

SV-J-2-3 : Fonctionnement des écosystèmes

Le fonctionnement d'un écosystème est marqué des flux de matière et d'énergie dans lesquels interviennent producteurs primaires, consommateurs et décomposeurs, exploitant des sources de matières différentes.

→ Comment fonctionne un écosystème et quels sont les flux de matière et d'énergie qui le traversent ?

I - ON PEUT REPRESENTER LES INTERACTIONS TROPHIQUES AU SEIN D'UN ECOSYSTEME PAR DES CHAINES TROPHIQUES

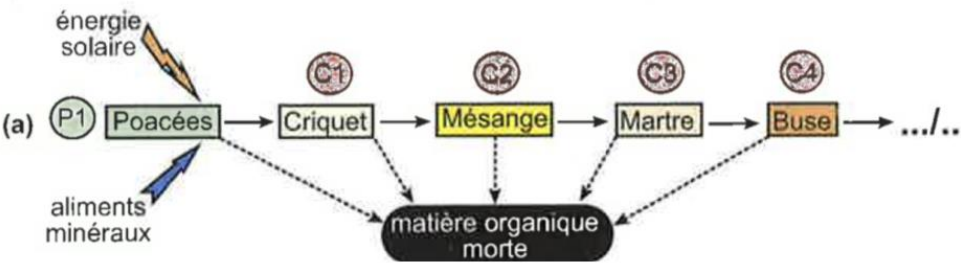
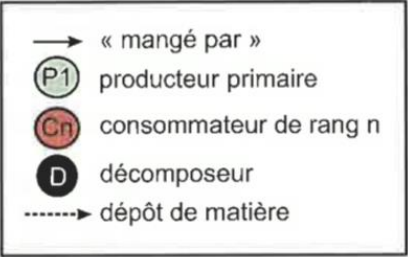
I.1 - Représentation des relations trophiques au sein d'un écosystème : chaîne alimentaire et niveau trophique

Chaîne alimentaire = chaîne trophique = suite d'organismes où chaque maillon de la chaîne, mange celui le précède et est mangé par celui qui le succède. La flèche signifie : « est mangé par ».

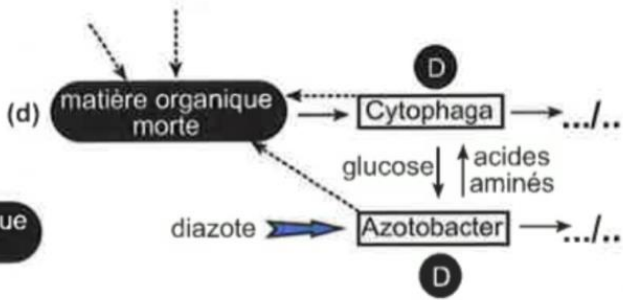
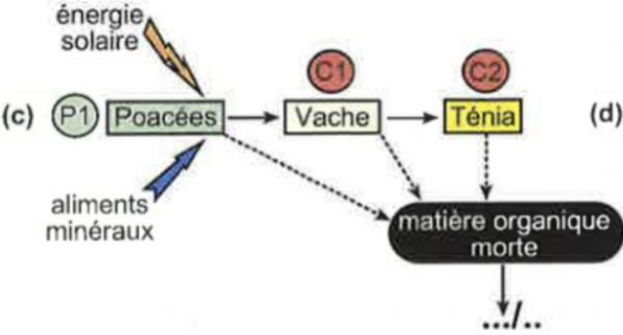
Niveau trophique = position occupée par un organisme dans une chaîne alimentaire (producteur ^{laire}, consommateur..). Il y a 4 niveaux trophiques majeurs :

- toujours un **producteur primaire** en début de chaîne
- des consommateurs de divers ordres hétérotrophes :
consommateurs primaires herbivores, les carnivores
- les **décomposeurs** recyclent toujours la MO morte en la minéralisant (surtout dans le sol : détritivores, bactéries, champignons)

Chaînes de prédateurs : (a) exemple :



Chaîne de parasites (c) et de détritivores (d)



I.2 - Les limites de la notion de niveau trophique

→ Certaines espèces ont un large spectre de ressources.

Polyphages = organismes exploitant des ressources appartenant à des groupes taxonomiques différents.

Omnivores = organismes à la fois herbivores et carnivores.

La vache est omnivore mais à l'échelle de l'écosystème prairie, l'impact des vaches sur la structure de la biocénose est lié essentiellement à l'occupation du niveau 2 en tant que consommateur herbivore.

Rq 1 : La vache appartient à différents niveaux trophiques si l'on considère les consommateurs de la panse comme consommateurs I

Rq 2 : certains organismes changent de ressources alimentaires au cours de leur cycle de vie.

II - LES FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE ENTRE LES NIVEAUX TROPHIQUES SUCCESSIFS S'ACCOMPAGNENT DE PERTES

L'énergie lumineuse est captée et convertie en énergie chimique par **les producteurs primaires autotrophes**.

Les relations trophiques conduisent à **des flux de matière et d'énergie** sous forme chimique.

Tous les êtres vivants **convertissent l'énergie chimique** et la dissipent finalement **en chaleur** au cours des différentes réactions du métabolisme.

II.1 - L'entrée de l'énergie dans la biosphère par la production primaire

A) Processus mis en jeu : photolithoautotrophie et de la chimiolithoautotrophie des producteurs ^{primaires}

Cf SV-E

Production (masse. surface⁻¹.temps⁻¹) : quantité de matières synthétisée par un niveau trophique par unité de temps, pour une biomasse donnée

Production primaire brute = quantité de matière organique élaborée par les producteurs ^{laires}

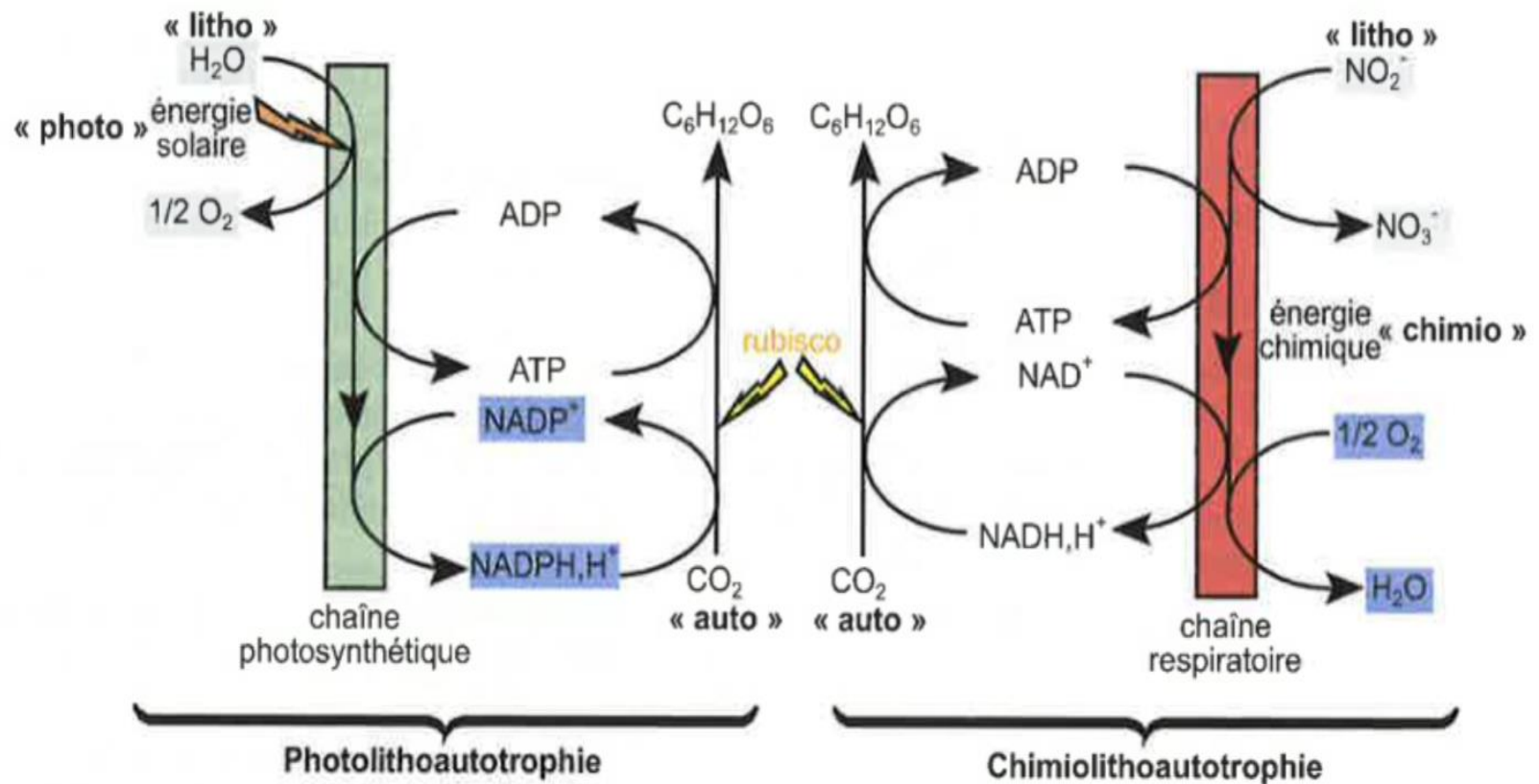
Production lare nette = production lare brute à laquelle on soustrait les pertes respiratoires :

