

# Peuplement et ressources

- Nutrition carbonée d'un peuplement végétal
- Alimentation hydrique d'un peuplement
- Peuplement végétal cultivé et nutrition minérale
- Le partage des ressources au sein d'un peuplement

# Peuplement et ressources

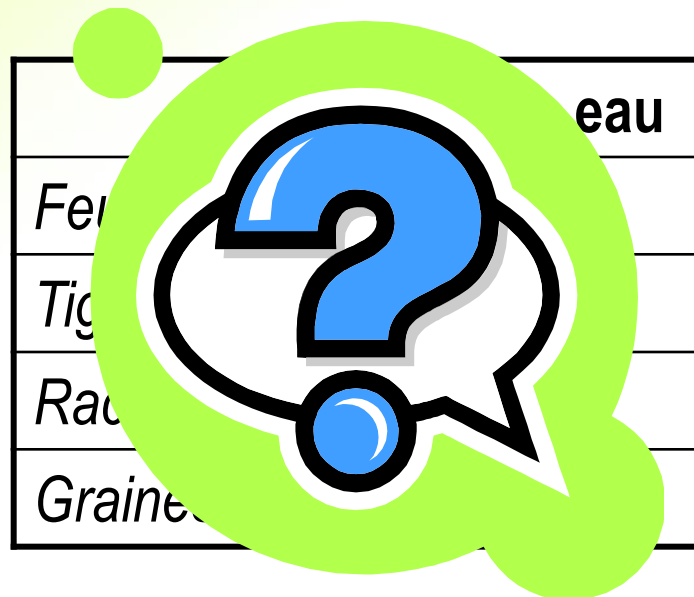
- Nutrition carbonée d'un peuplement végétal
- Alimentation hydrique d'un peuplement
  - L'eau dans le complexe sol-plante-atmosphère
  - Les régulations des transferts d'eau
  - Évaluer la contrainte hydrique d'un peuplement
  - Gérer la contrainte hydrique de la culture
- Peuplement végétal cultivé et nutrition minérale
- Le partage des ressources au sein d'un peuplement

A close-up photograph of a single, clear water droplet hanging from the edge of a light green leaf. The background is a soft, out-of-focus green, suggesting a natural, outdoor setting. The lighting is bright, highlighting the droplet's surface and the leaf's texture.

# L'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère

# Alimentation hydrique

## Principales fonctions de l'eau ?





## Etat de l'eau dans le continuum S-P-A

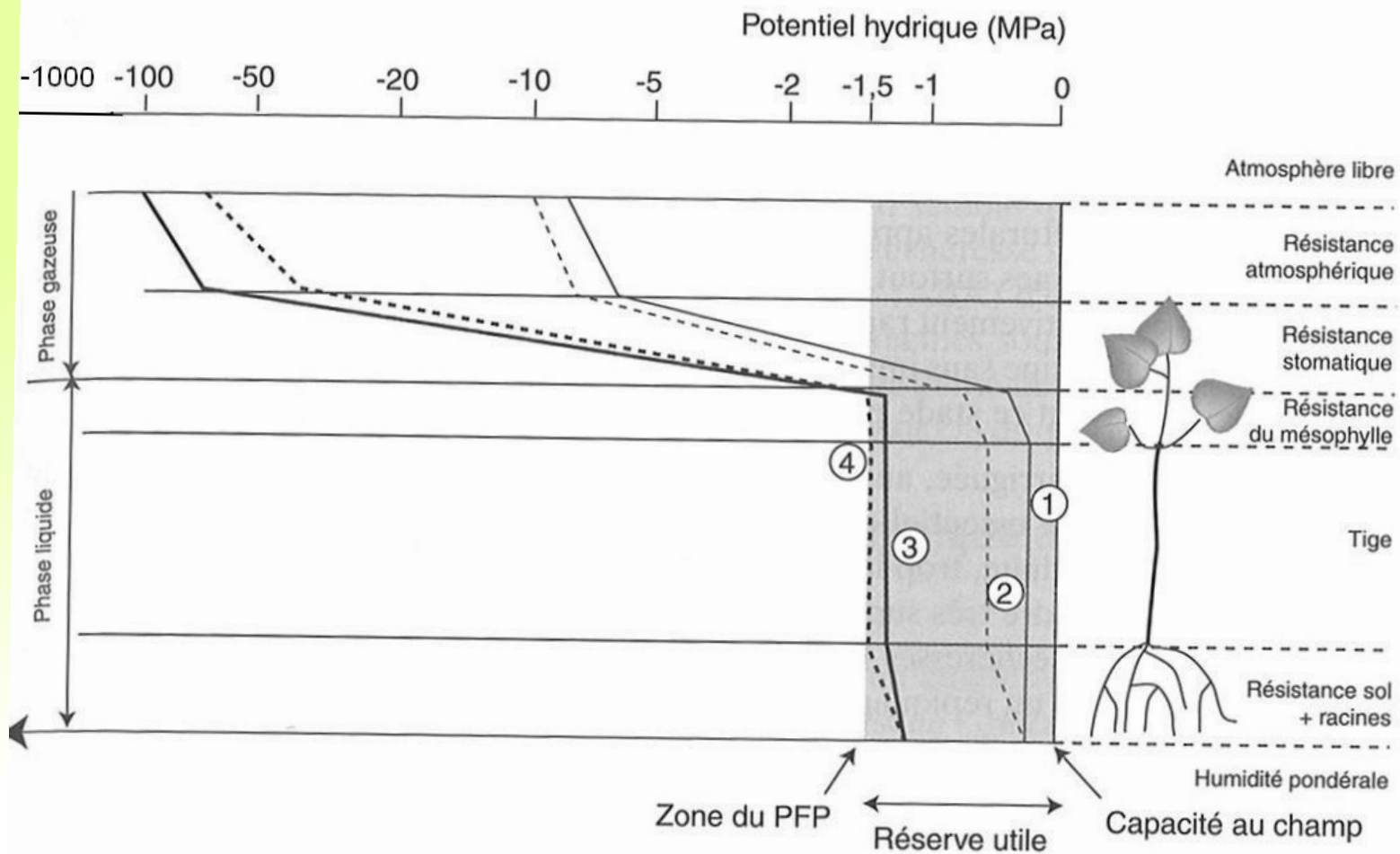
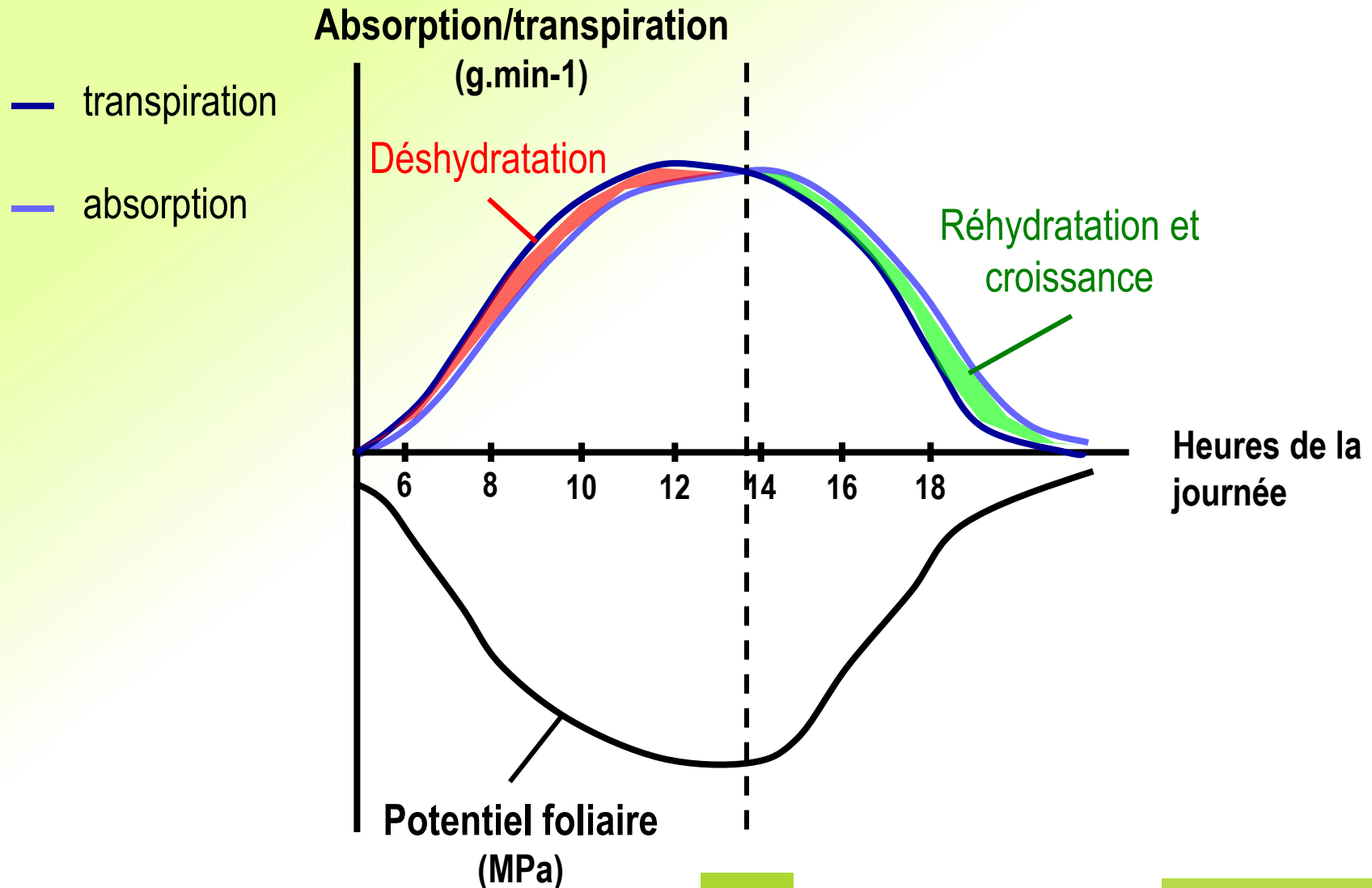


Schéma des phénomènes hydriques dans le CSPA. Sol humide, évaporation faible (1), évaporation forte (2). Sol sec, évaporation faible (3), évaporation forte (4) (d'après Guyot, 1997).

