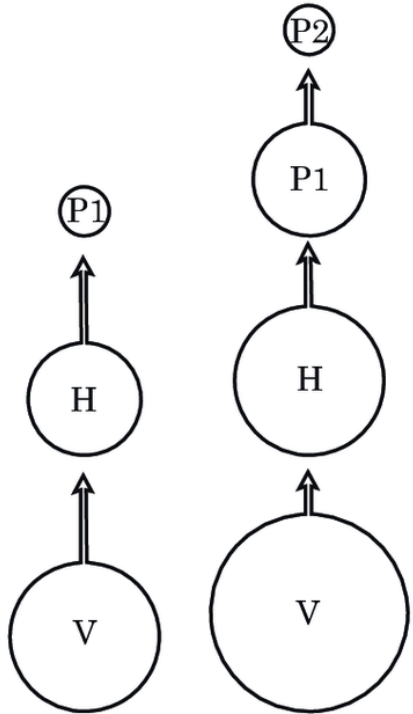
top-down = contrôle par les interactions biotiques

La présence d'un prédateur réduit l'abondance d'un herbivore donc favorise le développement végétal

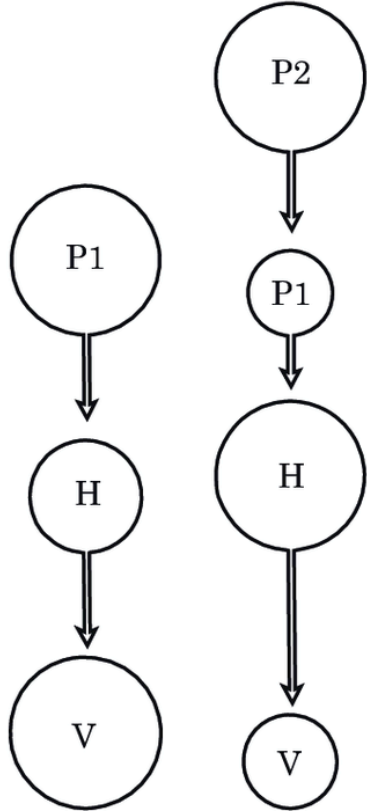


Bottom-up et top-down

Bottom-up



Top-down



1. Flux de matière et d'énergie au sein des écosystèmes

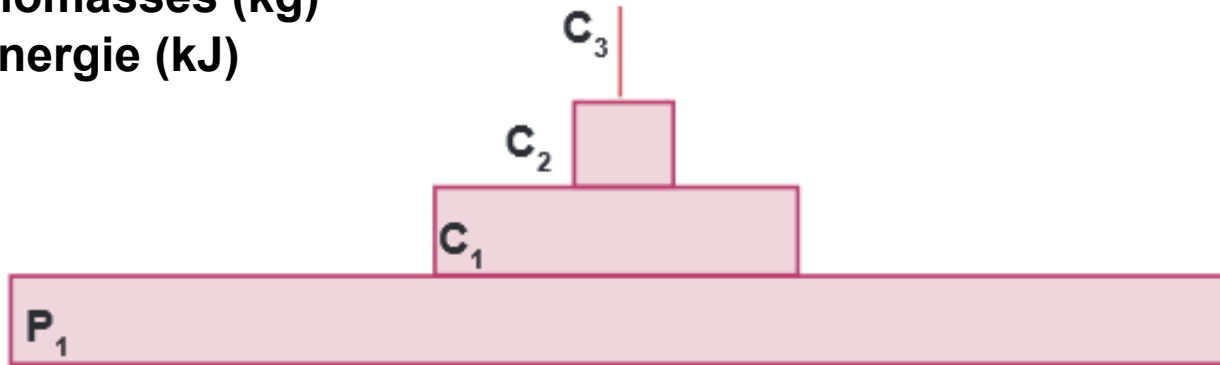
1.2. Les transferts énergétiques

Les pyramides écologiques

Nombres

Biomasses (kg)

Énergie (kJ)

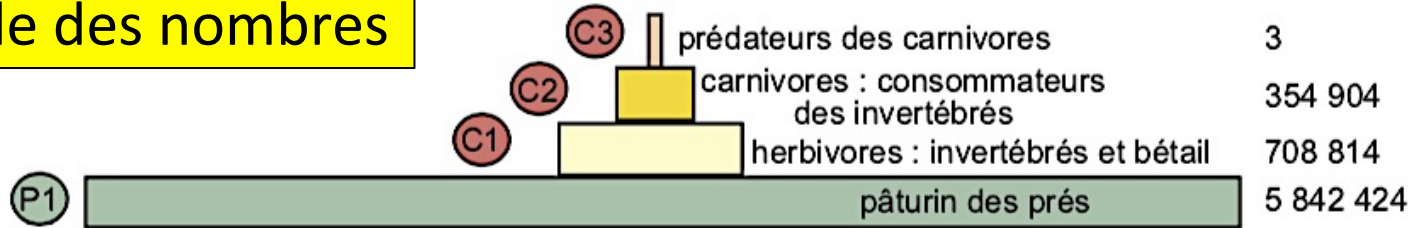


Source de l'énergie = énergie solaire (on néglige la chimiolithotrophie)

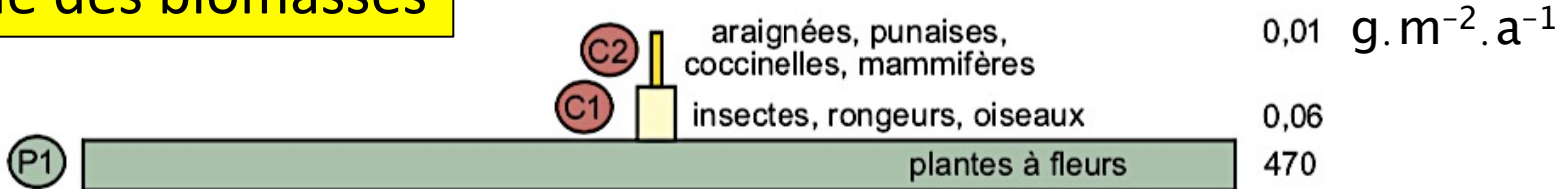
Rayonnement solaire d'une prairie normande = $4,2 \text{ GJ.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$

Exemples de pyramides écologiques

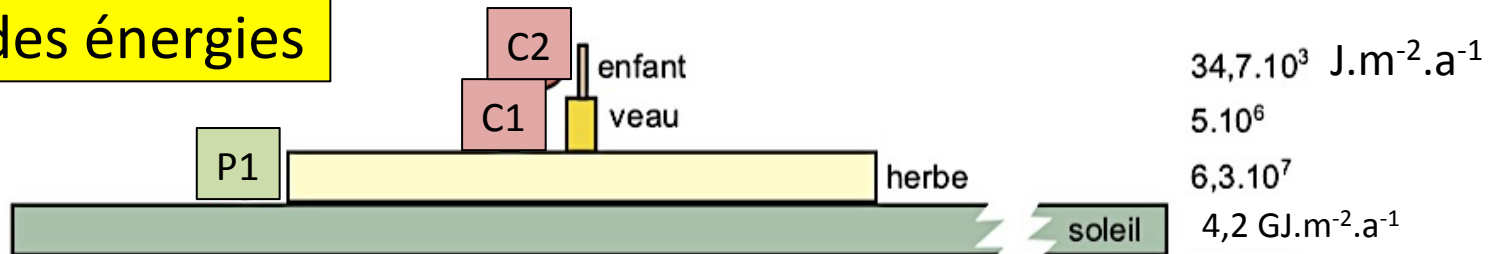
Pyramide des nombres



Pyramide des biomasses



Pyramide des énergies



Des pyramides pas toujours en pyramides...

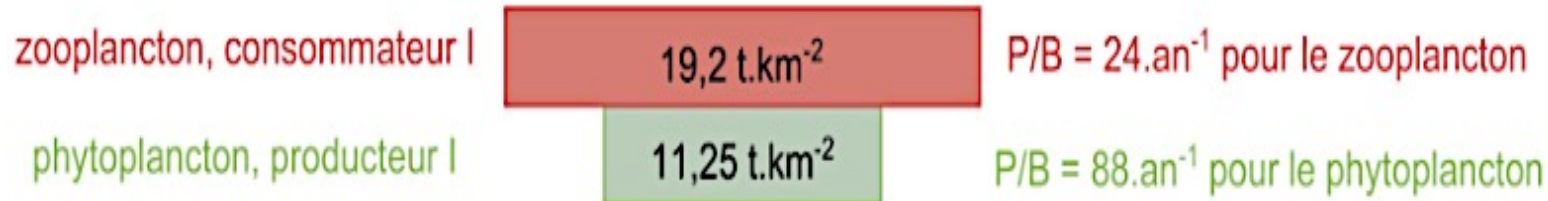
➤ Plus d'insectes que d'arbres en forêt

Pyramide des nombres



➤ Cas du plancton

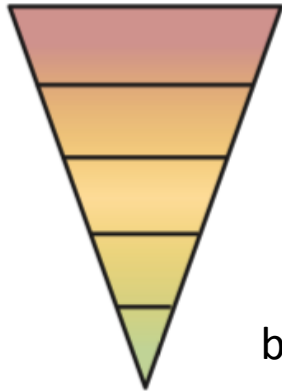
Pyramide des biomasses du plancton du lac d'Annecy



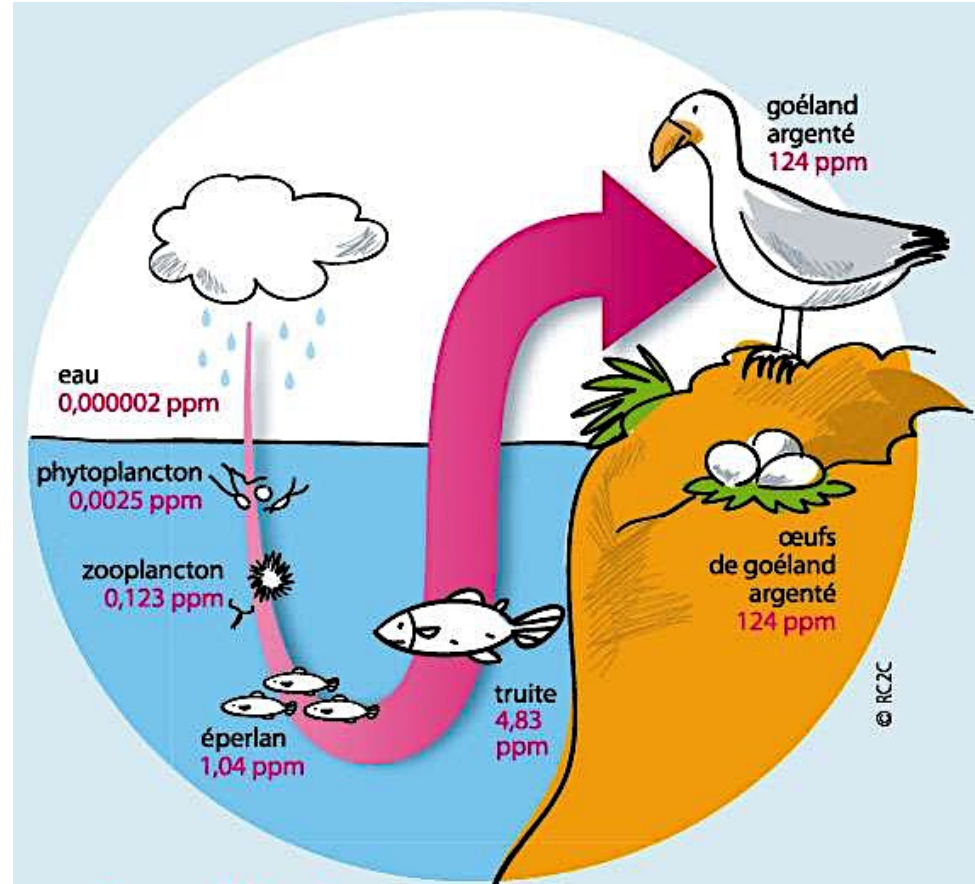
Calculer τ

La bio-accumulation

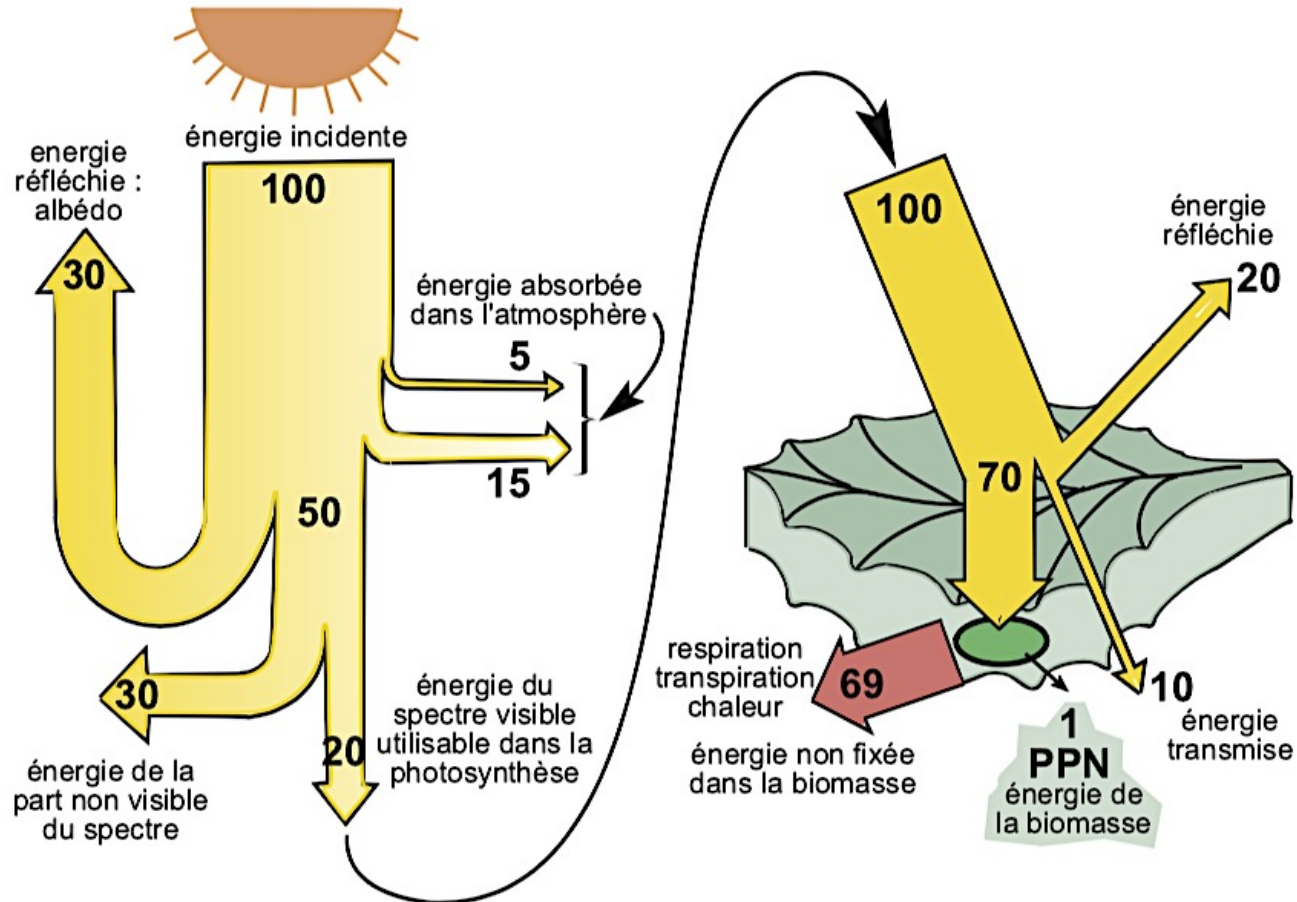
Exemple des PCB
(polychlorobiphényles) donnés
en ppm (partie par million :
1 ppm = 0,0001%).