→ $PPN = PPB - R$

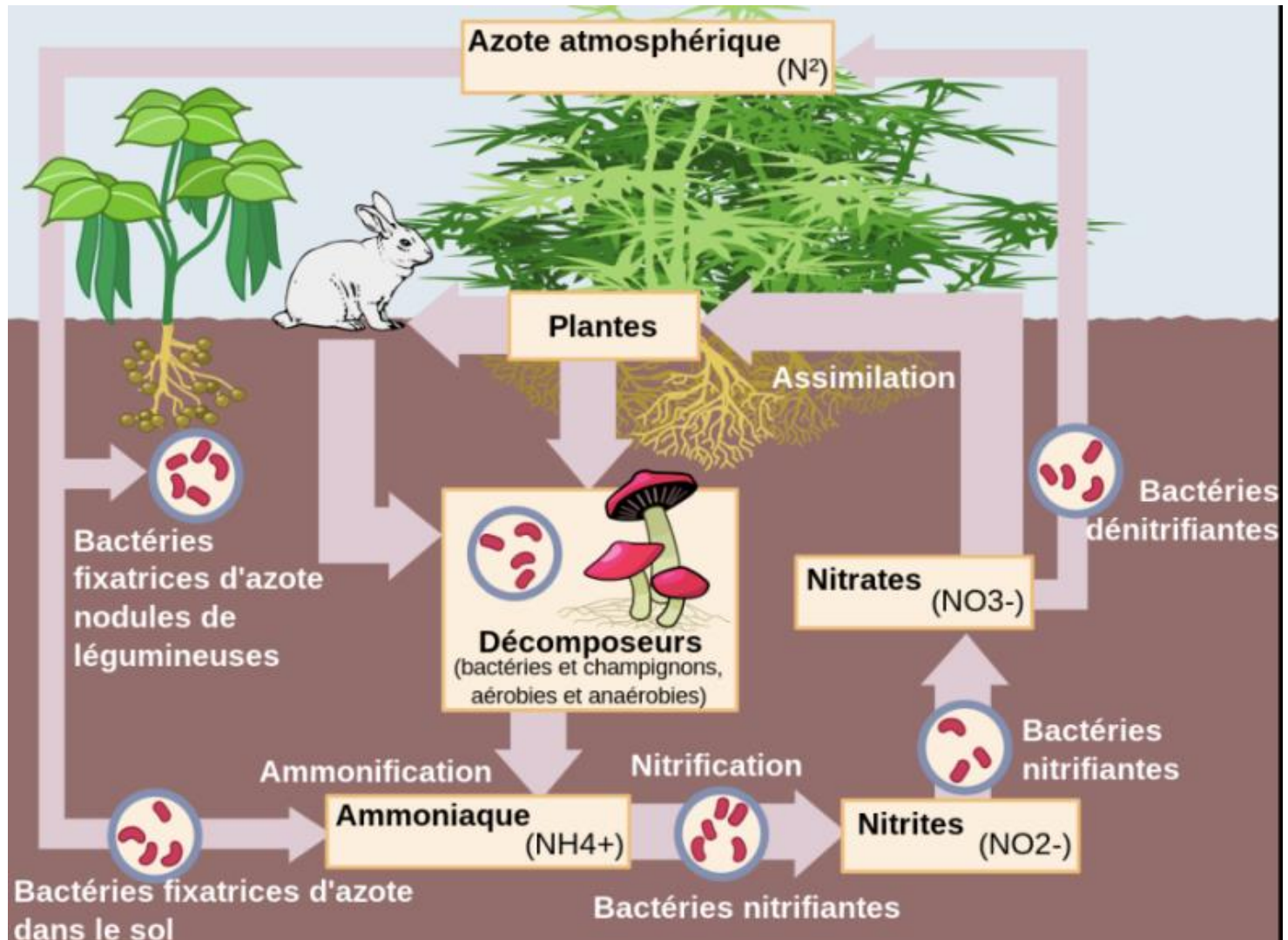
La production lare est la synthèse de matière organique (= biomasse) par les producteurs primaires =

→ principalement les végétaux **photo-litho-autotrophes** en milieu terrestre

→ bactéries **chimio-litho-autotrophes** (bactéries du sol nitrifiantes)

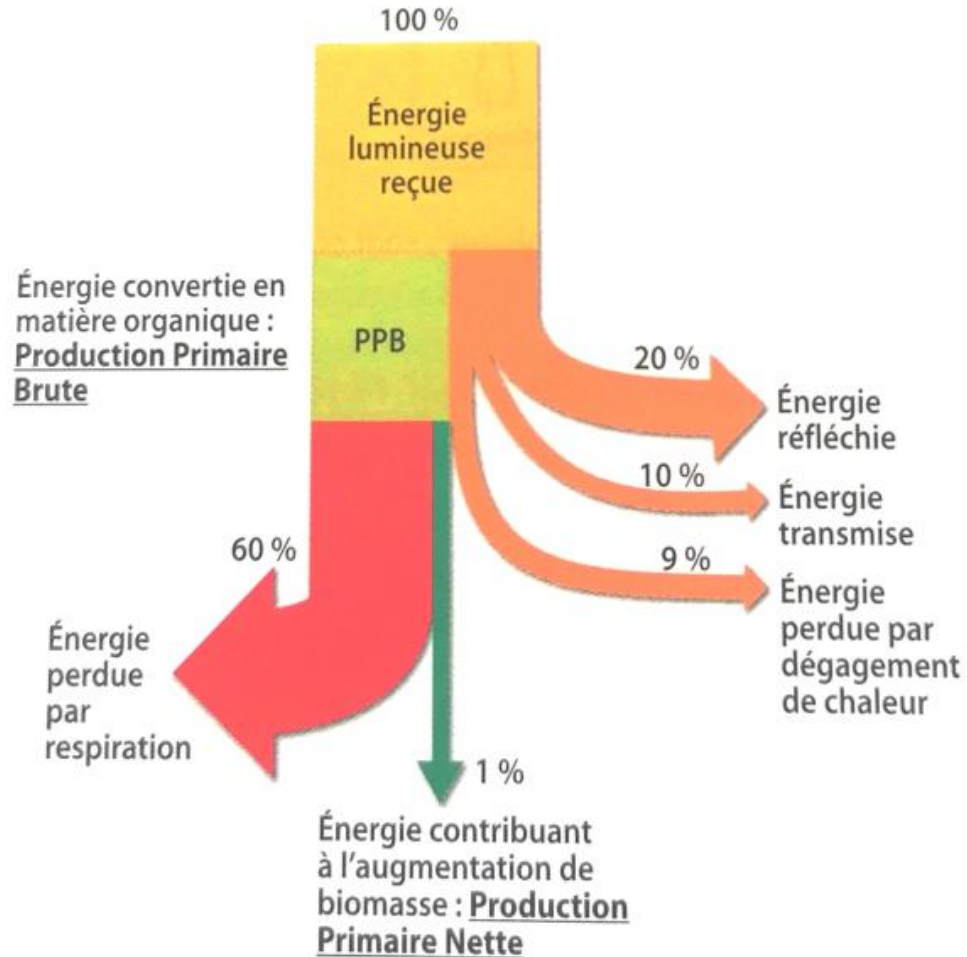


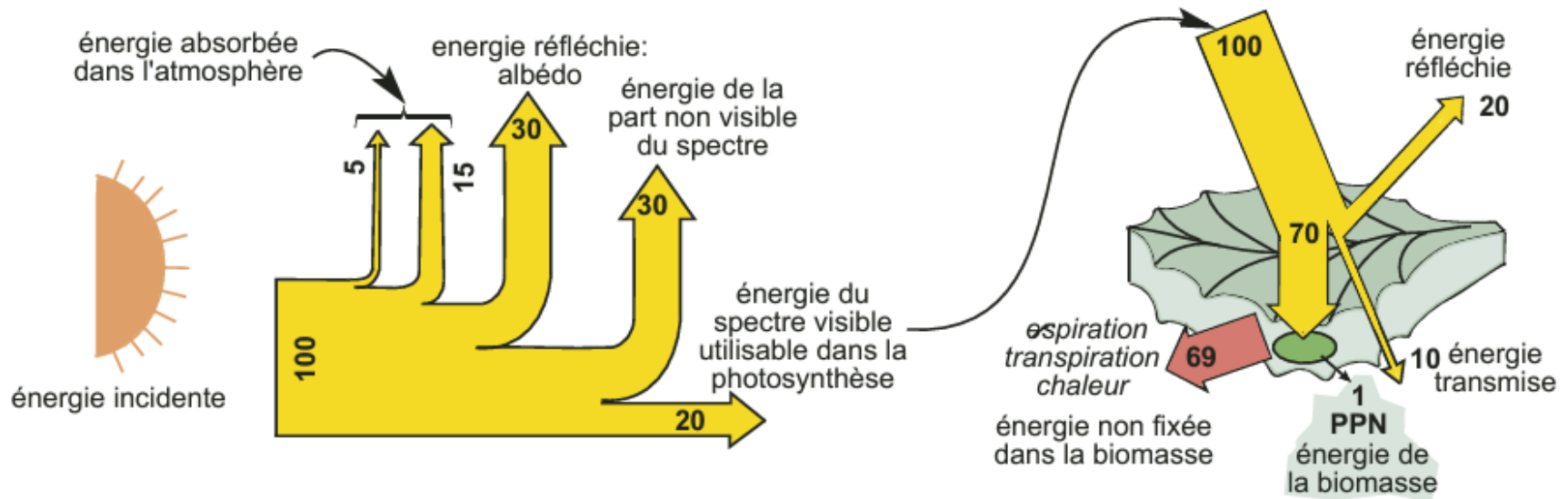
Rappel chimolithotrophie dans le sol : les bactéries Nitrobacter sont nitrifiantes



B) De l'énergie lumineuse à l'énergie chimique chez les producteurs primaires : de nombreuses pertes énergétiques

Production primaire brute (PPB) = **Production primaire nette (PPN)** + **Quantité de matière utilisée par le catabolisme**





De l'énergie solaire à la biomasse des producteurs primaires.

Seulement 20 % de l'énergie du spectre visible parvient au sol et peut être utilisé par les feuilles. La conversion de l'énergie solaire en énergie de biomasse par les végétaux verts présente donc un très mauvais rendement. À l'échelle mondiale, le rendement de la photosynthèse (production primaire nette de l'ensemble des écosystèmes rapportée à l'énergie solaire reçue au sol) **est très faible, de l'ordre de 1 %**. Toute la biomasse produite par la photosynthèse des végétaux verts n'est pas mise à la disposition des phytophages. En effet, une fraction (R) est engagée dans le catabolisme (respiration, photorespiration, fermentations éventuelles). Une partie de PPN sert à l'alimentation du niveau suivant.

	Production primaire nette (g.m ⁻² .an ⁻¹)	Biomasse (g.m ⁻²)	Productivité (an ⁻¹)	
Forêt caducifoliée	1 300	30 000	4,3 %	Individus de grande taille à maturité : production importante mais productivité faible
Prairie tempérée	600	1 600	37,5 %	
Zone cultivée	650	1 000	65 %	Individus de petite taille à croissance rapide : production faible mais productivité élevée
				Espèces sélectionnées pour leur croissance individuelle élevée : forte productivité

- Un écosystème prairie a une **biomasse faible mais rapidement renouvelée** donc a une forte productivité surtout si des cultures ont été sélectionnées par l'homme.

Écosystème	Production primaire nette ($\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$)	Biomasse (g.m^{-2})	Temps de séjour (années)	Productivité
Forêt tropicale pluvieuse	2000	45000	22,5	0,044
Forêt tempérée	1200	30000	25,0	0,04
Prairie tempérée	500	1500	3,0	0,333
Lacs et rivières	500	20	0,04 (15 jours)	25
Plein océan	125	3	0,024 (9 jours)	41,667

D'après Whittaker et Liken (1973)

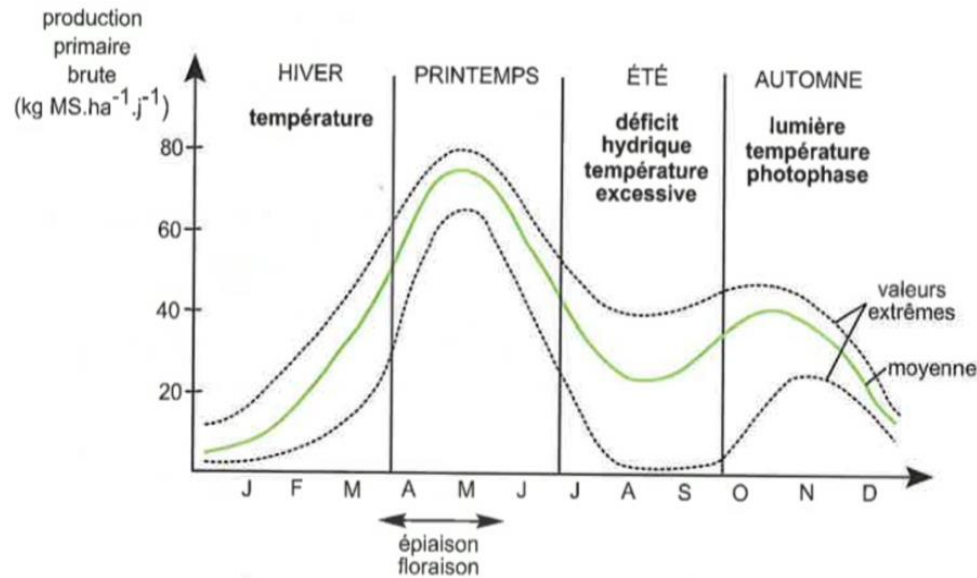
- Toutes les Poacées de la prairie n'ont pas la même productivité

Toutes ces espèces n'ont pas les mêmes usages, en prairie permanente ou temporaire ; selon le sol, le climat local, la saison. On distingue :

Espèces à productivité forte	Ray-grass d'Italie, Ray-grass anglais, Fétuque des prés, élevée, Dactyle aggloméré, Fléole des Prés
Espèces à productivité moyenne	Paturin des prés, Brome inerme, Vulpin des Prés
Espèces à productivité faible	Brome mou, Houlique laineuse , Crételle des prés, odorante

- Les variations saisonnières de la productivité de la prairie :
 → Il existe des facteurs abiotiques limitants dont il faut tenir compte (eau/structure du sol/disponibilité en éléments minéraux/ensoleillement/T°C...)

