

**ORGANISATION ET STRUCTURATION DES ECOSYSTEMES****DOC 1 – FORET TEMPEREE : EXEMPLE D’UNE HETRAIE – CHENAIE COLLINEENNE****DOC 2 – PRAIRIE PATUREE EN ZONE TEMPEREE**

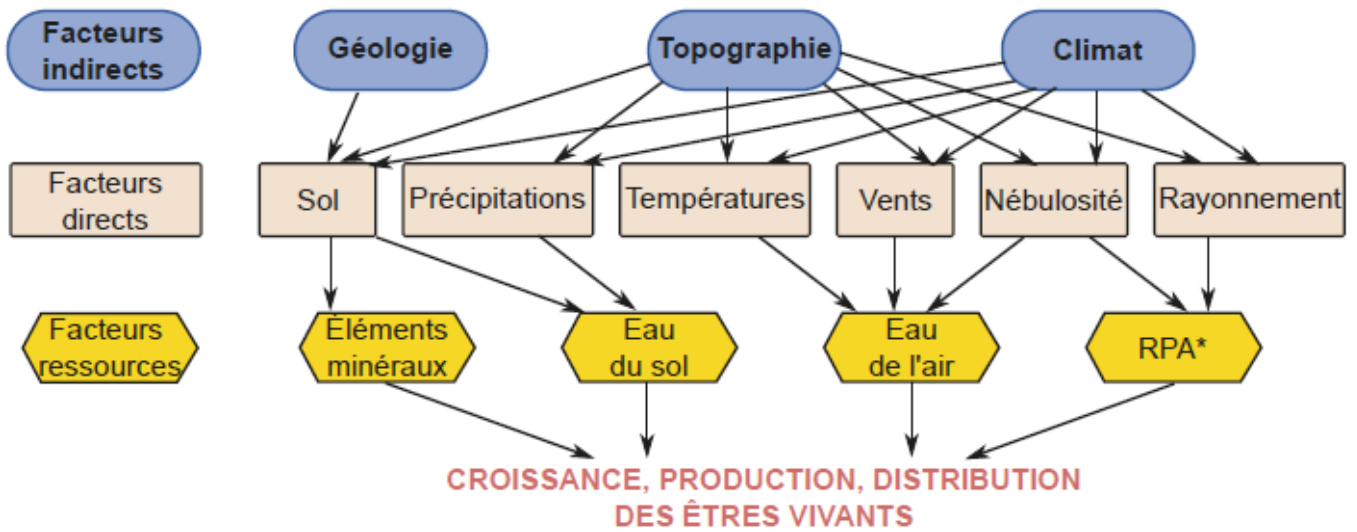
Paysage agro-sylvo-pastoral du massif du Jura (commune de Chapelle-des-Bois). La prairie du premier plan renferme une flore diversifiée typique des prairies de fauche de montagne. Les pâturages visibles au second plan présentent un taux de boisement croissant (pré-bois jurassien) en direction de la forêt.

*(Les prairies : biodiversité et services écosystémiques, Mauchamp et al. 2011)*



**DOC 3 – LES DIFFERENTS FACTEURS DU BIOTOPE INFLUENÇANT LE FONCTIONNEMENT DES ETRES VIVANTS (PLANTES EN PARTICULIER)**

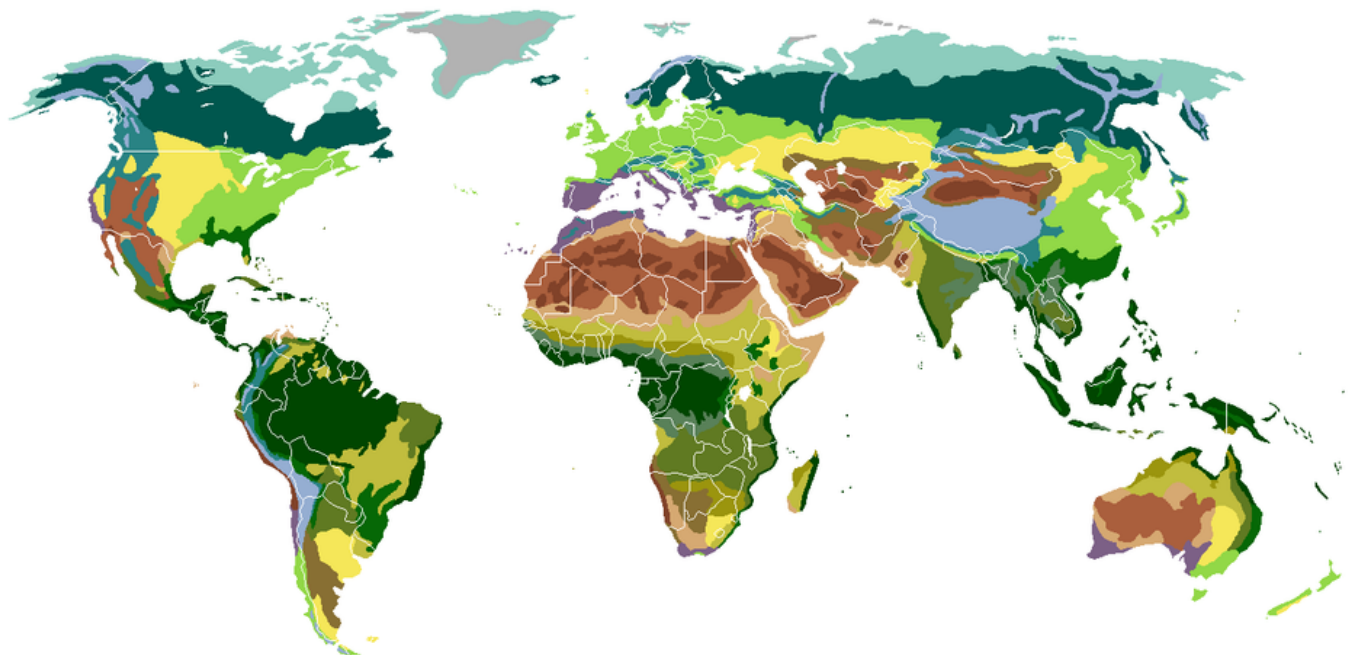
(Perrier et al., 2021)



\* RPA : rayonnement photosynthétiquement actif

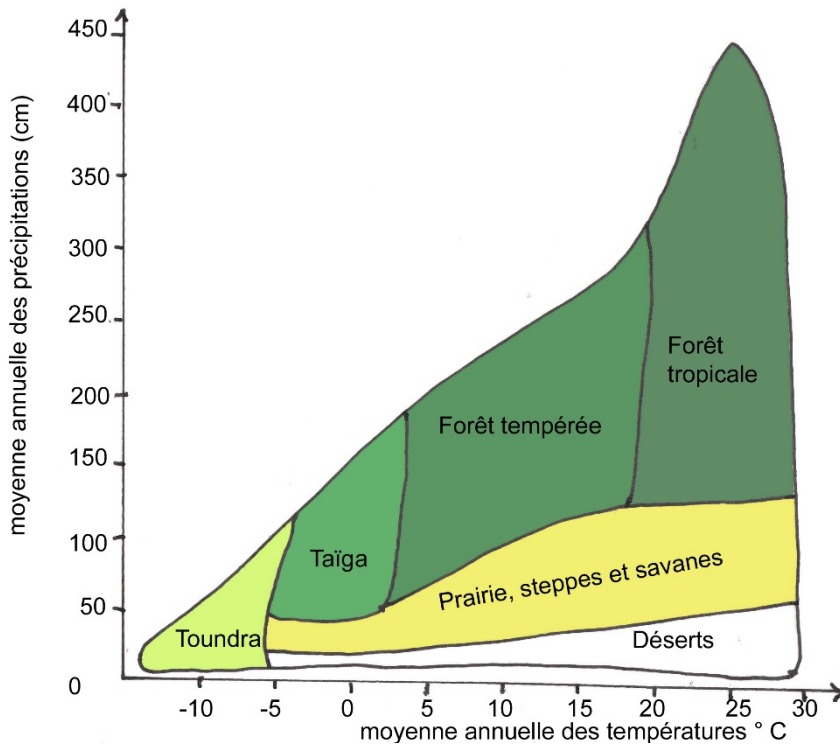
**DOC 4 – LES PRINCIPAUX BIOMES TERRESTRES**

(Wikipédia, avril 2022)



Inlandsis et déserts polaires	Déserts et broussailles xérophytes
Toundra	Steppe aride
Taïga	Déserts semi-arides
Forêts feuillues caducifoliées tempérées	Savanes
Prairies	Savanes et forêts claires
Forêts sempervirentes subtropicales	Forêts tropicales caducifoliées
Forêts sempervirentes méditerranéennes	Forêts sempervirentes tropicales
Forêts de mousson	Toundra alpine
Déserts arides	Forêts de montagne

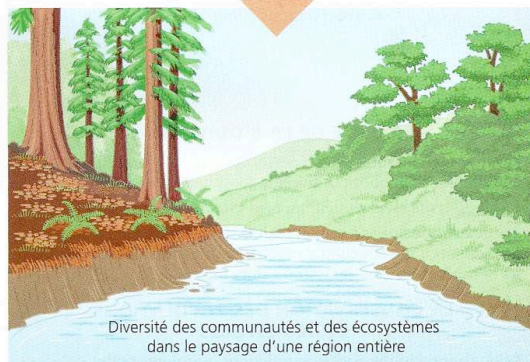
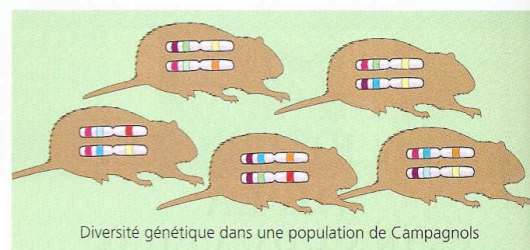
**DOC 5 – LIEN ENTRE CLIMAT ET TYPE DE PRAIRIES NATURELLES**



**Caractéristiques d'une prairie tempérée :**

- Température moyenne : 13°C
- Température moyenne de saison froide et de saison chaude : 7°C - 20°C
- Saisonnalité : hivers froids, étés avec éventuellement des périodes de sécheresse

**DOC 6 - LES TROIS TYPES DE BIODIVERSITE (+ DIVERSITE DES RELATIONS ENTRE ETRES VIVANTS)**  
(Campbell, 2004)



**FIGURE 55.1 Les trois composantes de la biodiversité.** (Les gros chromosomes illustrés dans la silhouette des campagnols, dans la partie supérieure de la figure, symbolisent la variation génétique au sein d'une population.)

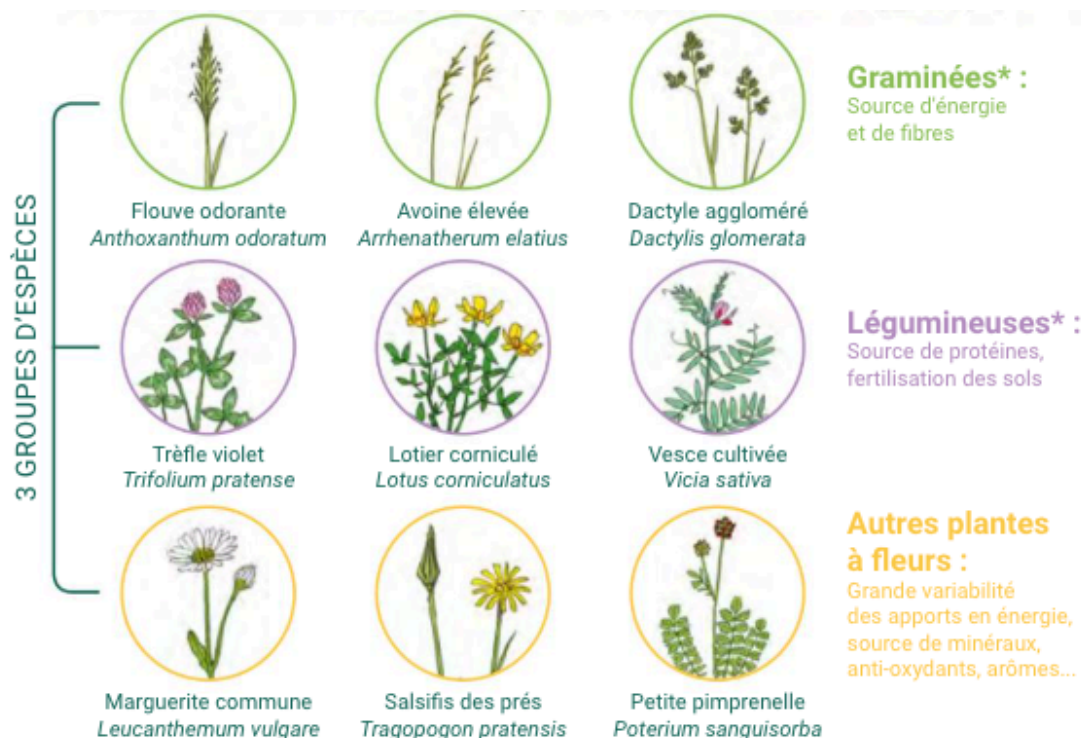
## DOC 7 - LA BIODIVERSITE D'UNE PRAIRIE PATUREE : DIVERSITE INTERSPECIFIQUE ET DIVERSITE DE GROUPES FONCTIONNELS

(<https://www.calameo.com/read/001407163587b56838892>)

Connaître quelques exemples



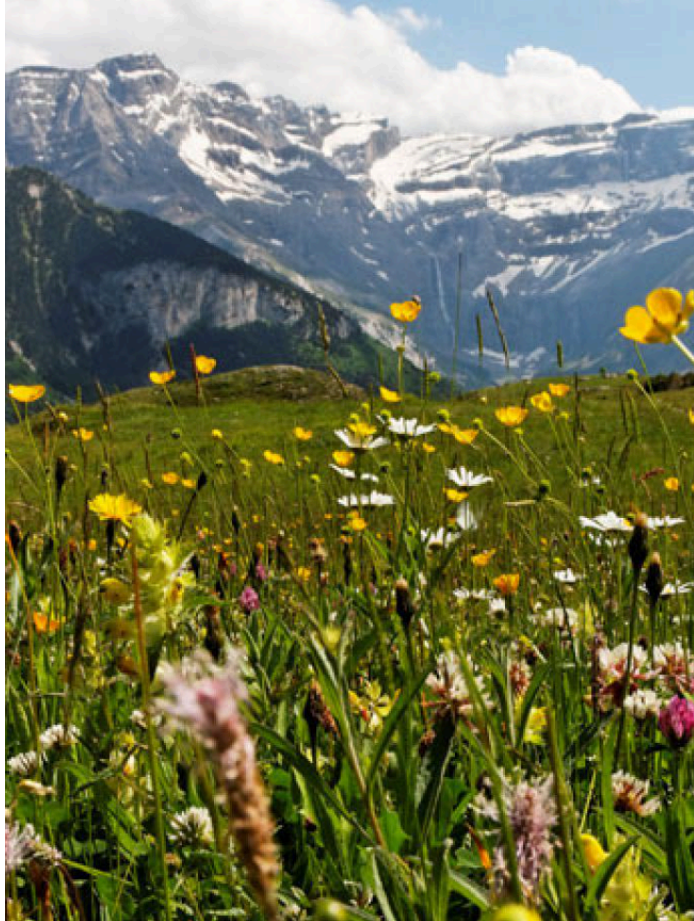
une strate herbacée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Poacées</b>: pâturin (<i>Poa</i>), ivraie (<i>Lolium</i>), chiendent (<i>Agropyrum</i>), dactyle (<i>Dactylis</i>), fétuque (<i>Festuca</i>), flouve (<i>Anthoxanthum</i>),...</li> <li>- <b>Fabacées</b> : trèfle (<i>Trifolium</i>), luzerne (<i>Medicago</i>), lotier (<i>Lotus</i>), dont une grande partie (les Légumineuses) réalisent la diazotrophie (= absorption de N<sub>2</sub> par association symbiotique avec les bactéries du genre <i>Rhizobium</i>)</li> <li>- <b>d'autres familles d'Angiospermes</b>: pissenlit (Astéracées), l'achillée millefeuille (Astéracées), le silène (Dianthacées), la renoncule (Renonculacées), la cardamine des prés (Brassicacées)</li> </ul>
une macrofaune vivant en surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>des vertébrés mammifères</b>: les campagnols, les mulots, les hérissons et les bovins</li> <li>- <b>des vertébrés non mammifères</b> : des reptiles ophidiens comme la couleuvre ou des oiseaux comme la buse et la chouette</li> </ul>
une microfaune vivant en surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>des Mollusques Gastéropodes</b> : escargot, limace (0,5 10<sup>6</sup>/ha)</li> <li>- <b>des Arthropodes Insectes Orthoptères</b> : criquets et sauterelles</li> <li>- <b>des Arthropodes Insectes Diptères</b>: mouches, larves de tipules (8mm - 10<sup>7</sup> /ha), taons</li> <li>- <b>des Arthropodes Insectes coléoptères</b> : bousiers et scarabées (20 000/ha)</li> </ul>
une pédofaune	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>des Annélides oligochètes</b> : les lombrics (7cm - 10<sup>6</sup>/ha), les enchytraéides (10<sup>7</sup>/ha) ;</li> <li>- <b>des vers Nématodes</b> (1,5 mm - 10<sup>11</sup>/ha),</li> <li>- <b>des Arthropodes Arachnides Acariens</b>: oribates (1,5 mm - 10<sup>8</sup>/ha),</li> <li>- <b>des Arthropodes Myriapodes</b> : mille pattes (3,5 cm - 0,5 10<sup>6</sup>/ha)</li> <li>- <b>des Arthropodes collemboles</b> (lucifuges - 5mm - 10<sup>8</sup>/ha)</li> <li>- <b>des Arthropodes Crustacés lucifuges</b>: les cloportes (1cm - 5 10<sup>6</sup>/ha)</li> </ul>
une microflore vivant dans le sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>des algues</b> (10<sup>13</sup>/ha),</li> <li>- <b>des bactéries</b> (10<sup>16</sup> à 10<sup>19</sup> /ha) par exemple Nitrobacter et Nitrosomas, indispensables à la nitrification de NH<sub>3</sub> en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans le sol;</li> <li>- <b>des champignons</b> (3,5 t/ha) dont l'importance dans les associations mycorhiziennes a déjà été signalée</li> </ul>



**DOC 8 – EXEMPLE DE COMMUNAUTES VEGETALES DE PRAIRIE PATUREE**

(*Les prairies : biodiversité et services écosystémiques, Mauchamp et al. 2011, Pronatura*)

Un exemple de communauté végétale de prairie de fauche à la fois productive et diversifiée, présentant un mélange de nombreuses espèces de poacées, de légumineuses et autres dicotylédones (Pyrénées)

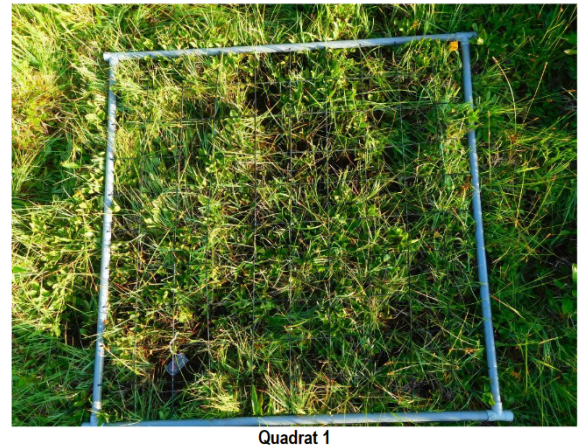
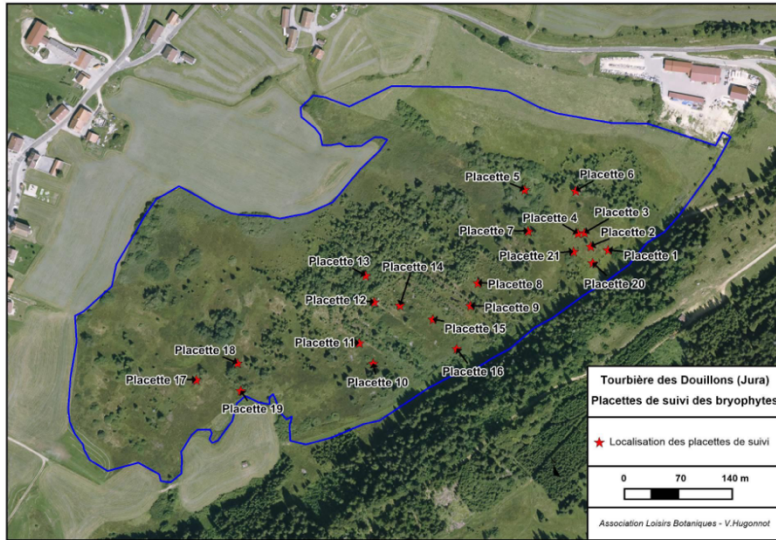


Un exemple de communauté végétale de prairie de fauche peu diversifiée en raison de la forte dominance du brome mou (*Bromus hordeaceus*, Poaceae), espèce annuelle souvent semée dont le développement rapide limite la croissance des autres espèces végétales.