# Alimentation hydrique

## Variation de volume au cours de la journée



## Cas d'un couvert :

- Racines puisent de l'eau → vers feuilles : contact avec atmosphère et vaporisation via les stomates
- Régulation de l'eau par ouverture et fermeture des stomates :
  - Ouverture : plante comme une nappe d'eau
  - Fermeture : 0 transpiration

**DONC** : relation eau-sol-atmosphère est gouvernée par des considérations énergétiques



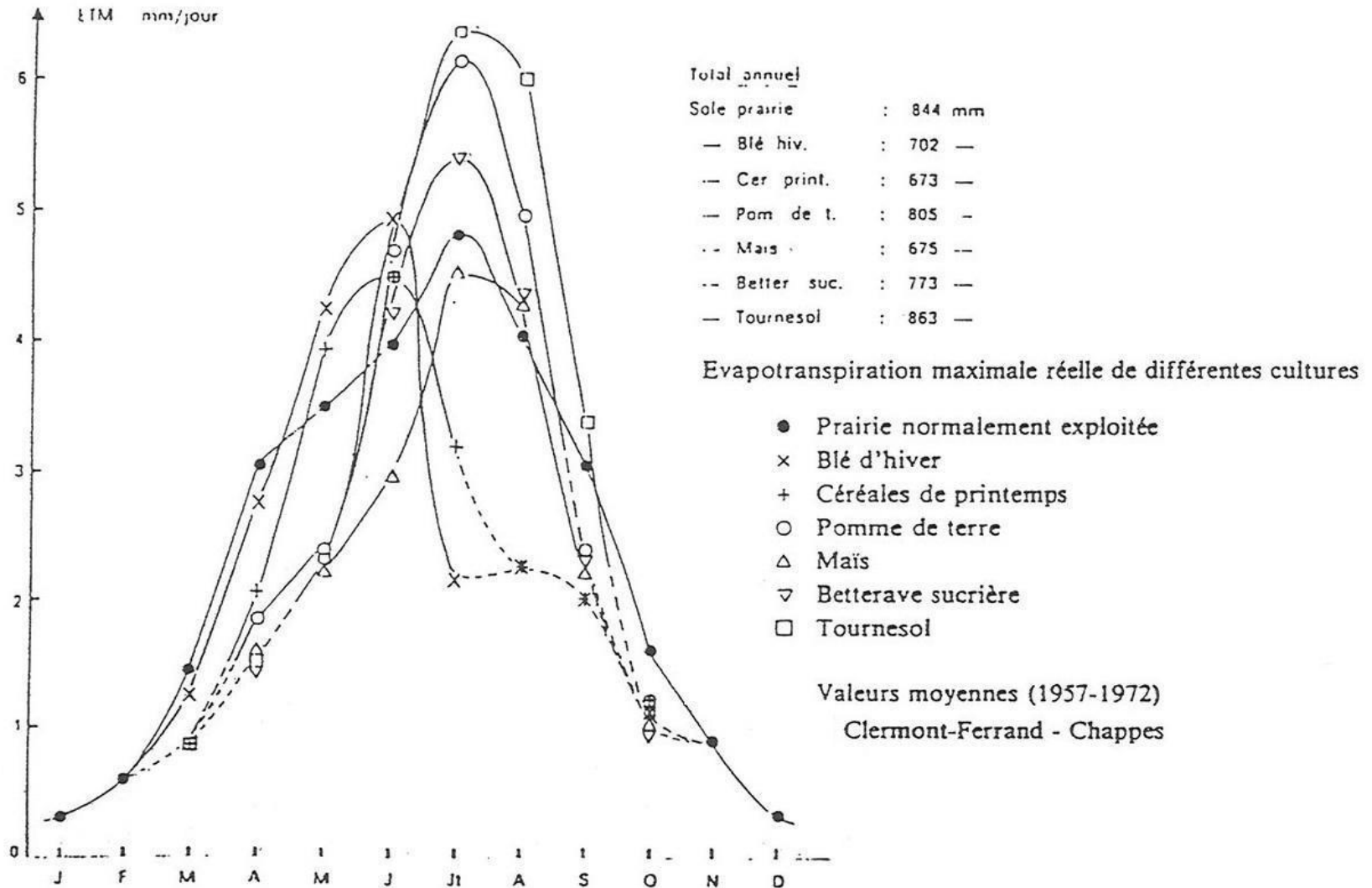
## Notions clés

- **ETP** EvapoTranspiration Potentielle (formule de Penman)
  - Prise en compte des régulations des végétaux => couvert idéal
  - Dépend de conditions météorologiques (rayonnement, vitesse du vent, humidité de l'air et température de l'air) = **demande** climatique
- **ETM** EvapoTranspiration Maximum (eau non limitante)
  - Dépend culture considérée, stade phénologique (degré de croissance et de développement du couvert ), conditions météorologiques
  - => couvert en conditions réelles mais sans limitation en eau
- **ETR** EvapoTranspiration Réelle
  - Dépend de ETM + capacité du sol à fournir l'eau nécessaire
  - => couvert en conditions réelles avec limitation en eau
  - ➔ Niveau de satisfaction des besoins en eau =  $ETR/ETM$
- **Q max** Débit maximum dépend morphologie, âge, racines et eau dans le sol



# Alimentation hydrique

## Importance du positionnement du cycle

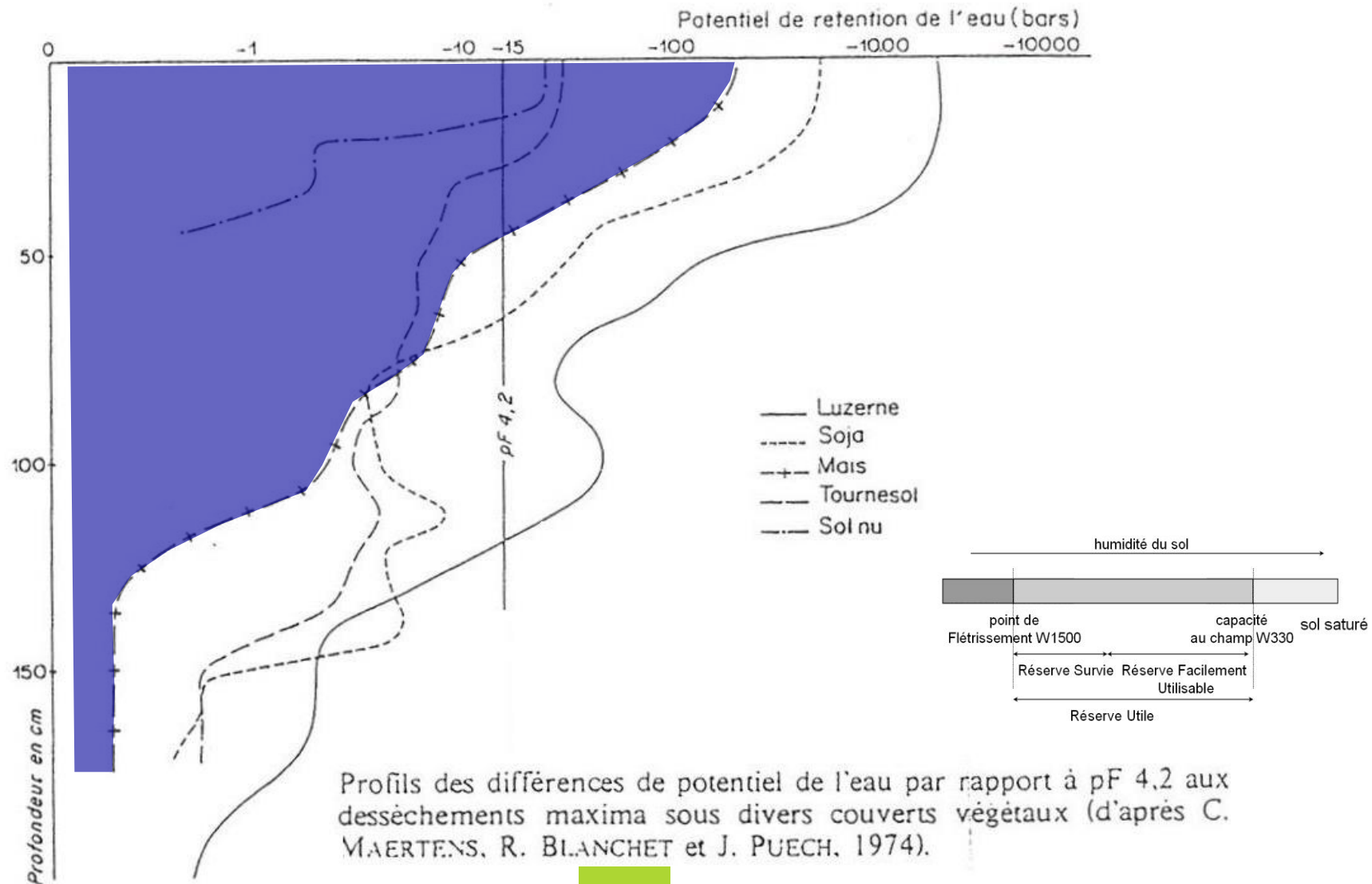


## Notion d'eau transpirable par la plante

- **TTSW** : Total Transpirable Soil Water
  - Elle dépend de : texture, porosité, propriétés hydrodynamiques du sol, profondeur d'enracinement
  - **Et des densités racinaires pour chaque horizon !**