Productivité primaire brute d'une prairie tout au long de l'année



MS : matière sèche ; épiaison : moment où l'inflorescence se dégage de la gaine de la dernière feuille ; floraison : mise en place de fleurs fonctionnelles.

→ Des variations qualitatives de la production : tout au long de l'année, la digestibilité de l'herbe et sa teneur en azote diminuent. Ce qui est lié à une augmentation de l'assimilation carbonée/assimilation azotée tout au long du printemps

- Les modifications des facteurs abiotiques par l'intervention humaine dans l'agrosystème : les **intrants** augmentent la productivité

Les intrants représentent ce que l'Homme introduit dans le milieu de culture pour en améliorer la productivité.

→ Fertilisation par apport d'engrais : améliore exclusivement la composition chimique du sol.

La fertilisation doit couvrir les besoins de la plante sans effet néfaste. Le bénéfice d'un apport azoté varie suivant la saison : c'est surtout pendant la phase de croissance et celle de reproduction que les apports sont les plus efficaces.

Pour info : Engrais azotés

N = macroélément constitutif des protéines ; il favorise la croissance cellulaire, les synthèses et la constitution de réserves protéiques. Il stimule l'élongation des feuilles directement responsables de la productivité.

A faible indice foliaire (indice foliaire = surface totale des feuilles / surface de la parcelle), N stimule aussi le tallage

Un apport d'azote raisonné : l'apport d'azote doit être moindre si la prairie comporte au moins 30% de Fabacées fixatrices de N_2 . Il peut se faire sous la forme de lisier (à action rapide) ou de fumier de bovins ou de compost à action plus lente.

Les autres engrais (souvent combinés NPK): Phosphore sous forme de P_2O_5 , Potassium sous forme de K_2O , Ca, S, Mg, Se...

→ Un amendement module la qualité du sol = substance incorporée au sol pour améliorer ses propriétés physiques

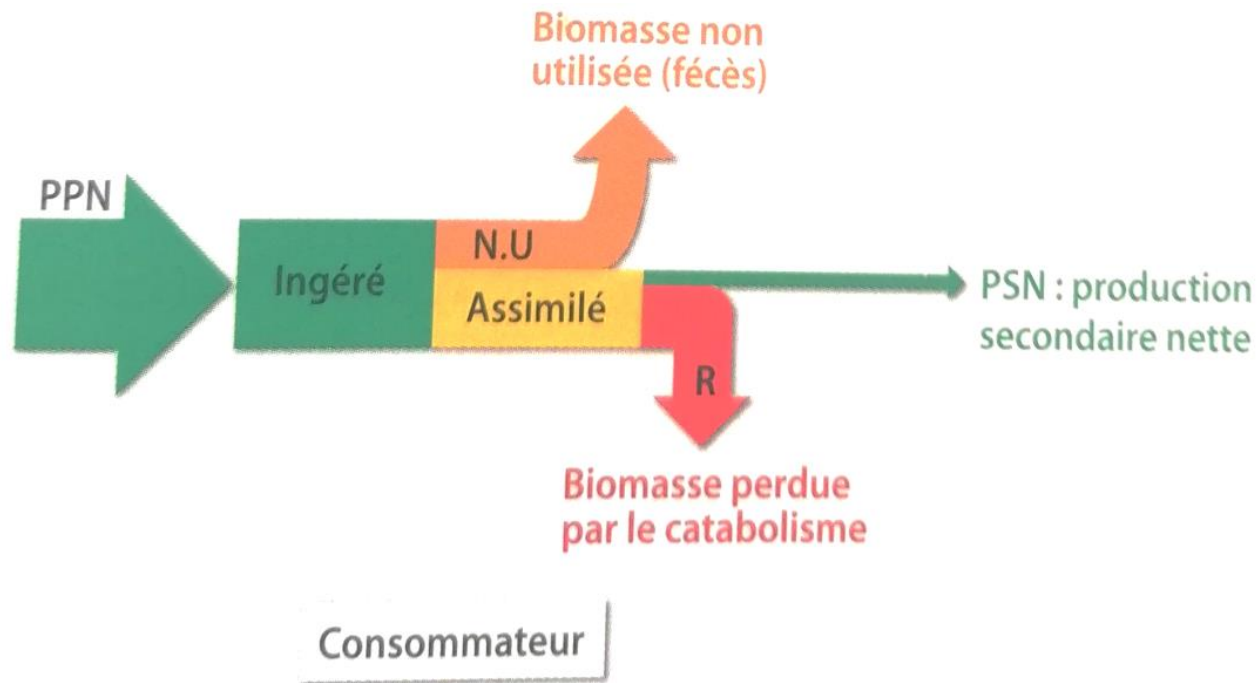
Sable : allège les sols lourds, améliore la structure du sol, son aération, la vie microbienne

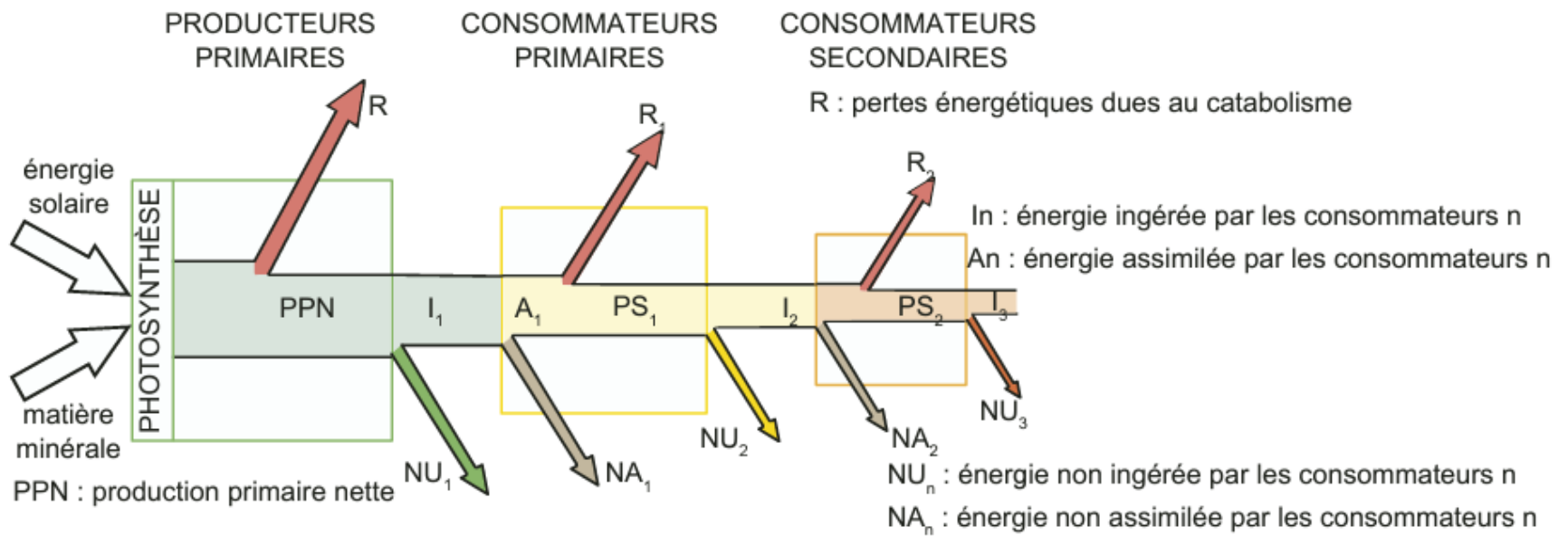
Chaulage : apport de carbonates de Ca et de Mg (basiques), remonte le pH d'un sol acide

II.3 - Les pertes de matière et la dissipation de l'énergie chez les organismes consommateurs chimiorganotrophes d'un niveau trophique à l'autre

Une grande partie de la biomasse ingérée par un consommateur ne participe pas à l'élaboration de sa propre matière organique : à chaque niveau trophique on observe une perte de biomasse et donc d'énergie, qui ne sera pas disponible pour le niveau trophique supérieur.

Seule une faible proportion de la matière ingérée par les consommateurs participe donc à la production de biomasse propre donc à la croissance de l'organisme.