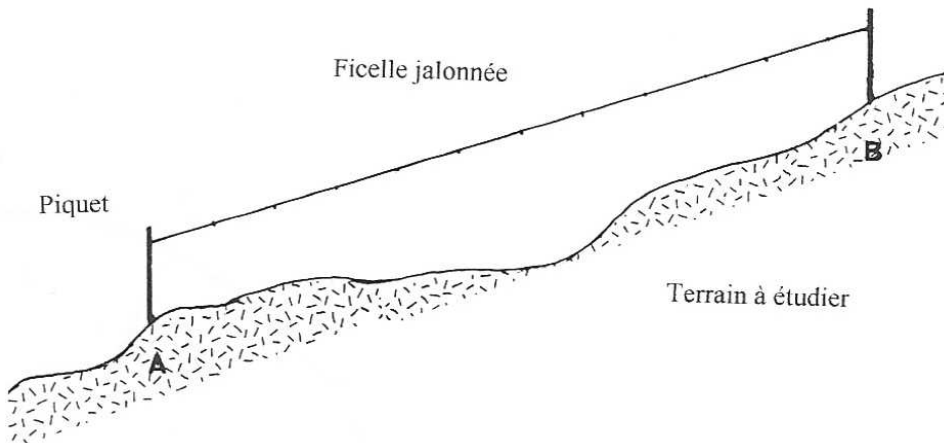
**DOC 9 – ETUDE DE LA BIODIVERSITE VEGETALE SUR LE TERRAIN**

- **Méthode des quadrats** : quadriller la surface à étudier avec des carrés et recenser les espèces  
Localisation de la position des quadrats (placettes). Exemple de quadrat



(Rapport de suivi de la végétation après travaux de restauration hydrologique, tourbière des Douillons, 2017)

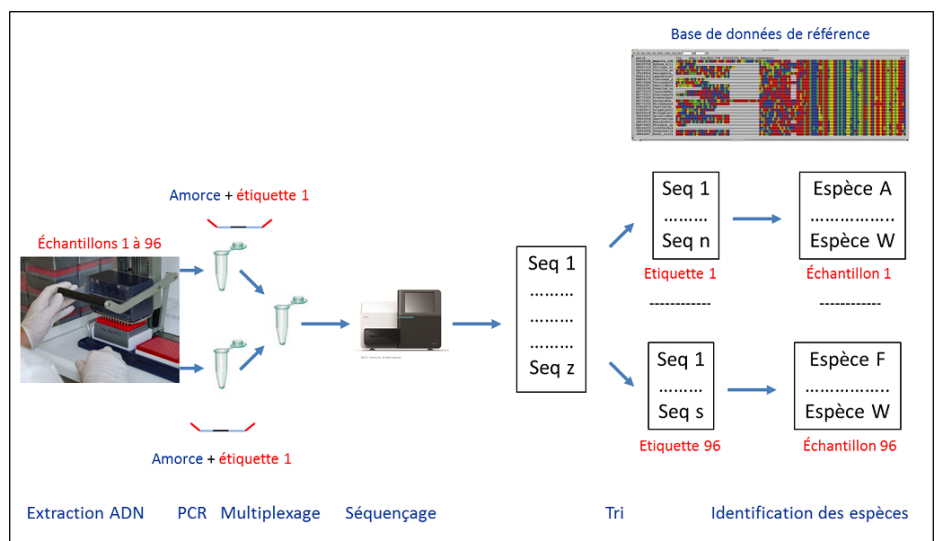
- **Méthode du transect** : reporter sur un profil topographique l'ensemble des espèces rencontrées



(Faurie et al., 2002)

**DOC 10 - PRINCIPE DE L'ANALYSE D'UN ECHANTILLON ENVIRONNEMENTAL : LE METABARCODING**

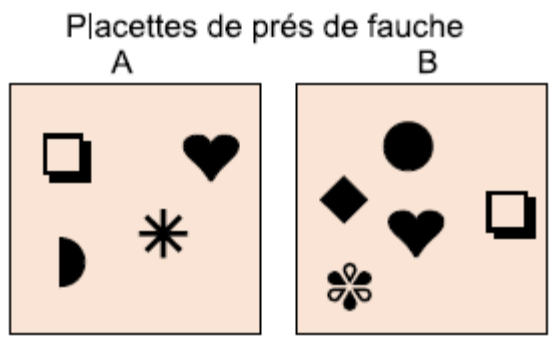
Dans une première étape, l'ADN de chaque échantillon est extrait. Il est ensuite amplifié par PCR en utilisant des amorces définies. Tous les fragments d'ADN d'un même échantillon sont marqués avec une même étiquette. Les échantillons sont ensuite mélangés, c'est le multiplexage, puis séquencés par des appareils permettant le séquençage massif. Les séquences provenant d'un même échantillon portent toutes la même étiquette, il est donc possible de déterminer toutes les séquences provenant d'un même échantillon.



Puis, les espèces présentes dans un échantillon donné sont identifiées par comparaison avec les bases de données. <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/metabarcoding-codes-barres-adn-caracteriser-biodiversite/>

**DOC 11 – LA RICHESSE SPECIFIQUE D’UN ECOSYSTEME**

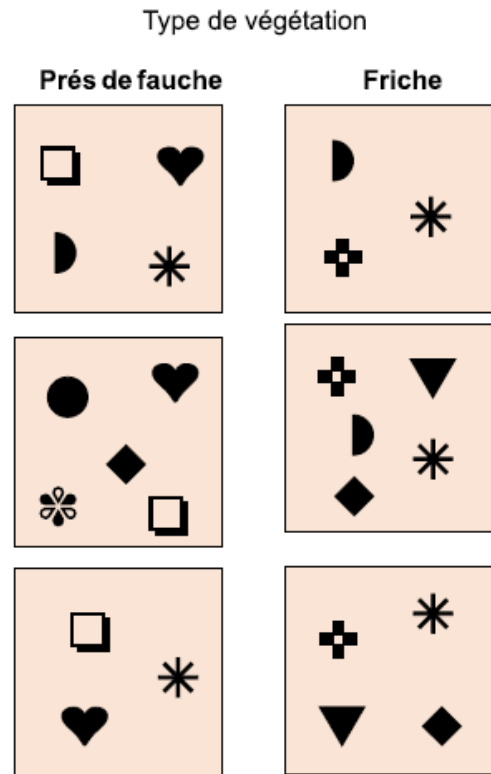
(Bruhier et al., 1998)



**Richesse spécifique** de A = 4

**Richesse spécifique** de B = 5

**Richesse locale** du type de végétation pré de fauche =  $\frac{4 + 5}{2} = 4,5$



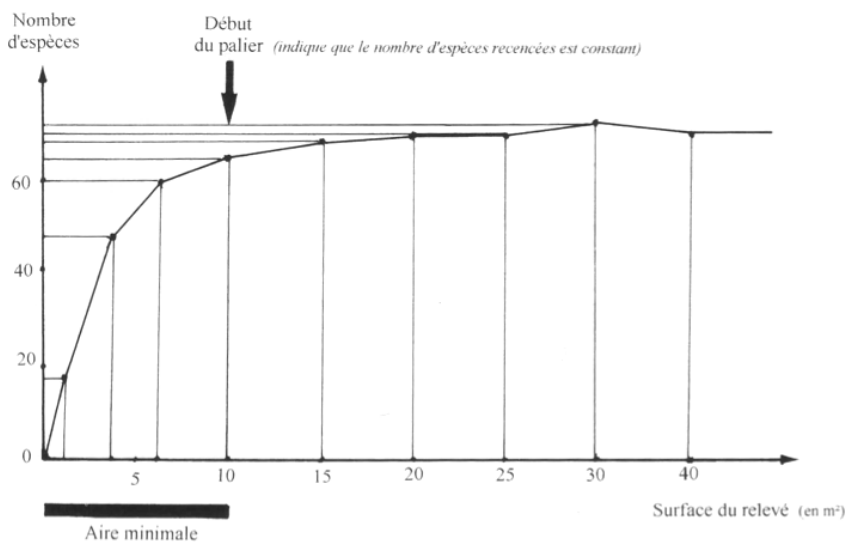
**Richesse globale :**  $\square \blacklozenge \heartsuit \bullet \ast = 7$   $\blacklozenge \ast \blacktriangledown \oplus \blacktriangleright = 5$

**Richesse originale :**  $\bullet \ast \ast = 3$   $\oplus \blacktriangledown = 2$

**Fonds commun :**  $\square \blacklozenge \blacktriangleright \ast = 4$

**DOC 12 – CALCUL DE L’AIRE MINIMALE POUR ESTIMER LA RICHESSE SPECIFIQUE**

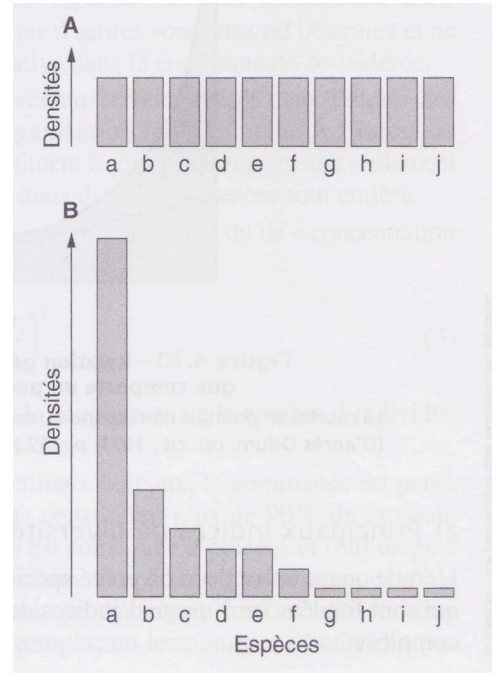
(Faurie et al, 2012)



**DOC 13 – QUANTIFIER LA DIVERSITE AVEC DES INDICES DE DIVERSITE****Richesse spécifique et équitabilité**

Les peuplements A et B possèdent tous deux le même nombre d'espèces (10) = la même richesse spécifique, mais l'équitabilité est très différente : elle est maximale en A et très faible en B.

(Ramade 2020)

**Indice de Shannon-Weaver, un indice de diversité spécifique**

Programme : aucune formule d'indice n'est exigée, la formule est fournie pour les calculs.

H' correspond à l'indice de Shannon, selon la formulation suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \cdot \log_2(p_i)$$

$p_i$  = l'abondance proportionnelle ou pourcentage d'abondance d'une espèce présente, c'est-à-dire  $p_i = n_i/N$

$n_i$  = le nombre d'individus dénombrés pour une espèce présente.

$N$  = le nombre total d'individus dénombrés, toute espèce confondue.

$S$  = le nombre total de la liste d'espèces présentes = **richesse totale** de l'échantillon

$\log_2$  : logarithme binaire

Unité de H' : en bit par individu (unité dérivée de la théorie de l'information)

Rq : d'autres bases de logarithme peuvent être utilisées pour calculer l'indice (comme ln), ce qui revient seulement à un changement d'unité.

La valeur de H' varie entre 0 et 5, le plus souvent entre 1 et 5

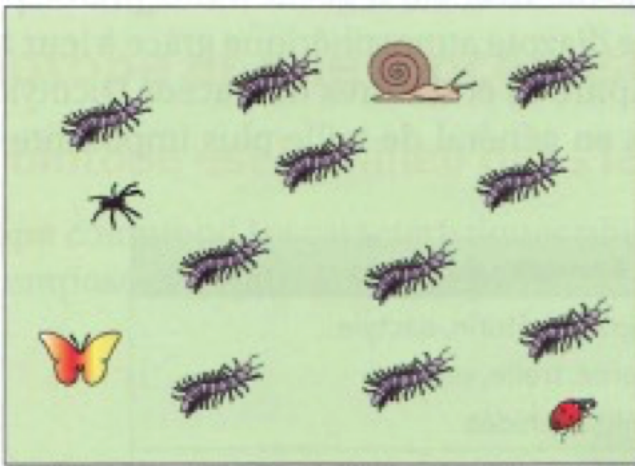
- H' = 0 dans le cas où la communauté n'est composée que d'une seule espèce ( $\log_2 1 = 0$ )
- La valeur maximale de H' est atteinte lorsque chacune des S espèces de l'échantillon de N individus est équiprobable, à savoir qu'elle comptabilise le même nombre d'individus. Cela correspond à un peuplement hétérogène pour lequel tous les individus de toutes les espèces sont répartis d'une façon égale. Dans ce cas  $p_i = 1/S$  d'où  $H'_{\max} = \log_2 S$ .
- Les valeurs les plus faibles (inférieure à 1,5) sont associées à des peuplements dominés quantitativement par une ou quelques espèces. Ce genre de situation se rencontre par exemple lors de la phase de colonisation d'un biotope, avec essentiellement des espèces pionnières (à stratégie r).

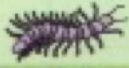




Ainsi, **plus le peuplement est constitué d'espèces différentes et équitablement réparties, plus la valeur de l'indice augmente de façon logarithmique** : c'est un indice de **diversité spécifique**.

Mais la comparaison de ces valeurs nécessite quelques prudenances. En effet, cet indice n'a de signification écologique que s'il est calculé pour une communauté d'espèces ayant une même probabilité de collecte dans l'écosystème (même échelle de taille, mêmes modes de déplacement, ...).

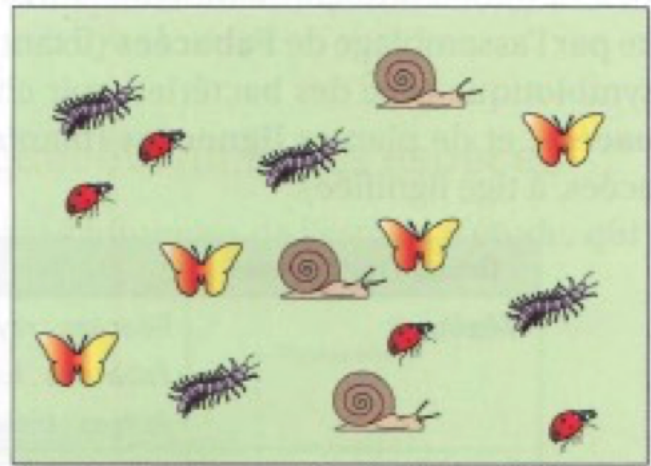
**L'indice de régularité ou équitabilité** (indice de Pielou) se définit comme le rapport  $H' / H'_{\max}$  : il mesure la régularité de la distribution des fréquences des différentes espèces. Cet indice varie entre 0 (dominance d'une espèce) et 1 (espèces équitablement réparties).





Exemple d'application de l'indice de Shannon et de l'indice d'équitabilité :



Espèces	Nombre d'individus	Proportion $P_i$
	10	10/15
	1	1/15
	1	1/15
	1	1/15
	1	1/15
<b>Total : S = 5</b>	<b>15</b>	

Indice de Shannon :  
 $H' = 1,43$  et  $H'_{\max} = 2,32$   
 Indice d'équitabilité :  
 $J' = 0,62$



Espèces	Nombre d'individus	Proportion $P_i$
	4	4/15
	4	4/15
	3	3/15
	4	4/15
<b>Total : S = 4</b>	<b>15</b>	

Indice de Shannon :  
 $H' = 1,99$  et  $H'_{\max} = 2$   
 Indice d'équitabilité :  
 $J' = 0,99$

<https://louernos-nature.fr/indices-de-diversite-ecologie-ecosystemes/> ; Faurie et al. 2012 ; Dautel et al. 2021

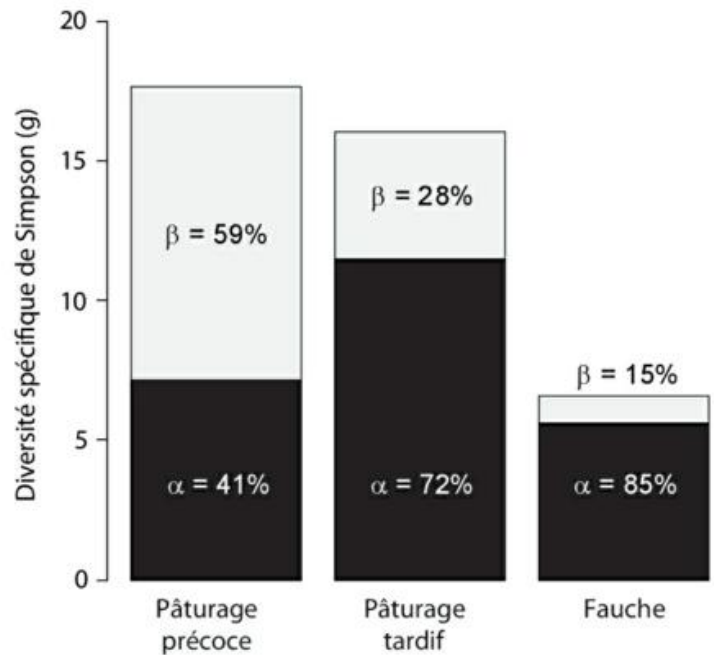
**DOC 14 - DIVERSITE SPECIFIQUE ESTIMEE PAR L'INDICE DE SIMPSON DE TROIS PARCELLES DIFFERANT PAR LEUR MODE D'EXPLOITATION**

Pâturage précoce : utilisation en pâturage de longue durée avec une faible charge en bétail  
 Pâturage tardif : utilisation en pâturage tardif de courte durée avec une forte charge instantanée  
 Fauche : utilisation en prairie de fauche avec plusieurs coupes par année et une forte fertilisation.

Le calcul des indices se base sur la fréquence des espèces dans 10 quadrats de 50 cm de côté sur chaque parcelle :

- La diversité *alpha* traduit une diversité à une échelle fine, à l'intérieur des quadrats
- la diversité *bêta* traduit une hétérogénéité de la végétation (différences de composition entre les quadrats à l'échelle de la parcelle)

(d'après Mauchamp et al., 2011)

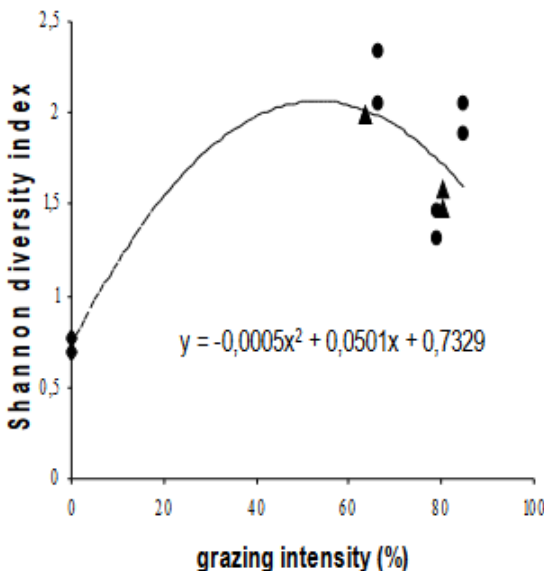
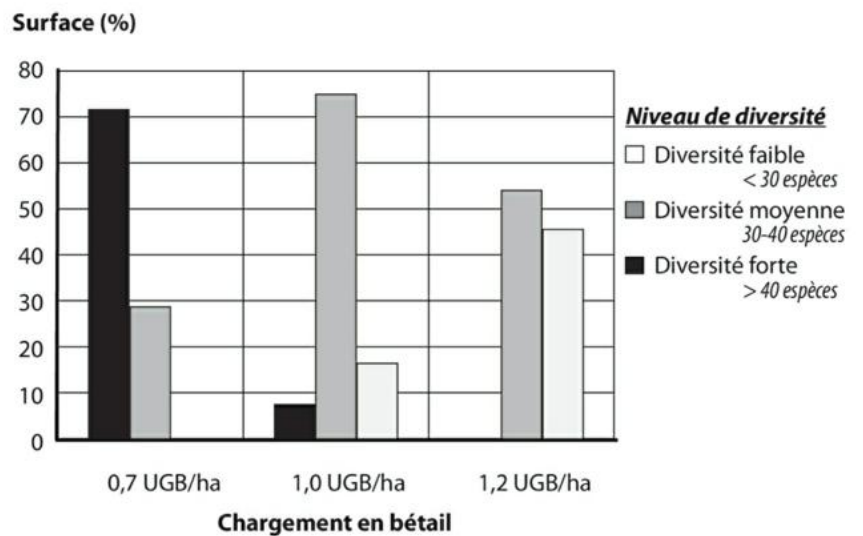


Question : Comparer l'effet de la fauche et du pâturage sur la diversité spécifique et proposer une interprétation.

**DOC 15 – VARIATIONS DE LA RICHESSE SPECIFIQUE DE PARCELLES EN FONCTION DE LA CHARGE EN BETAIL**

**Variations de la richesse spécifique** observées dans différentes parcelles du Cantal dont la charge en bétail varie entre 0,7 et 1,2 UGB (Unité Gros Bétail) par hectare. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la surface de l'exploitation pour chacune des classes de diversité relevées

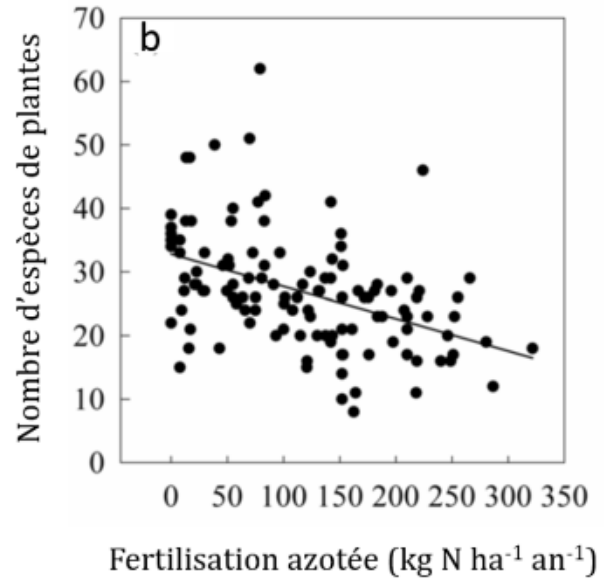
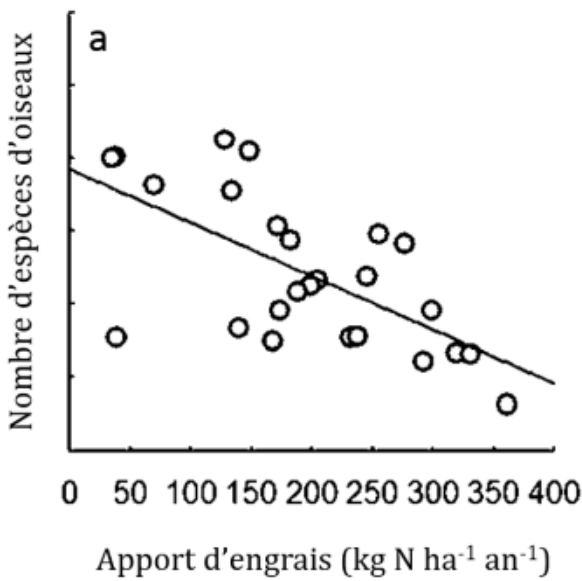
(Les prairies : biodiversité et services écosystémiques, Mauchamp et al. 2011)



**Change in Shannon diversity with grazing intensity.** Dashed lines and equations correspond to the regression models which better fit the data. Circles: horse-grazed patch types; triangles: cattle-grazed patch types.