bioaccumulation

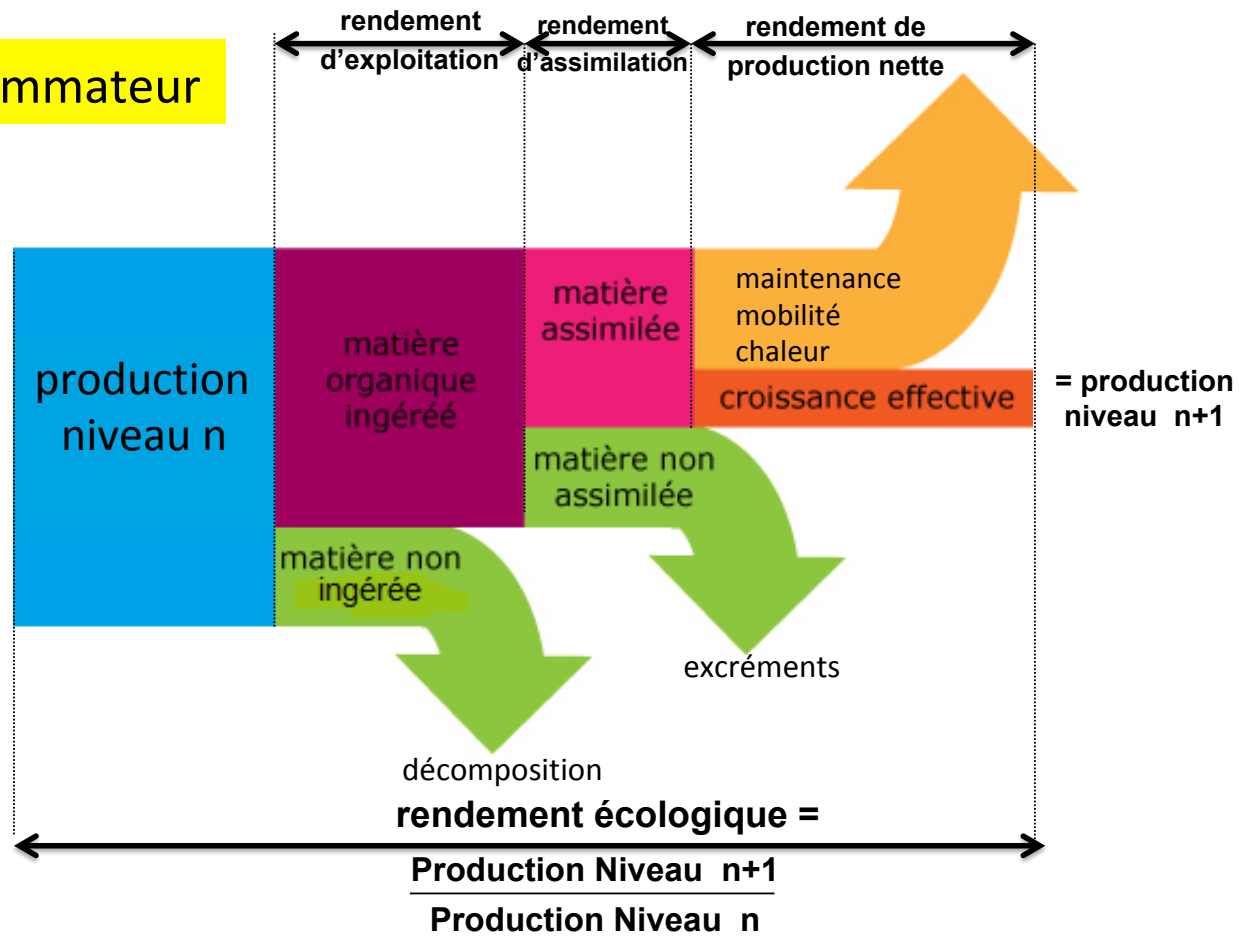


L'efficacité de la photosynthèse : 1 %

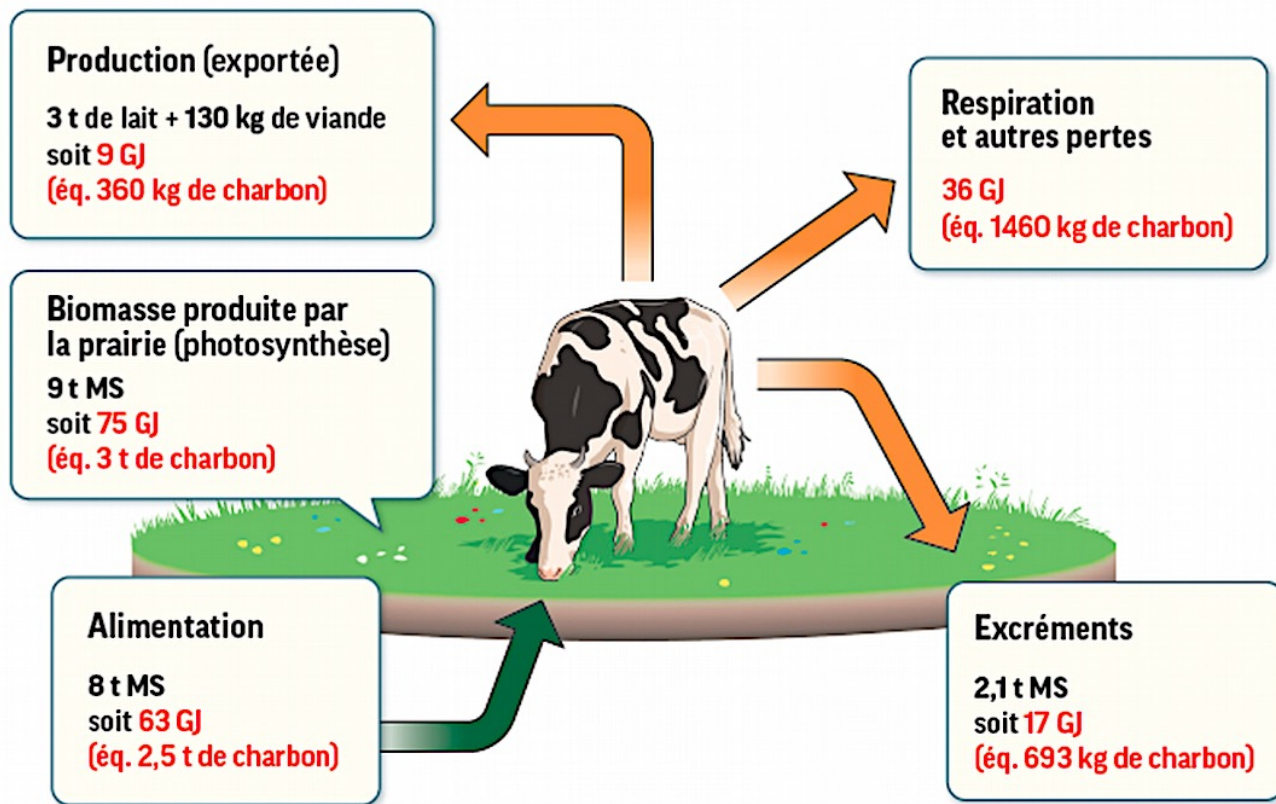


Efficacité d'un transfert

Cas d'un consommateur



Le cas de la Vache



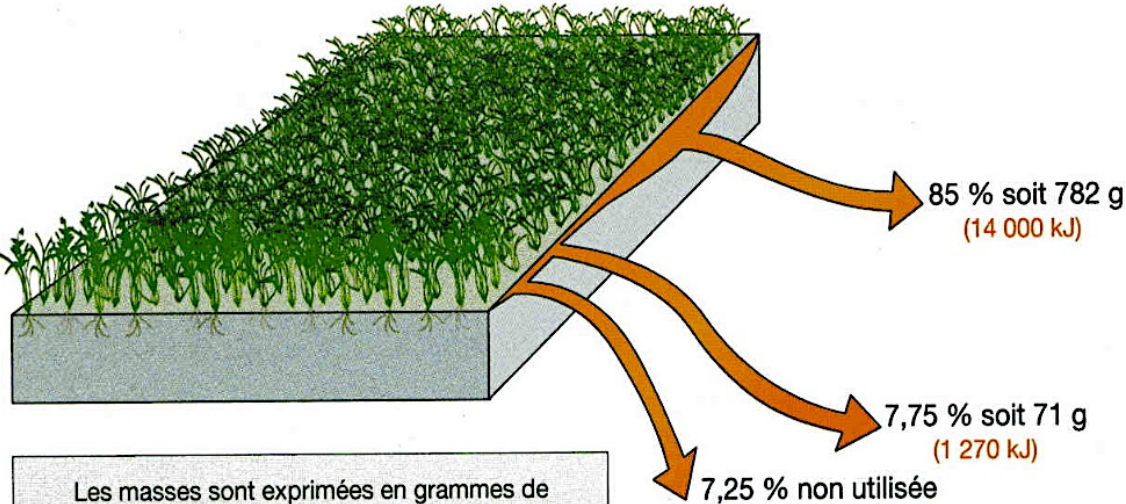
moyennes annuelles
pour une vache laitière
élevée 6 ans sur un
hectare

Productions primaires et secondaires

Réseau trophique : ici 2 herbivores

PRODUCTION PRIMAIRE 920 g

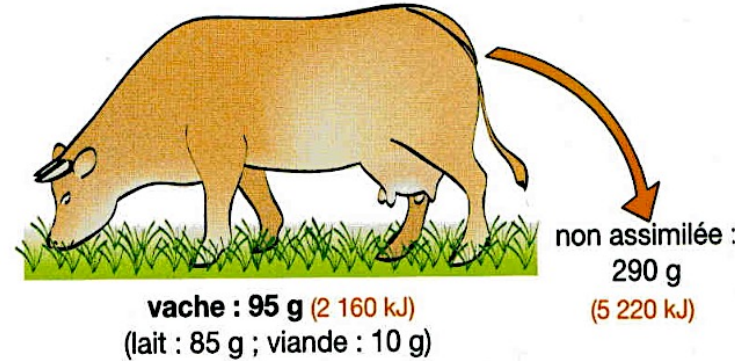
PRODUCTION SECONDAIRE 100,5 g



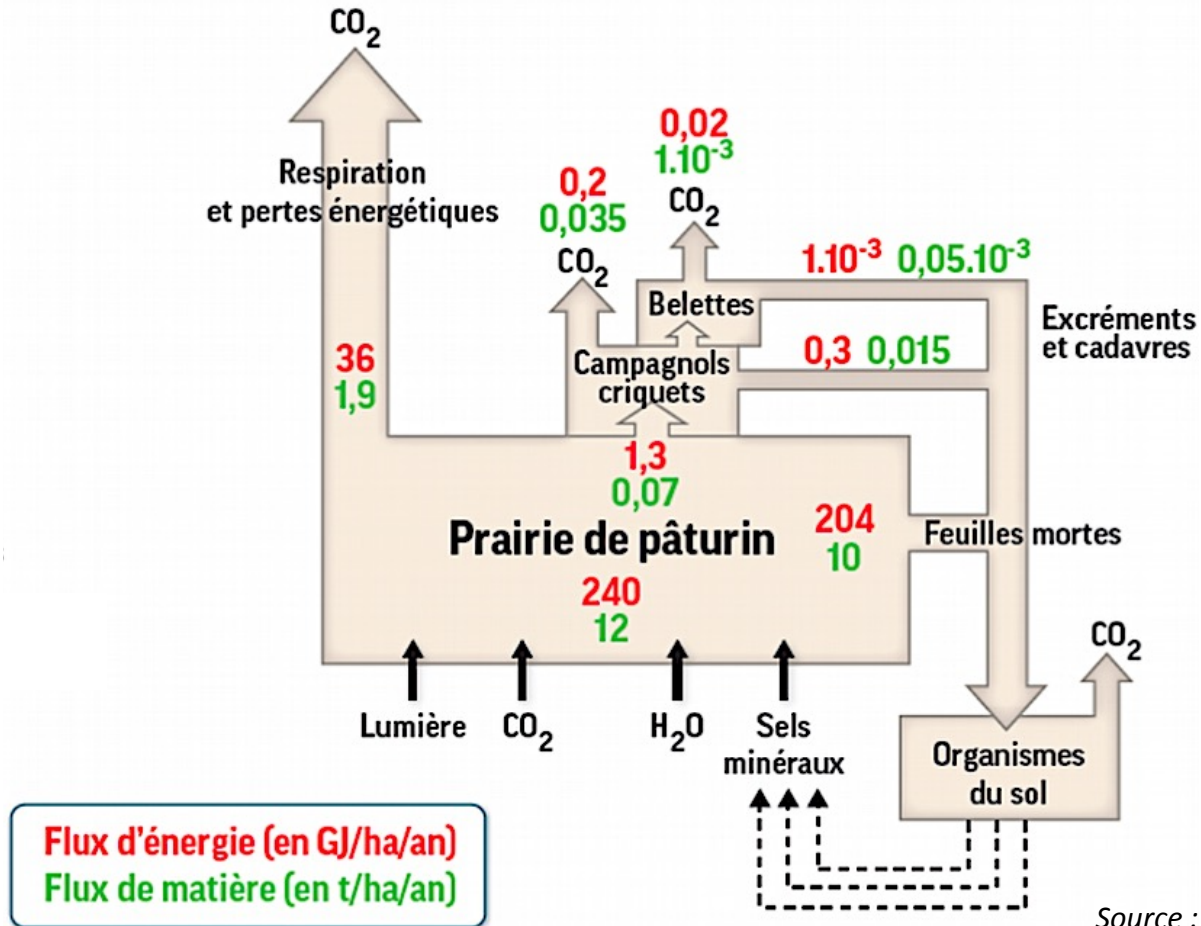
Les masses sont exprimées en grammes de matière sèche par mètre carré et par an.