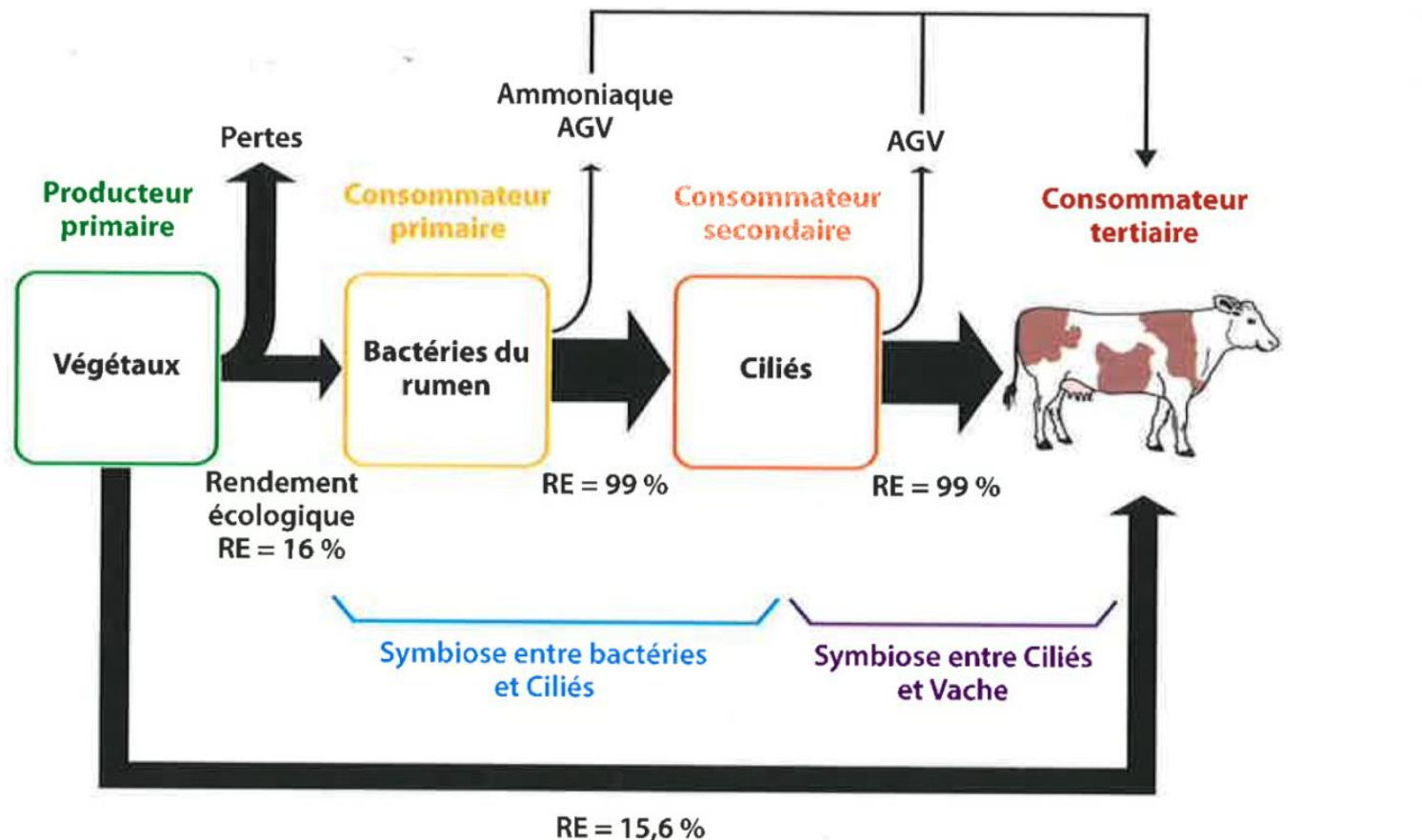


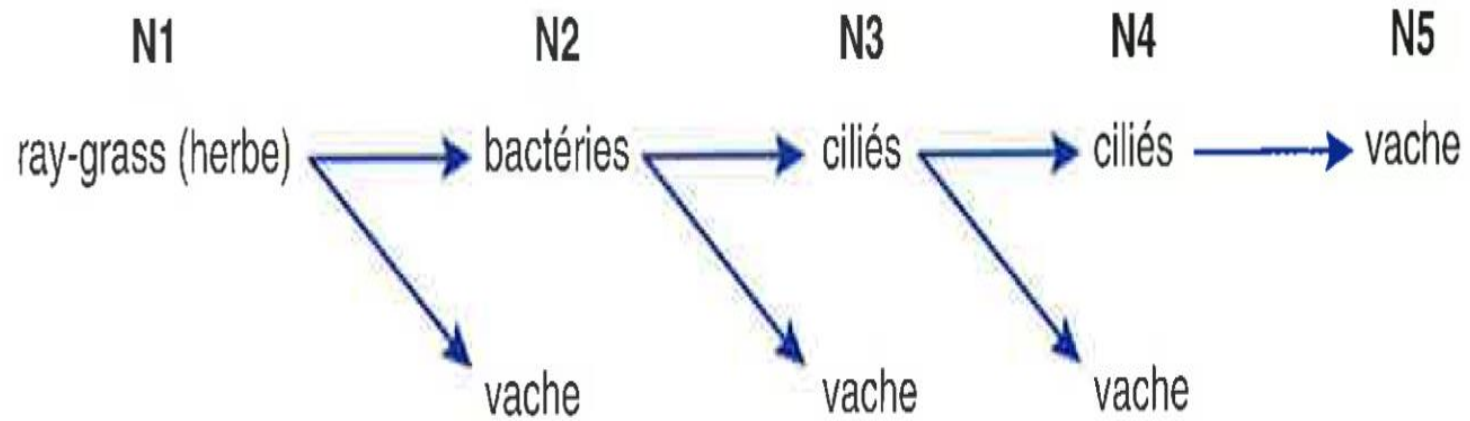


Transferts d'énergie dans un réseau trophique.

II.4 - Une position multiple de la vache dans les pyramides de production : importance des effets de la symbiose sur les transferts de matière et d'énergie

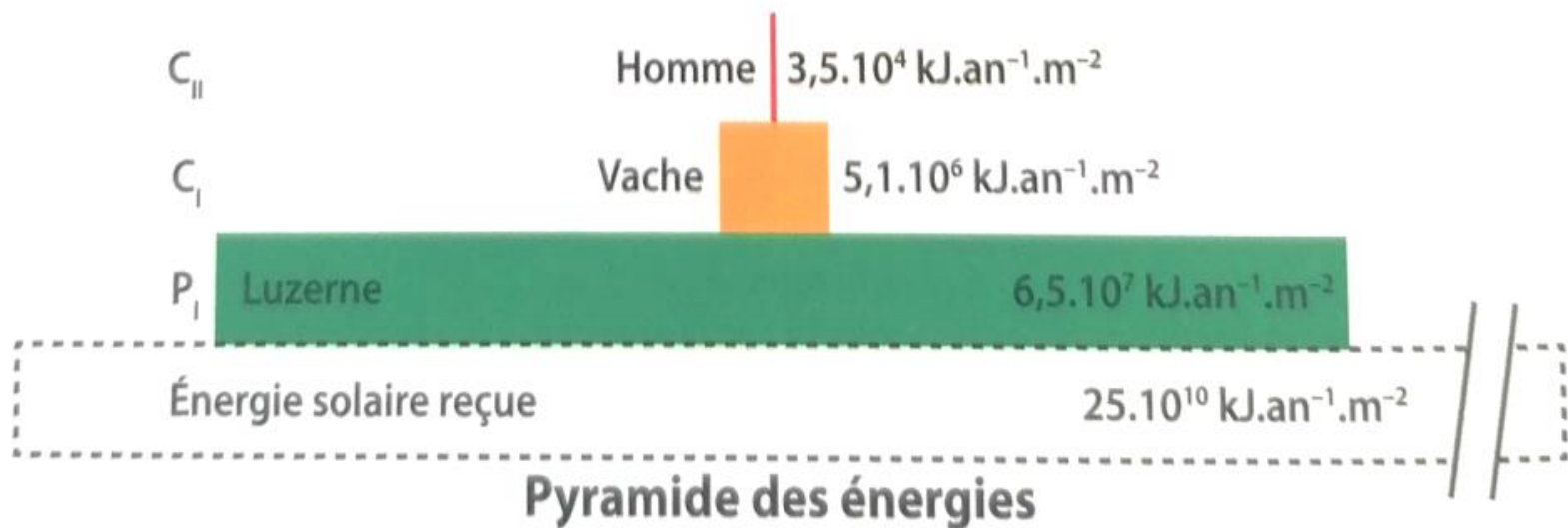
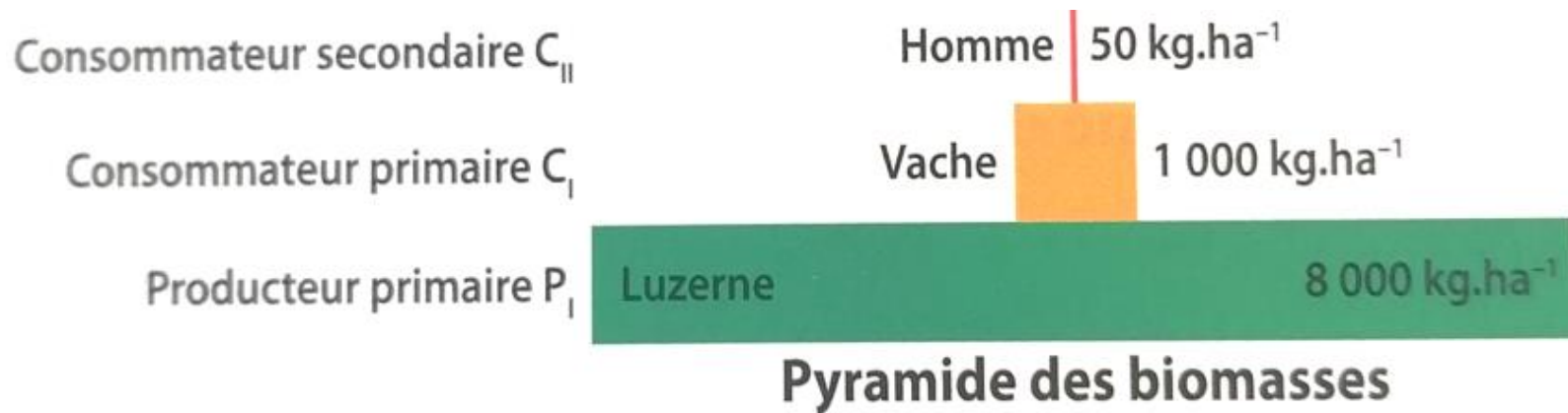
La vache occupe les niveaux 2 (consommation d'herbe), 3 (absorption d'AGV et consommation de bactéries phytophages), 4 (consommation de ciliés prédateurs de bactéries) voire 5 (consommation de ciliés prédateurs de ciliés) !





III - ON PEUT EVALUER LES TRANSFERTS D'ENERGIE ET DE MATIERE ENTRE NIVEAUX TROPHIQUES PAR LA CONSTRUCTION DES PYRAMIDES ECOLOGIQUES

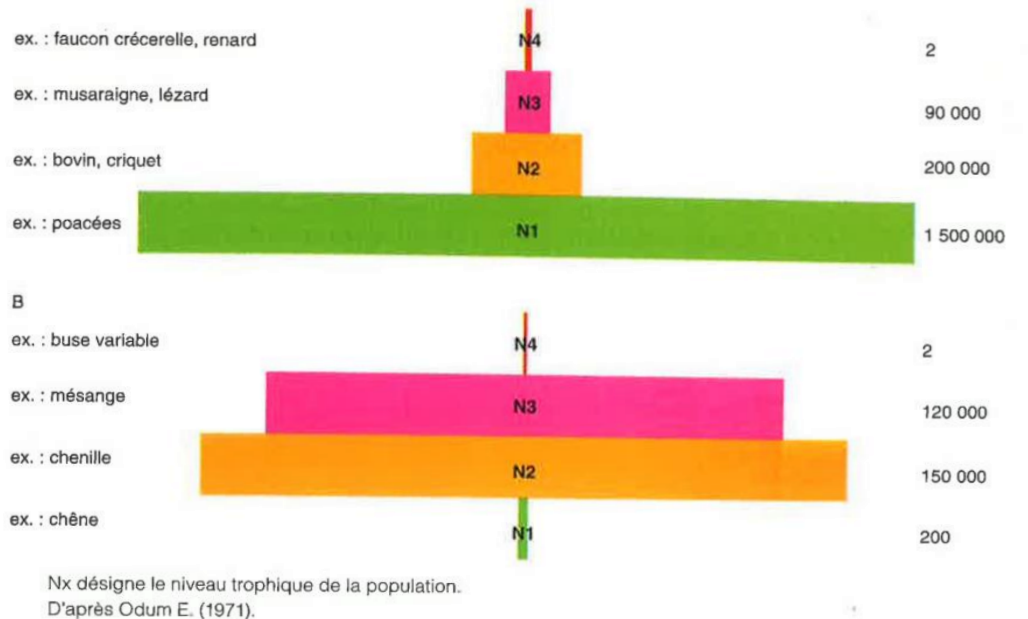
- Une **pyramide écologique** montre l'importance quantitative relative de chaque niveau trophique d'une chaîne trophique et efficacité des transferts entre niveaux trophiques et des pertes.
- Différentes pyramides écologiques sont construites selon les variables prises en compte.
- Construction : hauteur constante, base proportionnelle à la quantité représentée (choisir une échelle adaptée).