(Marion 2010 : thèse Impact du pâturage sur la structure de la végétation)

**DOC 16 – IMPACT DE LA FERTILISATION DES PRAIRIES SUR LA RICHESSE SPECIFIQUE DE L’ECOSYSTEME**

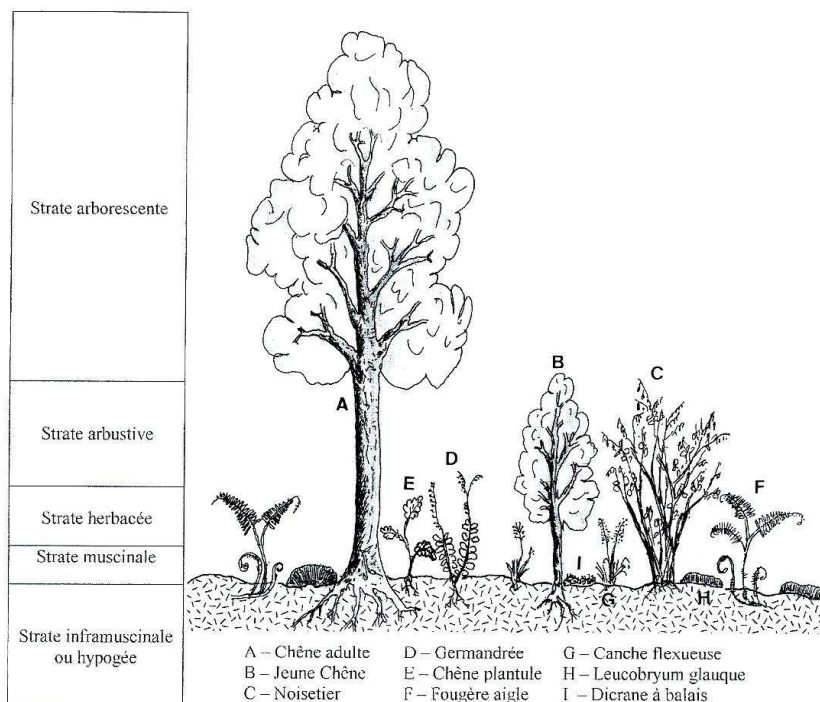


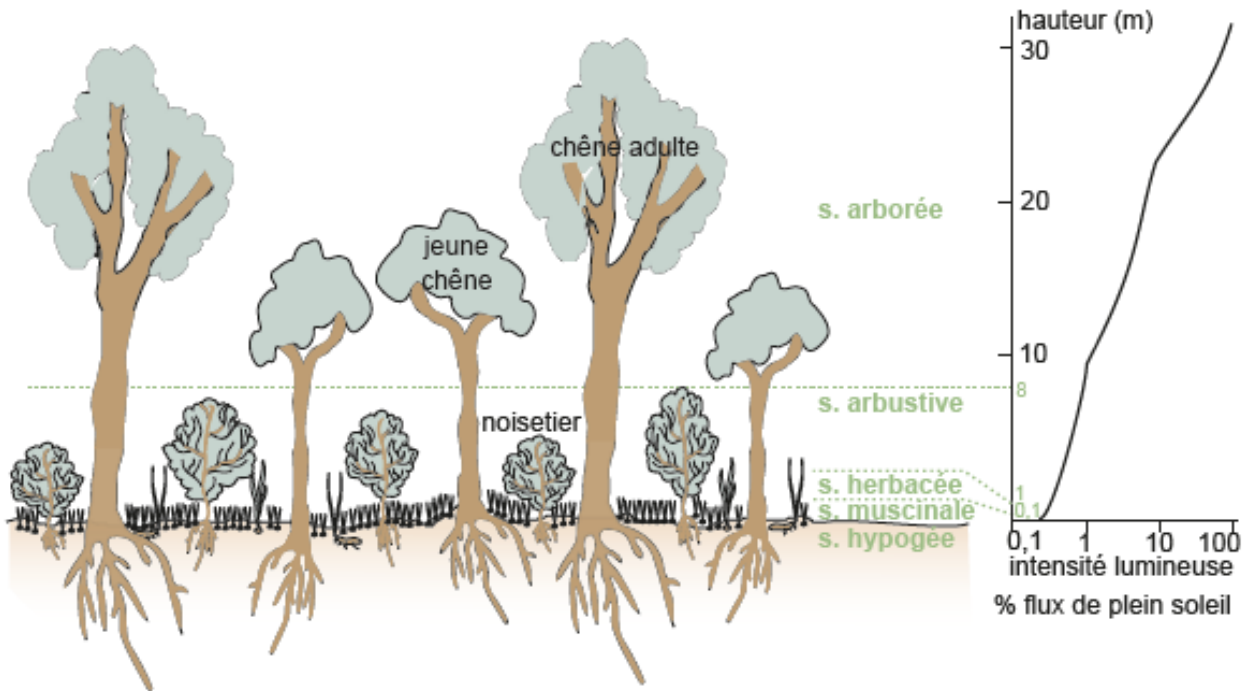
(D’après *Un espace de biodiversité au service des productions herbivores*, 2014)

**DOC 17 - STRATIFICATION VERTICALE DANS UNE FORET**

Type de strate	Hauteur	Exemples rencontrés
Strate arborée	> 8 m	Chêne, érable, hêtre, épicéa...
Strate arbustive	1 à 8 m	Sorbier, houx, if, jeunes arbres, clématites
Strate herbacée	5 cm à 1 m	Trèfles, sainfoin, bruyères, fougères, myrtiliers
Strate muscinée	0 à 5 cm	Mousses, lichens, algues, champignons
Strate hypogée	Sous la surface	Bulbe de tulipe, rhizome de muguet, champignons

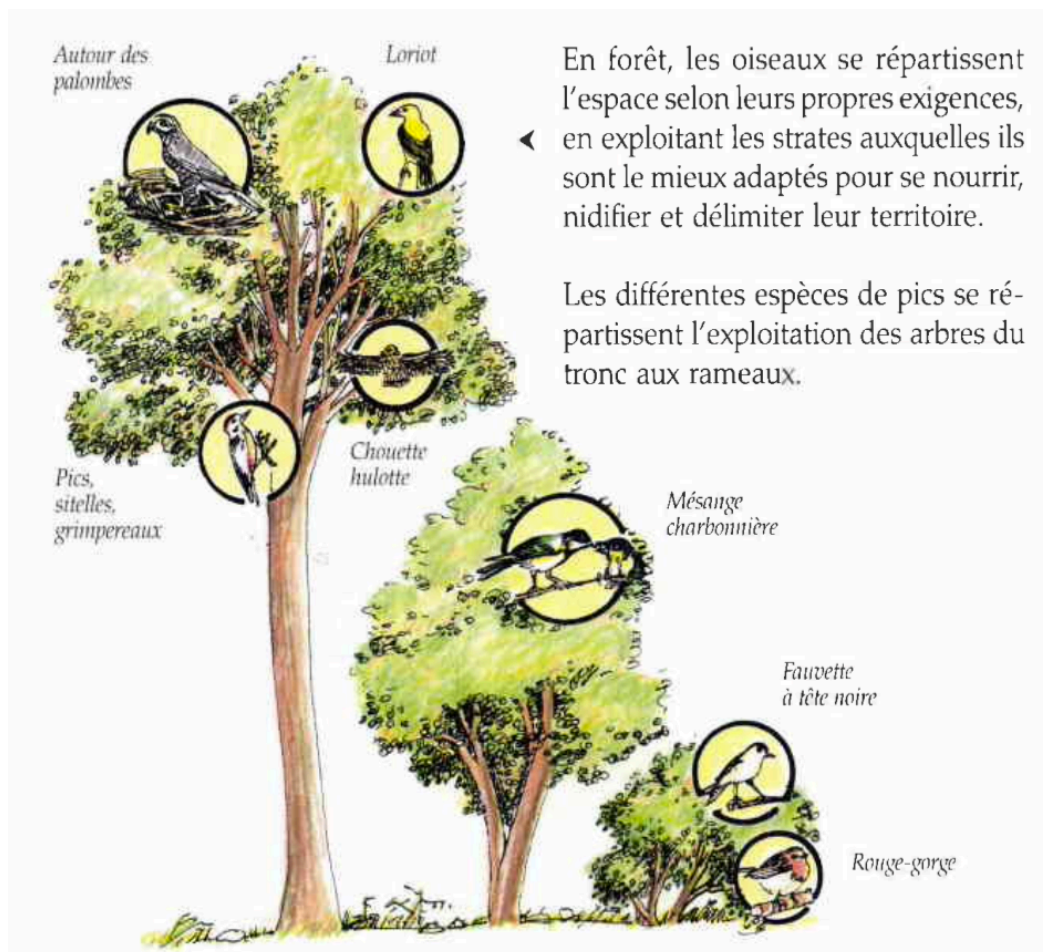
Les tailles indiquées varient selon les sources.





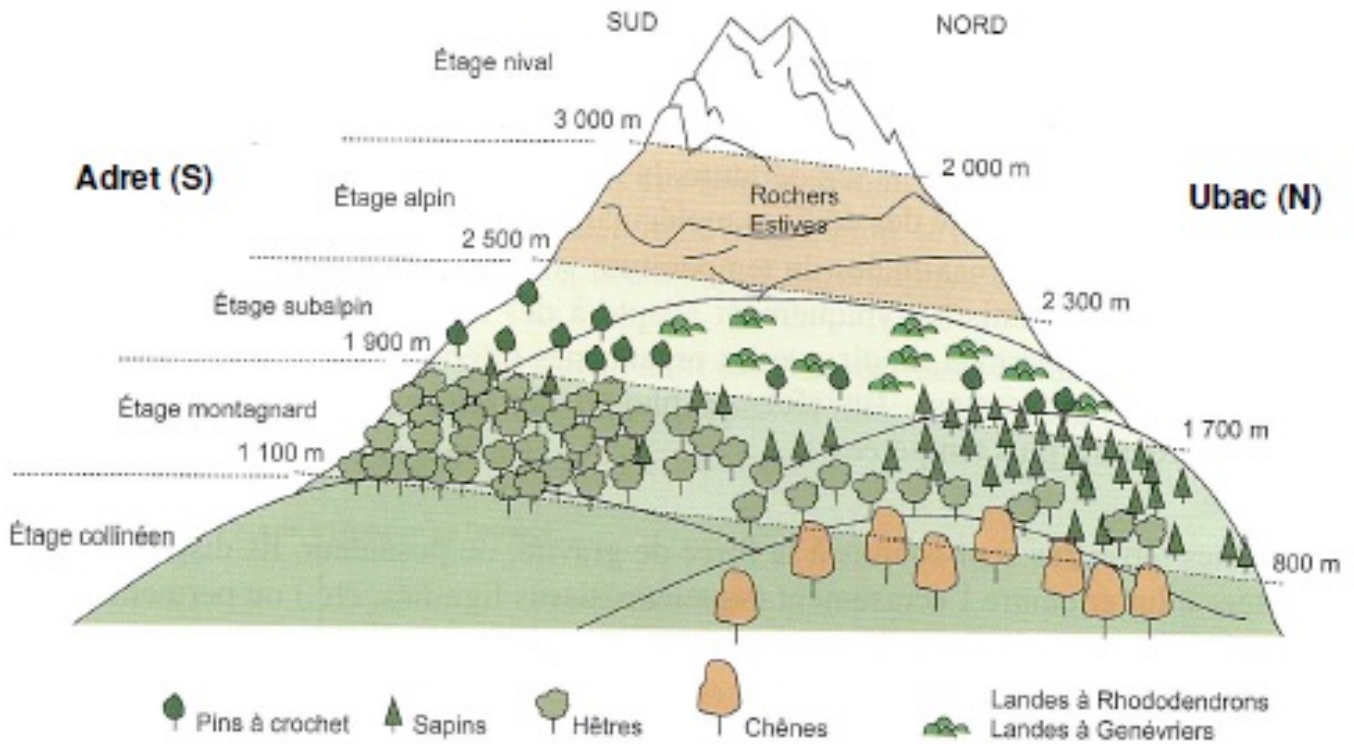
A droite, intensité lumineuse selon la position dans la stratification verticale. (Perrier et al., 2021, Faurie et al. 2012)

**DOC 18 - LE MICROCLIMAT FORESTIER (FORET TEMPEREE CADUCIFOLIEE)**  
(Fischesser et Dupuis-Tate 2007)

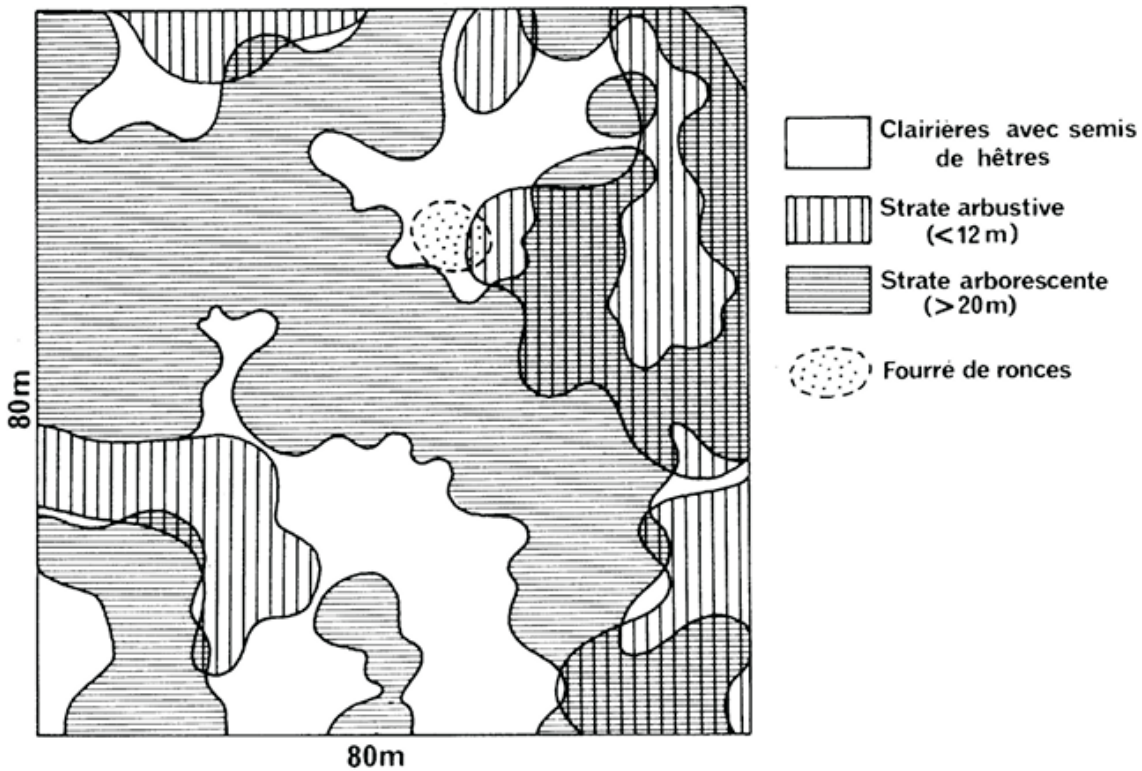




**DOC 19 – ETAGEMENT DES FORMATIONS BOTANIQUES SELON L'ALTITUDE ET LE VERSANT**  
(Richard et al. 2012)

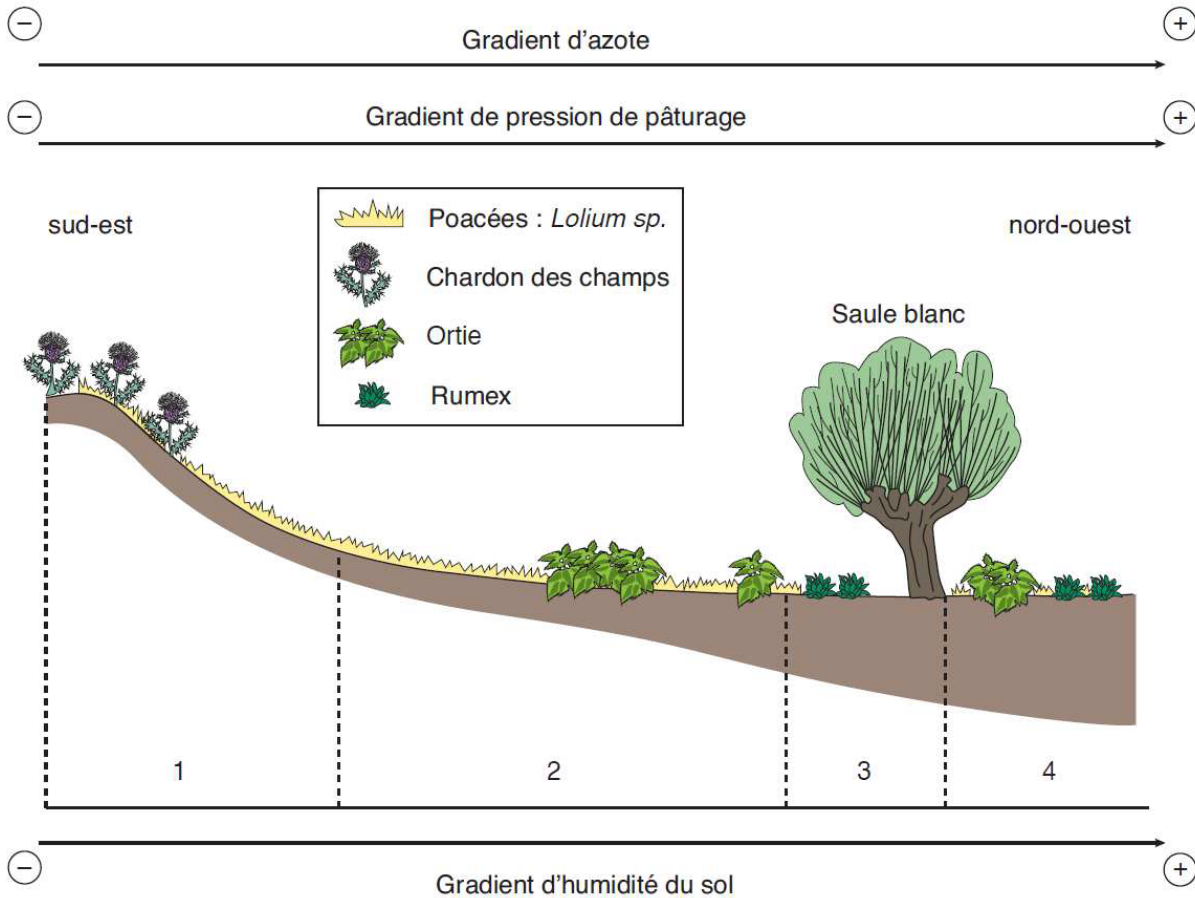


**DOC 20 – STRUCTURE SPATIALE D'UN PEUPEMENT NATUREL DE HETRES DE LA FORET DE FONTAINEBLEAU**



**DOC 21 - ZONATION HORIZONTALE D'UNE PRAIRIE MODEREMENT PATUREE, EN LIEN AVEC QUELQUES FACTEURS BIOTIQUES ET ABIOTIQUES**

(Segarra et al., 2015)



- **Zone 1** : sol peu épais, fort ensoleillement, eau peu retenue (car forte pente >> fort ruissellement), faible pâturage (car pente du talus réduisant l'accès)
- **Zone 2** : sol peu épais, fort ensoleillement, eau retenue
- **Zone 3** : sol épais, fort ensoleillement, eau retenue
- **Zone 4** : sol épais, ensoleillement modéré (car ombre de l'arbre), humidité forte (car eau retenue + ombre de l'arbre)

Le piétinement du bétail sur des sols argileux en forte pente provoque des trouées et une microtopographie en terrassettes, avec un risque d'érosion et de glissement de terrain dans les endroits les plus fréquentés, comme aux abords de ce point d'eau.

(d'après Mauchamp et al., 2011)

8.2



**DOC 22- LE LOMBRIC UNE ESPECE INGENIEUR DE L'ECOSYSTEME PRAIRIAL**

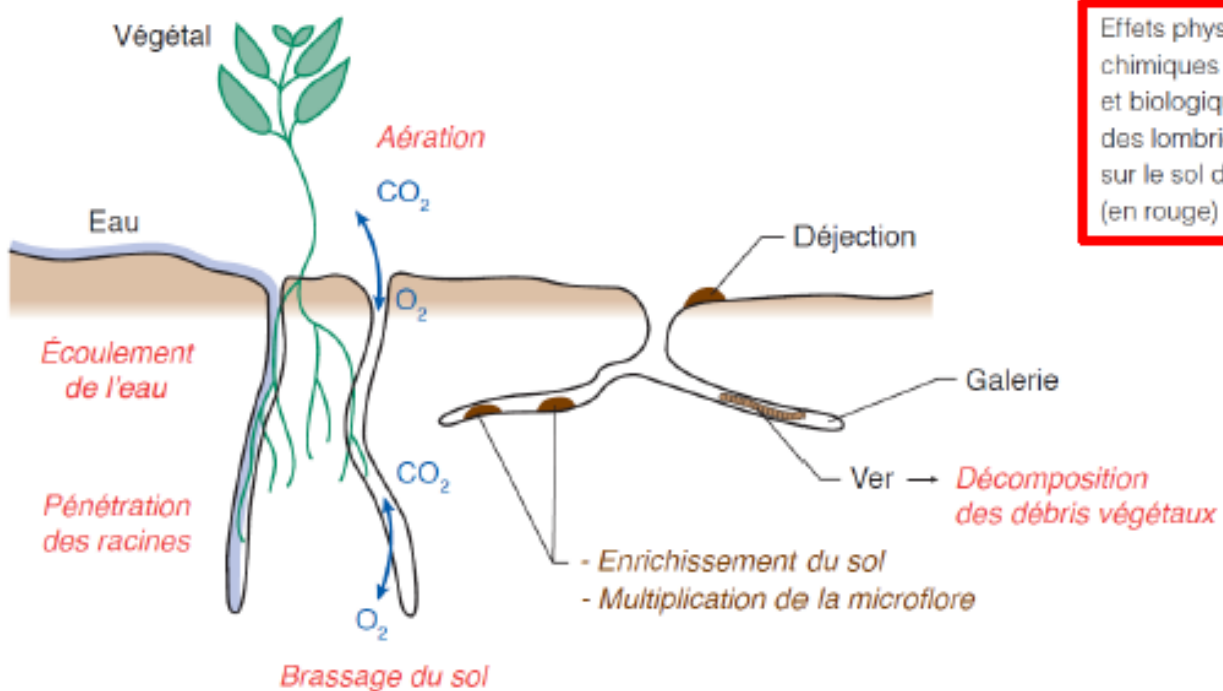
Analyse comparée du sol et des déjections de Lombrics.