Chiffres rouges = valeurs énergétiques en kilojoules

D'après Ricou.



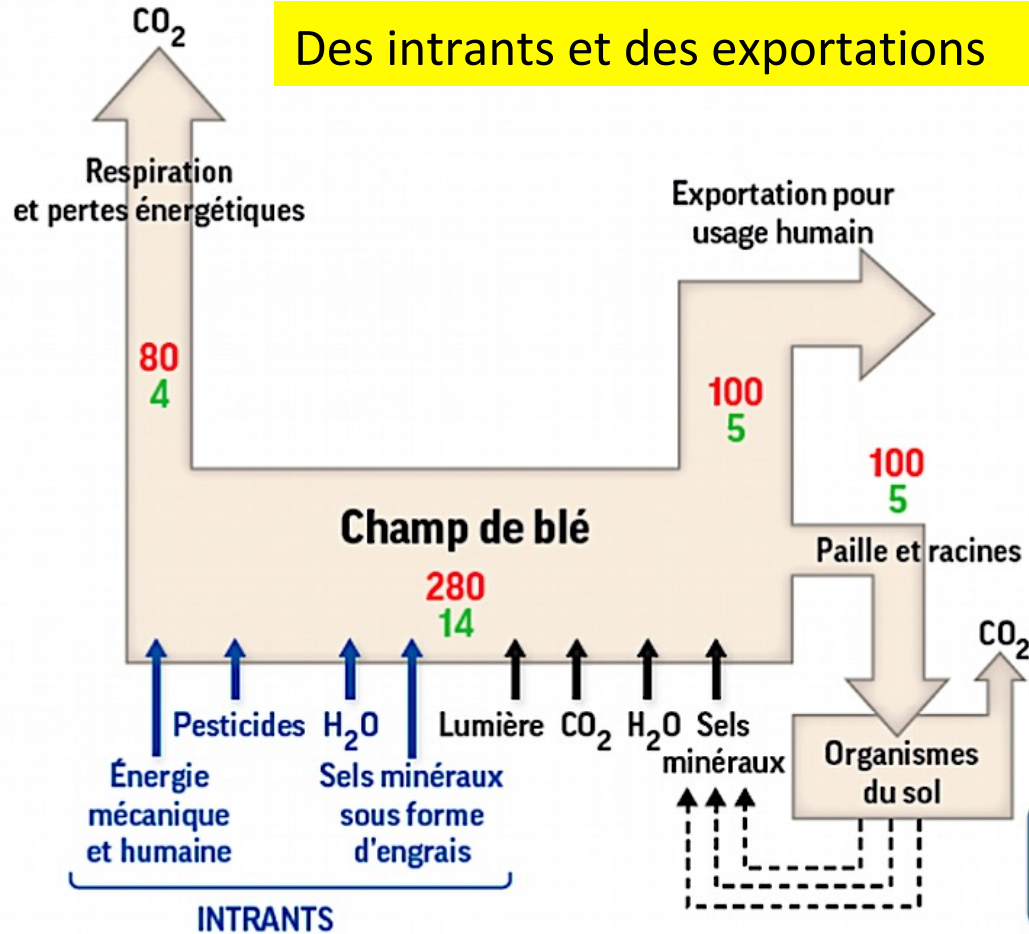
Rendements en prairie naturelle



Rendements en agrosystème

Des intrants et des exportations

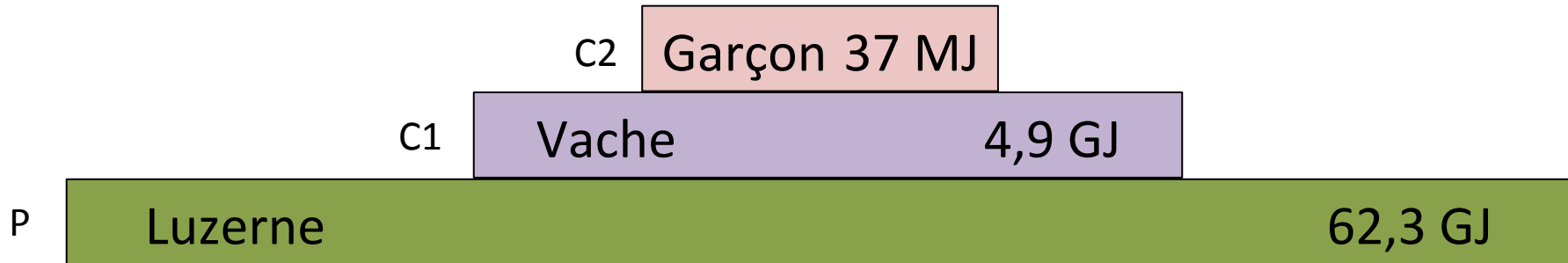
Source : S. Rebulard, planet-vie.ens.fr



Flux d'énergie (en GJ/ha/an)
Flux de matière (en t/ha/an)

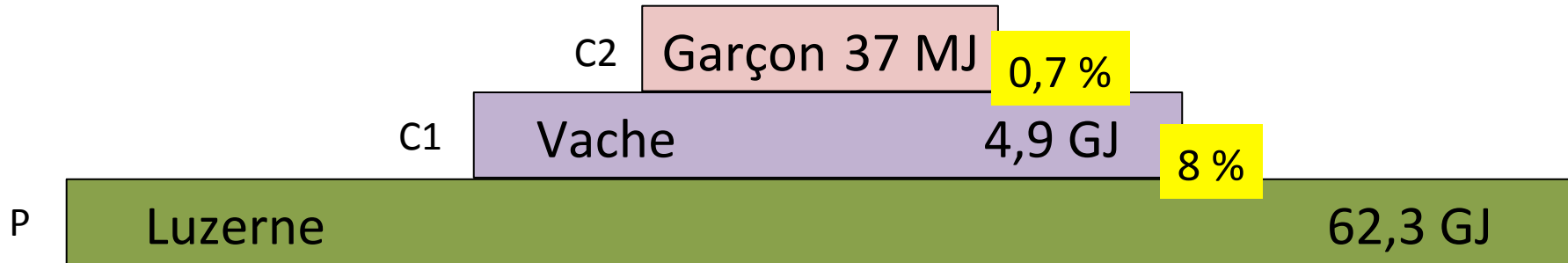
La symbiose du rumen

Calculer le rendement écologique à chaque niveau de cette pyramide des énergies



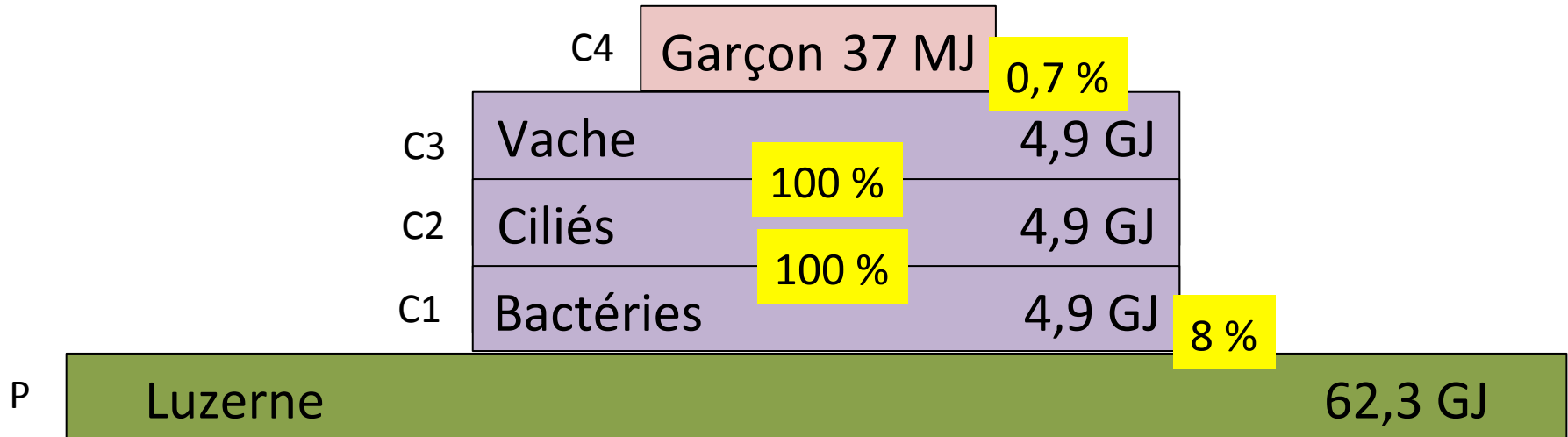
La symbiose du rumen

Calculer le rendement écologique à chaque niveau de cette pyramide des biomasses

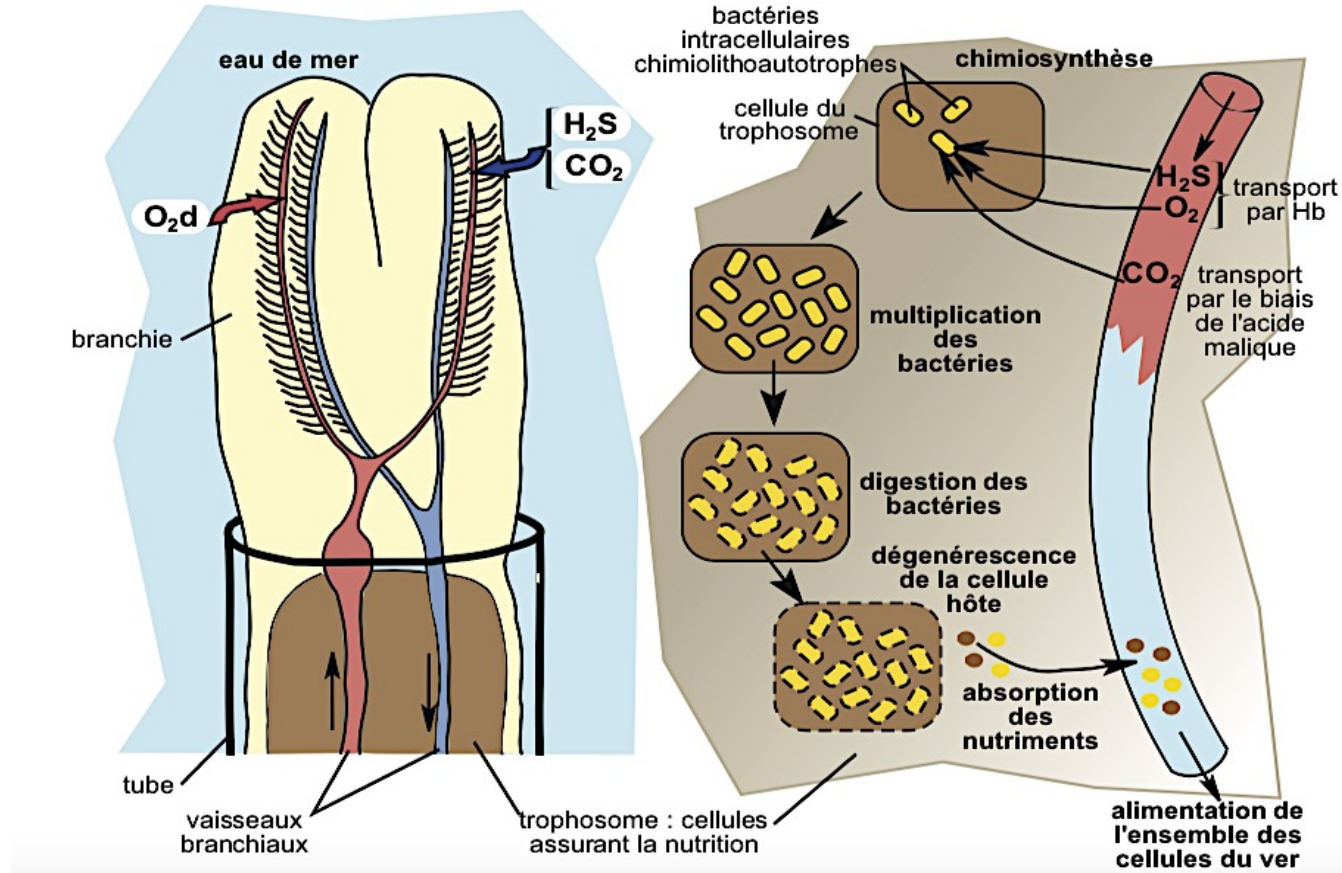


Mais il y a en fait plus de niveaux trophiques...