# Alimentation hydrique

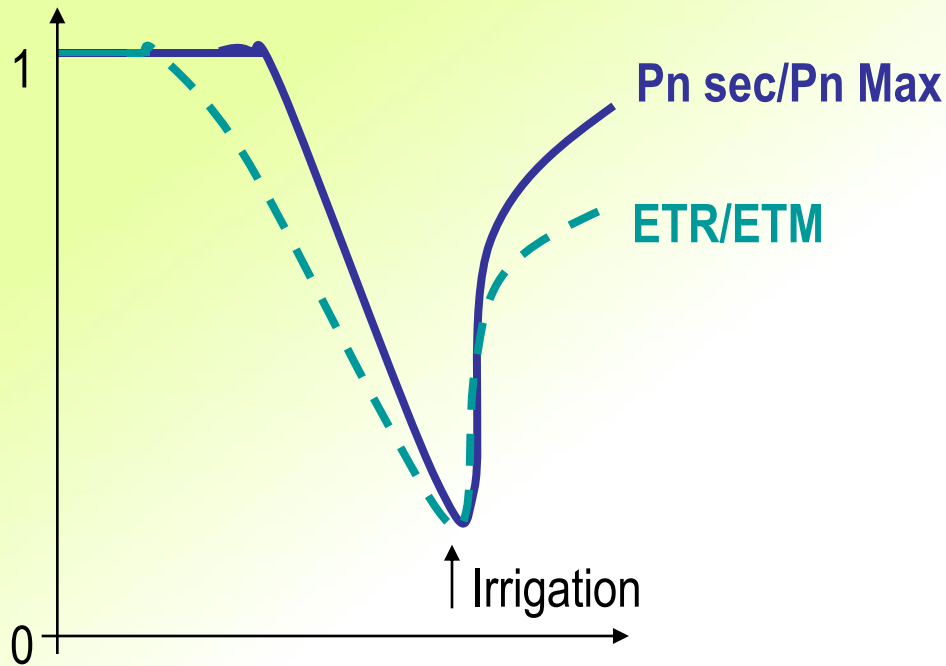
## Stock d'eau transpirable par la plante



# Les régulations des transferts d'eau

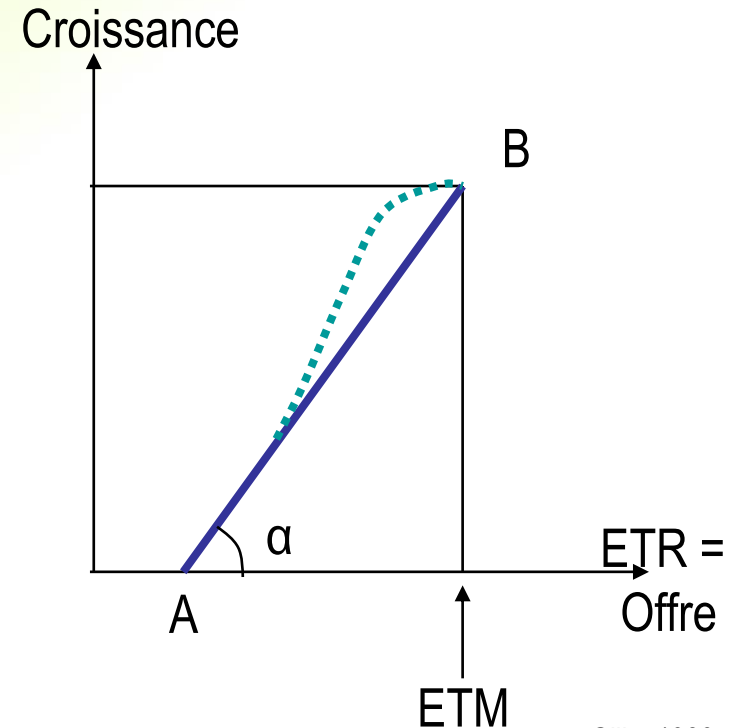


### Stress hydrique et croissance



Robelin 1979 Temps en jours

**Variation relative de la photosynthèse  
et de la transpiration**

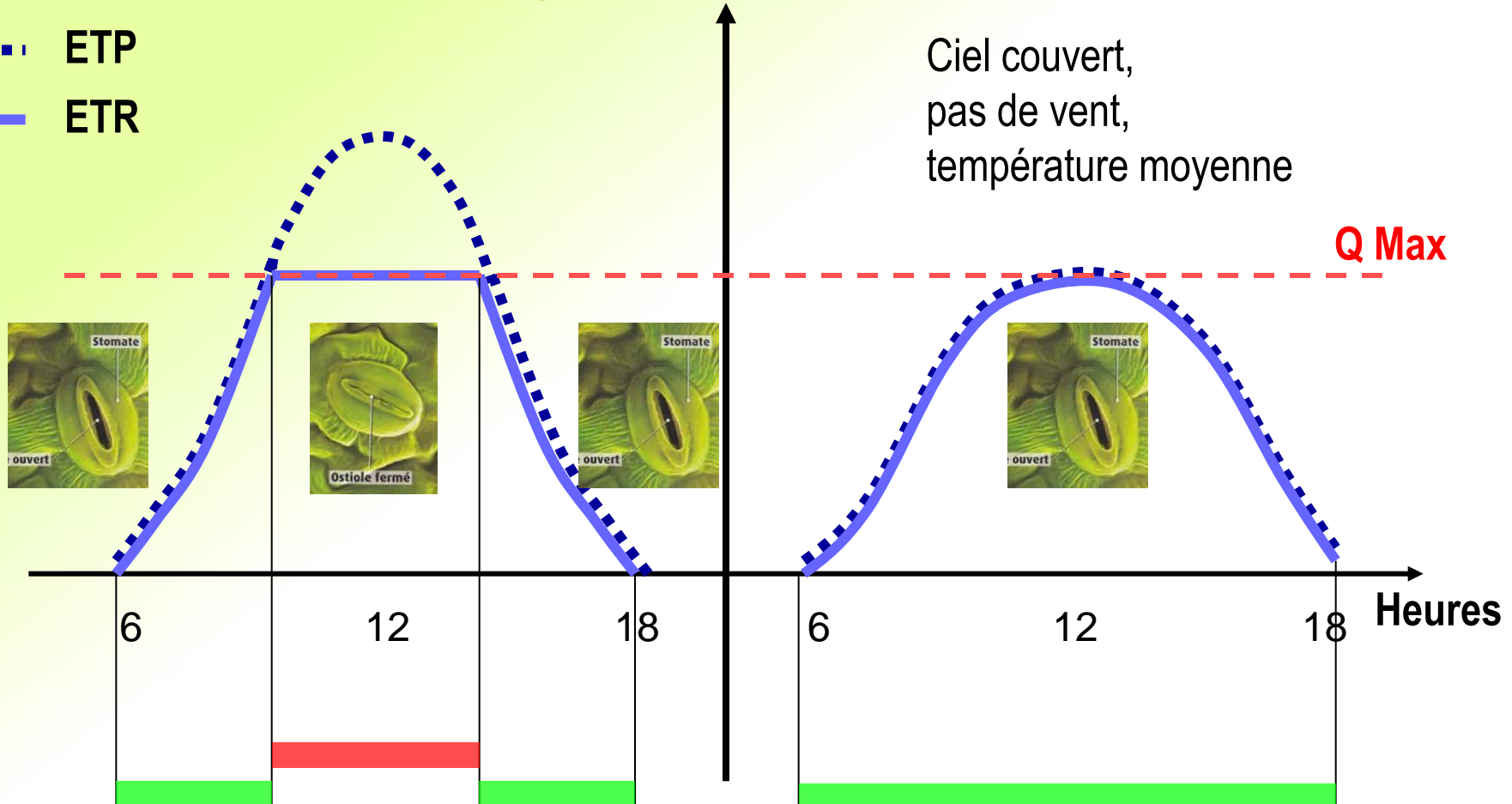


Gillet 1980

**Influence de l'offre  
sur la croissance**

### La demande climatique varie

... ETP  
— ETR

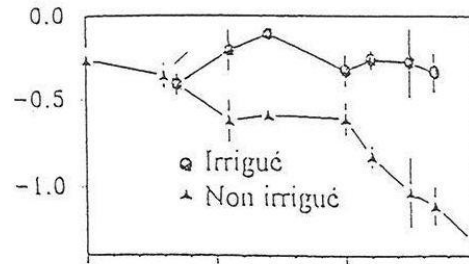


■ Fermeture des stomates  
■ Travail actif, stomates ouverts

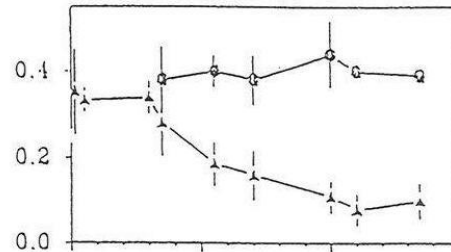


### Régulation stomatique de transpiration

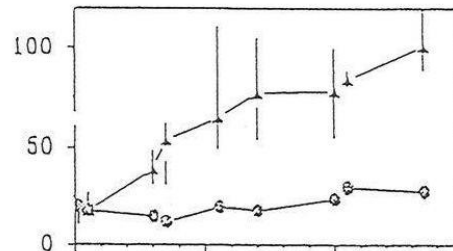
Potentiel hydrique  
du sol  
MPa



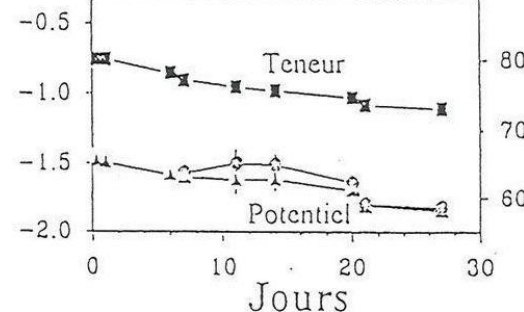
Conductance  
stomatique  
 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$