Les différents types de pyramides écologiques

Pyramide des nombres

Nb d'individus/1000 m² présents en été pour une prairie et une forêt tempérée

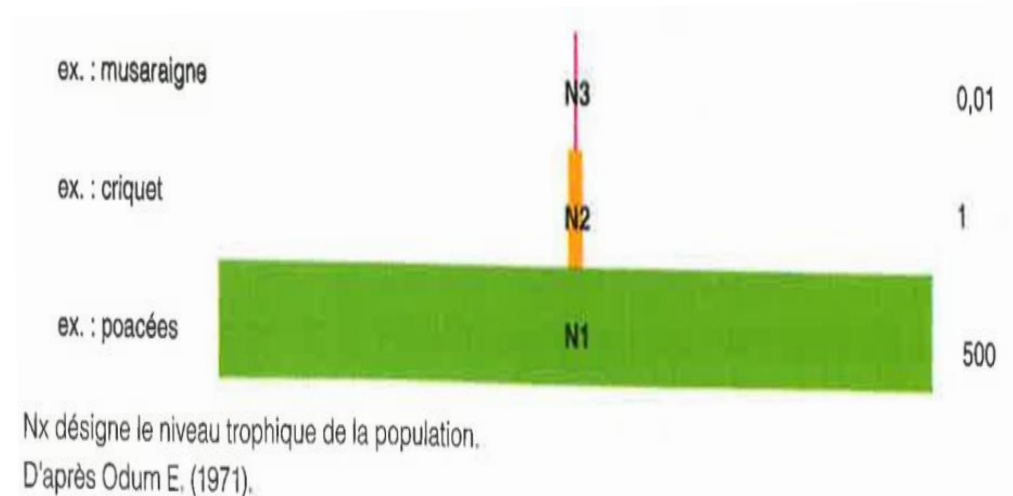


- Souvent le nombre décroît d'un niveau à l'autre
- pyramide inversée : forêt , chaine de parasites (nb de parasites >> nb d'hôtes)
- Ne montre pas que la taille croît généralement avec le rang dans la chaine des consommateurs
- Pas de véritable information quant au flux de matière et d'énergie

Pyramide des biomasses

Biomasse = quantité de matière vivante (donc de matière organique) en mmf (masse de matière fraîche) ou en mms (masse de matière sèche), pour un niveau trophique.

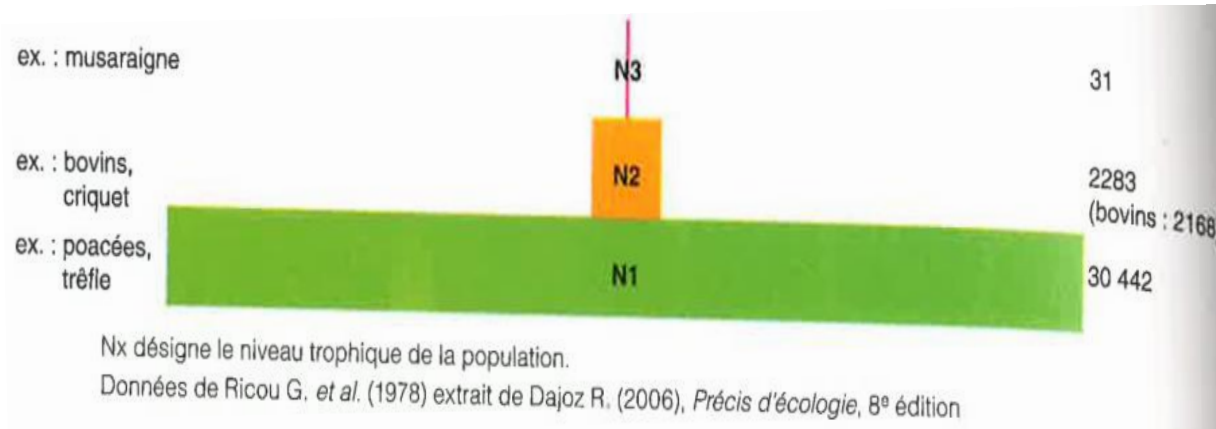
Masse en poids frais exprimée en g/m² dans un champ non exploité



- *D'un niveau trophique au suivant la biomasse décroît,*
- *Intègre mieux les pertes de matières organiques au cours des transferts d'un niveau à l'autre*
- *Existe exceptions : milieu marin : pyramide inversée car biomasse du phytoplancton + faible que la biomasse du zooplancton compte tenu du fort taux de renouvellement du phytoplancton.*

Pyramide des énergies

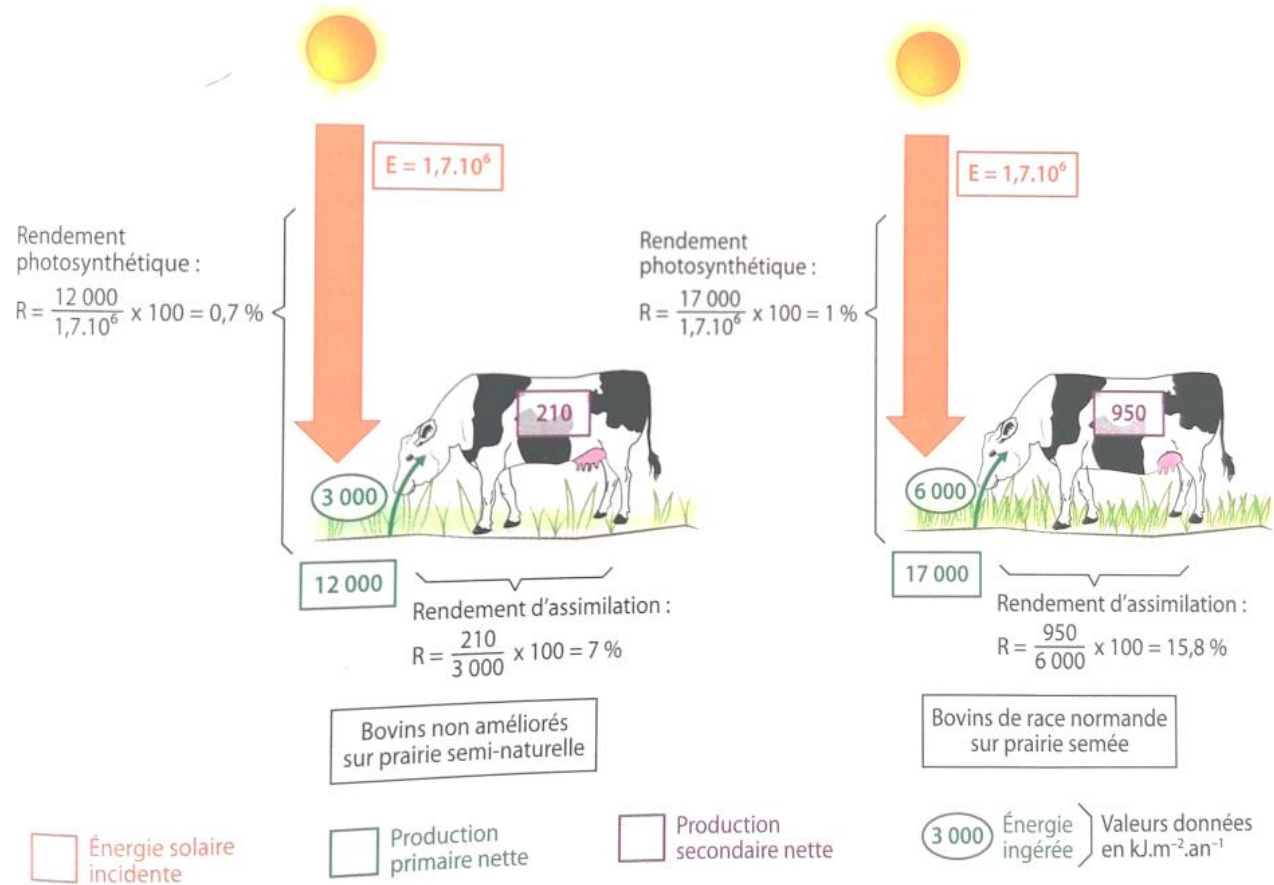
Exemple = pyramide des énergies d'une prairie pâturée en KJ/m²/an



Ici, part importante de la productivité primaire orientée vers la production bovine. On pourrait rajouter à la base l'énergie solaire reçue pour caractériser les pertes au niveau des prairies.

- *Quantité d'énergie produite sous forme de MO au cours du temps (rappel : 1 mole de glucose complètement oxydée = 2870 KJ)*
- *Permet de mieux caractériser le fonctionnement d'un écosystème. Nombreuses approximations cependant*
- *Allure pyramidale : d'une manière générale : RETENEZ que chaque niveau représente en moyenne 10% du niveau précédent ! **Pertes énormes***

Noter que l'amélioration génétique augmente le rendement d'assimilation : le fonctionnement de l'écosystème prairial fait apparaître un flux d'énergie plus important entre les êtres vivants



IV – DES RELATIONS REGULENT LES EFFECTIFS DES MAILLONS DU RESEAU : CONTROLES DESCENDANTS (TOP-DOWN) ET ASCENDANT (BOTTOM-UP)

Nous avons vu que les effectifs des populations sont influencés par la disponibilité des ressources et éventuellement par l'effet de la prédation (Lotka-Volterra).

Au niveau d'une chaîne trophique, une population peut exercer un contrôle sur les effectifs de plusieurs niveaux trophiques :

Dans un système trophique simplifié à trois niveaux comme celui de la figure 17.13, il y a deux modalités de contrôle des effectifs des populations :

- dans le cas d'un **contrôle ascendant, dit bottom-up**, la production végétale contrôle les effectifs des phytophages, qui contrôlent à leur tour ceux de leurs prédateurs ;

Le **contrôle ascendant** des producteurs primaires (P1) sur les niveaux supérieurs (consommateurs 1 et 2) s'explique par la ressource qu'il fournit aux niveaux supérieurs : si l'effectif de P1 augmente cela bénéficie à C1 et donc aussi à C2.