La symbiose du rumen

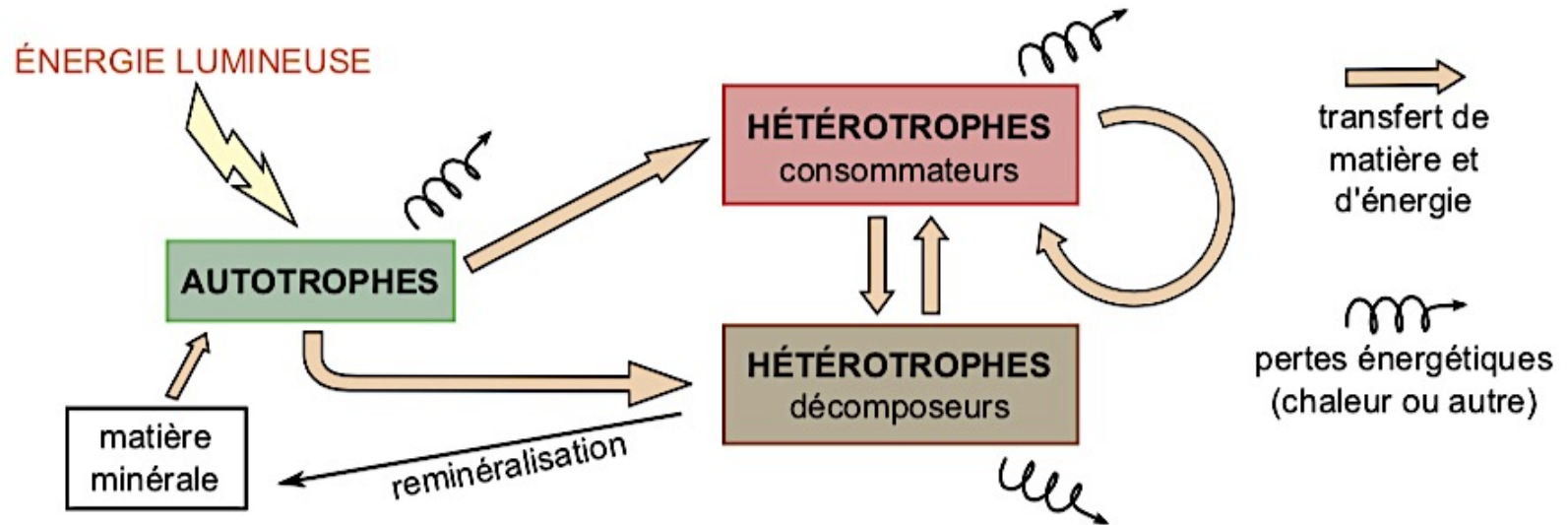


Une symbiose sans lumière : Riftia



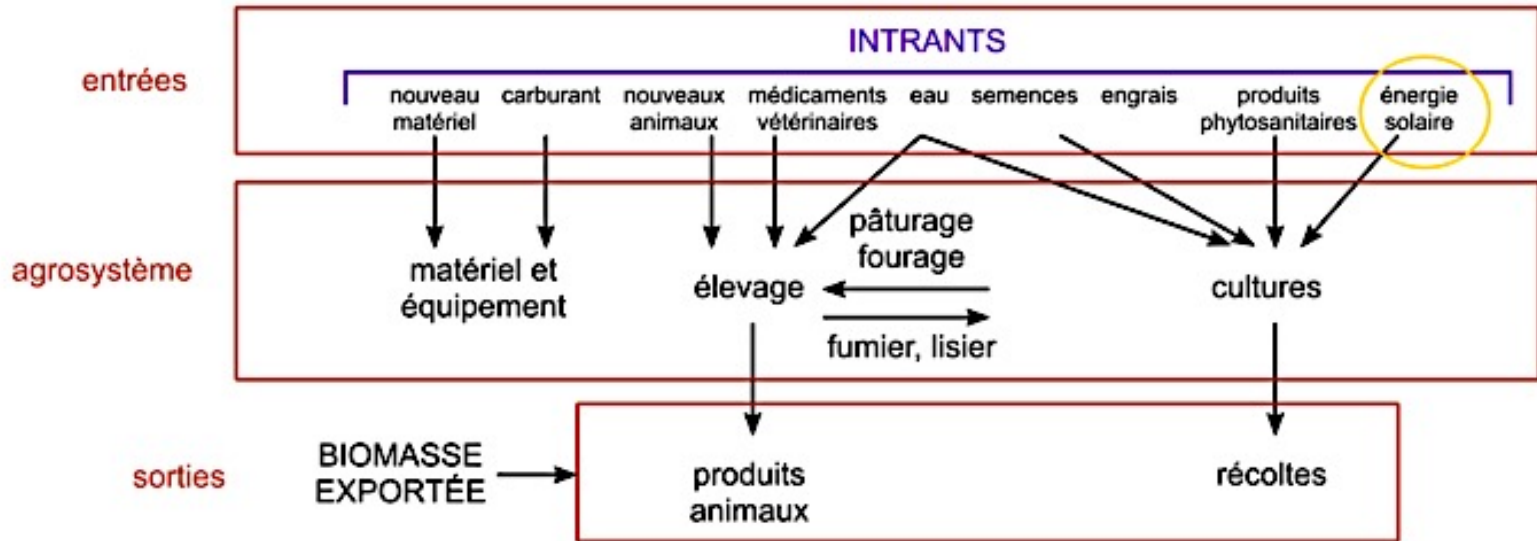
BILAN : les écosystèmes, des systèmes ouverts

Écosystème naturel = système fermé pour la matière (recyclage)
 mais système ouvert pour l'énergie (source = énergie solaire)



Les agrosystèmes

Agrosystème = système ouvert avec apport (intrants) et export de matière et d'énergie.



2. La dynamique des écosystèmes

2.1. Les successions écologiques

Succession progressive primaire

Végétation pionnière sur un mur



Lichen = espèces lithophytes (quasiment pas besoin de substrat)



Bryophytes à forte tolérance à la sécheresse



Fougère (rue des murailles et Asplénium) et herbacées dans les fissures

Succession écologique progressive

1) **Espèces pionnières** = héliophiles, petites, peu exigeantes
lichen, bryophytes

2) **Écosystème juvénile**

- grands effectifs, petit nombre d'espèces à stratégie démographiques r
- interactions faibles entre espèces
- réseaux trophiques généralement courts et linéaires
- plantes majoritaires annuelles ou bisannuelles
- biomasse généralement faible mais forte productivité
prairie de fougères, framboisiers, poacées, astéracées...

Succession écologique progressive

3) Écosystème transitoire

- landes de plantes vivaces avec des strates arbustives
- compétition interspécifique pour la lumière => sélection

4) Écosystème mature = climax

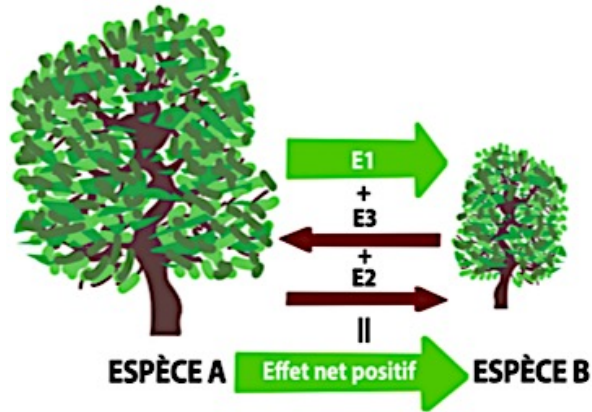
- biodiversité maximale : beaucoup d'espèces avec peu d'individus, souvent de stratégie démographique K,
- interactions complexes
- taux de recyclage de la matière élevé
- faible productivité

Forêt d'espèces liées aux facteurs abiotiques du milieu

Les mécanismes régulateurs de la dynamique

Compétition interspécifique pour la lumière : favorise la strate arborescente => plantes de + en + hautes

Facilitation = action bénéfique d'une autre espèce



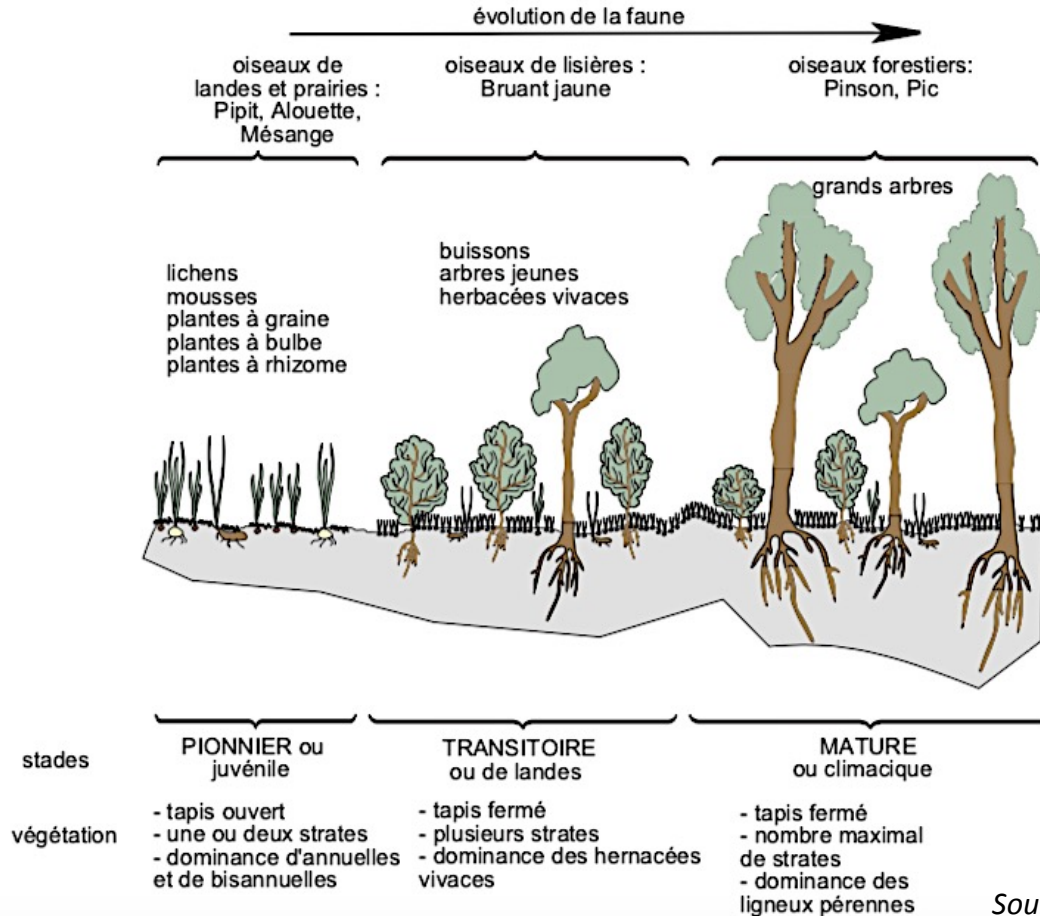
Plante « nurse » qui fait de l'ombre à la jeune plante et diminue ainsi l'évapo-transpiration.

Plantes épiphytes tropicales

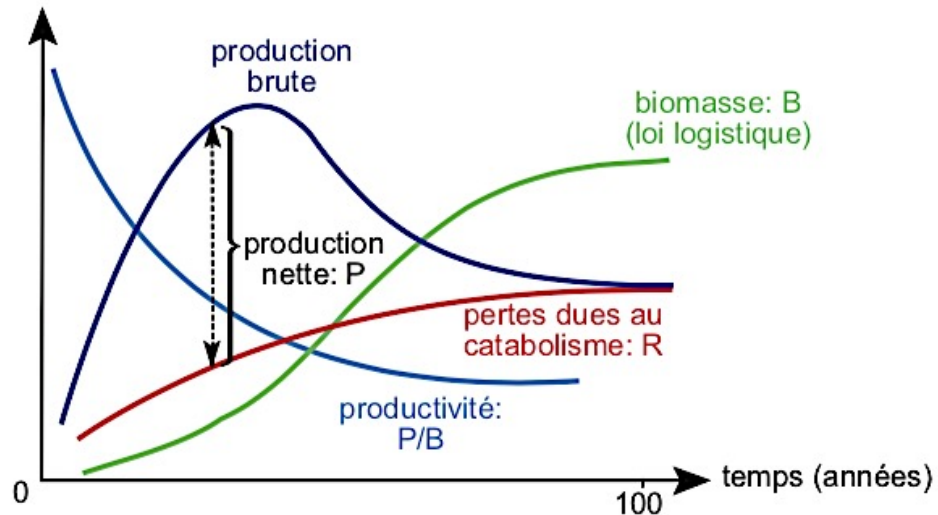
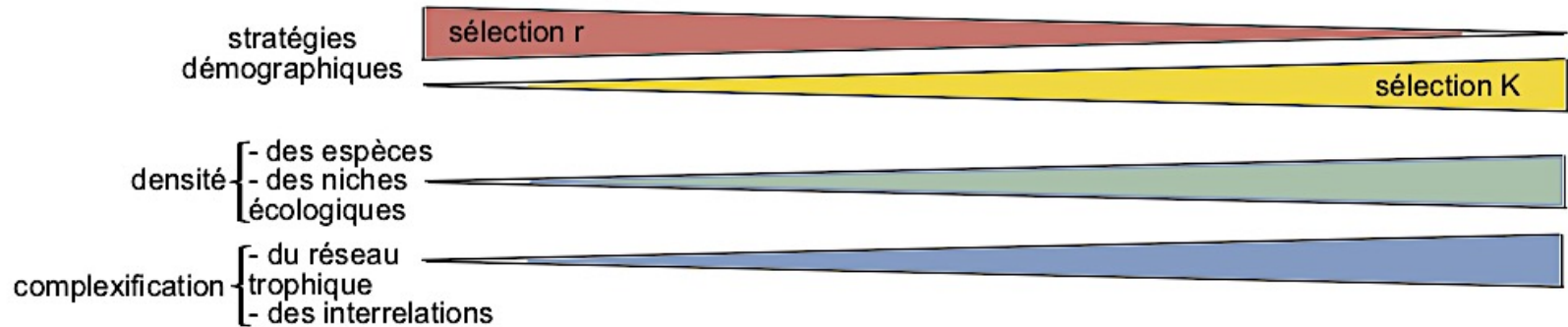


Source : Ubaldi, AgroParisTech, 2018

Les successions écologiques

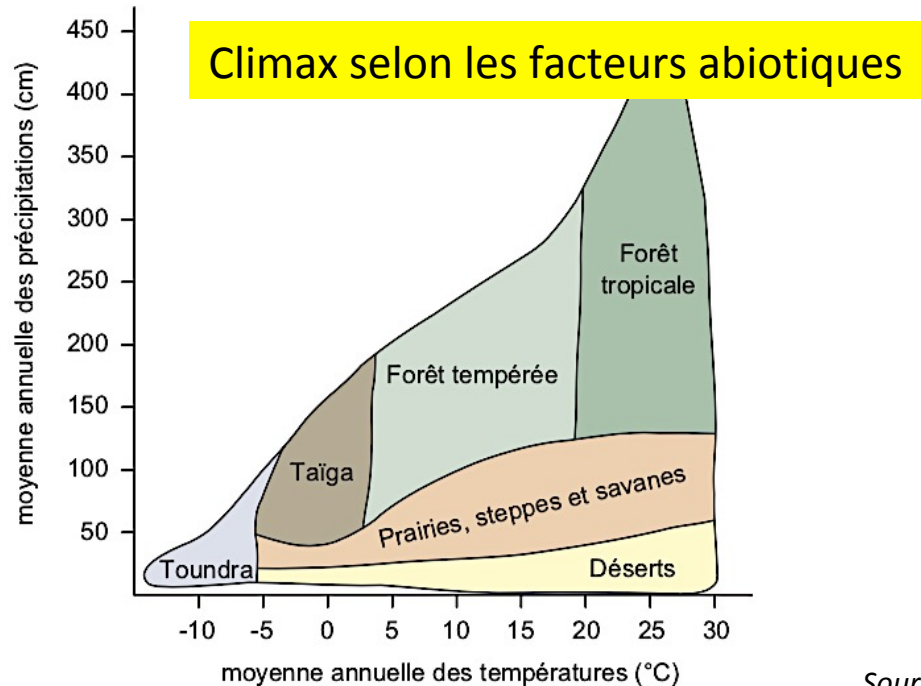


Les successions écologiques



Le climax dépend des conditions abiotiques

climax = état théorique dans lequel l'écosystème a atteint un état d'équilibre stable et durable en lien avec les conditions abiotiques.