Concentration en  
ABA du xylème  
 $\text{mol m}^{-3}$



Potentiel hydrique  
foliaire et teneur en  
eau relative. de la  
feuille MPa



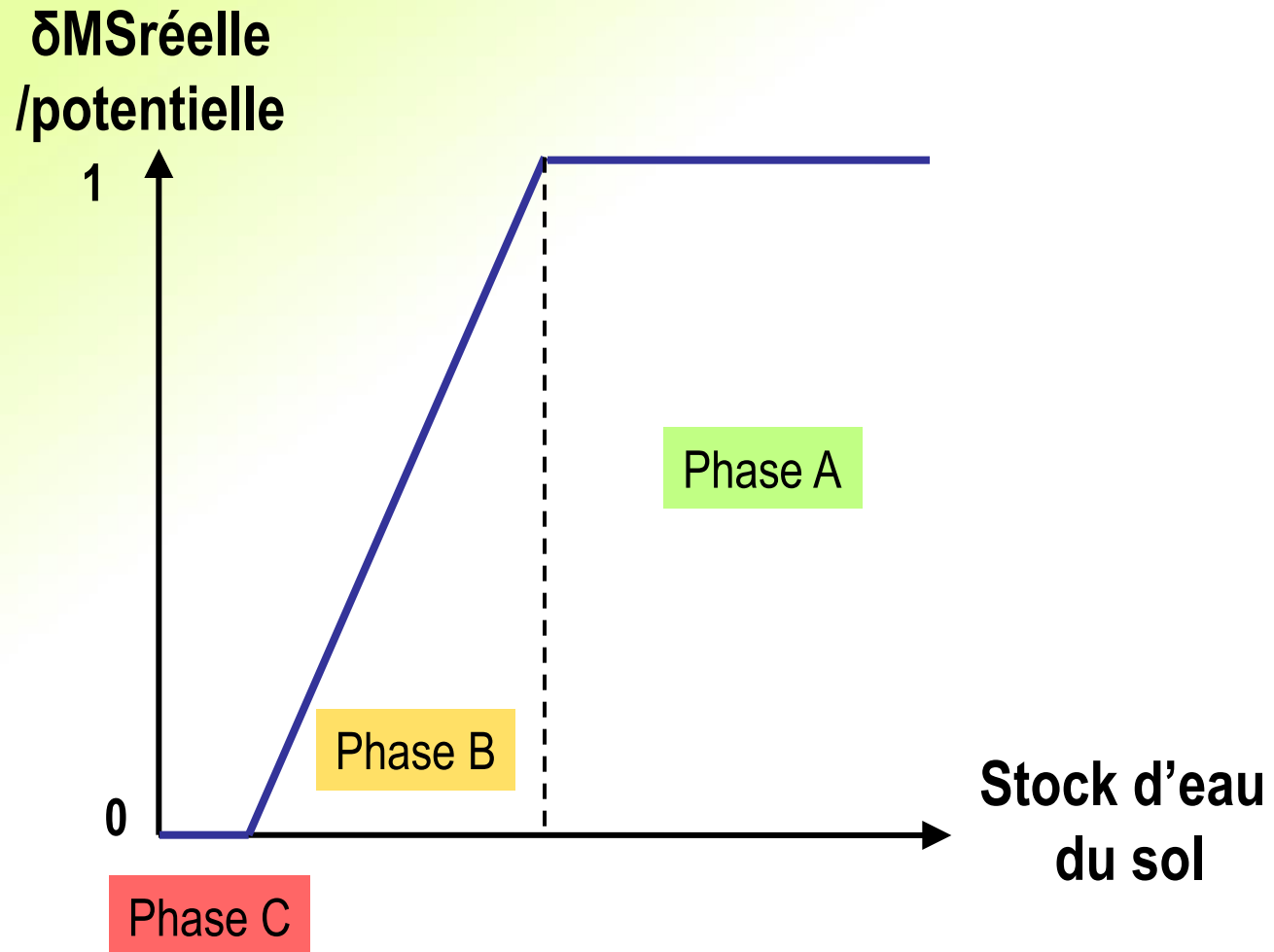
L'assèchement du sol induit  
une diminution du potentiel du  
sol