Paramètres étudiés	Sol de surface	Déjections
Calcium échangeable	1,990	2,790
Magnésium échangeable	0,162	0,492
Azote (Nitrate)	0,004	0,022
Phosphore disponible	0,009	0,067
Potassium échangeable	0,032	0,358
Taux de saturation	0,074	0,093
pH	6,4	7,0

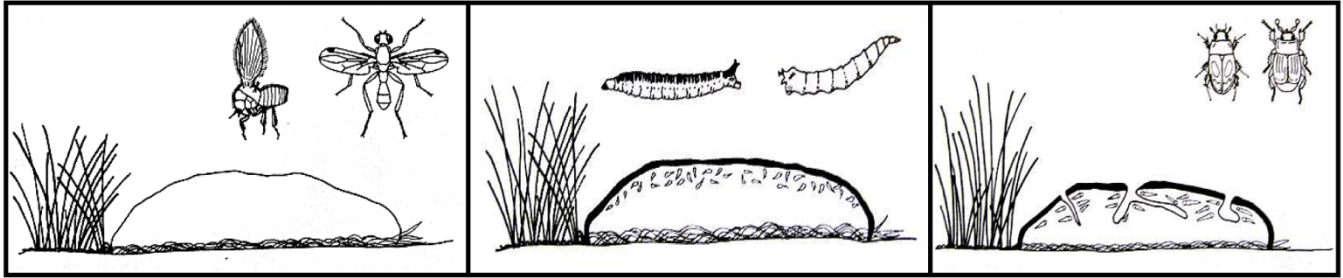
Remarque : les données d'analyse pour les sels minéraux sont exprimées en valeur pour mille.



### Les multiples actions des lombrics dans le sol (Segarra et al. 2015)



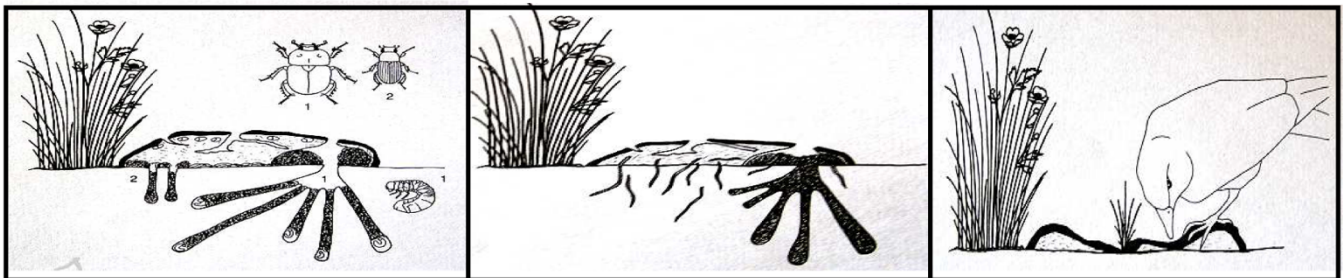
## DOC 23- EVOLUTION D'UNE BOUSE DE VACHE



Phase 1 : Evolution d'une bouse de vache. Au sortir du tube digestif les bouses sont le siège d'une activité bactérienne intense ainsi que d'une colonisation précoce par les insectes coprophiles. Diptères et Hydrophilidés sont les premiers à arriver.

Phase 2 : Dans les heures qui suivent le dépôt, une croûte se forme, par dessèchement de la surface. Les œufs pondus se transforment en larves. Un réseau de galeries formé par le déplacement des invertébrés permet l'oxygénation de la bouse.

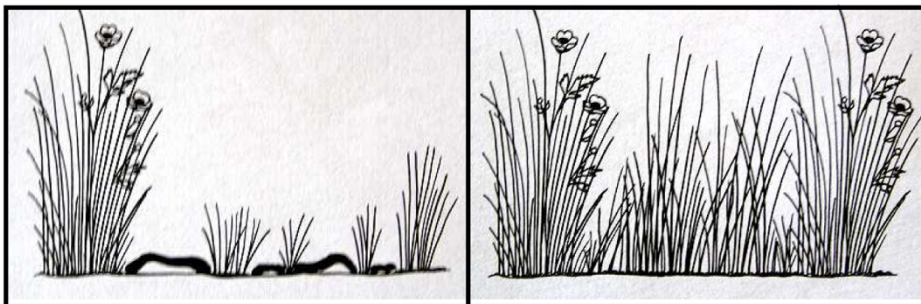
Phase 3 : La croûte durcit et s'épaissit mais l'intérieur reste mou. Les Coléoptères coprophages et prédateurs des différentes larves arrivent désormais.



Phase 4 : La bouse s'assèche de plus en plus. Les Coléoptères effectuent l'essentiel du travail d'enfouissement.

Phase 5 : La bouse est désormais sèche. La croûte épaisse se craquelle. L'intérieur poreux (constitué de restes de végétaux non digérés) est colonisé par la population édaphique sous-jacente, notamment par les vers de terre qui achèvent l'enfouissement.

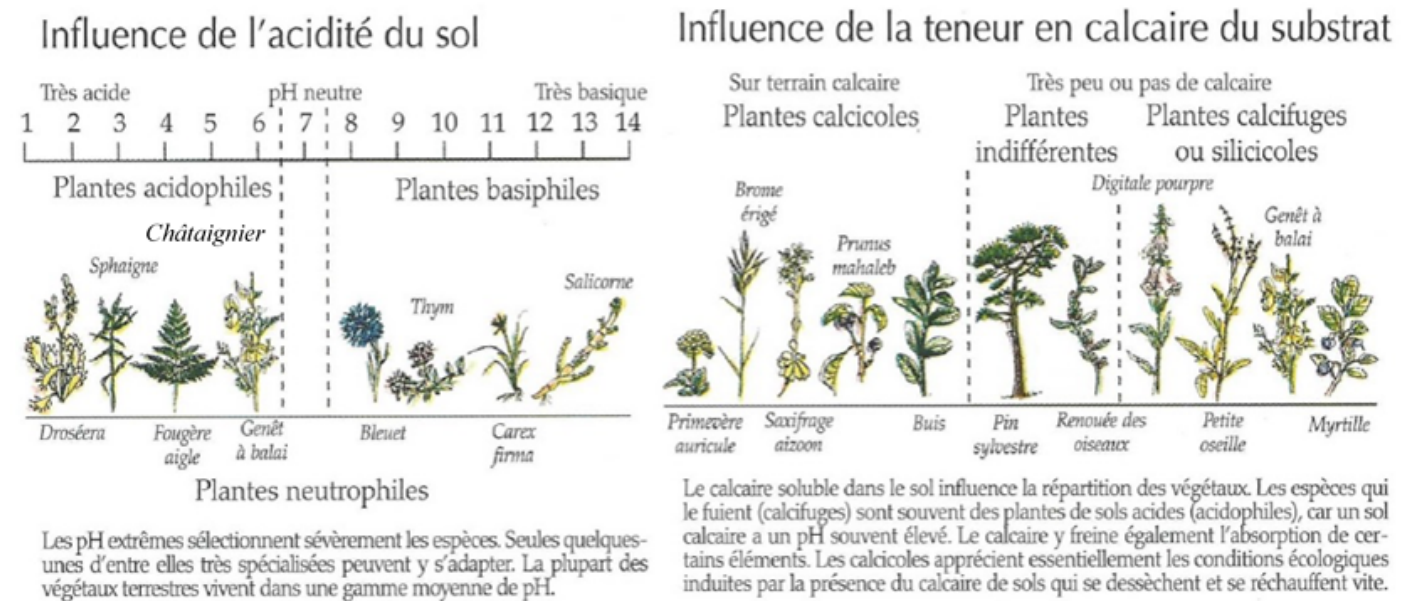
Phase 6 : La bouse se craquelle et se morcelle. Des prédateurs (mammifères et oiseaux) viennent y chercher leurs proies.



Phase 7 : Les pluies détrempent les petits fragments qui se désagrègent rapidement ne laissant sur le sol qu'une mince couche spongieuse de débris végétaux.

Phase 8 : La bouse a disparu : seules des traces subsistent sur le sol. La végétation a repris ses droits...

**DOC 24 - EXIGENCES EDAPHIQUES DE DIVERSES ESPECES VEGETALES**  
(Fischesser et Dupuis-Tate 2007)



**DOC 25 – TOLERANCE ET OPTIMUM D'ETRES VIVANTS DE LA PRAIRIE SELON LES PARAMETRES ABIOTIQUES**  
(Peycru et al. 2014)

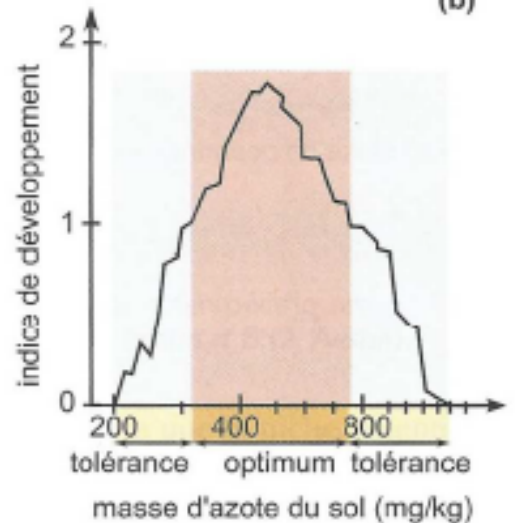
(a)

	tolérance				tolérance	
température °C	7	10	12	optimum	25	26
activité	S.O	S.	R.E	A.O	S.	S.O

S.O : sommeil dans la coquille operculée  
S : sommeil  
R.E : repos éveillé  
A.O : activité optimale

Influence de paramètres abiotiques sur la physiologie de deux êtres vivants de la prairie.

(b)



(a) Influence de la température sur l'activité de l'escargot ; (b) influence de la teneur en azote du sol sur l'alysson blanc, brassicacée (D'après Tilman).

## LES RELATIONS INTERSPECIFIQUES AU SEIN DE L'ECOSYSTEME

### DOC 26 – CATEGORISATION DES RELATIONS INTERSPECIFIQUES

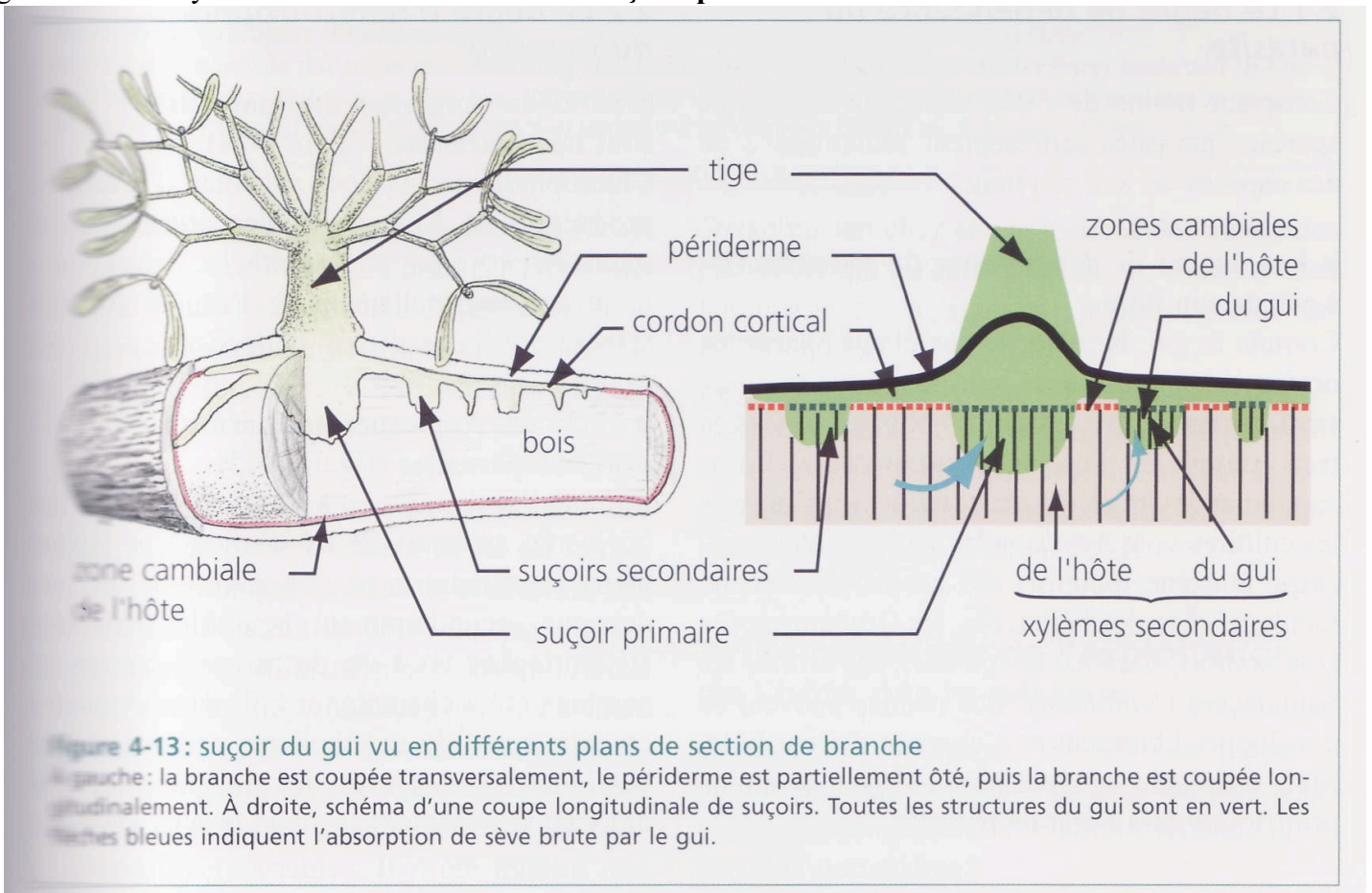
(Perrier et al. 2021)

		conséquence pour l'espèce A		
		positive	neutre	négative
conséquence pour l'espèce B	positive	mutualisme	commensalisme <sup>1</sup>	prédation parasitisme
	neutre	commensalisme <sup>1</sup>	neutralisme	amensalisme <sup>2</sup>
	négative	prédation parasitisme	amensalisme <sup>2</sup>	compétition

### DOC 27 – LE GUI BLANC, PARASITE D'ARBRES COMME LE POMMIER, LE PEUPLIER, LE TILLEUL, LE SAULE

(Meyer et al. 2008)

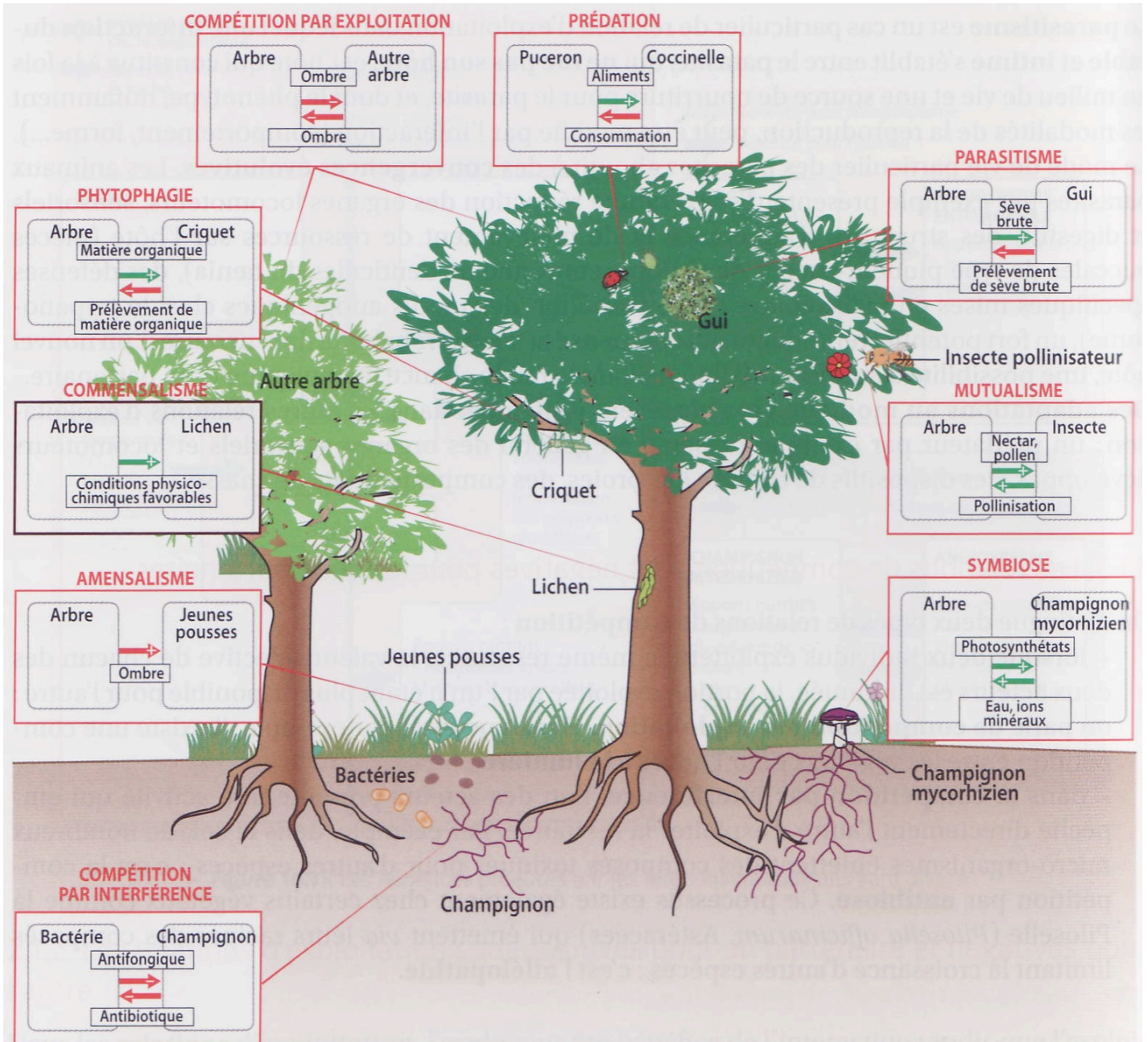
Le gui produit des cordons progressant sous l'écorce de l'arbre parasité, ces cordons génèrent des **suçoirs** qui se greffent sur le xylème secondaire de l'arbre : **les suçoirs prélèvent ainsi la sève brute de l'hôte.**

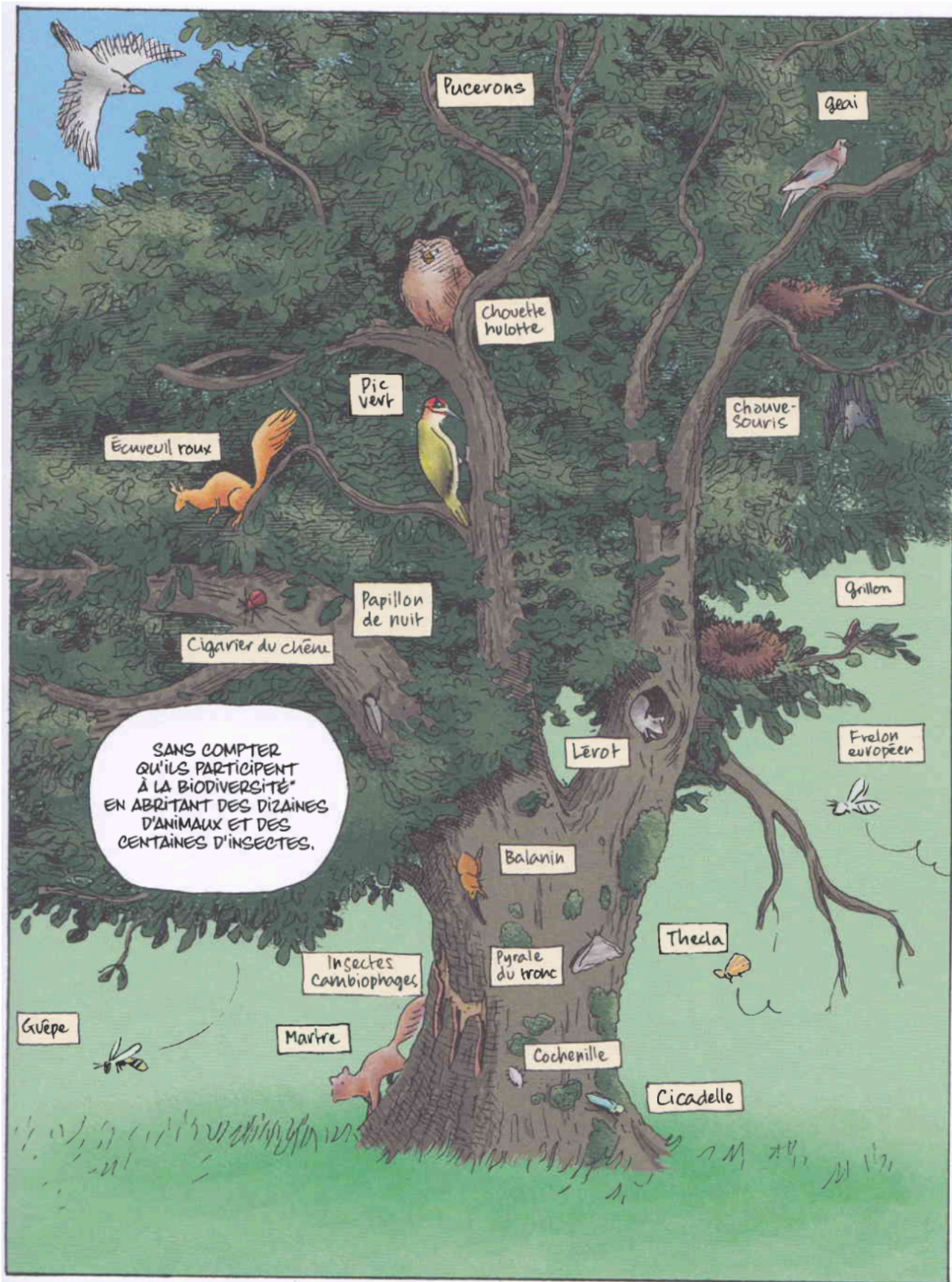


**DOC 28 – LES RELATIONS INTERSPECIFIQUES DANS LES ECOSYSTEMES**

(Dautel et al. 2021, Saintpierre et al. 2017, Fischesser et Dupuis-Tate, Le génie de la forêt, Hallé et Zabus)