Les successions écologiques

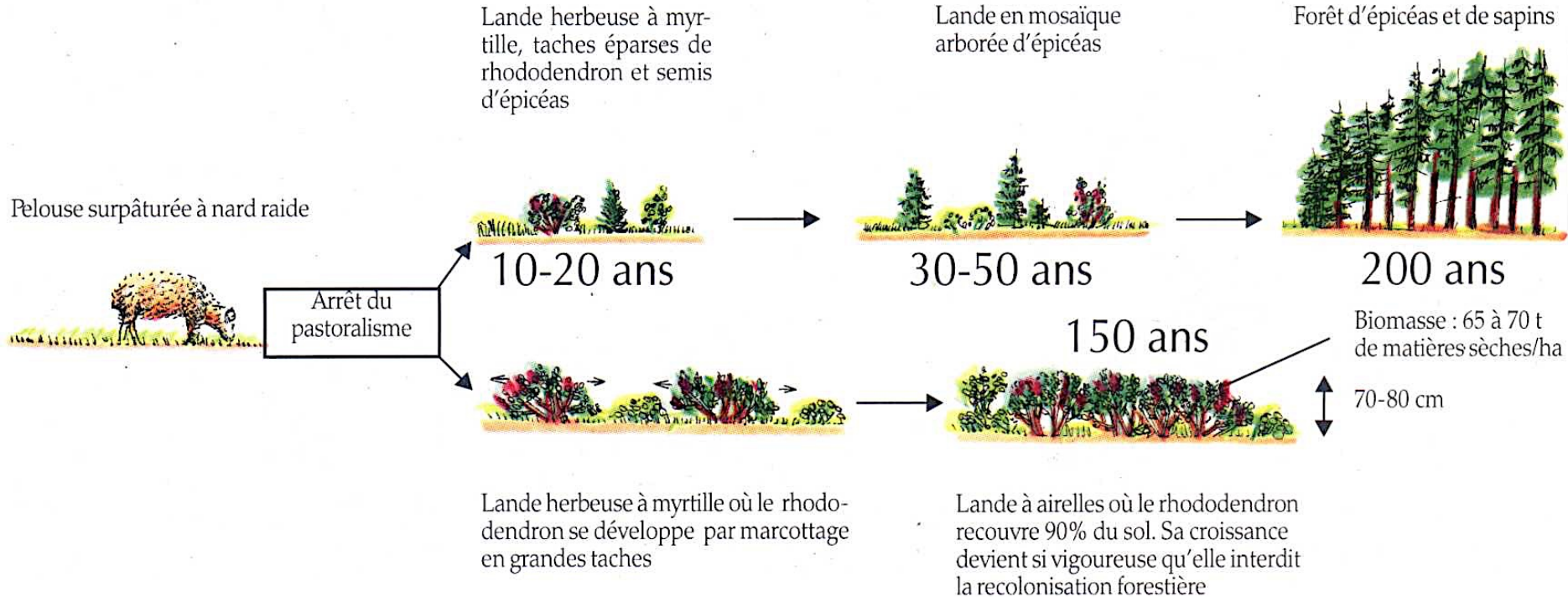
Série progressive = succession avec un peuplement de plus en plus riche, allant vers un stade climax

- **Série primaire** à partir d'un sol nu : coulée de lave, mur, remblai...
- **Série secondaire** à partir d'un sol préexistant : forêt après un incendie, prairie après retrait des animaux qui pâturent

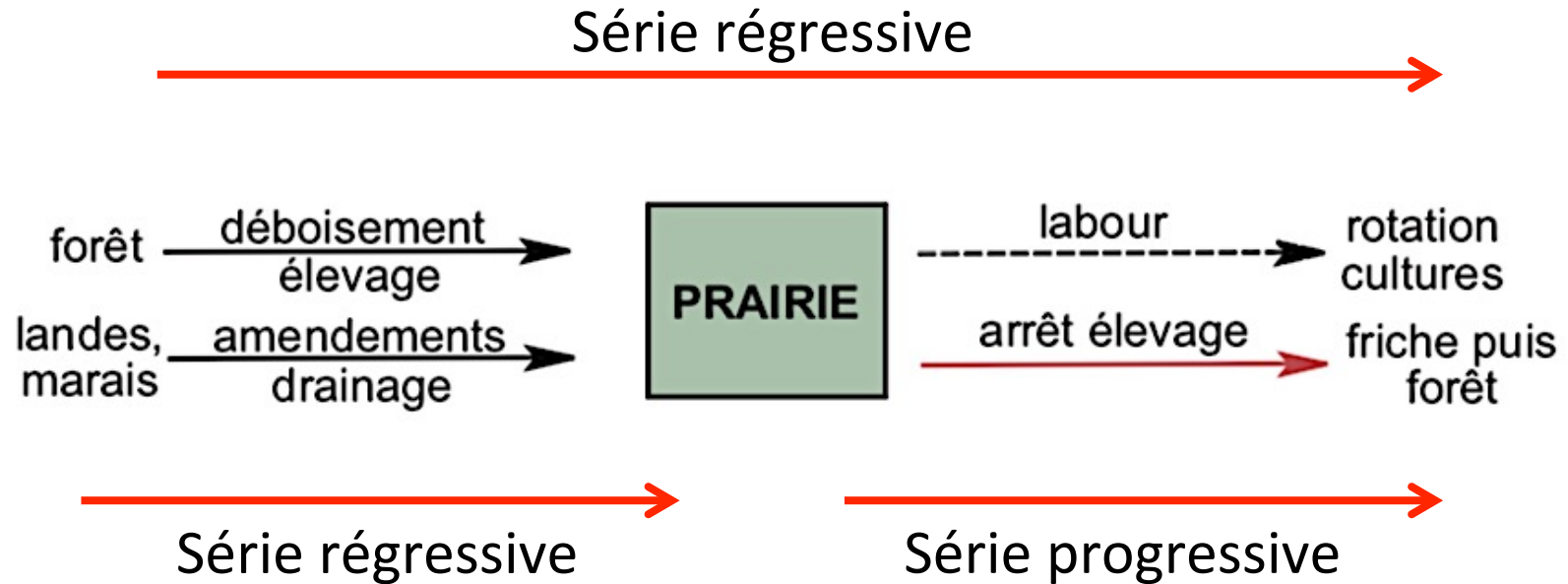
Série régressive = succession allant vers un appauvrissement en espèces. Elle fait suite à un stress et conduit à un **rajeunissement** du milieu (les espèces disparaissent dans l'ordre inverse de leur apparition).

Évolution progressive secondaire

Arrêt du pastoralisme



Des séries liées à l'agriculture



2. La dynamique des écosystèmes

2.2. Dynamique d'un écosystème suite à une perturbation

Des perturbations...

... à plus ou moins grande échelle



... saisonnières



... à caractère
exceptionnel



Les facteurs de perturbation abiotiques

Naturels

Incendies, crues, tempêtes, sécheresse, manteau neigeux, avalanche, glissement de terrain, gel...

Anthropiques

- **Eutrophisation** = surenrichissement nutritif
- **Labour**
- **Coupe d'arbres en forêt – déforestation**
- **Réchauffement climatique, sécheresse**
- **Pollution**

Le chablis, rajeunissement du milieu

Chablis = arbre déraciné, rompu ou mort debout.

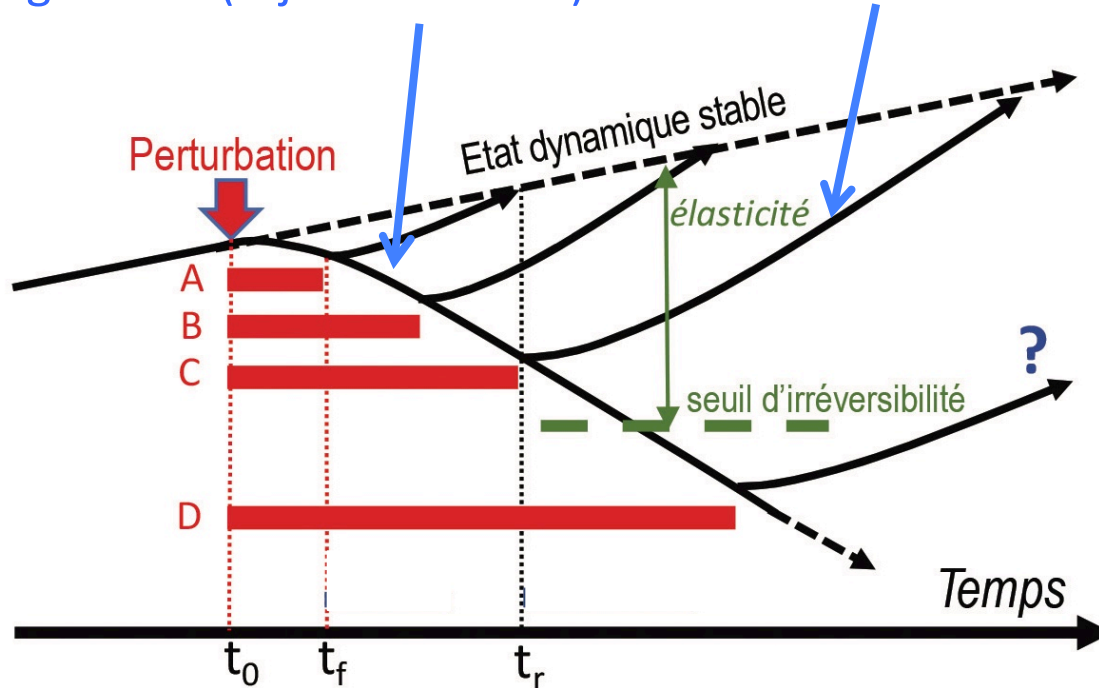


Le chablis correspond à un retour à un stade plus précoce de la série écologique. Le nombre d'espèces d'insectes y est 2 fois plus élevé (plus clair et plus chaud).

Un rajeunissement du milieu

régression (rajeunissement)

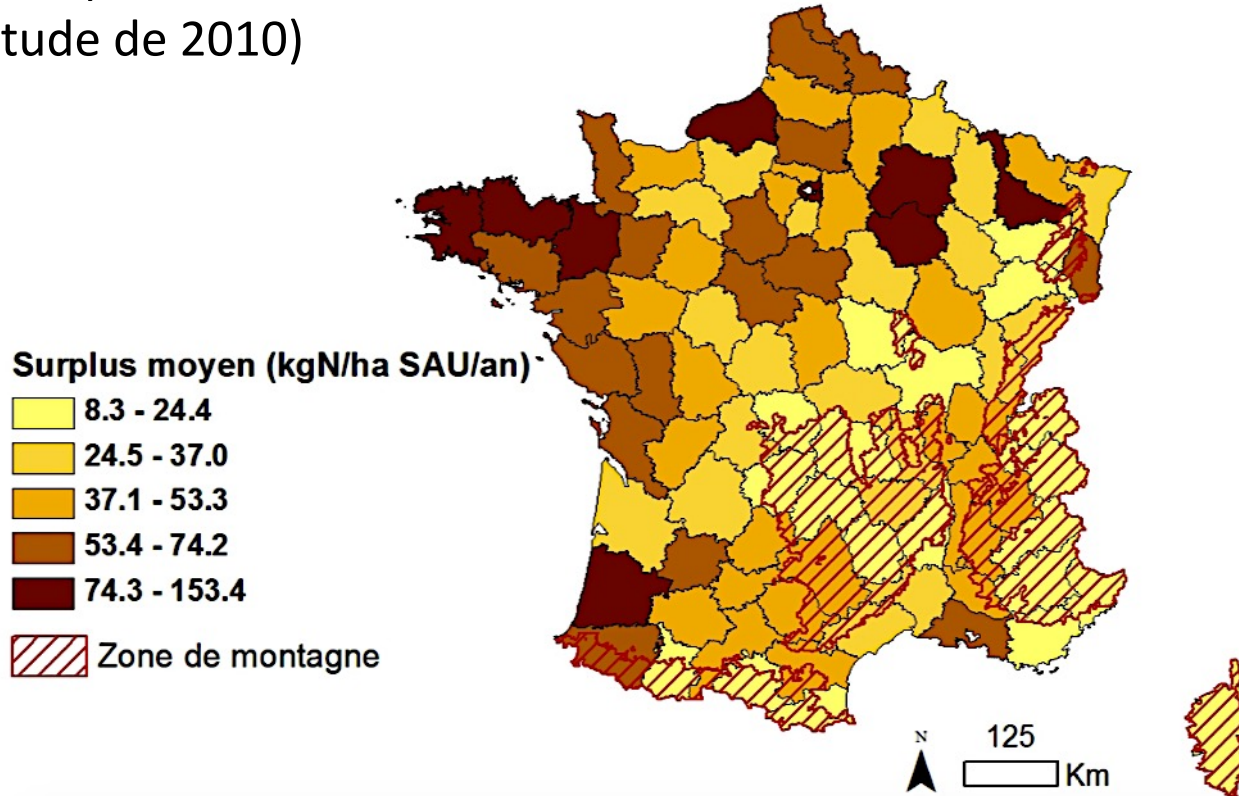
progression (évolution vers le climax)