- dans le cas d'un **contrôle descendant, dit top-down**, c'est la prédation qui détermine la dynamique des phytophages dont dépend à son tour l'accumulation de biomasse végétale. Ainsi par rétrocontrôle positif ou négatif, un équilibre dynamique (ou métastable car perçu comme ne bougeant pas du fait de la compensation de deux forces opposées qui s'équilibrent) s'installe peu à peu et régule le fonctionnement de l'écosystème. Une intervention extérieure modifiant l'équilibre préétabli peut alors générer des perturbations profondes. Ainsi, l'utilisation de produits chimiques visant à éradiquer des insectes jugés « nuisibles » pour les cultures, va aussi affecter leurs prédateurs ; ceux-ci disparaissant, ils n'assureront plus le contrôle top-down qui maintenait la population de phytophages à un niveau acceptable. L'écologie, en permettant d'identifier les mécanismes et processus régulant les interactions entre espèces contribue actuellement à proposer des solutions de gestion plus soutenables comme l'agroécologie

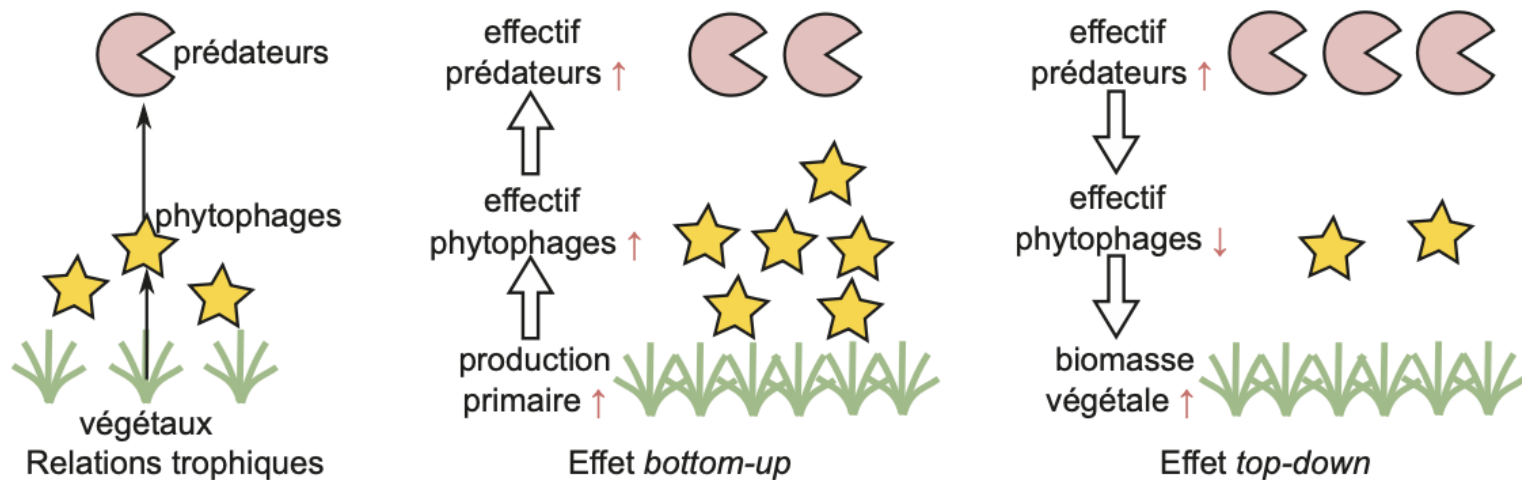
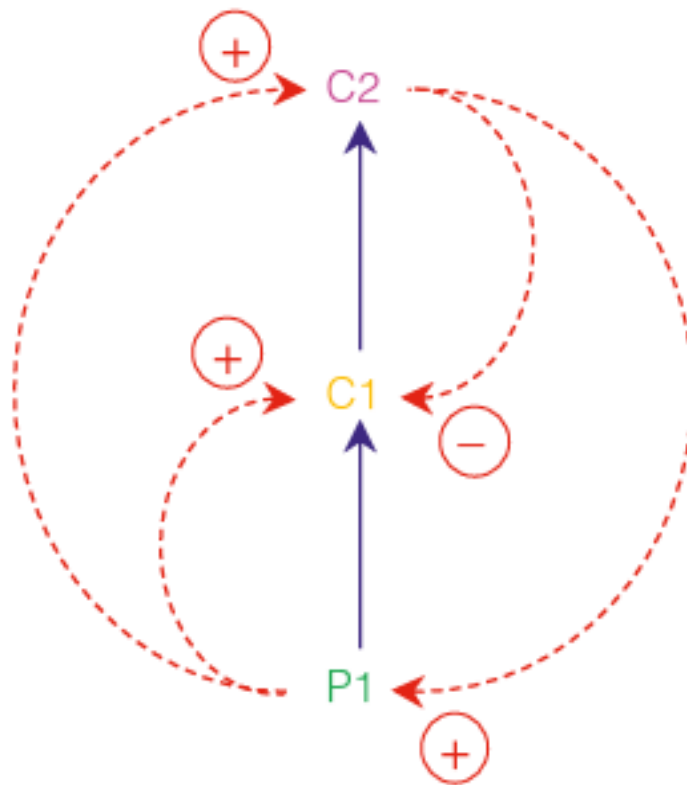


Figure 17.13 Contrôle des effectifs ascendants (*bottom-up*) ou descendants (*top-down*).

La variation à l'origine du contrôle peut être une augmentation (comme sur la figure) ou une diminution.

contrôle ascendant

contrôle descendant

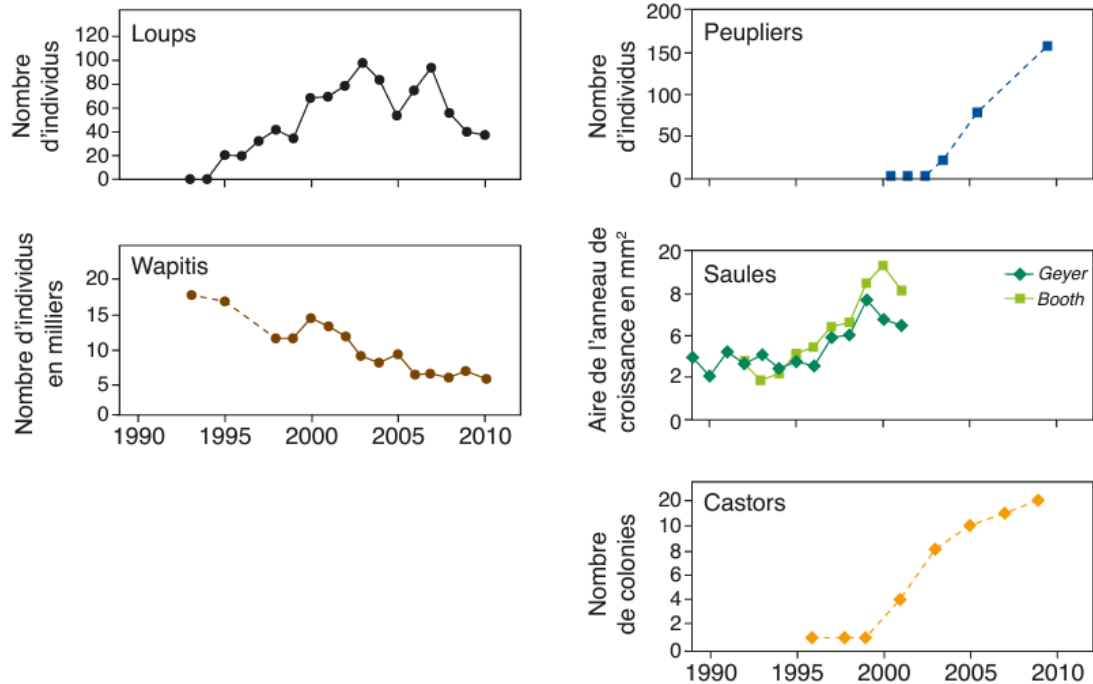


→ *relation trophique*
- - - → *effet sur les effectifs des populations*

Au sein des écosystèmes les deux contrôles s'exercent simultanément. La part relative des deux contrôles varie selon les écosystèmes.

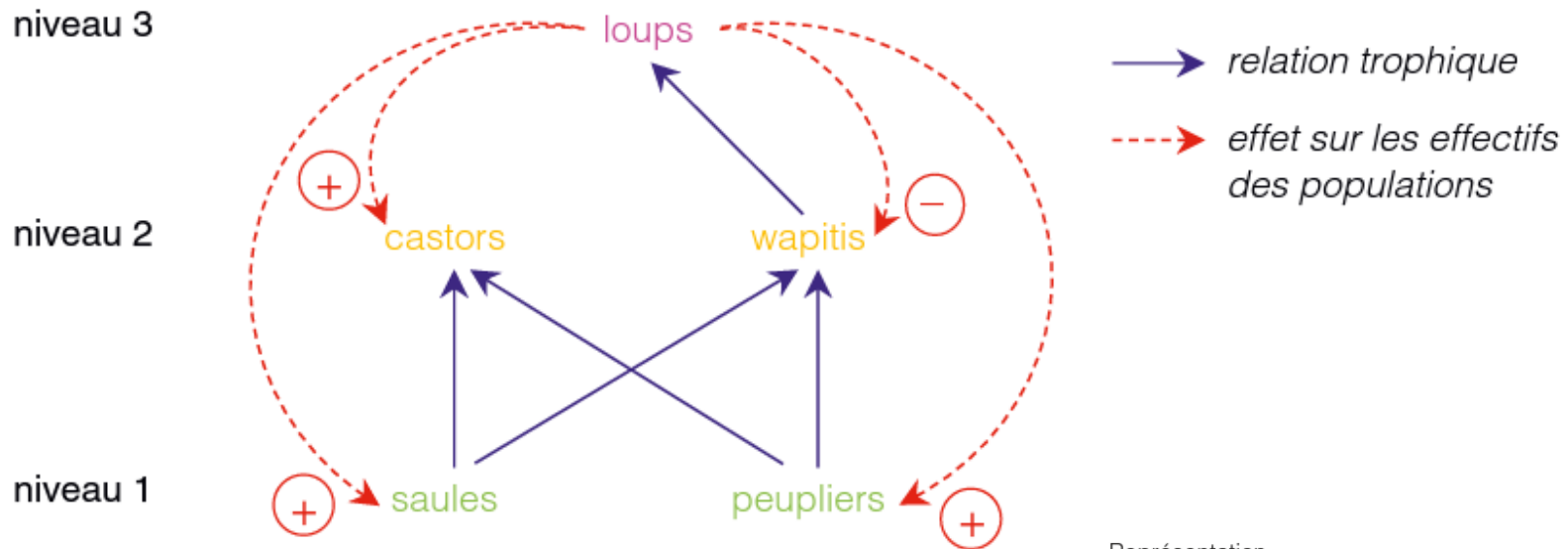
Effets de la réintroduction de loups, des superprédateurs, dans le parc de Yellowstone

L'exemple des effets de la réintroduction des loups en 1995 dans le parc de Yellowstone montre comment des superprédateurs (ou top-prédateurs), des prédateurs n'ayant pas de prédateurs, peuvent exercer un contrôle descendant (*top-down*) sur différentes populations des niveaux trophiques inférieurs.



Concernant les saules, les mesures d'aires de l'anneau de croissance annuel ont été réalisées sur des tiges prélevées annuellement chez deux espèces : *Salix geyeriana* (notée Geyer) et *Salix boothii* (notée Booth).

Les loups en limitant la population des wapitis ont permis aux espèces consommées par ces derniers de voir leurs effectifs augmenter (cas des peupliers) et/ou leur croissance favorisée (cas des saules). De même on observe une augmentation du nombre de colonies de castors depuis la réintroduction des loups que l'on peut expliquer par la baisse de la compétition avec les wapitis car ils exploitent des végétaux communs.