**LES RELATIONS INTERSPECIFIQUES SUR L'EXEMPLE D'UN ARBRE AU COURS DE SA VIE**

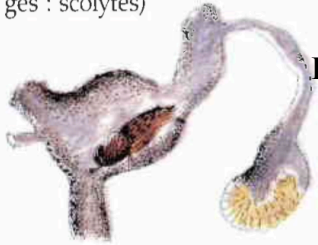




### Les microclimats d'un arbre âgé :

En forêt, les vieux arbres hébergent, grâce aux microclimats qu'ils leur offrent, de nombreuses espèces :

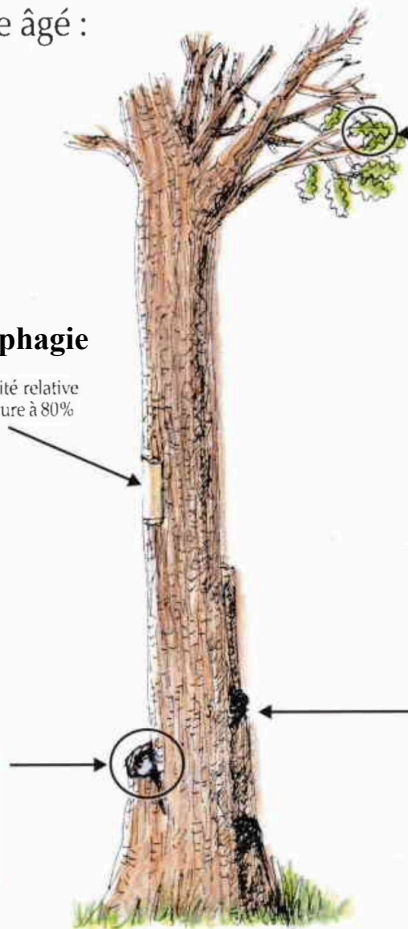
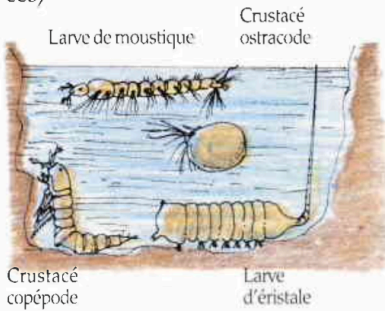
- Sous l'écorce (dans les galeries d'insectes xylophages : scolytes)



#### Phytophagie

Humidité relative supérieure à 80%

- Dans un creux du tronc rempli d'eau (larves d'insectes et de petits crustacés)



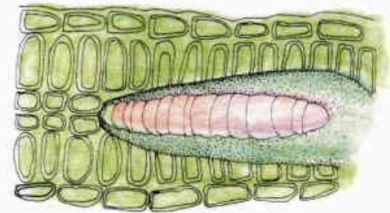
#### Parasitisme

- A l'intérieur d'une feuille (galerie de chenille mineuse)

Humidité relative  
 - à 1,6 cm de la surface : 52%  
 - à 0,5 mm : 93%



La chenille de toigne déprimée, issue d'un œuf pondu près d'une nervure, creuse sa galerie sinueuse dans le parenchyme de la feuille dont elle se nourrit en toute sécurité à l'abri des prédateurs



- 90% d'humidité constante  
 - Les variations de température sont très réduites

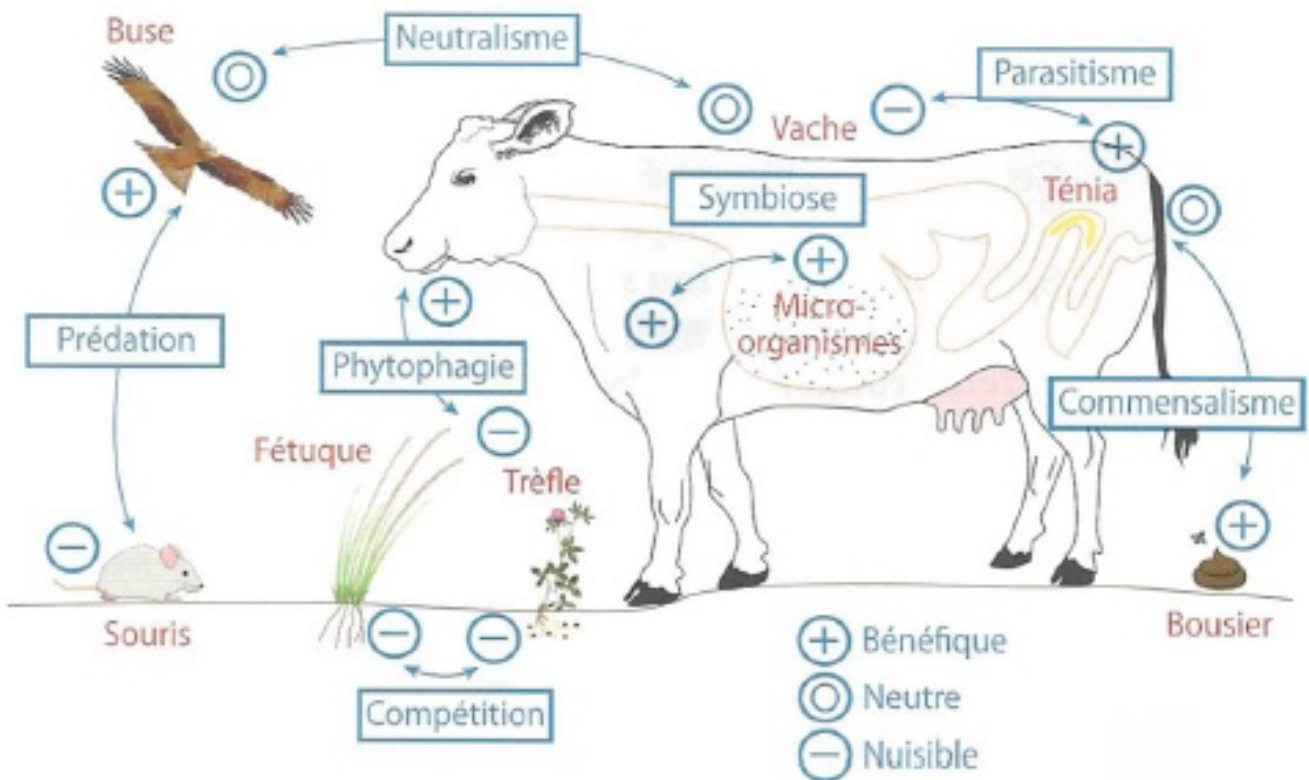
- Dans une cavité remplie de terreau (larve de cétoine)

Cétoine adulte



- Humidité très élevée  
 - Température tempérée : plus chaude la nuit, plus froide le jour

### LES RELATIONS INTERSPECIFIQUES DANS LES ECOSYSTEMES DANS LA PRAIRIE




DOC 29 – LES RELATIONS INTERSPECIFIQUES ENTRE FABACEES ET POACEES AU SEIN DE LA PRAIRIE

Exemple d'espèces prairiales des 2 familles

### Le Trèfle blanc

(*Trifolium repens*)



**AVANTAGES**

- Bonne association avec les graminées pérennes.
- Bien adapté au pâturage.
- Appétence et valeur nutritive excellente.
- Diminution de fertilisation azotée.
- Bonne production d'été en l'absence de sécheresse.

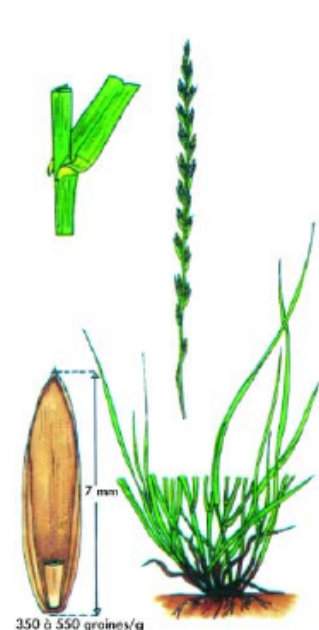
**LIMITES**

- Risque de météorisation en cas de surabondance.
- Maintien difficile du bon équilibre avec la graminée.

1500 à 2000 graine/g

### Ray-grass anglais

(*Lolium perenne*)



**AVANTAGES**

- Excellente plante de pâture (végétation basse et dense). Très appétente.
- Bonne valeur alimentaire.
- Implantation et exploitation faciles.
- Assez bonne tolérance aux excès d'eau.
- Bonne pérennité (3 à 6 ans selon le milieu et la variété).
- Bonne association avec le trèfle blanc.

**LIMITES**

- Production stoppée par la chaleur.
- Assez sensible aux rouilles.
- Difficile à faucher avec une barre de coupe.

**CRITÈRE DE CHOIX DES VARIÉTÉS**

- Précocité, souplesse d'exploitation.
- Répartition du rendement.
- Ploidie.
- Pérennité.
- Résistance aux maladies (rouilles).

350 à 550 graines/g

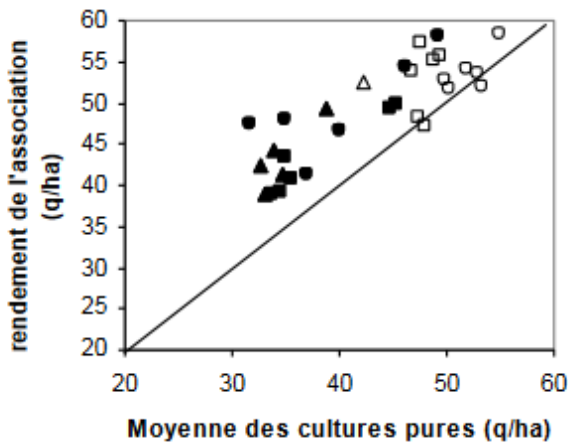


Figure 3 : Comparaison du rendement de l'association pois-blé et de la moyenne des cultures pures sur 3 années d'essais variétaux dans le cas des variétés Hr (symboles pleins) et des variétés hr (symboles vides) (INRA Dijon, Agri Obtentions)

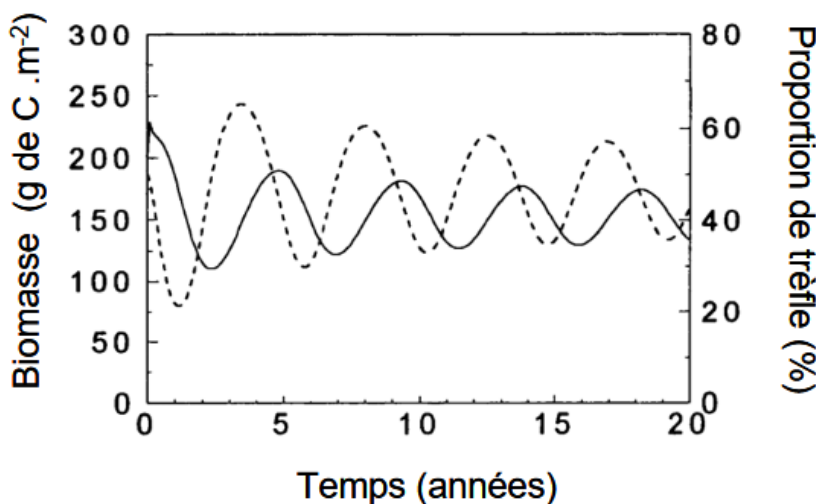
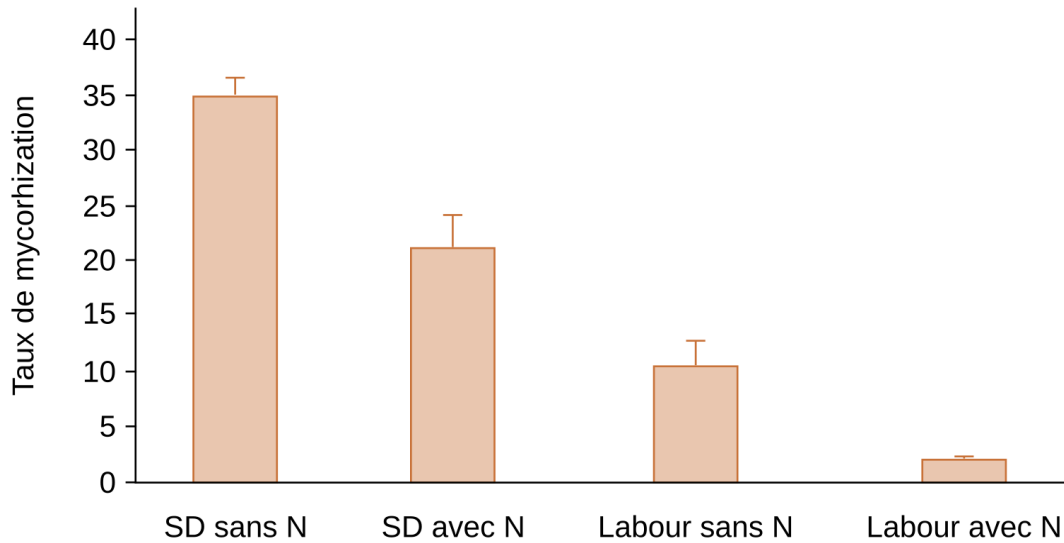


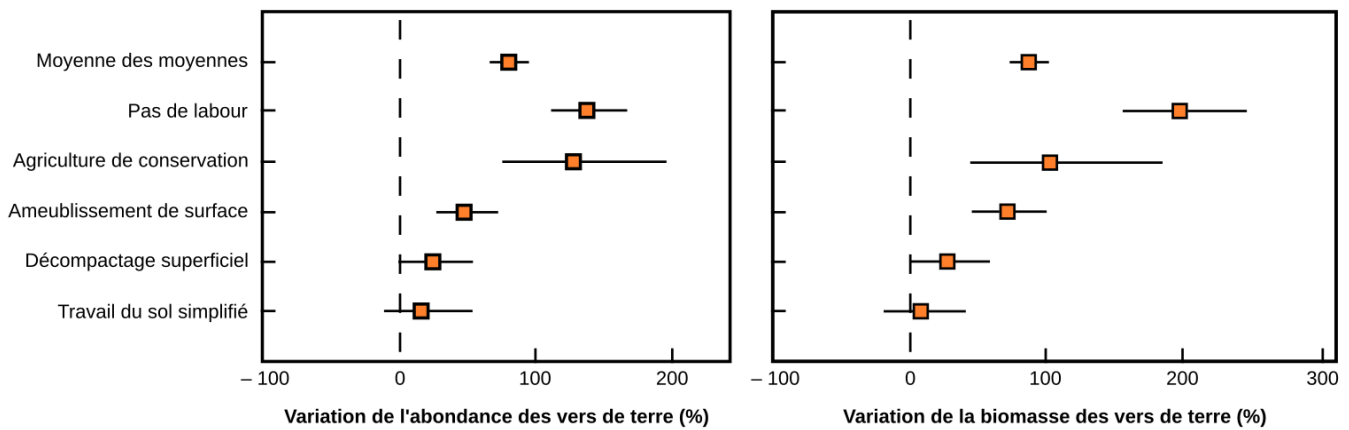
Figure 4 : Evolution au cours du temps de la biomasse totale (ligne solide) et de la proportion de trèfle (pointillés) simulées pour une association trèfle blanc – ray-grass anglais pâturée en situation où l'azote est le principal facteur limitant la production (d'après Schwinning et Pearson, 1996b).

(Corre-Hellou et al., 2006 ; Louarn et al., 2010)

**DOC 30 – LES RELATIONS INTERSPECIFIQUES DANS UN AGROSYSTEME****Influence du travail du sol et de la fertilisation azotée sur le taux de mycorhization des racines de blé**

Le taux de colonisation racinaire des racines de blé par des champignons mycorhiziens est mesuré dans quatre conditions :

- SD sans N : semis direct sur sol sans azote appliqué depuis 6 ans.
- SD avec N : semis direct sur sol avec azote appliqué depuis 6 ans.
- Labour sans N : labour + herse rotative sur sol sans azote appliqué depuis 6 ans.
- Labour avec N : labour + herse rotative sur sol avec sans azote appliqué depuis 6 ans.

**Effet de différents types de travail du sol sur l'abondance et la biomasse des vers de terre**

Les valeurs sont données en pourcentage du témoin, représenté par le labour conventionnel, qui correspond à l'enfouissement par une charrue des résidus végétaux à une profondeur de 20 à 40 cm. Pour chaque type de traitement, le carré représente la moyenne et les barres les intervalles de confiance à 95 %.

Pas de labour : pas de travail du sol excepté éventuellement de petits trous faits pour planter les graines.

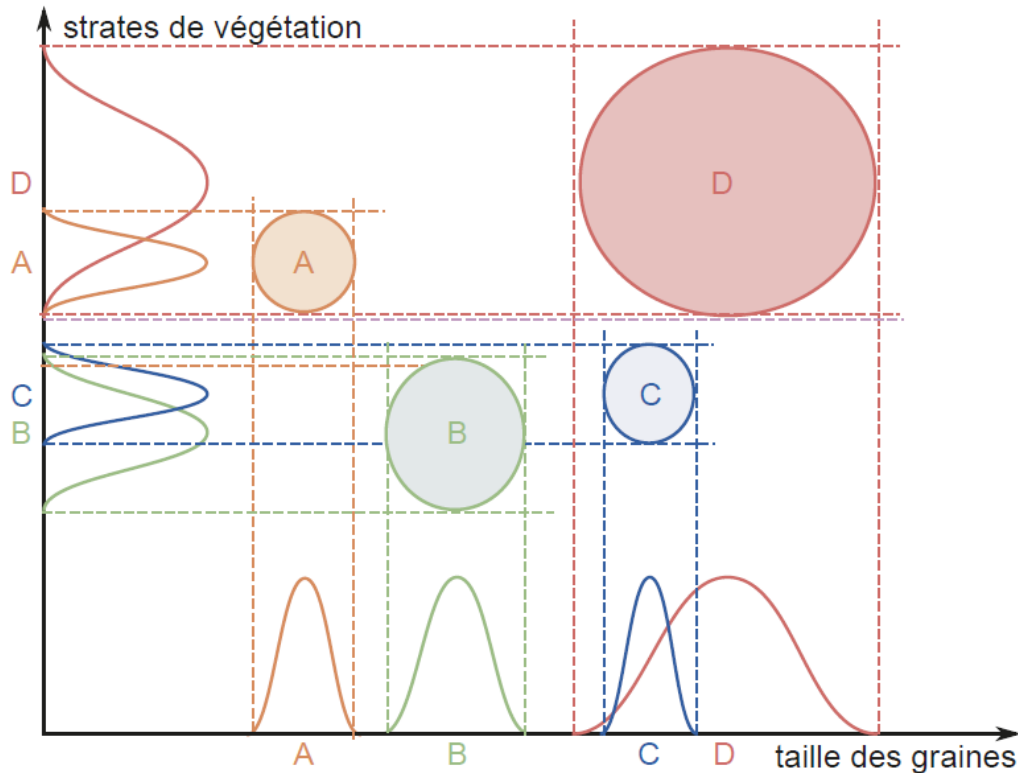
Agriculture de conservation : pas de travail du sol et une couverture permanente du sol (par les résidus des cultures précédentes ou par du paillage).

Ameublissement de surface : travail du sol sur moins de 15 cm de profondeur, sans retourner la terre.

Décompactage superficiel : travail sur sol sur plus de 15 cm de profondeur, sans retourner la terre.

Travail du sol simplifié : travail du sol moins de 15 cm de profondeur, en retournant la terre.