A, B, C et D : perturbations de durées croissantes. Exemples :
 A = tempête, feu de forêt ;
 D = pollution

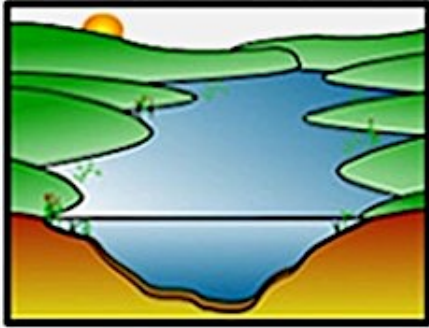
L'eutrophisation : origine

Carte des surplus d'azote en
France (étude de 2010)



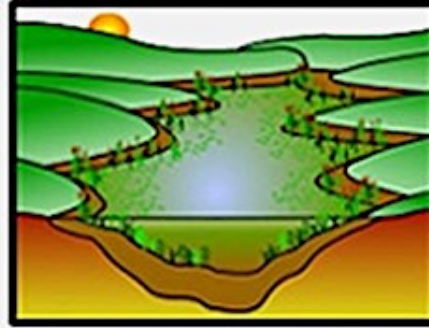
L'eutrophisation : conséquences

Oligotrophe



- ❖ Eaux claires
- ❖ Eaux fraîches
- ❖ Peu de végétaux aquatiques
- ❖ Eaux bien oxygénées
- ❖ Fond de roches, graviers, sables
- ❖ Beaucoup d'espèces animales et végétales

Eutrophe



- ❖ Eaux peu transparentes
- ❖ Eaux chaudes
- ❖ Beaucoup de végétaux aquatiques
- ❖ Eaux peu oxygénées
- ❖ Fond de vase
- ❖ Peu d'espèces animales et végétales (mortalité des espèces sensibles)

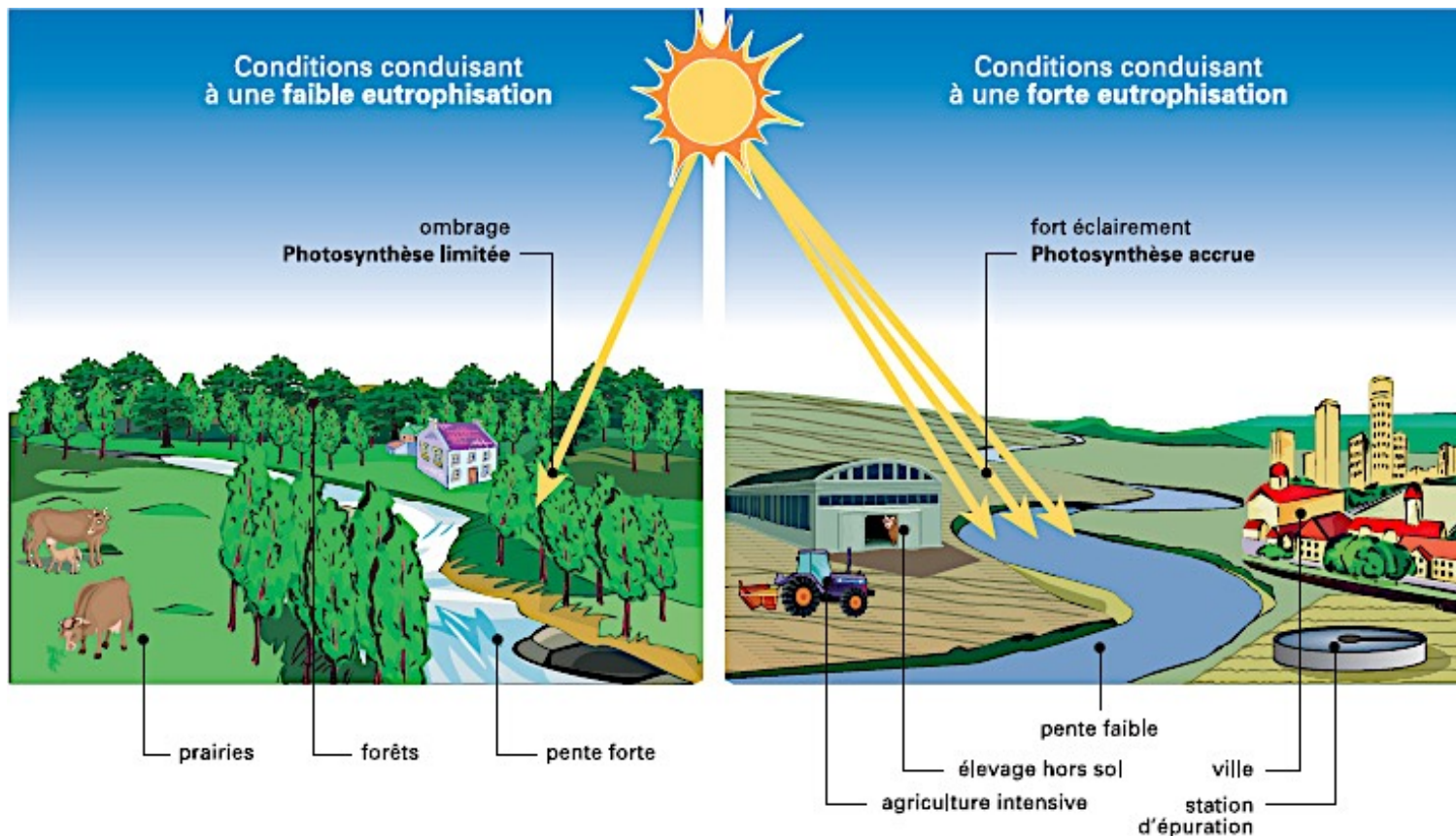
Marées vertes sur le littoral



Rivière eutrophisée

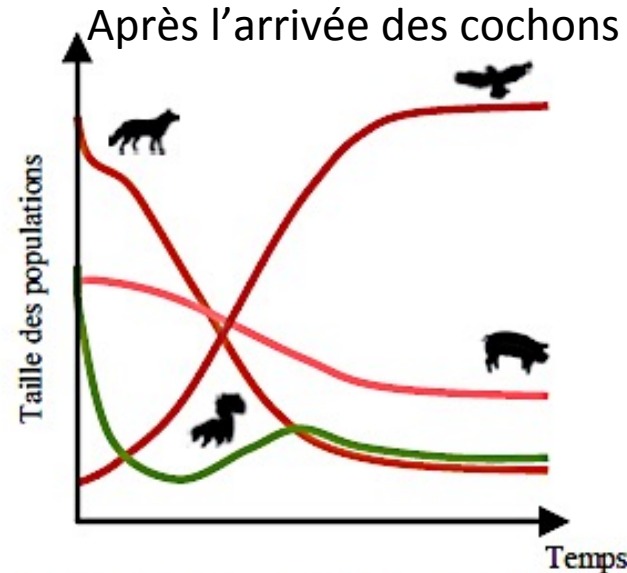
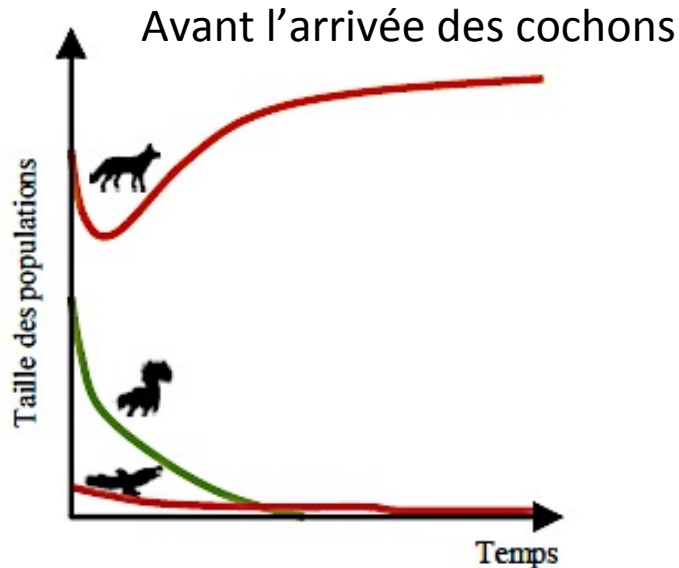


Une gestion possible



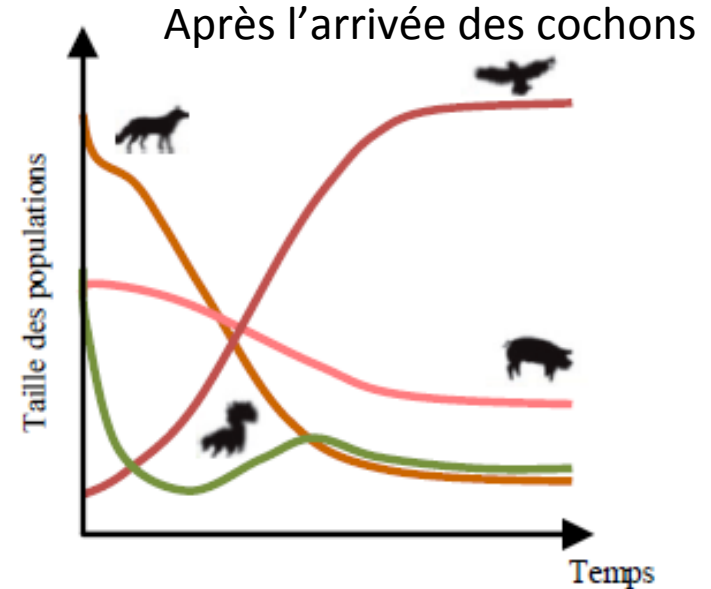
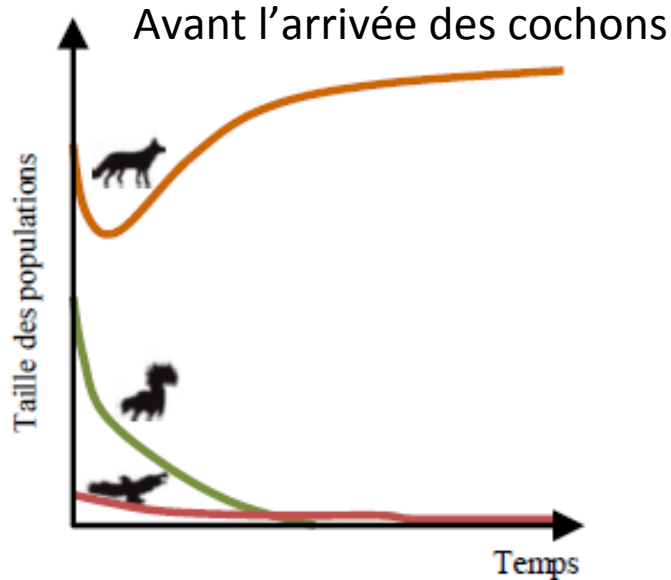
Les facteurs de perturbation biotiques

- Surpâturage ou sous-pâturage
- Épidémies
- **Espèces invasives** : exemple des îles californiennes



Les espèces invasives

Introduction de cochons sauvages dans les îles de la chaîne californienne.
Établissement des aigles royaux qui chassent les cochons... mais aussi les renards nains => déclin des renards nains.