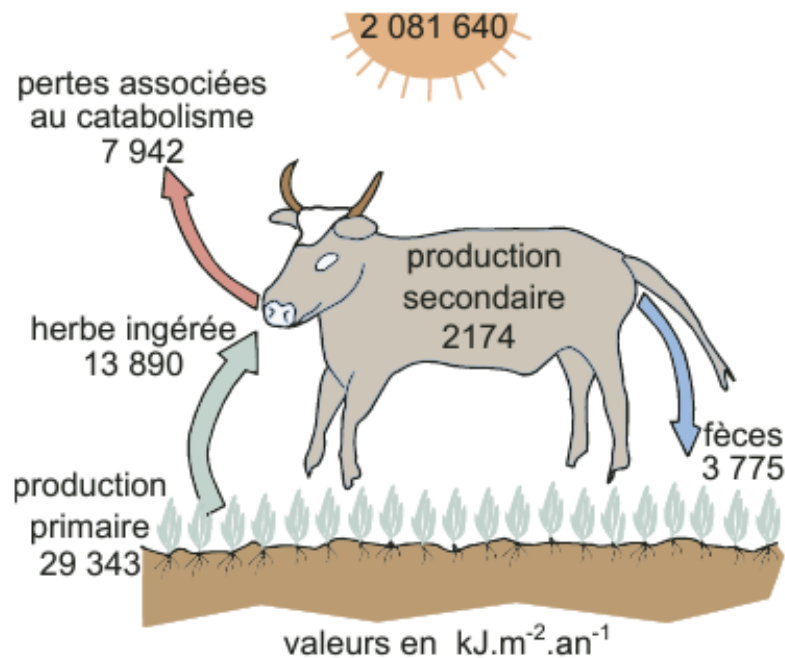
Représentation schématique du contrôle descendant exercé par les loups au niveau du réseau trophique (simplifié) du parc de Yellowstone

V - L'EFFICACITE DE L'UTILISATION DE L'ENERGIE D'UN NIVEAU A L'AUTRE DEFINIT LE RENDEMENT ECOLOGIQUE

Le **rendement écologique** (RE) est le rapport entre la production d'un niveau n du réseau trophique (P_n) et celle du niveau inférieur (P_{n-1}), exprimé en %.
En moyenne, RE est de 10% entre 2 niveaux trophiques.

$$RE = P_n / P_{n-1} \times 100$$

- Fonction de l'efficacité d'assimilation de l'énergie d'un niveau à l'autre. Un consommateur primaire a une efficacité d'assimilation faible (Cf lignine, cellulose non ou mal digérés) ...
- Fonction de l'efficacité de production nette : un endotherme utilise une grande proportion de l'énergie ingérée pour le maintien de sa température corporelle

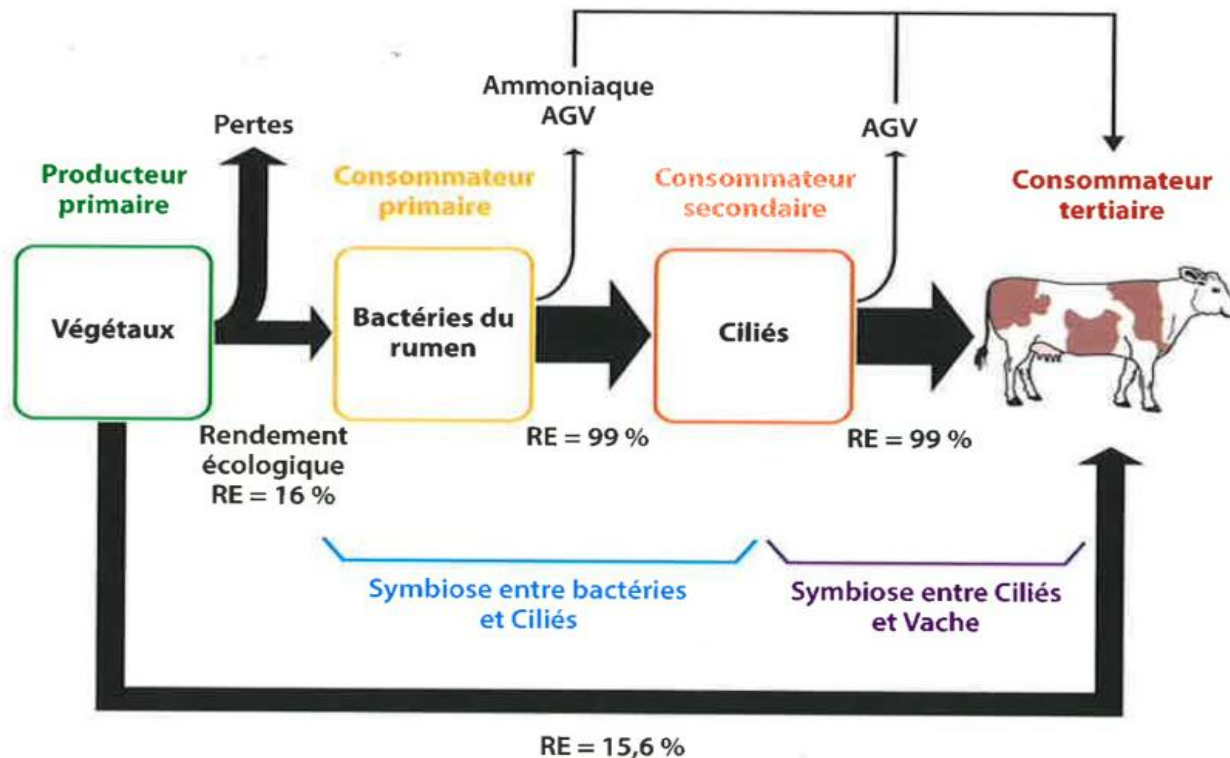


**Bilan énergétique
dans une prairie normande.**
(D'après Ricou 1978).

Efficiences écologiques calculées

efficience d'exploitation	efficience d'assimilation	efficience de production nette	efficience écologique
$\frac{13\,890}{29\,343} \approx 50 \%$	$\frac{13\,890 - 3\,775}{13\,890} \approx 70 \%$	$\frac{2\,174}{13\,890 - 3\,775} \approx 20 \%$	$\frac{2\,174}{29\,343} \approx 7 \%$

La symbiose dans le système digestif de la vache optimise le rendement écologique **supérieur à 15%**



Les flux de matière relativement complexes parcourant ce réseau trophique original s'accompagnent de rendements énergétiques élevés

Les ruminants ne digèrent pas directement l'herbe. C'est le microbiote ruminal (bactéries, protozoaires, champignons, archées) qui produit les exoenzymes permettant la digestion de l'herbe. La symbiose abritée par le rumen est un fermenteur naturel qui réalise un court-circuit trophique : les micro-organismes y trouvent des conditions optimales pour un développement rapide, sans dépense d'énergie pour la recherche de nourriture ; la part de matière non utilisée (NU) et non assimilée (NA) est quasiment nulle. Les déchets de cette digestion (bouses) ont un rapport C/N bas, ce qui accélère le recyclage de la matière organique dans le sol.

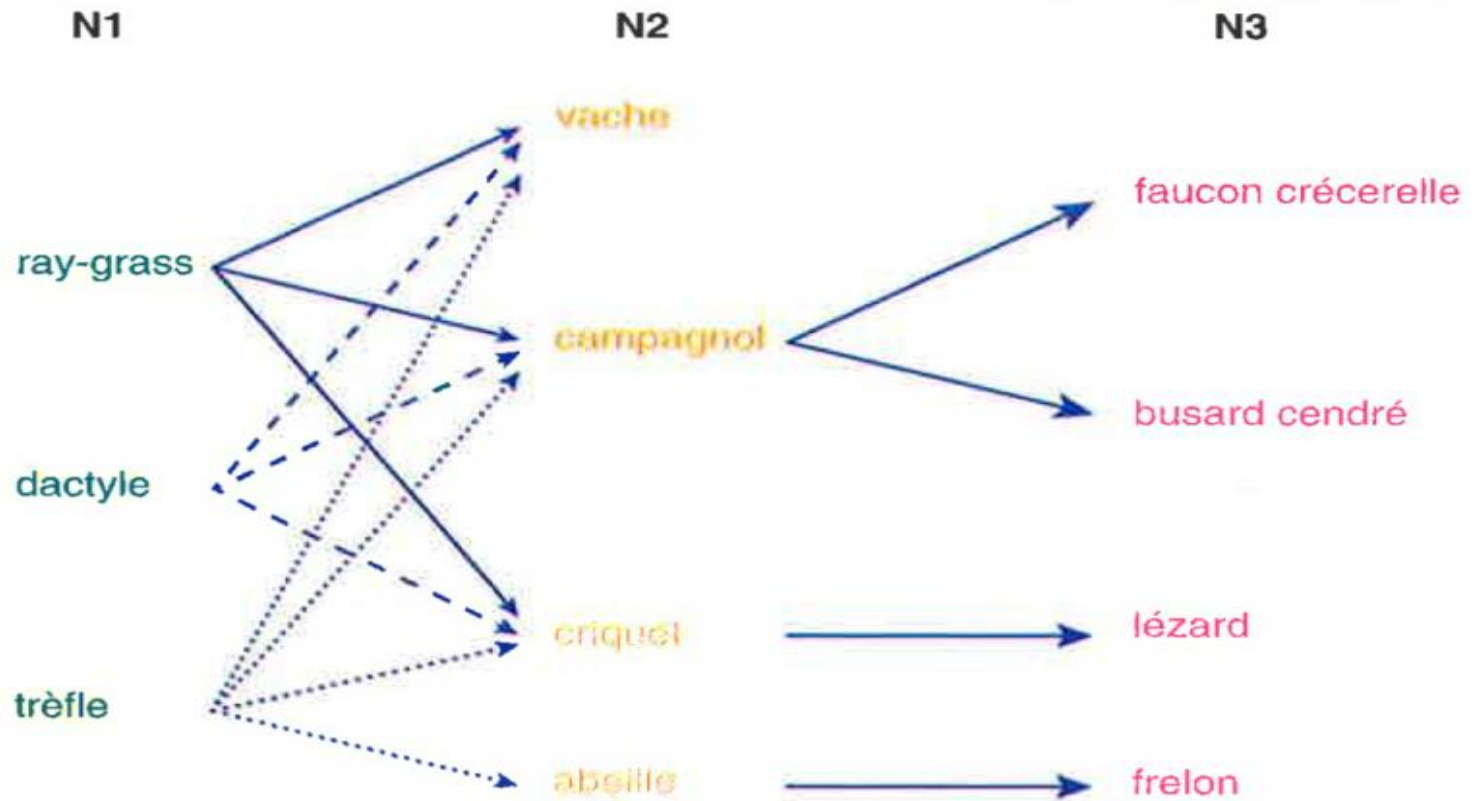
VI - LES CHAINES TROPHIQUES SONT INTERCONNECTEES EN UN RESEAU TROPHIQUE. LE FONCTIONNEMENT DE CES RESEAUX CONTRIBUE AU RECYCLAGE DE LA BIOMASSE AU SEIN DE L'ECOSYSTEME (CYCLE DE LA MATIERE).