La régulation stomatique est  
rapidement mise en place

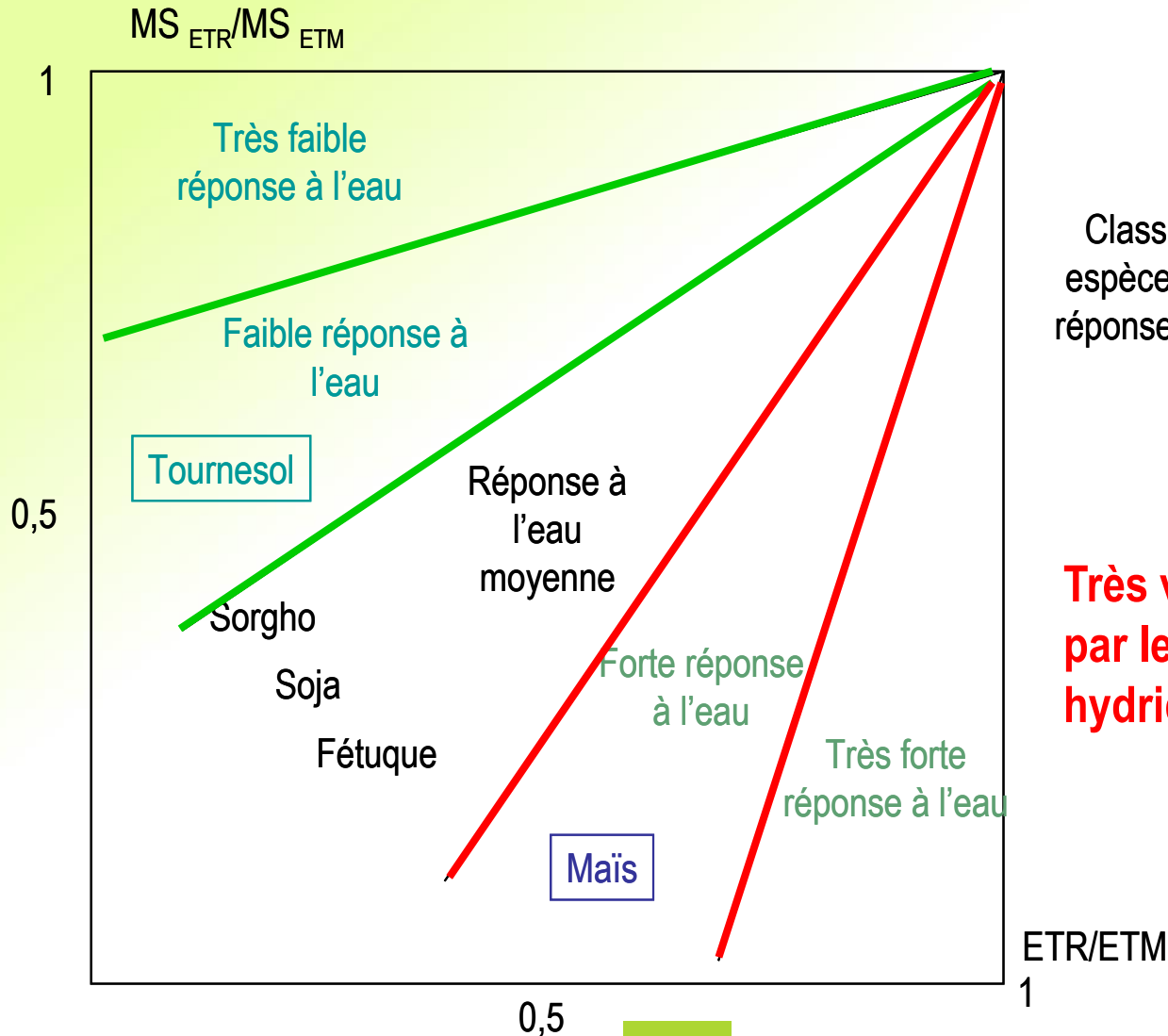
L'ABA est le premier signal  
de stress

L'assèchement de la feuille  
est évité autant que possible

### Fonction de stress



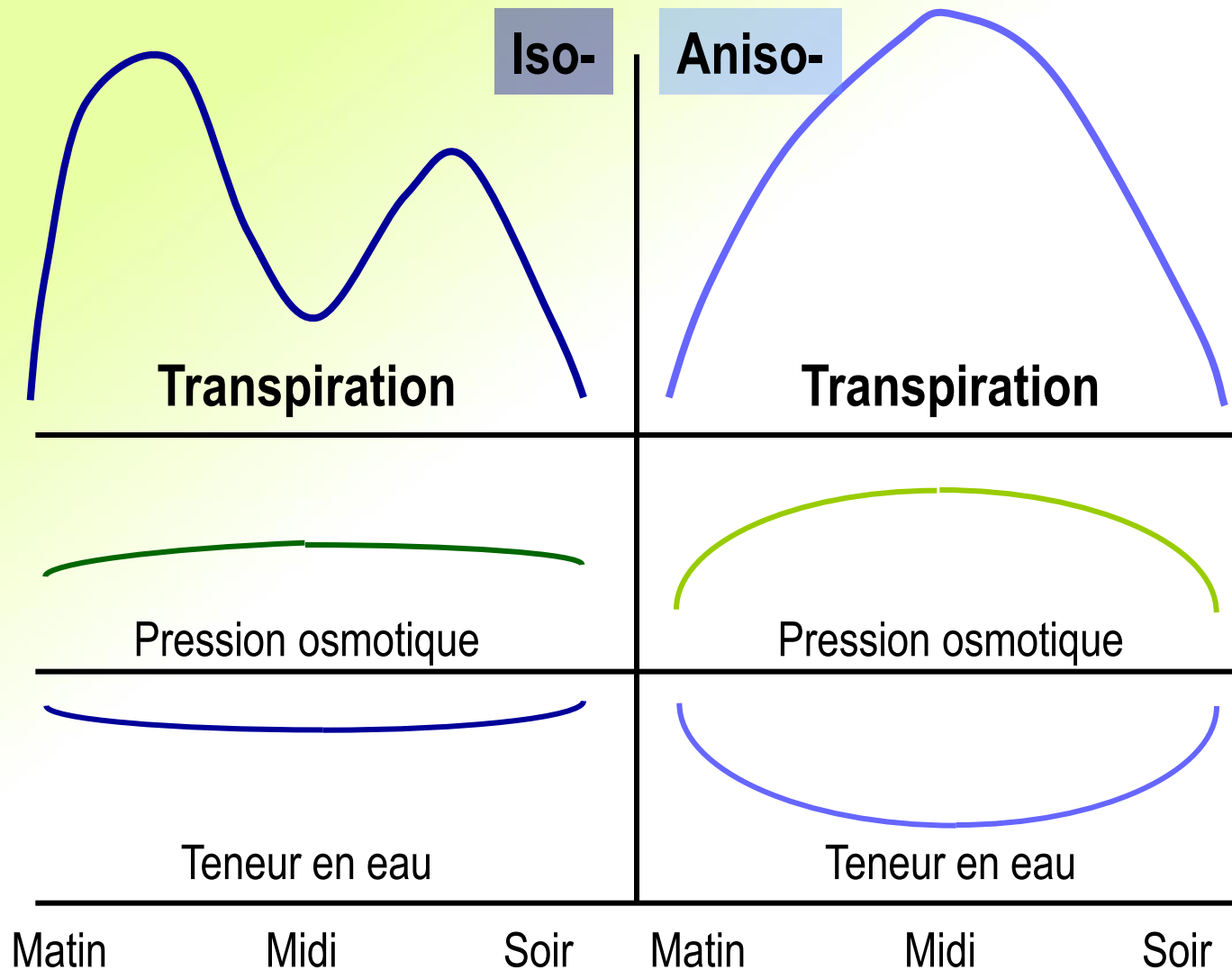
## Valorisation de l'eau



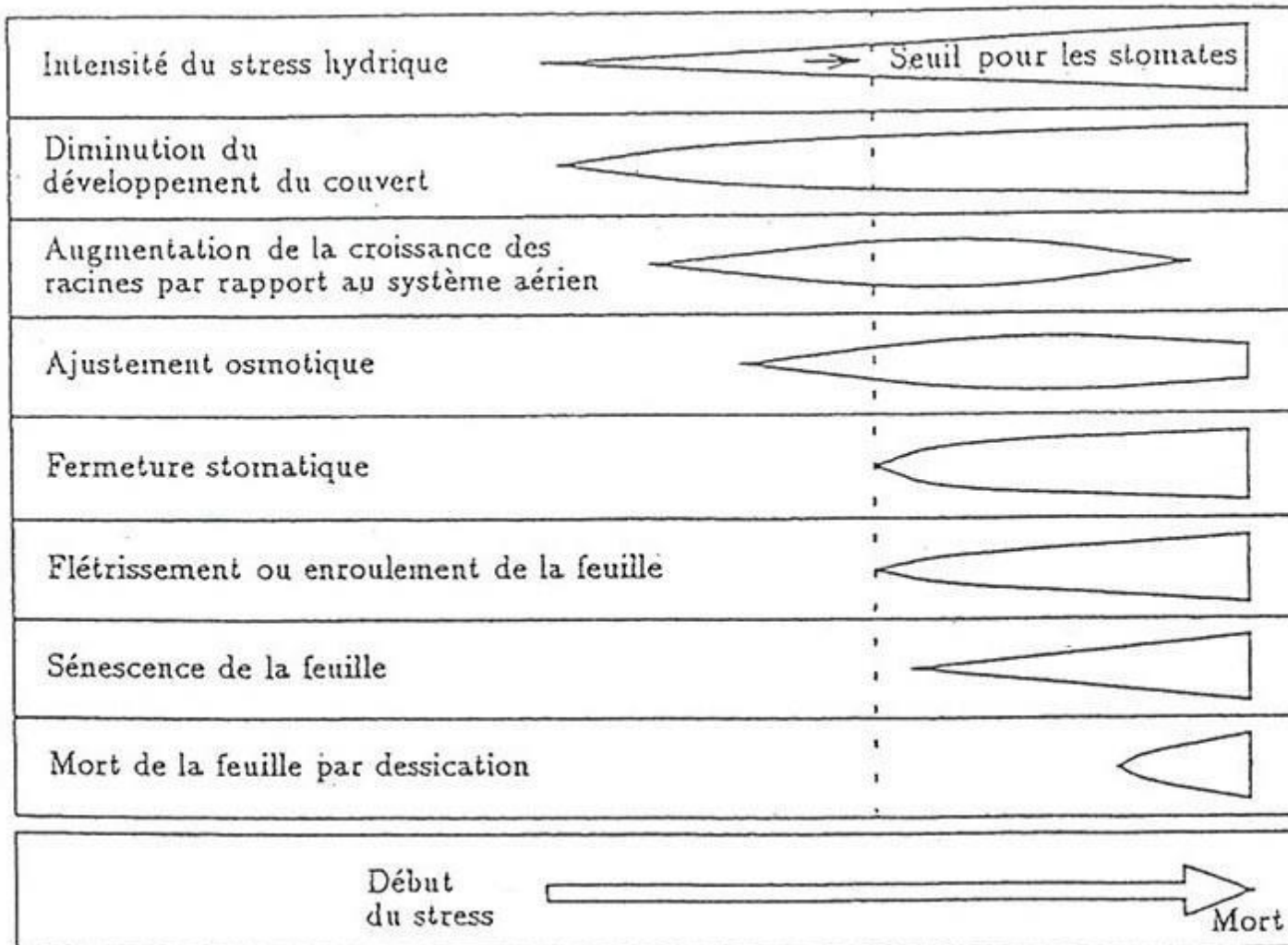
Classement des espèces selon leur réponse à l'irrigation

**Très vite affectées par le stress hydrique**

### Plantes iso et aniso-hydriques



### Les étapes de la régulation





The image shows a wide expanse of a golden wheat field. The foreground is filled with detailed stalks of wheat, their heads heavy and ripe. The field stretches to a flat horizon line. Above the horizon, the sky is a clear, vibrant blue, populated with soft, white cumulus clouds. A semi-transparent white banner is positioned horizontally across the middle of the image, containing the text 'Evaluer la contrainte hydrique' in a black, sans-serif font.