Des invasives dans la prairie



Berce du Caucase



Renouée du Japon



Ambroisie

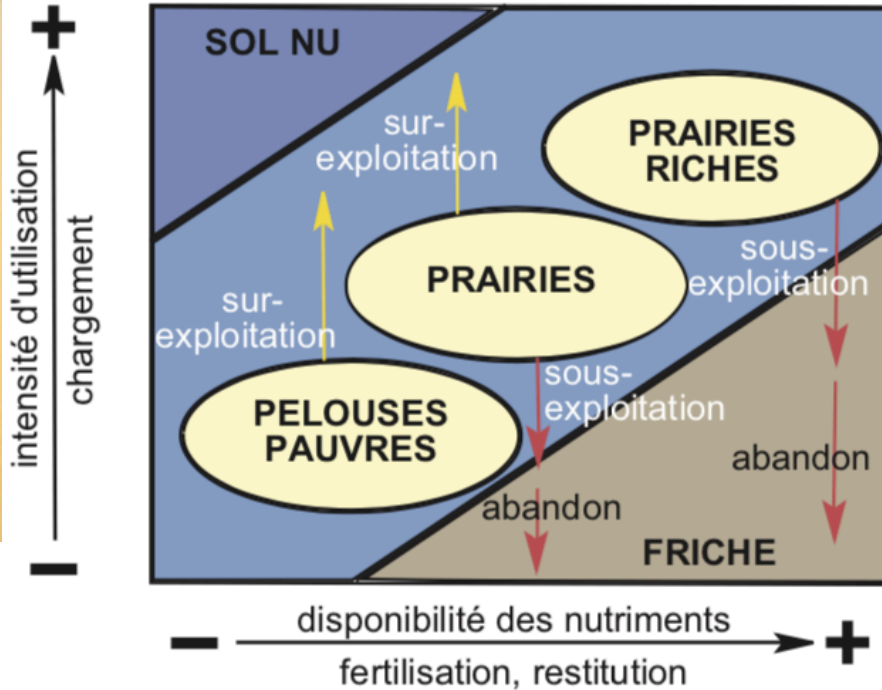


Sénéçon du Cap

Les utilisations des prairies, un équilibre

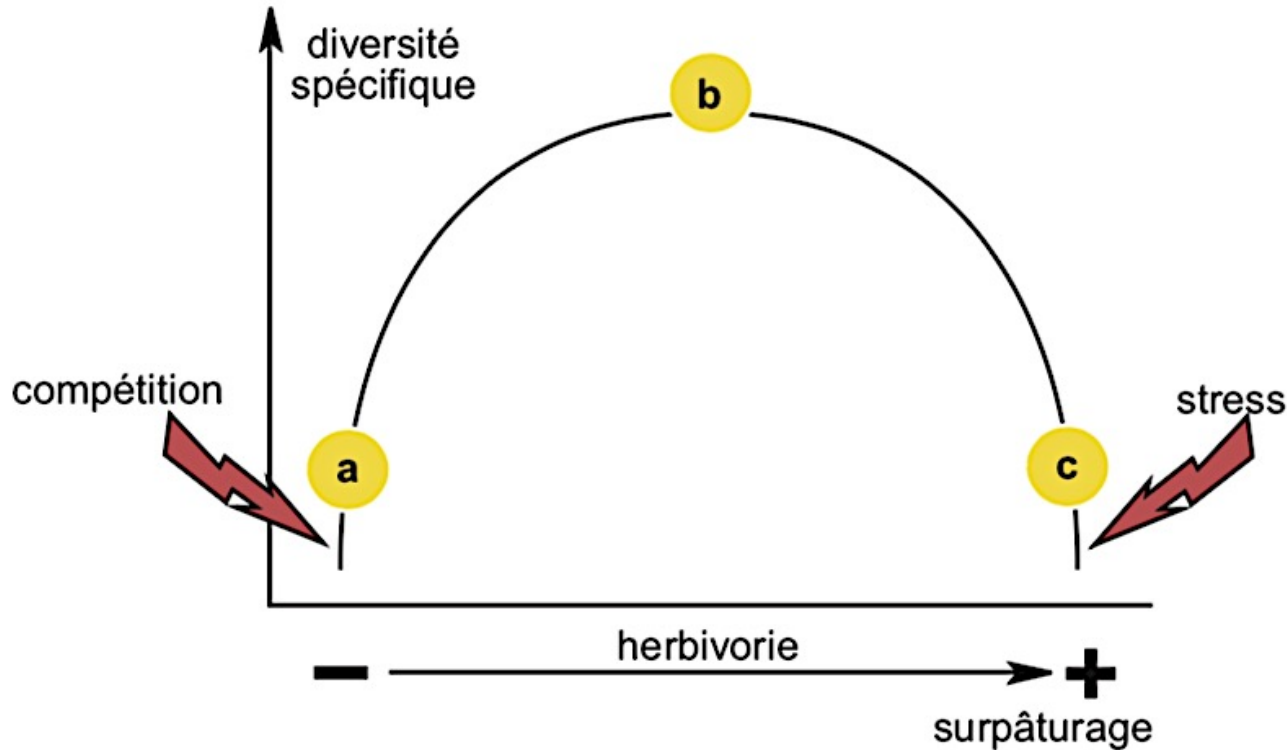


Sur-exploitation



Sous-exploitation

Bien pâturer favorise la biodiversité



a : faible nombre d'espèces de grande taille

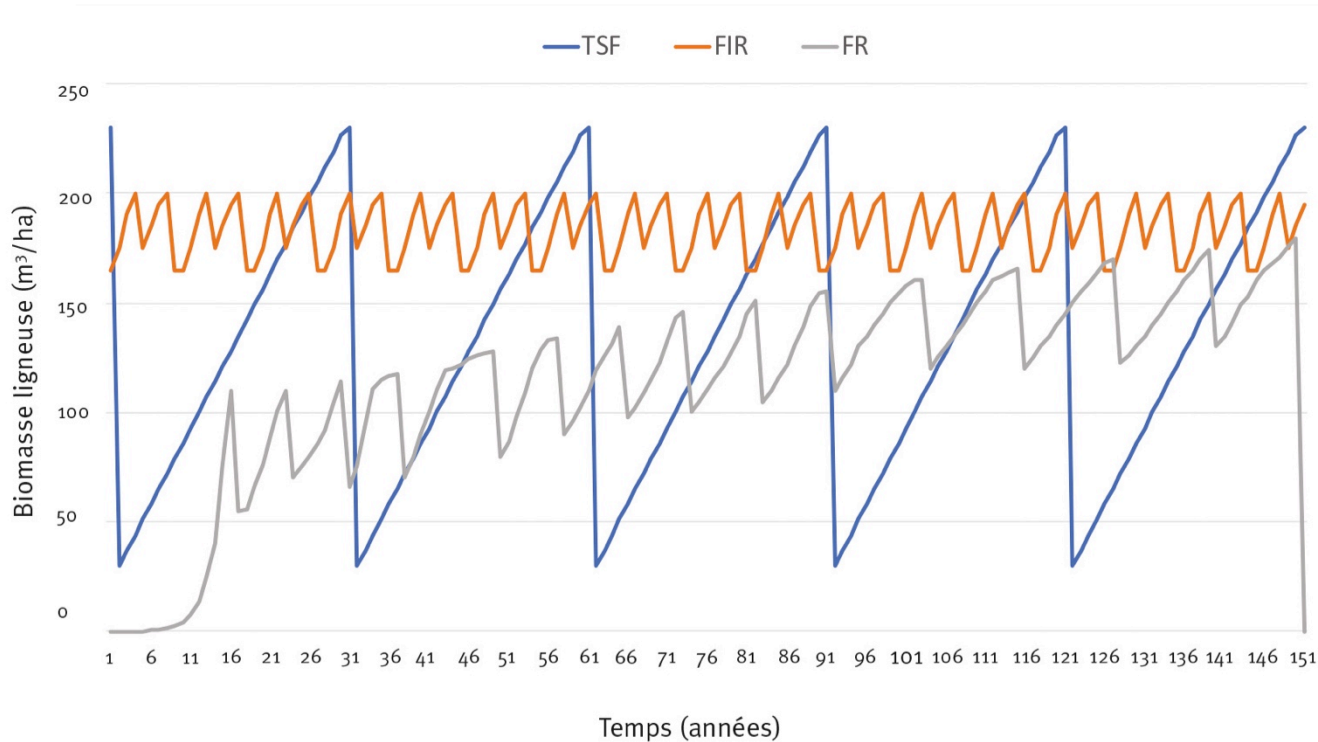
b : nombre maximal d'espèces; divers types morphologiques dans une mosaïque d'habitats

c : faible nombre d'espèces de petite taille

La gestion des forêts

Coupes raisonnées

rajeunissement de la forêt => reprise de la productivité



TSF : taillis sous futaie
 FIR : futaie irrégulière
 FR : futaie régulière

Le bocage favorise la biodiversité



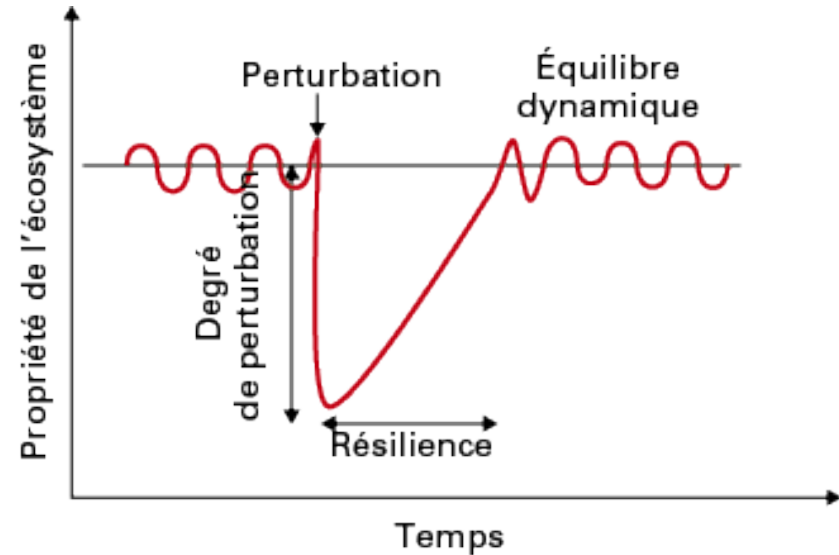
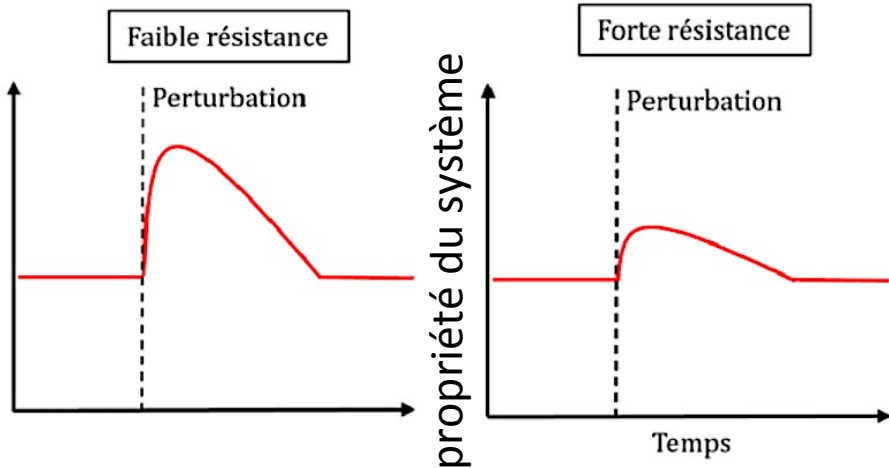
BILAN

Perturbation => rajeunissement de la succession végétale

Résistance et résilience

Résistance = capacité d'un écosystème à maintenir son état initial suite à une perturbation

Résilience = capacité d'un écosystème à revenir à son état initial après avoir subi une perturbation.



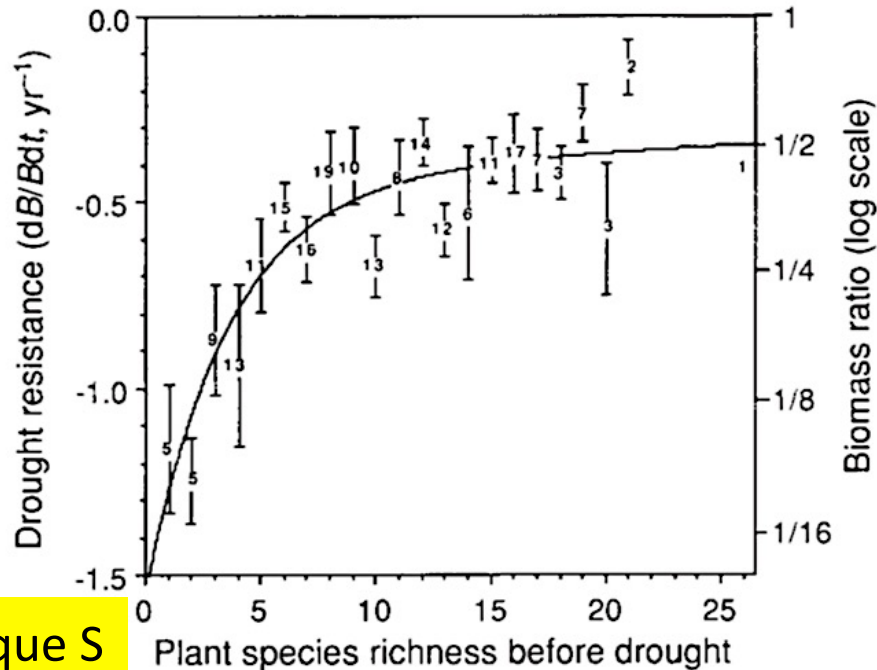
Les travaux de Tilman

1982 : Tilman suit 207 parcelles plantées d'espèces connues.

1988 : intense sécheresse en été

- parcelles monospécifiques 6 fois moins productives que les parcelles ayant plus de 15 espèces

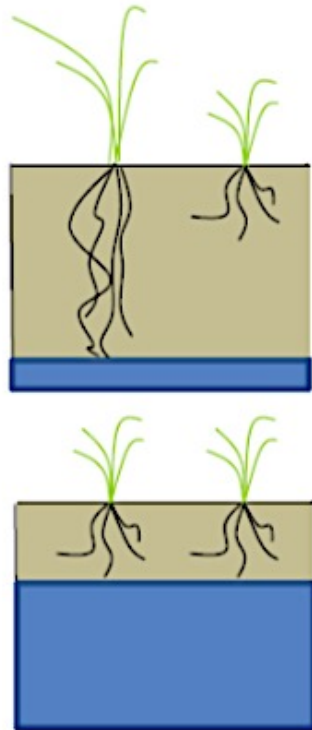
Résistance à la sécheresse



Rapport de
biomasse entre 1986
et 1988

Richesse spécifique S

Réponse à la sécheresse

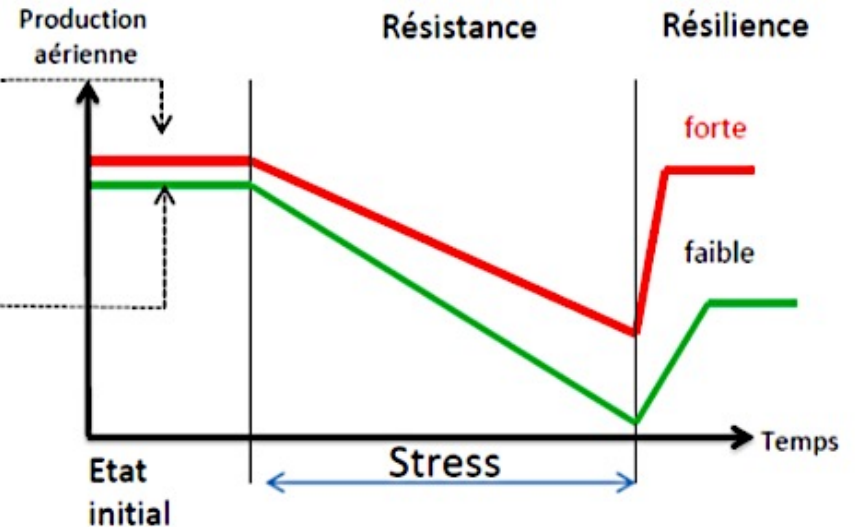


Forte biodiversité

Meilleure utilisation de la ressource
Complémentarité fonctionnelle

Faible biodiversité

Résilience = Capacité d'un écosystème à récupérer ses fonctions initiales après stress