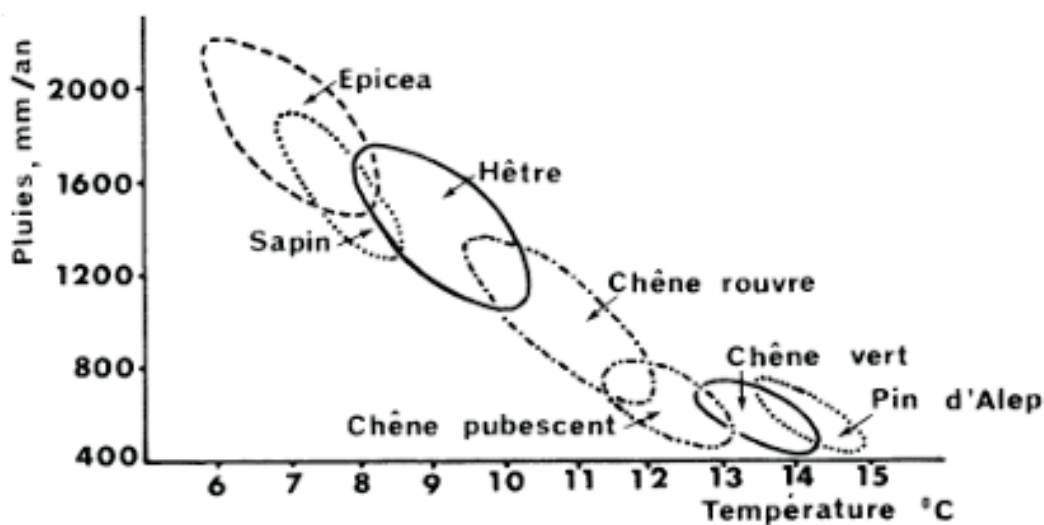
<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/production-agricole-agrosystemes/structure-et-fonctionnement-des-agrosystemes>

**DOC 31 – DEFINITION DE LA NICHE ECOLOGIQUE POTENTIELLE ET DE LA NICHE REALISEE****Définition de la niche écologique potentielle : exemples d'oiseaux granivores et d'arbres**

**Figure 17.14** Intervalles de tolérance et délimitation de la niche écologique potentielle.

Pour simplifier la représentation, on suppose que deux facteurs suffisent à définir la niche écologique potentielle : l'habitat (strate de végétation occupée) et les préférences alimentaires (taille des graines consommées).

(Perrier et al. 2021)

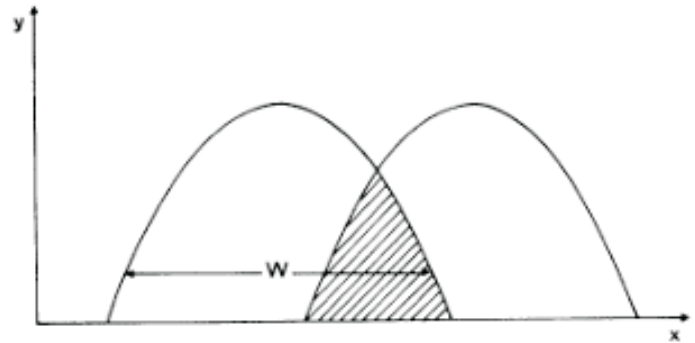


**19** Niche pluviothermique de quelques essences arborées en France d'après leur distribution observée (d'après Lebreton, 1978).

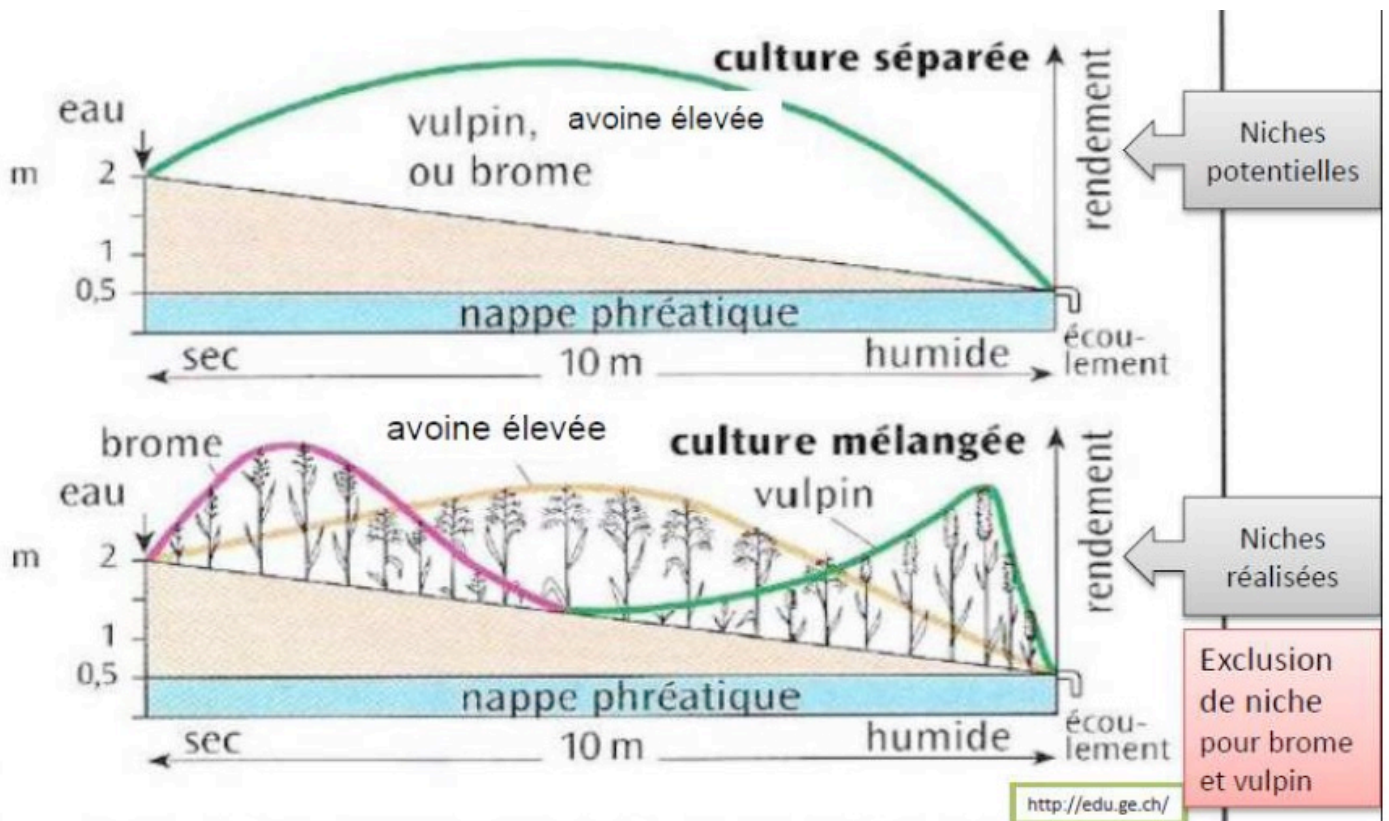
La température utilisée est la moyenne annuelle.

**Chevauchement de niches entre deux espèces**

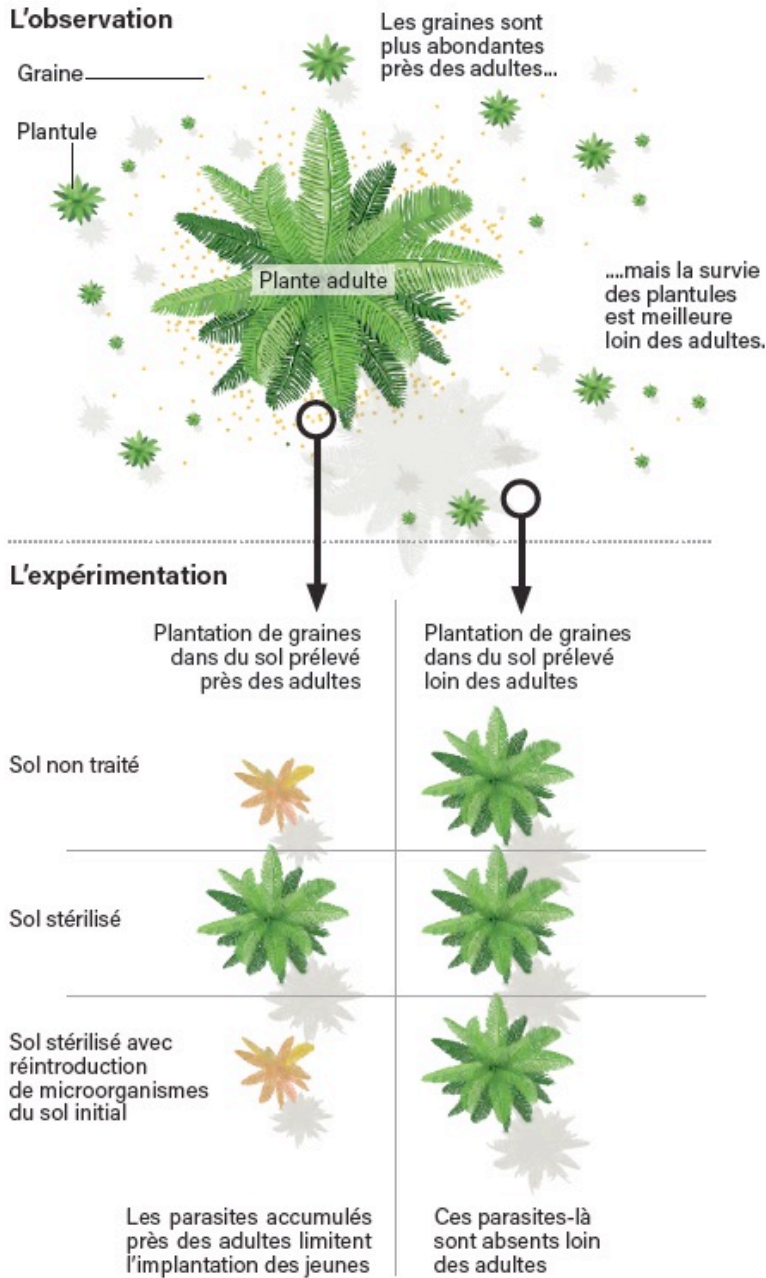
**Figure 50** Amplitude ( $w$ ) et chevauchement de niches (hachuré) de deux espèces mesurés sur un gradient de ressource,  $x$ .  
En ordonnées : quantité de ressources utilisées,  $y$ .



**Principe d'exclusion réciproque : de la niche potentielle à la niche réalisée chez les Poacées de la prairie**  
(d'après A Helme-Guizon)



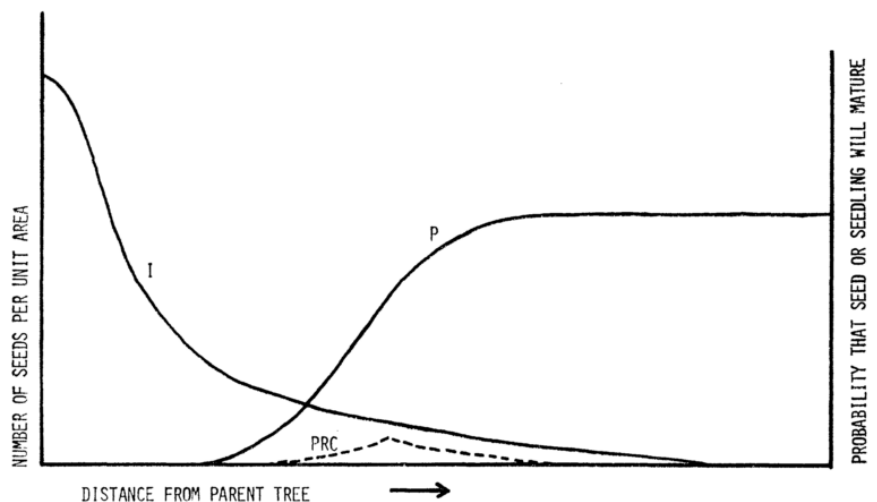
**DOC 32 – L’EFFET JANZEN-CONNELL**



PLS 2021

**Représentation graphique du modèle de Janzen-Connell :**

probabilité de maturation d'une graine ou plantule en fonction de la distance par rapport à l'arbre parent. Le nombre de graines par unité de surface (I) diminue rapidement en fonction de la distance par rapport à l'arbre parent, mais la probabilité (P) qu'une graine ou plantule échappe aux prédateurs avant sa maturation augmente. La différence entre ces deux courbes produit une courbe de recrutement de la population (PRC)



[https://www.researchgate.net/figure/3-Representation-graphique-du-modele-de-Janzen-Connell-Janzen-1970-Connell-1971\\_fig2\\_318987866](https://www.researchgate.net/figure/3-Representation-graphique-du-modele-de-Janzen-Connell-Janzen-1970-Connell-1971_fig2_318987866)

**DOC 33 – LES PYRAMIDES ECOLOGIQUES**

**Principe de construction**

Une pyramide écologique de nombre, de biomasse ou d'énergie est une représentation graphique montrant l'importance quantitative de chaque niveau trophique.

On représente les niveaux par un rectangle dont la surface est proportionnelle au nombre, masse ou énergie de chaque niveau. Les centres des rectangles sont centrés verticalement.

En général la hauteur des rectangles est la même pour chaque niveau trophique.

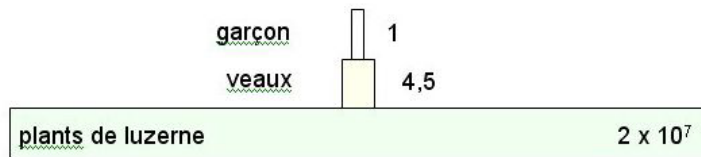
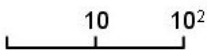
L'échelle doit être respectée afin de visualiser l'évolution d'un niveau trophique au suivant.

La lecture d'une pyramide se fait de la base vers le sommet.

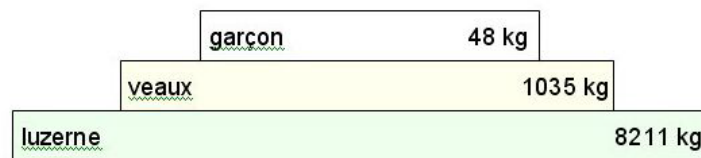
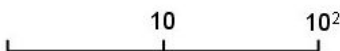
**Pyramides écologiques dans une prairie**

Écosystème « idéal » : champ de luzerne de 4 ha qui sert à nourrir des veaux eux mêmes mangés en un an par un enfant

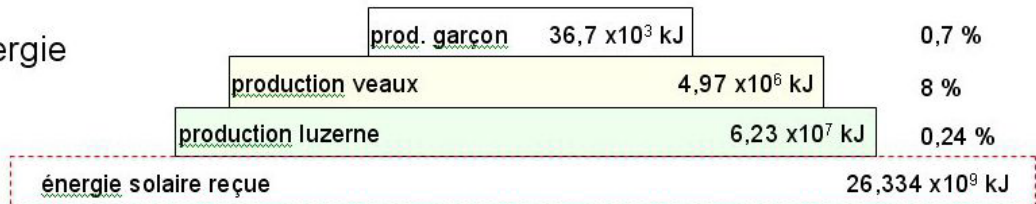
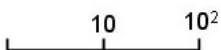
Pyramide des nombres



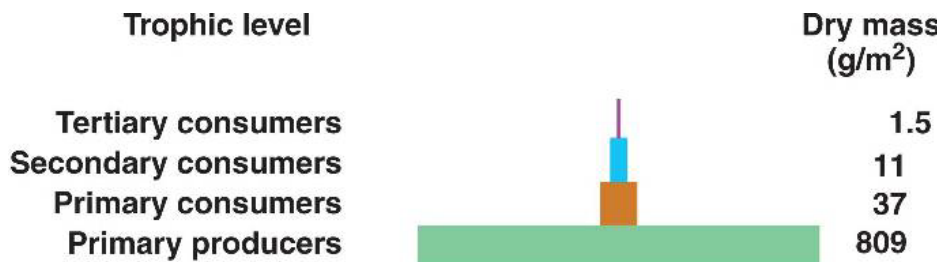
Pyramide des biomasses



Pyramide de l'énergie



**Deux types de pyramides écologiques**

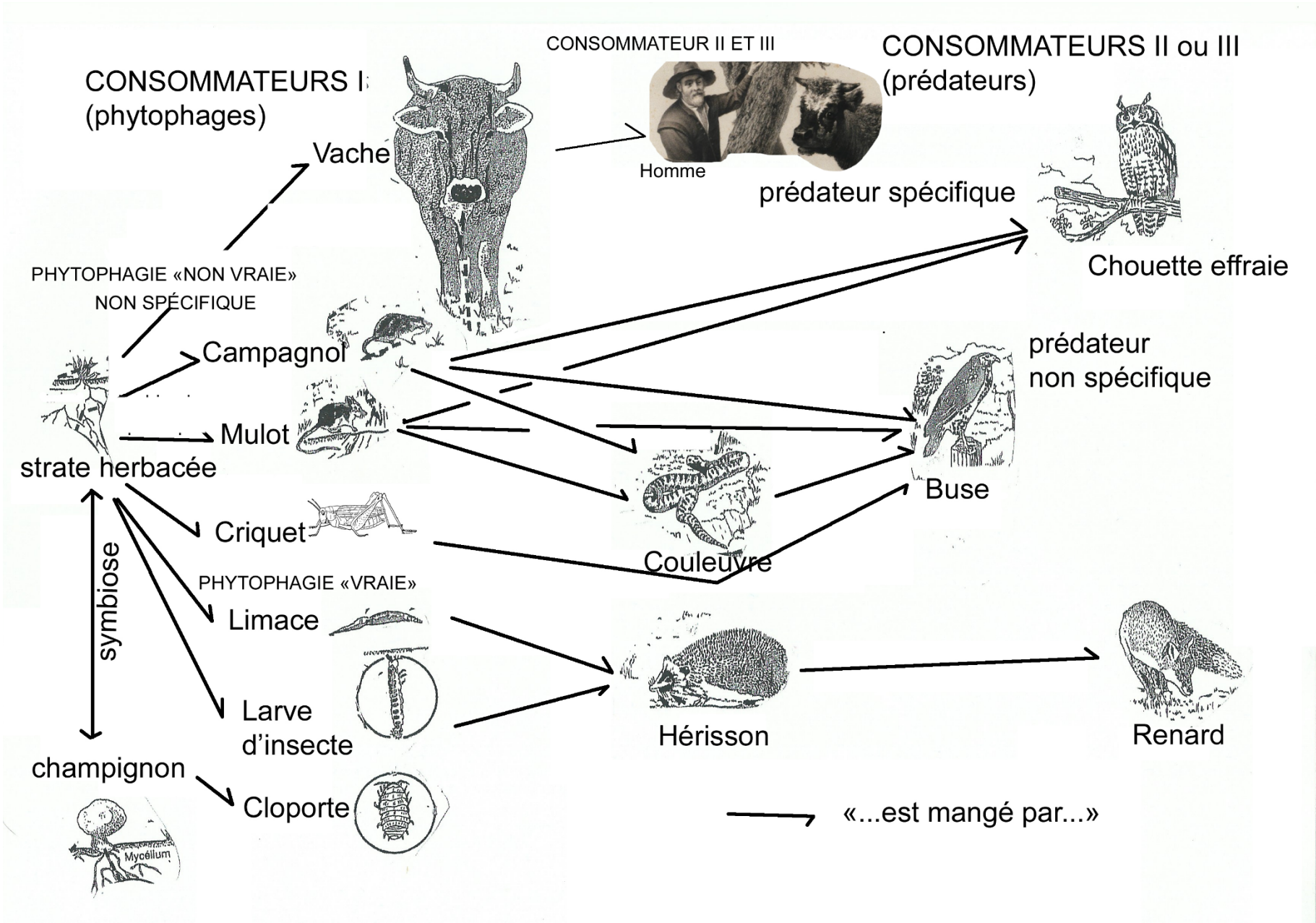


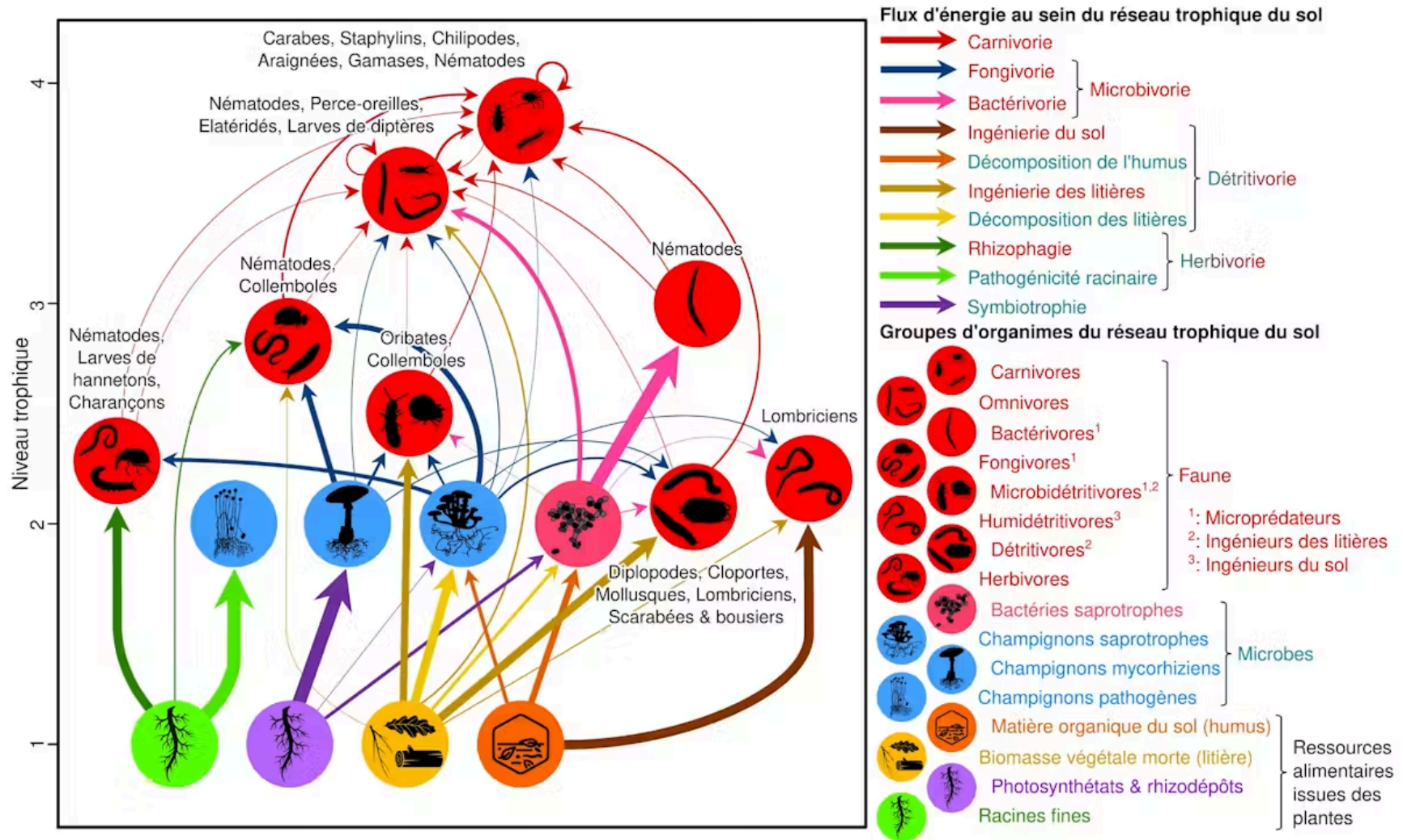
Most ecosystems (data from a Florida bog)