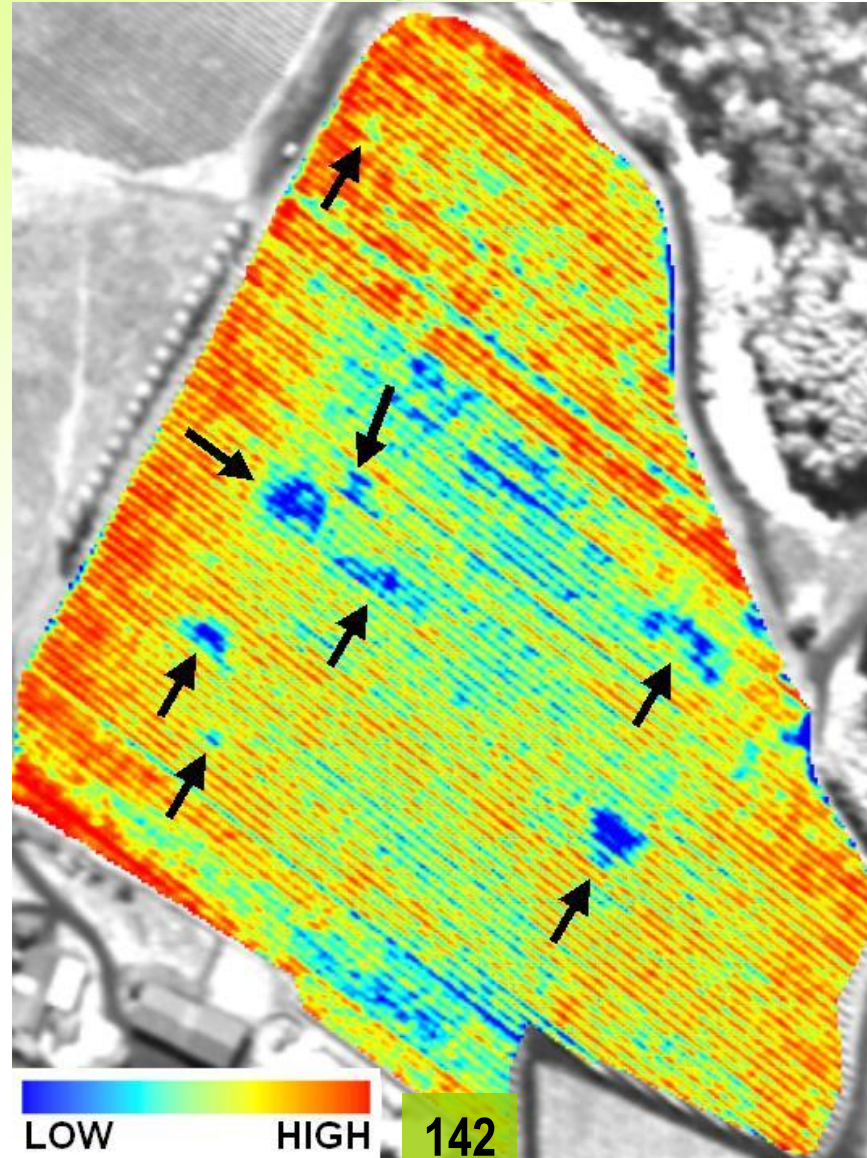
# Evaluer la contrainte hydrique



### Différents indicateurs

- Indicateurs directs d'état hydrique de la plante :
  - Teneur en eau des feuilles (peu pratique)
  - Potentiel hydrique foliaire (de base, de tige...)
- Indicateurs indirects d'état hydrique de la plante :
  - Conductance/résistance stomatique
  - Température foliaire (radiothermométrie)
  - Diamètre de tronc
  - Transpiration réelle (flux de sève, lysimètre...)
- Indicateurs des conditions d'alimentation de la plante
  - Bilan hydrique du sol
  - Potentiel hydrique du sol (tensiomètres)
  - ...


## Mesure des émissions IR par satellite



- Gestion de l'irrigation se fait souvent grâce à :
  - Un suivi tensiométrique (watermarks...)
  - Un bilan hydrique





The background image is a tropical scene. The top half shows a dense line of palm trees against a bright, slightly cloudy sky. The bottom half shows a body of water, likely a pond or a slow-moving river, which reflects the palm trees and the sky. The water is calm, with some small ripples and reflections of the surrounding greenery.

# Gérer la contrainte hydrique d'une culture

### Optimiser l'efficacité d'utilisation de l'eau

- Efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) : masse d'eau consommée par les plantes (ETR) / matière sèche produite
  - Dépend (un peu) des caractéristiques de l'espèce (résistance aux transferts de CO<sub>2</sub>)
  - Dépend du stade de développement de la culture (évaporation)
  - Dépend surtout des conditions de milieu



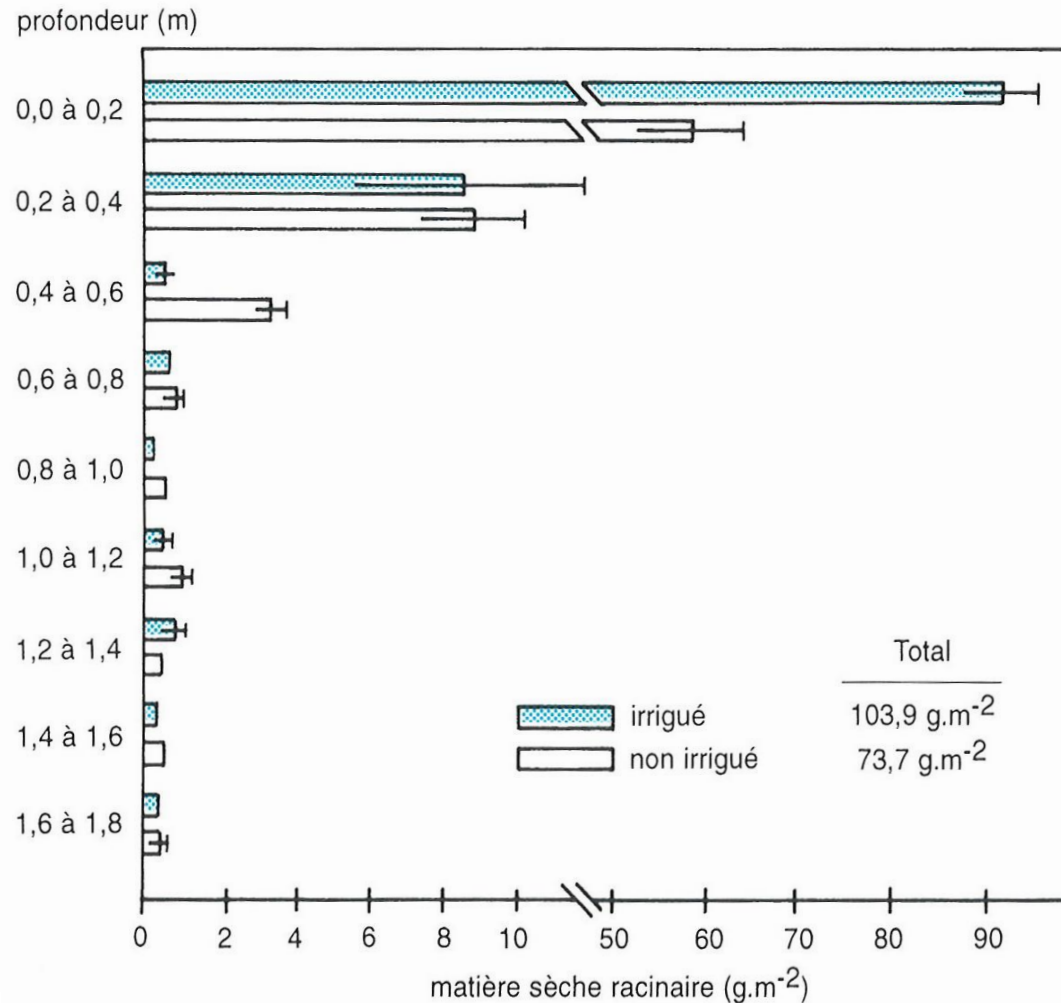


### Optimiser le rapport entre offre et demande

- Augmenter l'offre ( $Q_{max}$ ) :
  - Améliorer l'enracinement (travail du sol, implantation, drainage)
  - Irriguer (attention à ne pas aller contre l'enracinement !)