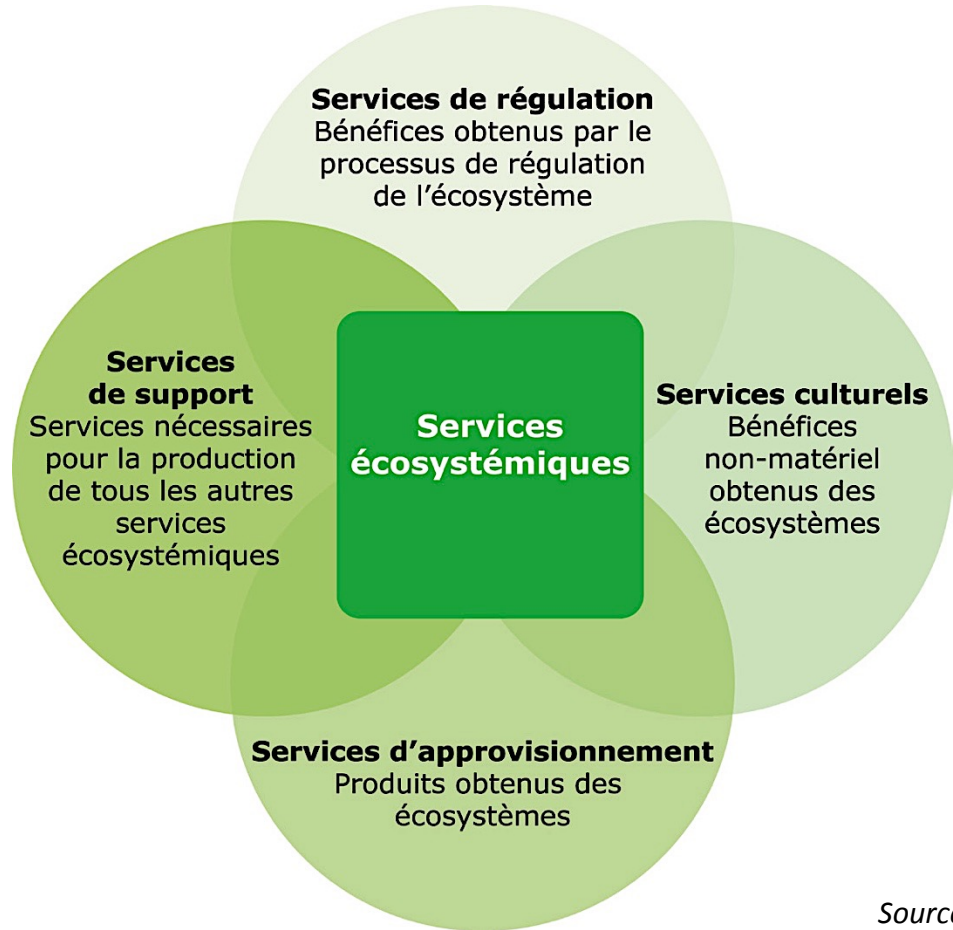
2. La dynamique des écosystèmes

2.3. Services écosystémiques et gestion des écosystèmes

Les 4 types de services écosystémiques

Service écosystémique

bien ou service que l'Homme peut tirer des écosystèmes



Service d'approvisionnement

Nourriture, matières premières, eau douce, ressources médicinales

Sur 297000 espèces de plantes, on en connaît **30000 espèces consommables**

Seulement **120** espèces végétales (mais plusieurs milliers de variétés) ont une importance nationale et sont cultivées

30 espèces fournissent l'essentiel de l'alimentation dans le monde

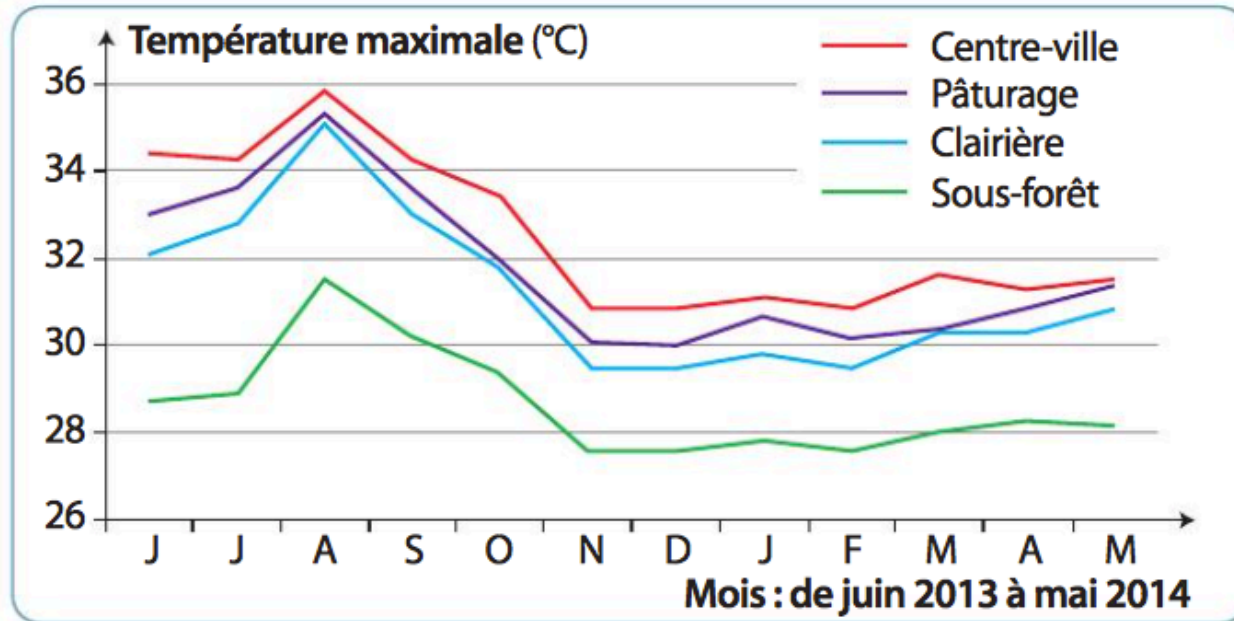
50 % de l'apport énergétique quotidien de la population mondiale repose sur **3 produits: riz, blé, maïs**

Service de régulation

- *Régulation locale du climat et de la qualité de l'air*
- Séquestration et stockage du carbone
- Atténuation des événements météorologiques extrêmes
- Traitement des eaux usées
- *Prévention contre l'érosion et maintien de la fertilité des sols*
- Pollinisation
- Contrôle biologique

La régulation du climat local

Strasbourg = plan **Canopée** : planter 10 000 arbres (objectif 2030) dans la ville et couvrir 30% de la surface urbaine en végétation (26% actuel)



Source : 28^e colloque de l'Association internationale de climatologie (Liège 2015)

Prévention de l'érosion des sols

Ravinement sur sol nu (Algérie)



Enherbement stabilisateur du sol



Services de soutien (= support)

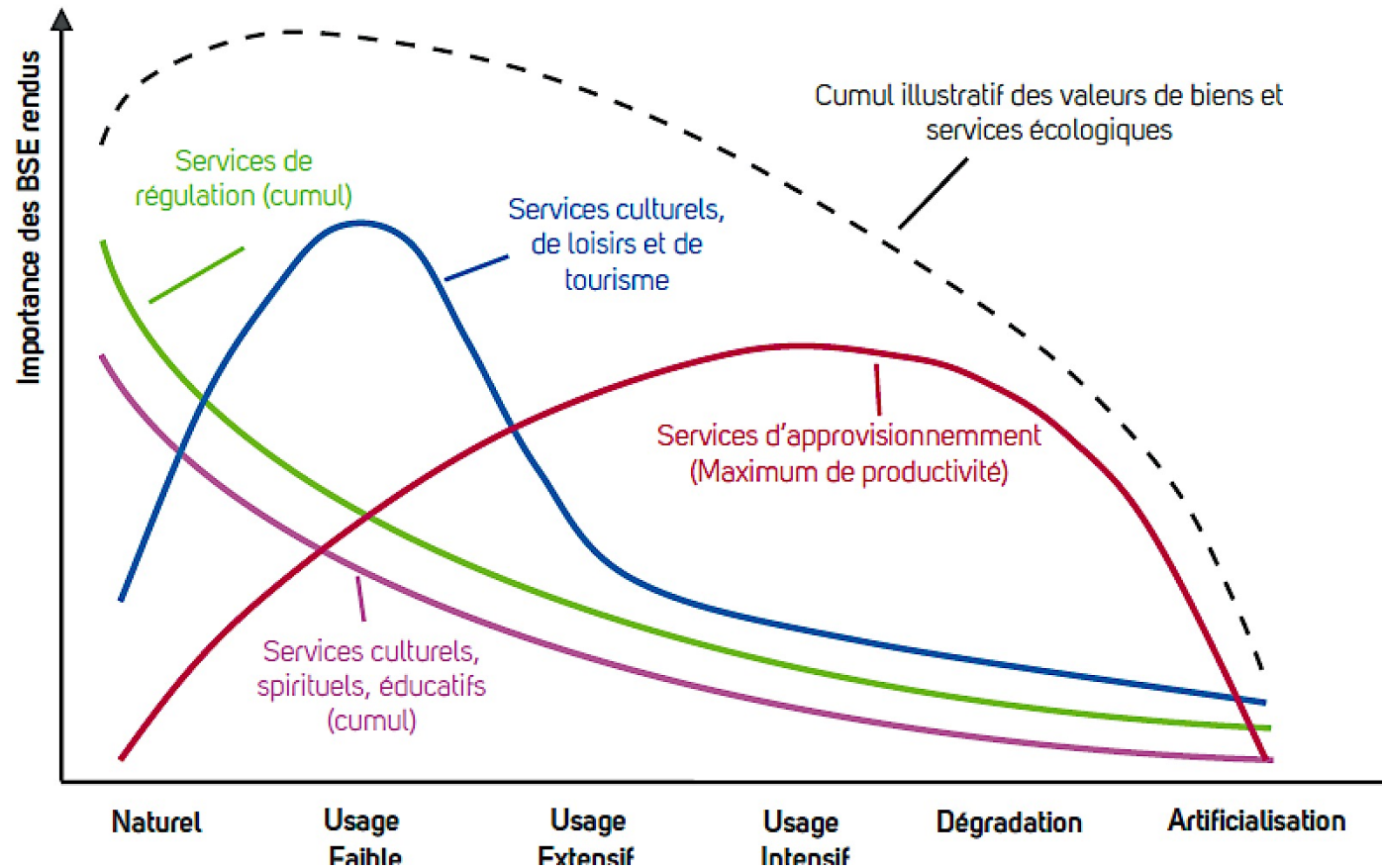
- Habitats pour les espèces
- Maintien de la diversité génétique

Services culturels

- Divertissement et santé
- Tourisme
- Appréciation esthétique et inspiration pour la culture, art et design
- Expérience spirituelle et sentiment d'appartenance

Concilier les usages

Service écologique fourni



Évaluer la valeur de la biodiversité

Tache quasiment impossible mais des essais, fondés sur les coûts de restauration... en débat.

Composante de la biodiversité évaluée	Valeur économique
Une espèce particulière : chouette tachetée (États-Unis)	Entre 100 et 105 euros.an ⁻¹ par ménage
L'habitat forêt au Royaume-Uni	56 euros.an ⁻¹ par ménage
Les services récréatifs en forêt aux États-Unis (Appalaches) : Chasse • Pêche • Observation de la faune et de la flore	De 1 500 euros.ha ⁻¹ .an ⁻¹ pour les observations, jusqu'à 6 300 euros.ha ⁻¹ .an ⁻¹ pour la chasse
Composante du biotope évaluée	Valeur économique
La limitation de l'érosion des sols en Turquie	45 euros.ha ⁻¹
La séquestration du carbone au Royaume-Uni	300 à 440 euros.ha ⁻¹

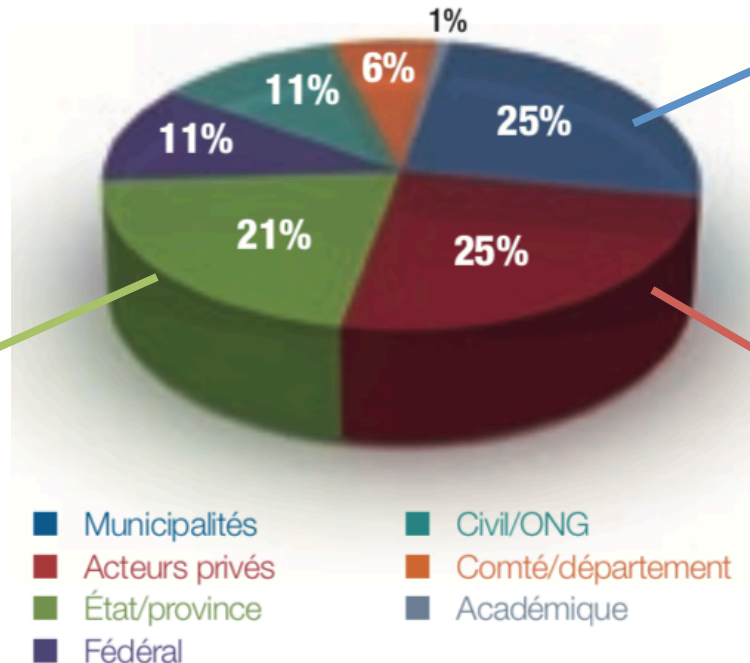
Source : *Science eaux et territoires, politiques publiques et biodiversité*, 3 (2010)

Les PSE : paiements pour service écosystémique

= mécanismes de financement incitatif de protection de la biodiversité

Investissements (liés à la gestion de l'eau)

Exemple : Chambre d'agriculture



Exemple : New-York

Exemples : EDF
Evian, Nestlé

Source : Ecosystem Marketplace

Source : <http://www.mission-economie-biodiversite.com>

Quelques exemples de restauration

Actions pouvant accélérer la résilience	Moyens mis en œuvre	Exemple
Recréer les successions écologiques	Favoriser la dispersion des espèces	Dispersion de graines d'arbre indigène par du bétail pour restaurer la forêt tropicale sèche, au Costa Rica (Amérique du sud)
Gérer le niveau trophique du sol	Si besoin d'enrichir le sol en nutriments : planter des espèces fixatrices d'azote	Le lupin est souvent planté pour accroître la concentration en azote dans les sols perturbés par les activités humaines
Améliorer l'accessibilité aux nutriments	Favoriser le développement de certaines plantes pionnières, ajouter des filaments mycéliens pour favoriser la mycorhization	Méthodes testées à Madagascar où le déboisement touche l'ensemble des forêts
Dépolluer un sol : bio-remédiation	Introduction puis export d'espèces végétales ayant la capacité d'emmagasiner des métaux	Certaines plantes telles que l'Arabette de Haller ont la capacité d'accumuler le zinc et le cadmium sur d'anciens sites industriels

CONCLUSION

Prise de conscience collective et connaissances scientifiques : 2 armes pour le monde de demain.

Tous les écosystèmes sont plus ou moins anthropisés.

La croissance démographique doit s'accompagner d'une gestion rigoureuse et égalitaire des ressources.