6.1 - Le réseau trophique permet d'approcher la structure de la biocénose de l'écosystème prairie

Réseau trophique = ensemble de toutes les chaînes alimentaires qui constituent un réseau complexe d'interactions alimentaires au sein de la biocénose, à l'échelle de l'écosystème.

Les chaînes trophiques au sein des réseaux sont liées entre elle par les consommateurs **polyphages**.

Exemple : réseau trophique partiel d'une prairie



Nx désigne le niveau trophique de la population.

La flèche signifie « est consommé par » et désigne ainsi le sens du flux de matière.

- L'abondance de la polyphagie au sein d'un réseau trophique influence la structure de ce réseau

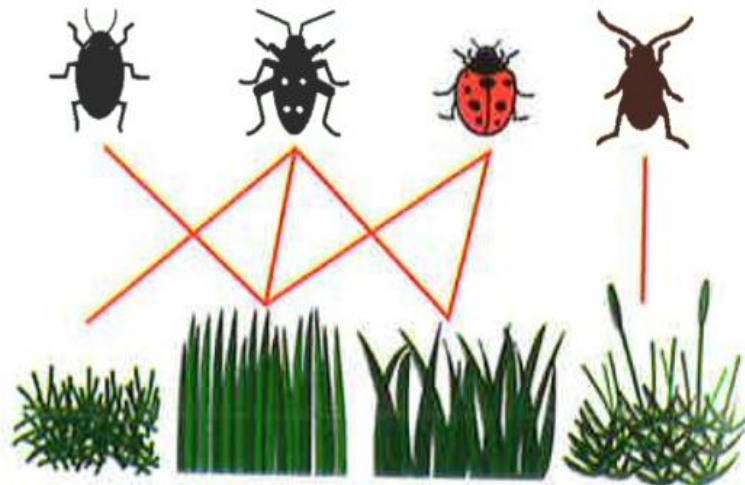
c = complexité d'un réseau =
L/S (L = nb total de liens ; S =
nb d'espèces)

Plantes/ insectes nectarivores



$$c = 24/8 = 3$$

Plantes/insectes phyllophages



$$c = 14/8 = 1,75$$

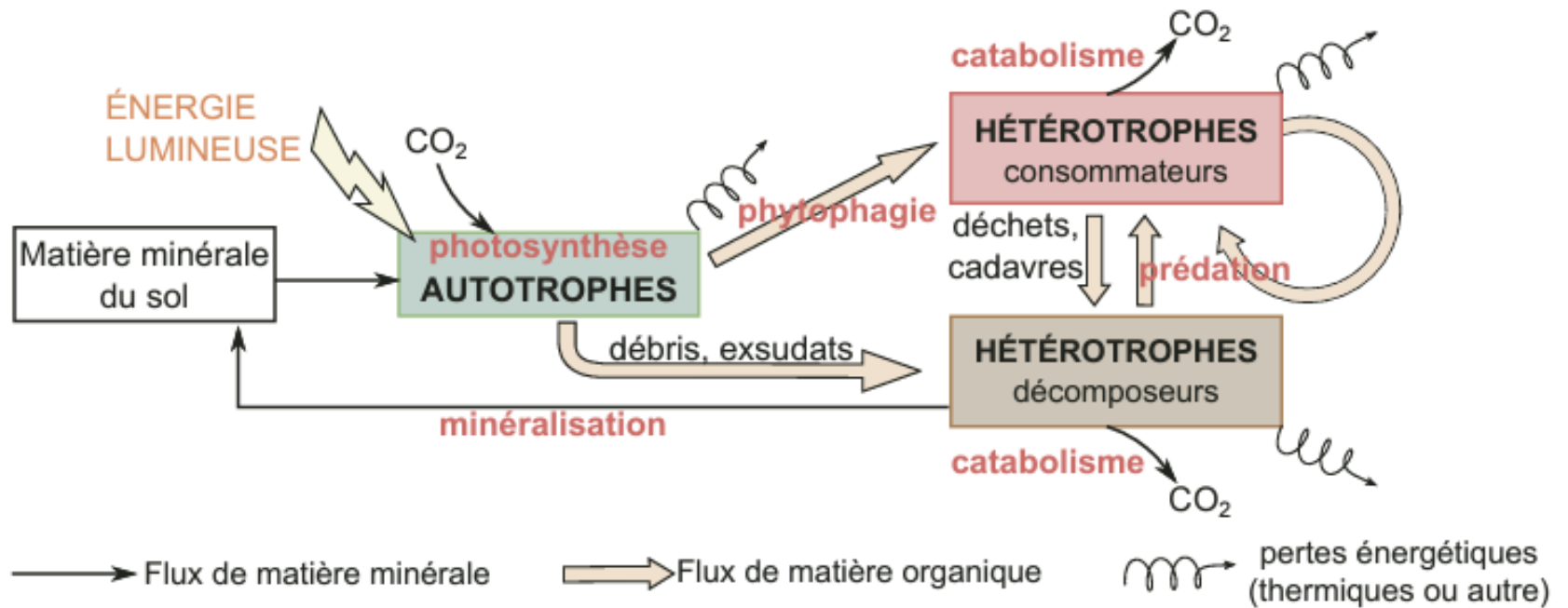
6.2 - Dans tous les cas, le catabolisme de tous les consommateurs (y compris microbiens) aboutit à une minéralisation

A) Minéralisation par les chaînes trophiques du système herbivore

La **respiration** est un processus de minéralisation de la matière : le carbone (mais aussi des éléments tels que l'hydrogène, l'oxygène, l'azote ...) passe de la forme organique à la forme minérale :

B) Décomposition et minéralisation par les chaînes du système détritivore (*BCPST2*)

Le réseau de décomposeurs du sol exploitant la MO et l'énergie contenue dans les détrit.



Flux de matière dans un écosystème.

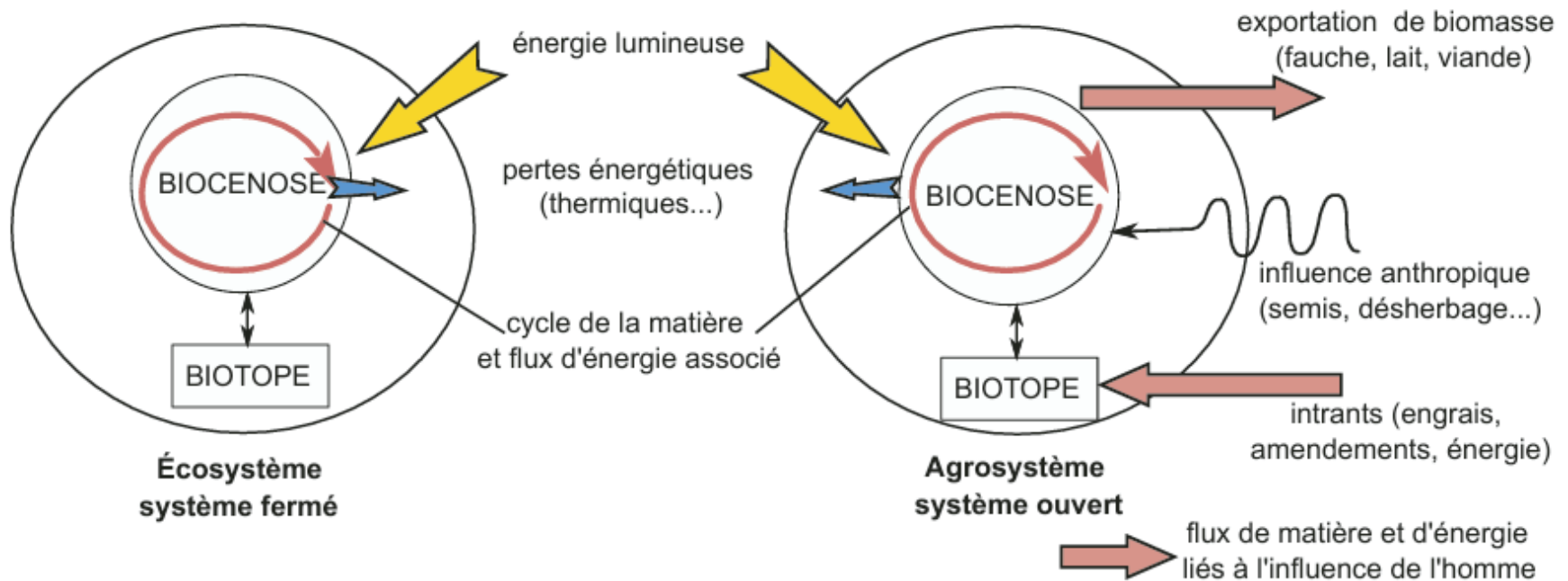
VII - TRANSFERTS D'ÉNERGIE DANS UN ECOSYSTEME OU UN AGROSYSTEME

Dans un **écosystème**, la matière est recyclée par l'action des décomposeurs : du point de vue de la matière, un écosystème est un système fermé. Mais ce transfert cyclique de la matière s'accompagne de perte d'énergie vers le biotope (pertes thermiques notamment) : au moins 90 % de l'énergie de biomasse d'un niveau ne sont pas transférés au niveau suivant. Du point de vue énergétique, un écosystème est donc un système ouvert, dont le fonctionnement est entretenu par l'énergie solaire.

Dans un **agroécosystème** (ou agrosystème) comme la prairie, les rendements des transferts sont plus faibles que dans un écosystème.

- D'abord parce qu'une grande partie de la production est exportée par l'homme (alimentation ou autre utilisation qui est le plus souvent très sélective). C'est une situation particulière par rapport aux écosystèmes naturels dont la production est consommée ou décomposée sur place. Ces exportations déséquilibrent le cycle de la matière et rendent nécessaires des importations sous forme de fertilisants du sol notamment).
- L'énergie qui entre dans l'agrosystème n'est pas seulement d'origine solaire. Il s'y rajoute l'énergie du travail humain, des machines, celle du fonctionnement de l'exploitation agricole, ou celles de production des engrais, semences, irrigation, pesticides... Les différents apports nécessaires à la production de l'agrosystème constituent des **intrants**, dont la maîtrise est un enjeu économique et environnemental.

En résumé, le fonctionnement des agrosystèmes demande d'injecter en permanence de l'énergie pour obtenir la production recherchée. Au final, les agrosystèmes ne sont pas nécessairement plus performants que les écosystèmes naturels si l'on tient compte de l'ensemble de ces apports. Au-delà de l'échelle locale, un écosystème peut être connecté à d'autres par des flux variés. Par exemple, la nécromasse d'une forêt alimente la production secondaire d'une rivière qui la traverse ; et en retour les larves qui se développent dans cette rivière deviennent des adultes qui nourrissent les consommateurs insectivores de la forêt. Ce constat a conduit à la notion de **métaécosystème** (sur le modèle des métapopulations) définie comme un ensemble d'écosystèmes connectés par des flux de matière, d'énergie ou d'organismes à travers leurs frontières. Cette notion permet notamment de mieux prévoir les effets des perturbations sur la dynamique des écosystèmes.



Comparaison écosystème/agrosystème.

Bilan : les agrosystèmes sont des systèmes ouverts d'un point de vue énergétique et de matière. Leur fonctionnement repose sur un flux de matière et d'énergie. L'intervention de l'homme dans l'agroécosystème prairie permet de faire passer d'un rendement écologique moyen d'écosystème de 10% à un RE de plus de 15%