Some aquatic ecosystems (data from the English Channel)

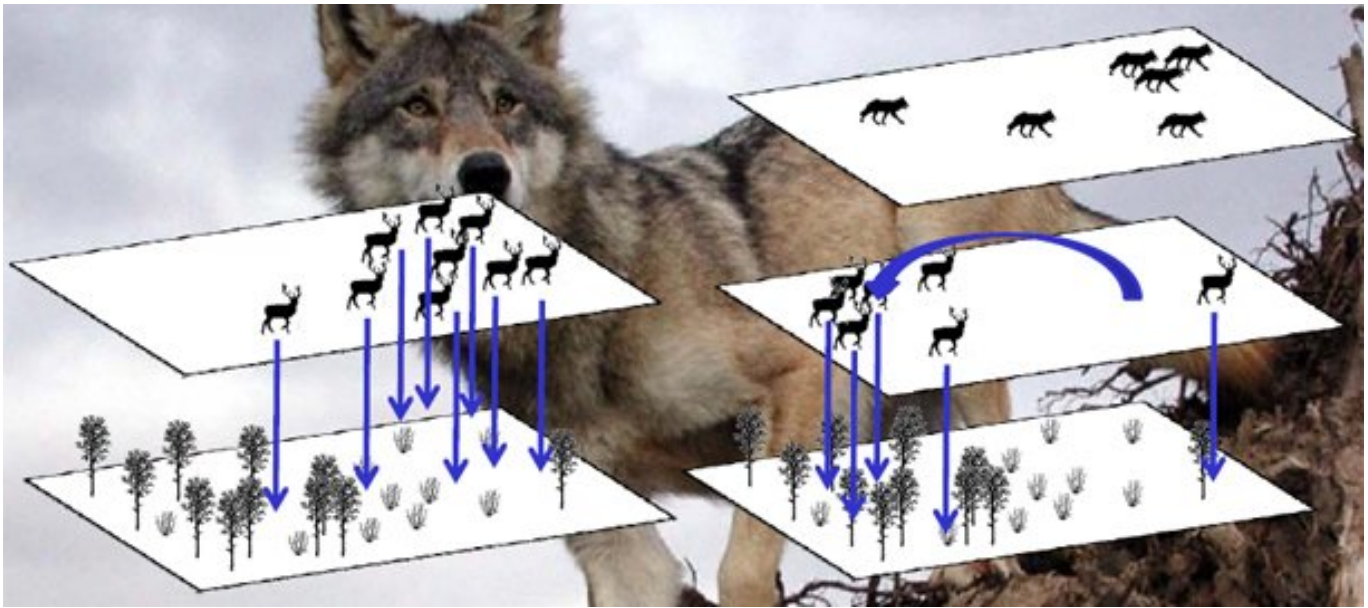
**DOC 34 – RESEAU TROPHIQUE DE LA PRAIRIE**  
D'après S Guellac





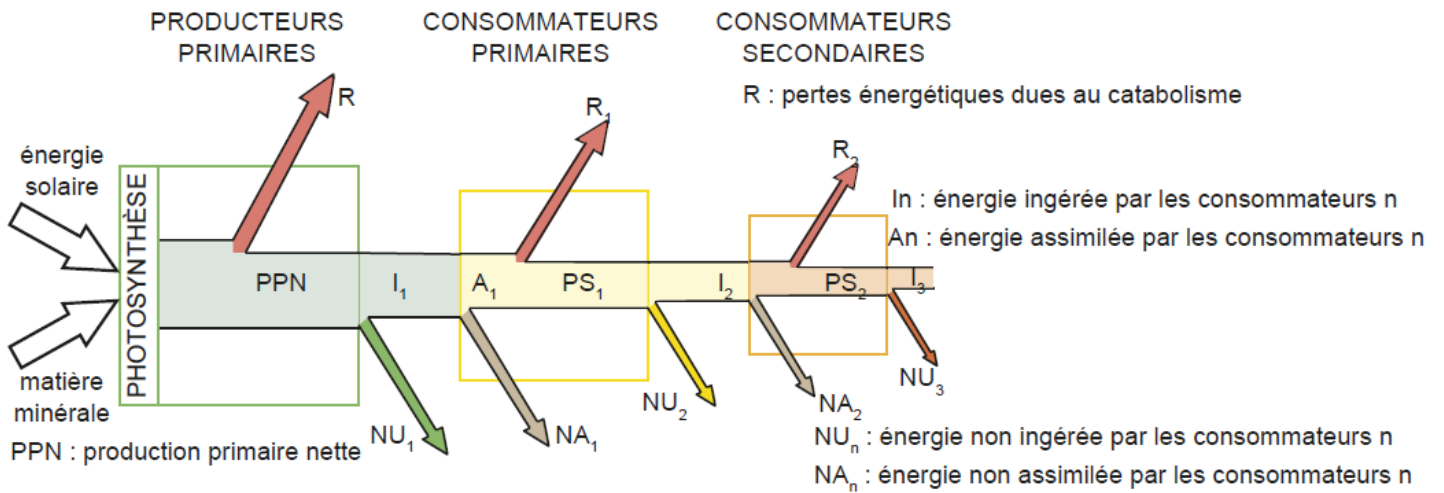
Représentation du réseau trophique du sol. Les flèches représentent les flux d'énergie entre les groupes trophiques, leur épaisseur étant proportionnelle à l'intensité des interactions trophiques. La couleur des flèches montre comment les flux d'énergie peuvent être agrégés par type de ressource et de consommateur afin de quantifier les fonctions du réseau trophique du sol. Le niveau trophique correspond à la position qu'occupent les organismes d'un groupe trophique dans le réseau, mesurant sa distance par rapport à la production primaire autotrophe. Ludovic Henneron, adapté d'après Henneron et al. (2026). Les silhouettes utilisées sont libres de droit (licence Creative Commons

**DOC 35 - EFFET « TOP DOWN » OU CASCADE TROPHIQUE DECOULANT DE LA RELATION DE PREDATION**



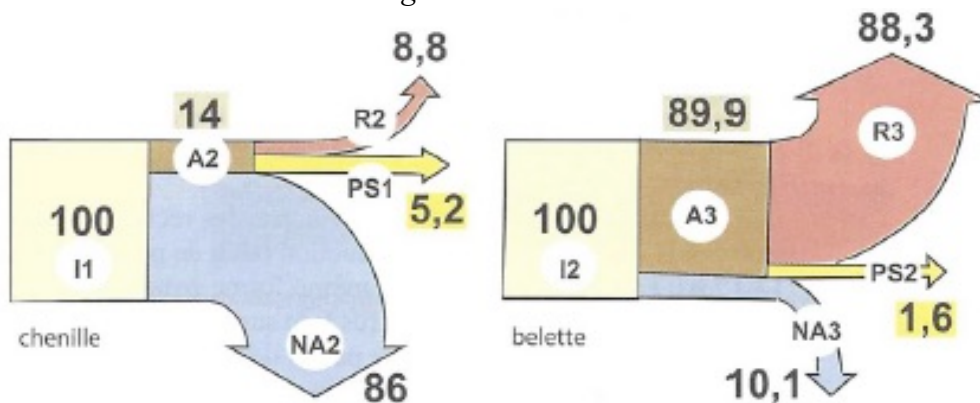
**DOC 36 – TRANSFERTS D’ENERGIE DANS UN RESEAU TROPHIQUE**

(Perrier et al., 2021)



**DOC 37 – RENDEMENTS ENERGETIQUES OU EFFICIENCES ENERGETIQUES***(Faurie et al., 2012, Ricklefs et Miller 2005)*

$$\begin{aligned} \text{Rendement d'exploitation} &= \frac{\text{Ingestion de nourriture}}{\text{Production de proies}} \\ \text{Rendement d'assimilation} &= \frac{\text{Assimilation}}{\text{Ingestion}} \\ \text{Rendement de production nette} &= \frac{\text{Production (croissance et reproduction)}}{\text{Assimilation}} \\ \text{Rendement de production brute} &= \text{Rendement d'assimilation} \times \text{Rendement de production nette} \\ &= \frac{\text{Production}}{\text{Ingestion}} \\ \text{Rendement écologique} &= \text{Rendement d'exploitation} \\ &\quad \times \text{Rendement d'assimilation} \\ &\quad \times \text{Rendement de production nette} \\ &= \frac{\text{Production de consommateurs}}{\text{Production de proies}} \end{aligned}$$

Exemple : Comparer les rendements de ces 2 organismes consommateurs.

Rendements écologiques d'une belette (carnivore endotherme) et d'une chenille (herbivore ectotherme) (D'après Barbault).

Les valeurs encadrées en marron et en jaune représentent respectivement les rendements d'assimilation et écologique. Les indices affectant les abréviations prennent en compte les niveaux trophiques, C1 pour la chenille et C2 choisi par exemple pour la belette.

**I = énergie ingérée / A = énergie assimilée / NA = énergie non assimilée (= fèces)**  
**R = énergie perdue par métabolisme (respiration, urines)**  
**PS = production secondaire**

Exercice : Calculer les différents types de rendements sur ces 2 exemples.

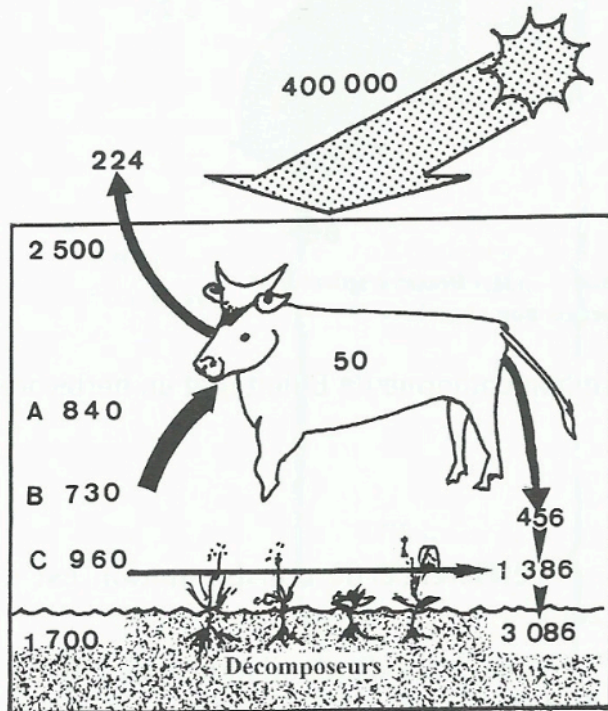
La première fournie par Macfadyen concerne des Bœufs non améliorés, paissant librement une prairie naturelle anglaise. La seconde proposée par Ricou porte sur une prairie artificielle de Normandie pâturée par des Bovins sélectionnés de race normande. 1 calorie = 4,18 joules

Éléments principaux de la chaîne ramenés à une surface de 1 m<sup>2</sup> (kcal / m<sup>2</sup> / an)

A = Herbe consommée par les invertébrés herbivores

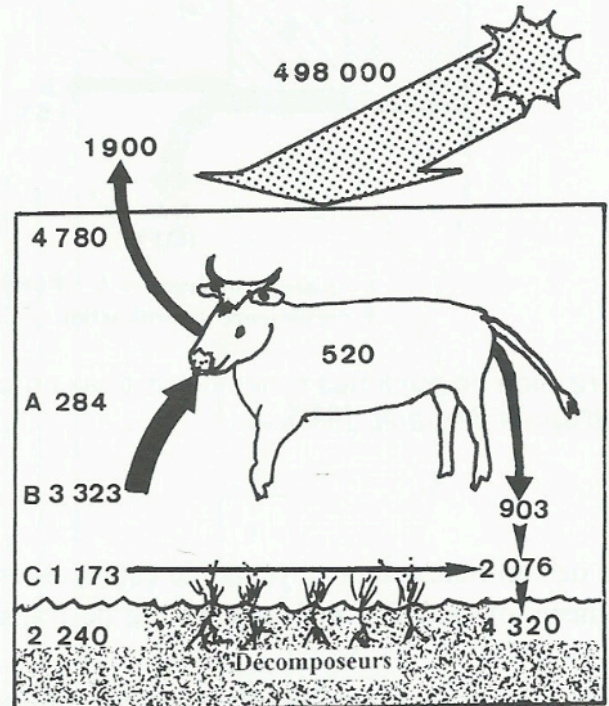
B = Herbe ingérée par le Bovin

C = Herbe abandonnée aux décomposeurs



Bovins non améliorés paissant librement sur un pré semi-naturel (Grand-Bretagne)

D'après Macfadyen 1963



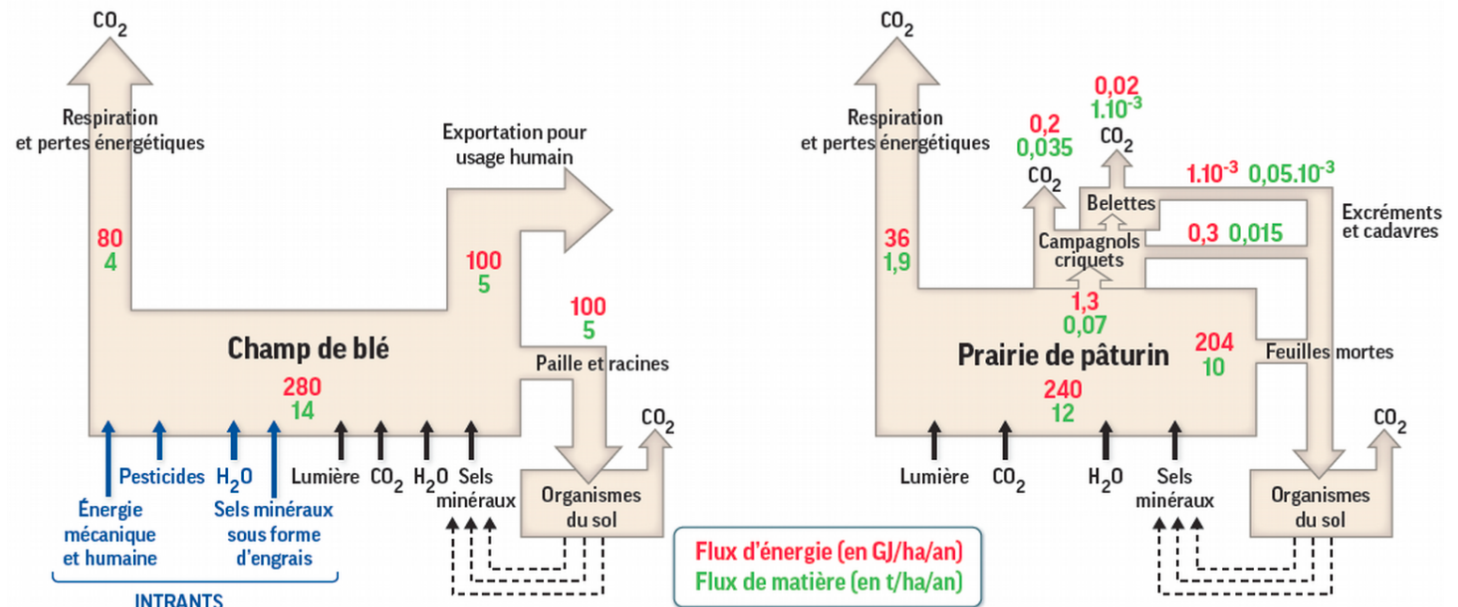
Bovins de race normande paissant sur parcelle (4-5 passages) d'une prairie de type lolieto-Cybnosuretum (Normandie)

D'après Ricou 1978

Comparaison des rendements de Bovins dans deux prairies différentes (Annales de bac D').

**DOC 38 – COMPARAISON DES PYRAMIDES TROPHIQUES ET DES FLUX DE MATIERE DANS UN AGROSYSTEME « CHAMP DE BLE » ET UN ECOSYSTEME « PRAIRIE » EN L'ABSENCE DE PATURAGE**

<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/production-agricole-agrosystemes/structure-et-fonctionnement-des-agrosystemes>



Lors de la formation de biomasse par la photosynthèse, les plantes agricoles captent du carbone dans l'atmosphère (dont une partie sera restituée à l'atmosphère par la respiration), mais elles vont aussi se procurer les autres éléments nécessaires dans le sol : azote (constitution des protéines, des acides nucléiques, de la chlorophylle), phosphore (nucléotides, métabolites divers), soufre (protéines, coenzymes), etc. En conséquence, au moment de la récolte, l'agriculteur en sortant la biomasse de l'agrosystème (pour la vendre ou la consommer) **exporte une partie de la matière que la plante a prélevée dans le sol.**

Il est nécessaire, pour maintenir une nutrition correcte des plantes, de renouveler ces éléments nutritifs, ce que les agriculteurs font depuis toujours par l'**apport d'engrais** (organique ou de synthèse depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle). En allant plus loin que la seule compensation, l'apport d'engrais peut également contribuer à augmenter la production de biomasse. Jusqu'à une limite au-delà de laquelle les excès d'éléments nutritifs ne sont plus utilisés par les plantes (on parle de reliquats) et peuvent quitter la parcelle agricole par infiltration ou ruissellement, générant ainsi des pollutions.

D'autres **flux de matière** sous forme d'**intrants** s'ajoutent aux engrais dans les agrosystèmes :

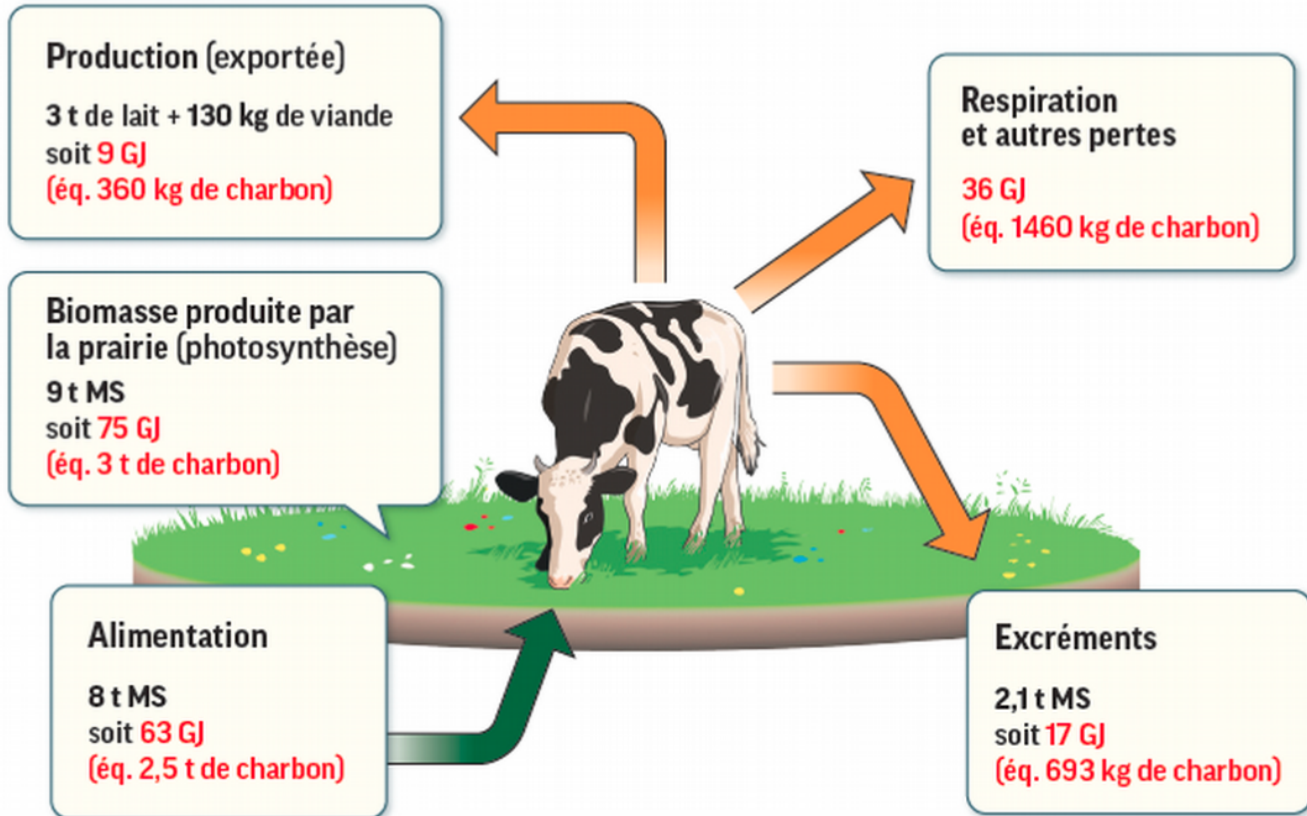
- les **apports en eau** (principalement pour le maïs et les cultures légumières en France métropolitaine) ;
- les **produits phytosanitaires** qui, comparativement à la biomasse produite, représentent de faibles quantités de matière, mais sont employés pour leur effet biocide. Les molécules actives, selon les cas, sont absorbées ou non par la plante et peuvent persister dans les sols ou au contraire y être dégradées.