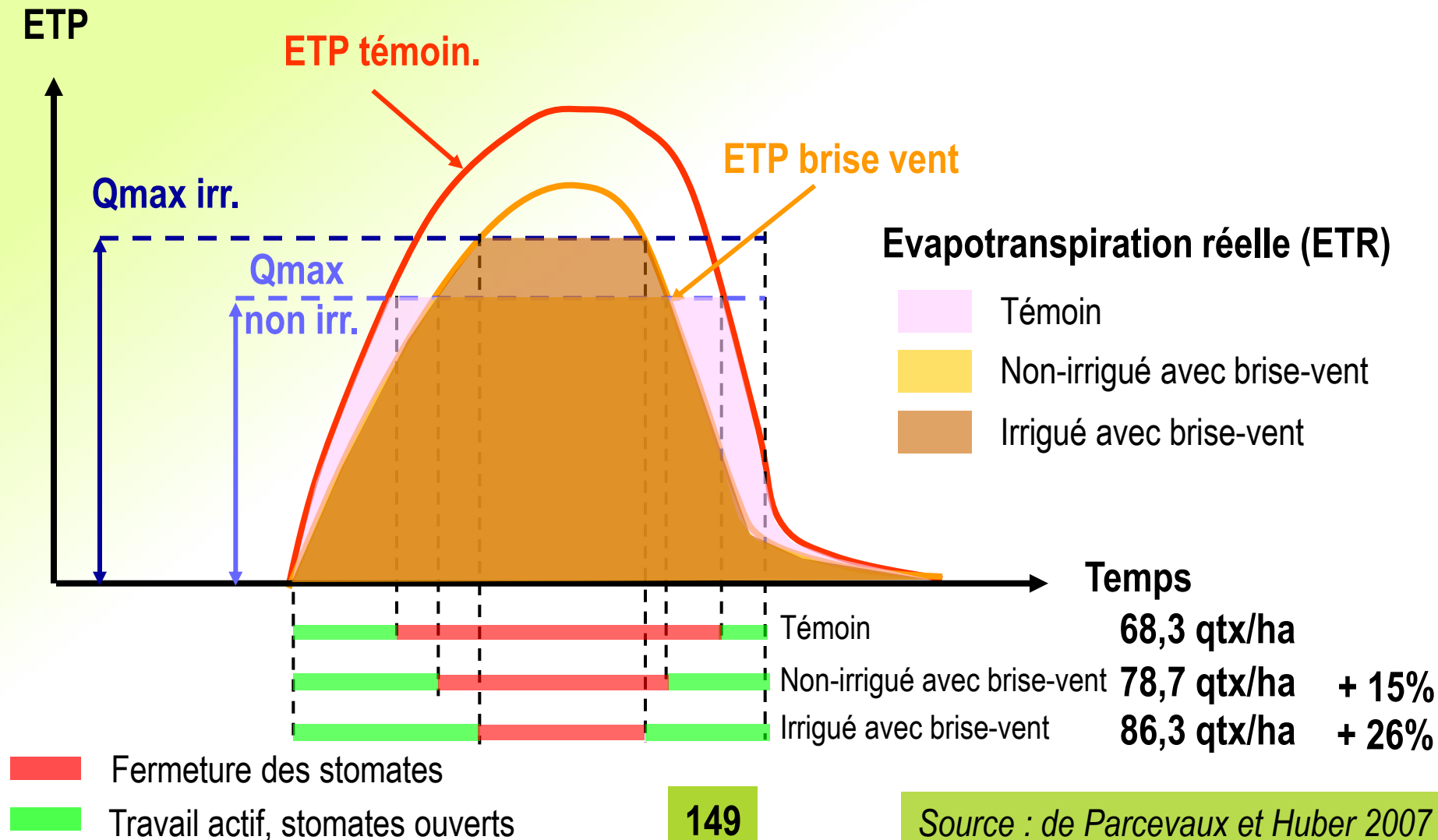




## Optimiser le rapport entre offre et demande

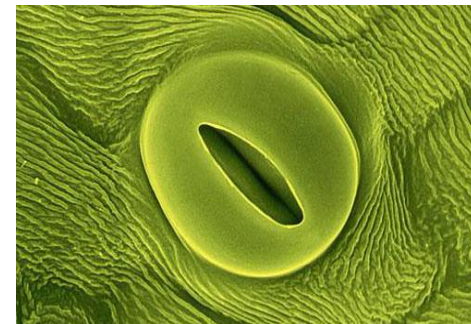
- Augmenter l'offre ( $Q_{max}$ ) :
  - Améliorer l'enracinement (travail du sol, implantation, drainage)
  - Irriguer (attention à ne pas aller contre l'enracinement !)
  - Limiter l'évaporation du sol (mulch, travail superficiel)
- Optimiser la demande :
  - Décaler le cycle de croissance
  - Réduire le rayonnement incident en milieu de journée
  - Réduire le vent (haies)
  - Diminuer la surface foliaire

## Optimiser le rapport entre offre et demande



## Stratégies naturelles d'adaptation

- L'esquive :
  - Réalisation du cycle en dehors des périodes arides
  - Cycles plus courts
- L'évitement (de la déshydratation) :
  - Éviter les pertes d'eau (épines, sénescence et abscission précoce des feuilles, renforcement cuticule, métabolisme CAM...)
  - Augmenter l'absorption (croissance racinaire augmentée, ramification, amélioration de la conductance stomatique, évitement cavitation...)
- La tolérance (à la déshydratation) :
  - Ajustement osmotique
  - Dormance...



## Optimiser le rapport entre offre et demande

- Améliorer la résistance à la sécheresse :
  - Choix des cultures
  - Sélection variétale
  - OGM?



# Peuplement et ressources

- Nutrition carbonée d'un peuplement végétal
- Alimentation hydrique d'un peuplement
- Peuplement végétal cultivé et nutrition minérale
- Le partage des ressources au sein d'un peuplement



# Peuplement et ressources

- Nutrition carbonée d'un peuplement végétal
- Alimentation hydrique d'un peuplement
- Peuplement végétal cultivé et nutrition minérale
  - Les éléments minéraux dans le peuplement
  - Les transferts sol-plante
  - Gérer la fertilisation de la culture
- Le partage des ressources au sein d'un peuplement





# Les éléments minéraux dans le peuplement

# Les éléments minéraux

## Rôle des éléments minéraux



- Constituants de base des tissus (C, O, H, N, P) :
  - Éléments constitutants de la matière sèche
  - Rq : d'autres éléments jouent également ce rôle
- Ions pour le maintien d'un équilibre du milieu interne (Ca, Mg, K, Na) :
  - Maintien de la pression osmotique
  - Maintien de l'équilibre électrique
- Rôle de catalyseurs à certaines réactions (oligo-éléments)

# Les éléments minéraux

## Absorption des minéraux par le peuplement

Deux voies d'absorption :

- La voie aérienne :
  - Carbone, oxygène (photosynthèse)
  - Autres éléments sous forme gazeuse (ex. SO<sub>2</sub>)
- La voie racinaire :
  - Voie principale d'absorption minérale
  - Généralement sous forme dissoute dans la solution de sol (liée à l'alimentation hydrique !)



# Les éléments minéraux

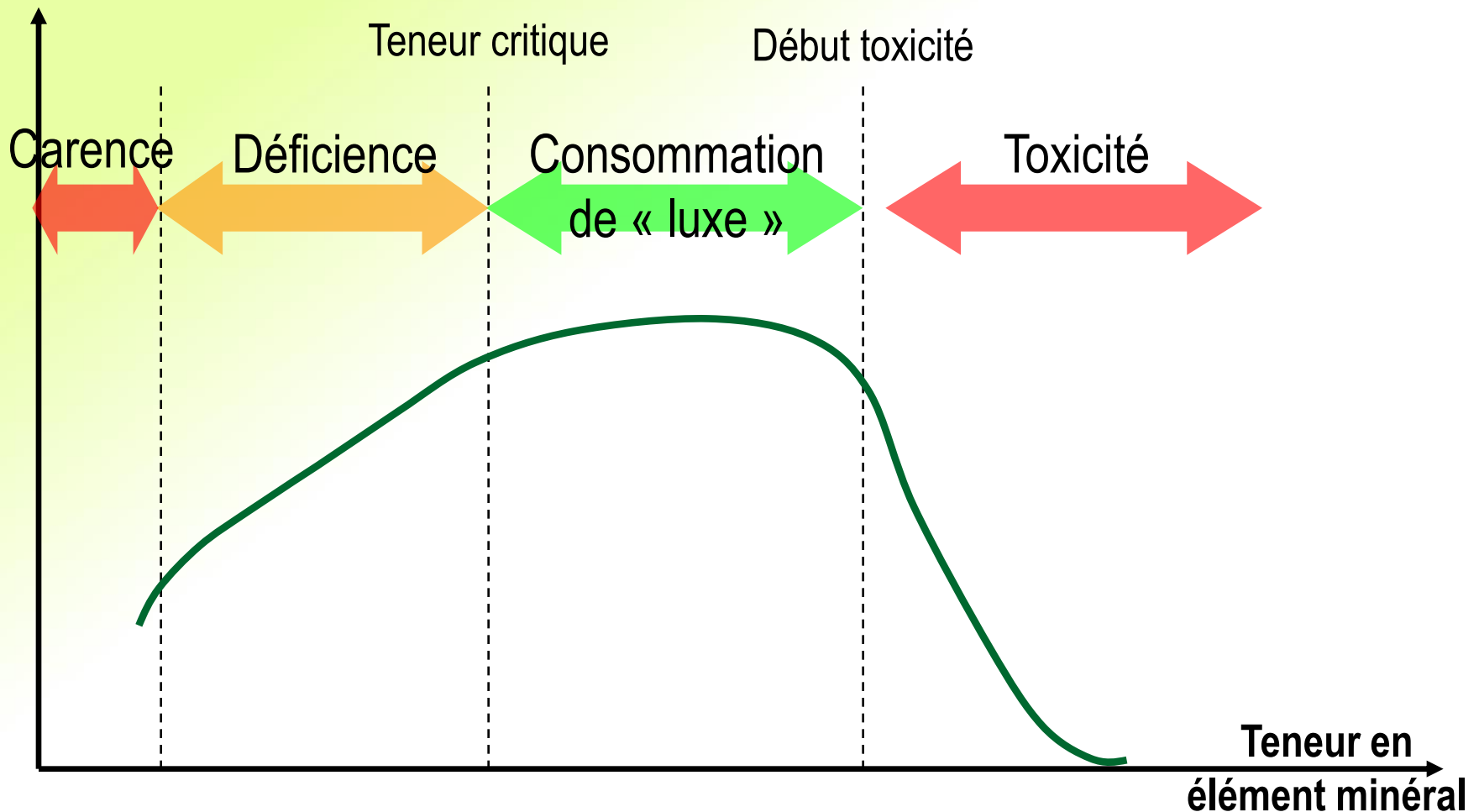
## Composition de la plante

- La composition de la plante varie fortement en fonction de :
  - L'espèce
  - L'âge et la nature de l'organe
  - La conduite de la culture (notamment la fertilisation)

# Les éléments minéraux

## Lien entre composition et production

**Croissance**



# Les éléments minéraux

## Un peu de vocabulaire

- Quelques notions liées à la nutrition minérale du peuplement :
  - Carence vraie : faible présence de l'élément dans le milieu
  - Carence induite : défaut de nutrition qui n'est pas lié à une faible présence de l'élément (déséquilibres chimiques, pH, anoxie, éléments antagonistes)
  - Déficience ou sub-carence : pas de symptômes visibles
  - Consommation de luxe : augmentation des prélèvements sans augmentation de croissance (peut jouer sur qualité)
  - Toxicité : excès d'éléments dans la plante qui s'intoxique (trop forte biodisponibilité dans le milieu)