Concernant les **flux d'énergie**, la principale source reste bien sûr l'**énergie solaire** qui est convertie par les plantes en énergie chimique contenue dans les molécules organiques produites par photosynthèse. Notons, à ce titre, qu'une exportation de biomasse est aussi une exportation d'énergie solaire destinée à devenir une énergie alimentaire. Par ailleurs, le maintien des caractéristiques de l'agrosystème (aussi bien les facteurs physico-chimiques que biotiques) nécessite un **apport constant d'énergie de la part des agriculteurs** (semis, récolte, etc). Cette énergie était autrefois apportée principalement sous forme **musculaire** (humains, animaux de travail), et avait donc une origine alimentaire (donc solaire). Aujourd'hui, l'essentiel de l'énergie est apportée par les **combustibles fossiles** (utilisés par les machines agricoles ou pour le chauffage des serres par exemple) et l'**électricité** (pompes d'irrigation par exemple). Lorsque l'énergie utilisée dans l'agrosystème provient de combustibles fossiles, il s'agit donc toujours d'énergie solaire, mais emmagasinée sous forme d'énergie chimique par la photosynthèse d'organismes ayant vécu il y a des millions d'années. Ces ressources sont limitées car l'utilisation de ces combustibles est plus rapide que leur formation.

**DOC 39 – BILAN ENERGETIQUE D'UN AGROSYSTEME VACHE SUR PRAIRIE**

<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/production-agricole-agrosystemes/structure-et-fonctionnement-des-agrosystemes>

Dans cet exemple, seuls 14 % (9/63 soit un coefficient énergie fournie/énergie produite de 7) de l'énergie ingérée par l'alimentation aboutissent à une production alimentaire (viande ou lait). Remarquons qu'une part importante de l'énergie ingérée, 27 % (17/63) reste dans l'agrosystème et alimente la vie dans le sol. Les valeurs indicatives sont des moyennes annuelles pour une vache laitière de 500 kg abattue à 6 ans, élevée sur un hectare pendant un an, dont la viande représente 36 % du poids vif (MS : matière sèche).



Pour mesurer la performance agronomique d'une activité agricole, le premier critère utilisé est le plus souvent le **rendement agricole**. Celui-ci correspond à une **biomasse produite et récoltée annuellement par unité de surface**. Cette biomasse récoltée ne correspond pas à l'ensemble de la production primaire produite sur la parcelle. En effet, il est rare que les plantes entières soient récoltées, seuls les organes d'intérêt (grains des céréales, tubercules des pommes de terre, etc.) sont collectés et exportés. Subsiste alors au champ le reste de la biomasse produite dans l'année : feuilles, tiges, racines, etc.

L'évaluation de la performance écologique de l'agrosystème peut être réalisée grâce à la notion de **rendement écologique**, c'est-à-dire le **rapport entre l'énergie reçue et l'énergie récoltée**.

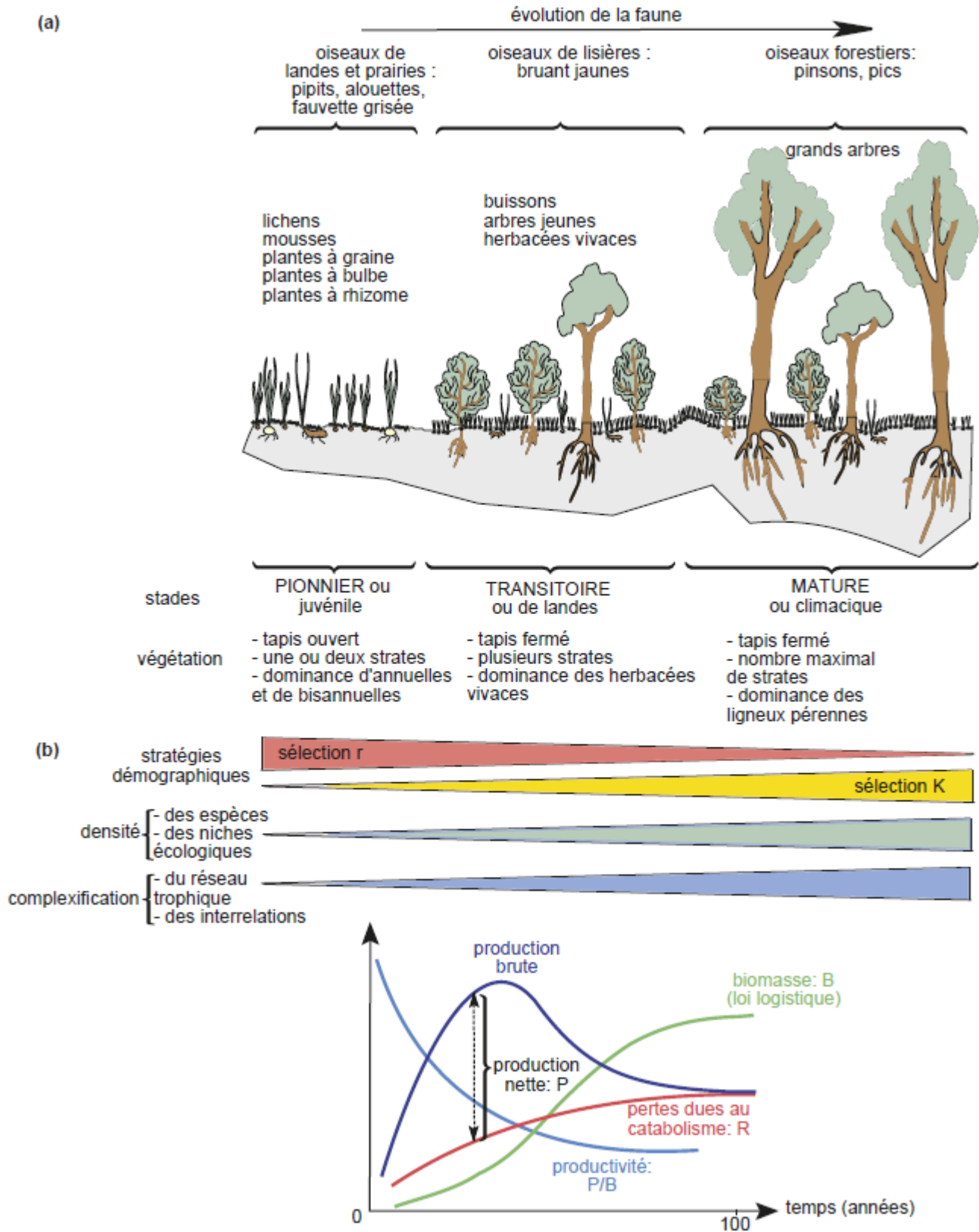
Une parcelle agricole reçoit une énergie solaire d'environ 38 000 GJ/ha/an. Pour la moyenne française, une culture de **blé tendre** à un rendement écologique de 107/38 000 soit **0,28 %**. Ce qui est l'un des rendements écologiques les plus importants parmi les cultures métropolitaines.

Cette notion de rendement écologique peut également être appliquée à l'élevage, les calculs sont alors un peu plus compliqués et nécessitent d'évaluer, sur la durée de vie de l'animal, la quantité d'énergie pouvant être récupérée par les humains sous forme de biomasse. Dans le cas **d'un élevage laitier** cette biomasse alimentaire correspond au lait et à la viande, soit 9 GJ/ha/an. Le rendement écologique est alors de 9/38 000 soit **0,02 %**. On constate un rapport de un à dix par rapport à l'agrosystème « blé tendre » qui s'explique par la position trophique de la vache : il s'agit d'un consommateur primaire qui doit être nourri de biomasse végétale. Il y a alors des pertes (notamment dues à la respiration de l'animal) entre les deux niveaux trophiques.

Ces exemples permettent de chiffrer une notion bien connue : sur une surface donnée, il est possible de produire de plus grandes quantités d'énergie alimentaire sous forme végétale que sous forme animale.

**DOC 40 – EXEMPLE D’UNE SUCCESSION ECOLOGIQUE PROGRESSIVE ET VARIATION DE QUELQUES PARAMETRES ASSOCIES (BIOMASSE, PRODUCTION, ET RESPIRATION)**

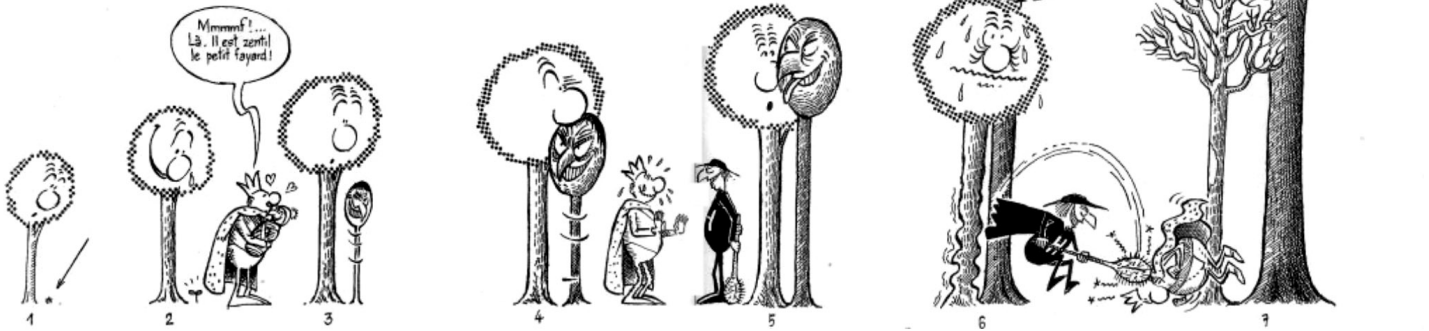
(Perrier et al., 2021)



**DOC 41- FACILITATION ECOLOGIQUE ET COMPETITION INTERSPECIFIQUE DANS LA TRANSITION VERS LA FORET (La hulotte)**

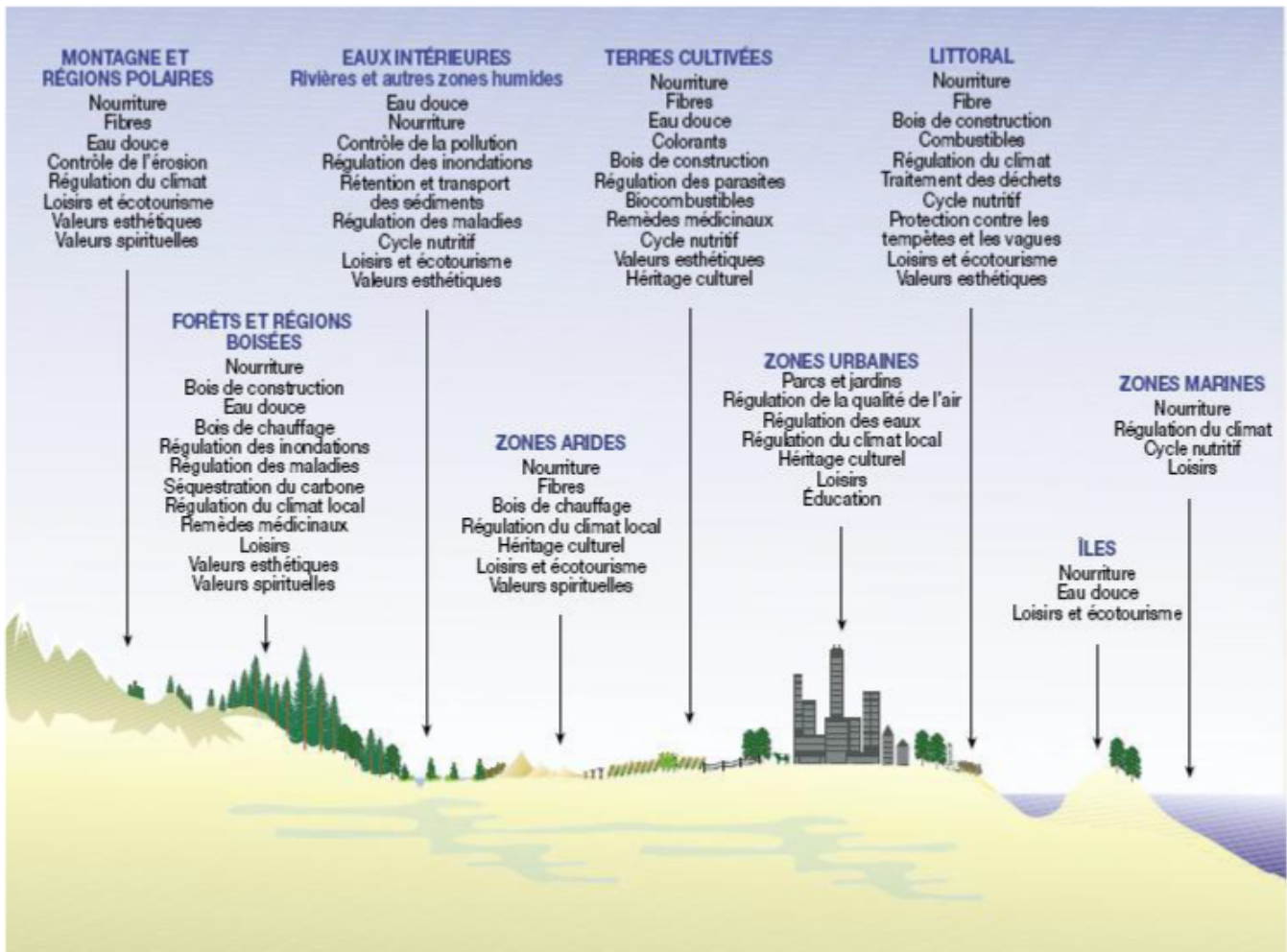
**LA MORT DU CHÊNE, ÉTIOLÉ PAR LE TRAITRE FAYARD** (TRAGÉDIE EN 7 ACTES)

1. Apportée par quelque rongeur : une faîne, le fruit piquant du Hêtre ...
2. Sous l'ombre protectrice du Chêne, le petit Hêtre pousse ...
- 3, 4, 5 ... pousse ... pousse ... pousse ...
6. Le fayard étale largement son parapluie de branches. Et hop! ...
- 7 ... Privé de soleil, le Chêne s'étiolé et meurt.



**DOC 42 - LES ECOSYSTEMES ET LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES**

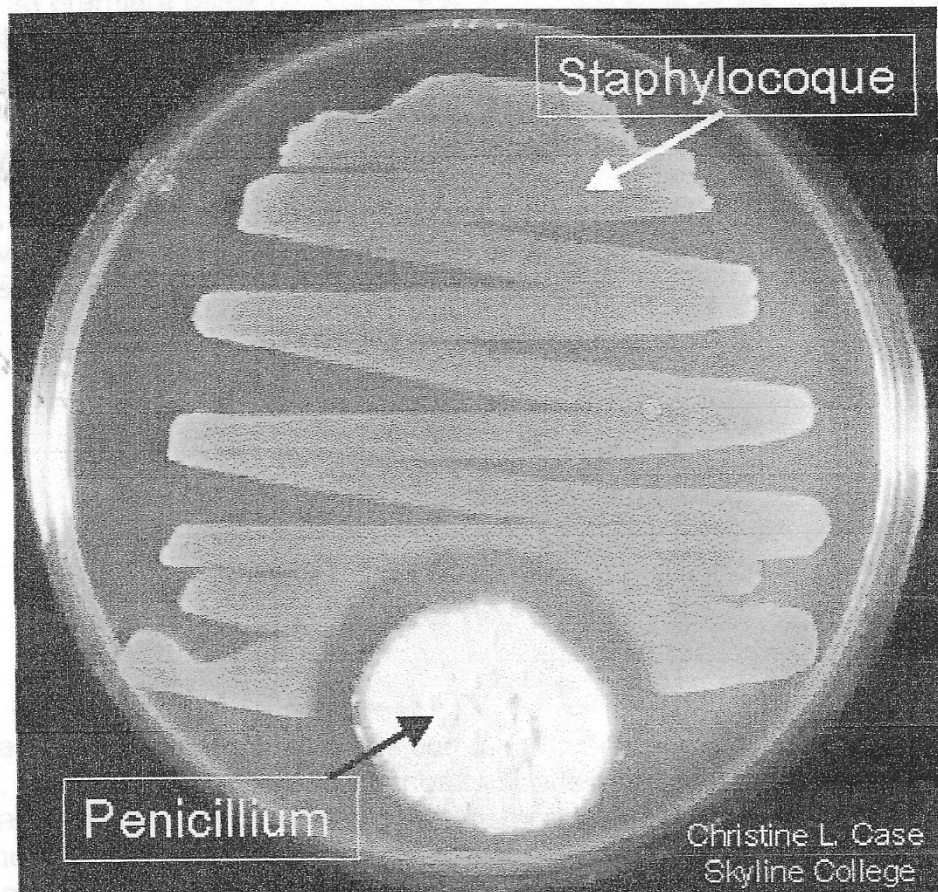
(Les écosystèmes – académie des sciences)



**POUR VOTRE CULTURE SCIENTIFIQUE****La découverte de Fleming****Un hasard !**

En septembre 1928, de retour de vacances, le docteur Alexander Fleming retrouve son laboratoire londonien et ses cultures de staphylocoques. Il a la mauvaise surprise de constater leur contamination par un champignon *Penicillium notatum*, utilisé dans un laboratoire voisin. Ce genre de contamination n'est pas rare, mais avant de se débarrasser des cultures désormais inutilisables, il a le réflexe de les examiner attentivement. Il constate que les staphylocoques ne se développent pas à proximité du champignon, dessinant un « halo » clair.

Il émet alors l'hypothèse que la champignon microscopique synthétise une substance qui bloque le développement de la bactérie et l'appelle « pénicilline ». Fleming publie sa découverte en 1929 et signale les possibilités thérapeutiques, car « la pénicilline utilisée en doses massives n'est ni toxique ni irritante... elle peut constituer, par applications ou en injections, un antiseptique efficace contre les microbes ». Mais la pénicilline est très difficile à purifier et isoler en quantités appréciables et elle est bientôt oubliée. Il faut attendre une dizaine d'années avant qu'elle revienne sur le devant de la scène.

**Une étape de purification longue et difficile**

Au début des années 1940, à l'université d'Oxford, le pharmacologiste Howard Florey et le biochimiste Ernst Chain reprennent les travaux sur la pénicilline. Ils mettent en place une culture à grande échelle d'une souche de *Penicillium notatum* obtenue grâce à Fleming et parviennent ainsi à en isoler une quantité très faible. Le

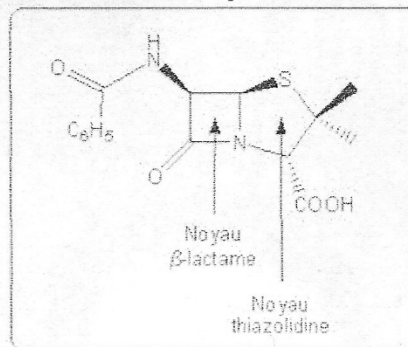
chimiste Edward Abraham est chargé de la purifier. En 1940, les premiers essais in vivo montrent que la pénicilline permet de sauver des souris infectées par des streptocoques. Les essais sur les êtres humains commencent dès 1941 : les résultats sont spectaculaires, des infections auparavant potentiellement mortelles sont guéries en quelques semaines grâce à la pénicilline. Elle acquiert très vite le statut de « médicament miraculeux », mais les stocks sont quasiment inexistantes en raison des grandes difficultés d'obtention. En effet, d'une part *Penicillium notatum* ne produit qu'une quantité faible de pénicilline et uniquement dans un milieu riche en oxygène. Cela impose d'utiliser des cultures en surface, beaucoup plus difficiles que les cultures en cuve. D'autre part, la pénicilline est très instable, en particulier aux pH faibles et élevés, ce qui rend son extraction et sa purification extrêmement difficile. La pureté de la pénicilline utilisée dans les premiers essais in vivo a été rétrospectivement évaluée de l'ordre de 1% !

A partir de 1942, les grandes firmes pharmaceutiques américaines (Merck, Pfizer...) sont associées au projet dans le but de permettre un changement d'échelle de la production. La pénicilline est alors considérée comme une substance stratégique par les pouvoirs publics américains et sa production devient un effort de guerre : les quantités obtenues sont prioritairement allouées aux forces armées. En 1944, Pfizer inaugure sa première usine de production de la pénicilline et les soldats alliés disposent de pénicilline le jour du débarquement en Normandie. Dès 1945, la production est suffisante pour que les restrictions sur sa distribution soient levées; elle est bientôt disponible dans toutes les pharmacies du pays.

### Et un prix Nobel en 1945

Fleming, Florey et Chain recevront le prix Nobel de physiologie-médecine pour « la découverte de la pénicilline et ses effets curatifs de nombreuses maladies infectieuses » en 1945.

### Structure de la pénicilline G .



Des maladies bactériennes mortelles comme la tuberculose, la pneumonie, la diphtérie, la syphilis ou encore le tétanos contre lesquelles il n'existait aucun remède il y a 60 ans peuvent désormais être traitées grâce aux antibiotiques. On considère aujourd'hui que **leur utilisation thérapeutique a permis d'allonger la durée moyenne de la vie humaine d'une dizaine d'année**. Toutefois, on constate partout une augmentation de **l'antibiorésistance des bactéries**, c'est à dire de leur capacité à résister aux antibiotiques. La lutte contre l'antibiorésistance passe bien sûr par la recherche de nouveaux antibiotiques, mais elle commence surtout par une utilisation plus raisonnée des antibiotiques disponibles, au risque de se retrouver dans dix ou vingt ans aussi démunis qu'au début du vingtième siècle contre les maladies infectieuses.