# Les éléments minéraux

## Antagonisme entre éléments

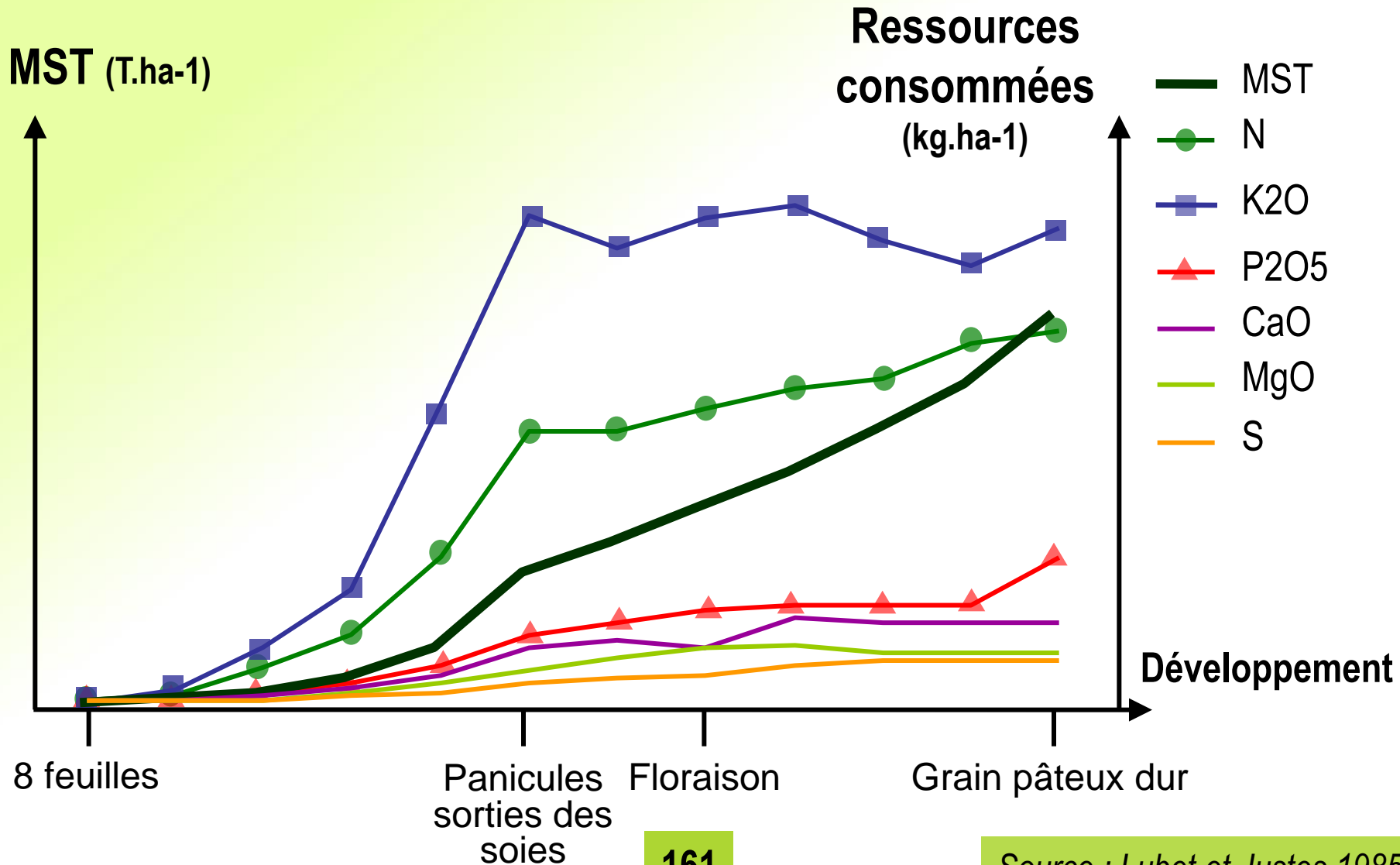
Fertilisation K	K	Ca	Mg	Total
1	26	102	67	195
2	98	64	30	192
3	131	56	22	209

Kg/ha



# Les éléments minéraux

## Besoins et prélèvements



# Les éléments minéraux

## Besoins et prélèvements



### Besoins totaux

**N = 227**

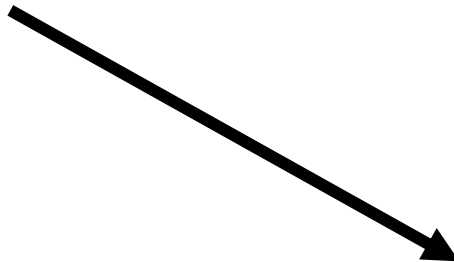
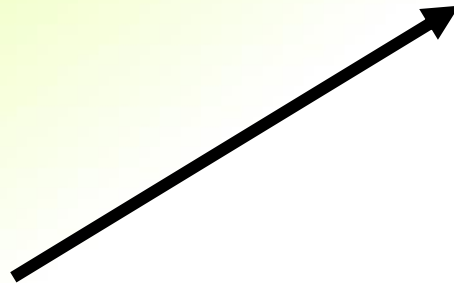
**P = 88**

**K = 350**

**Ca = 174**

**Mg = 87**

**S = 215**



### Exportations

Kg/ha

**N = 105**

**S = 72**

**P = 47**

**Ca = 17**

**K = 35**

**Mg = 14**

### Restitutions

**N = 122**

**S = 143**

**P = 41**

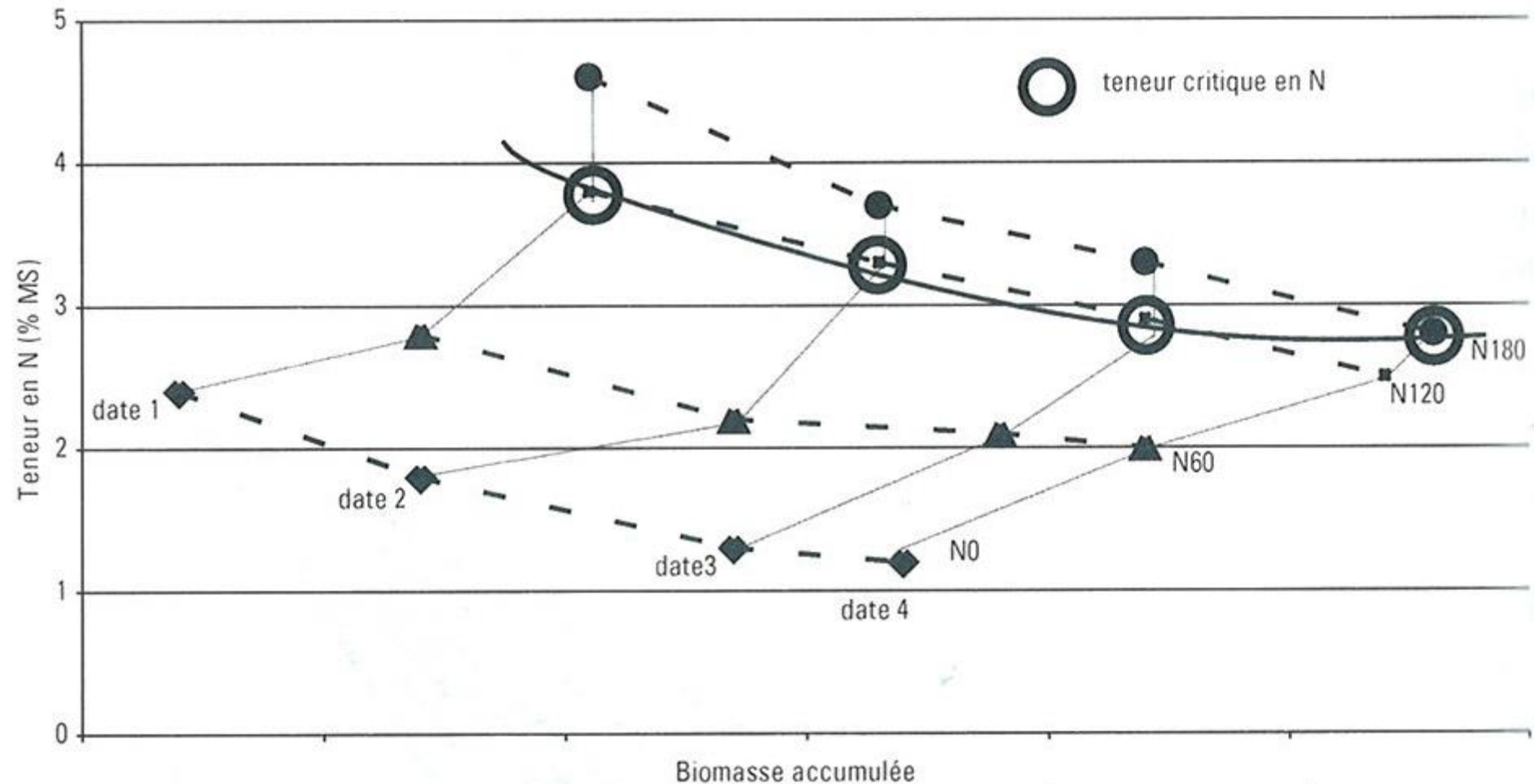
**Ca = 157**

**K = 315**

**Mg = 73**

# Les éléments minéraux

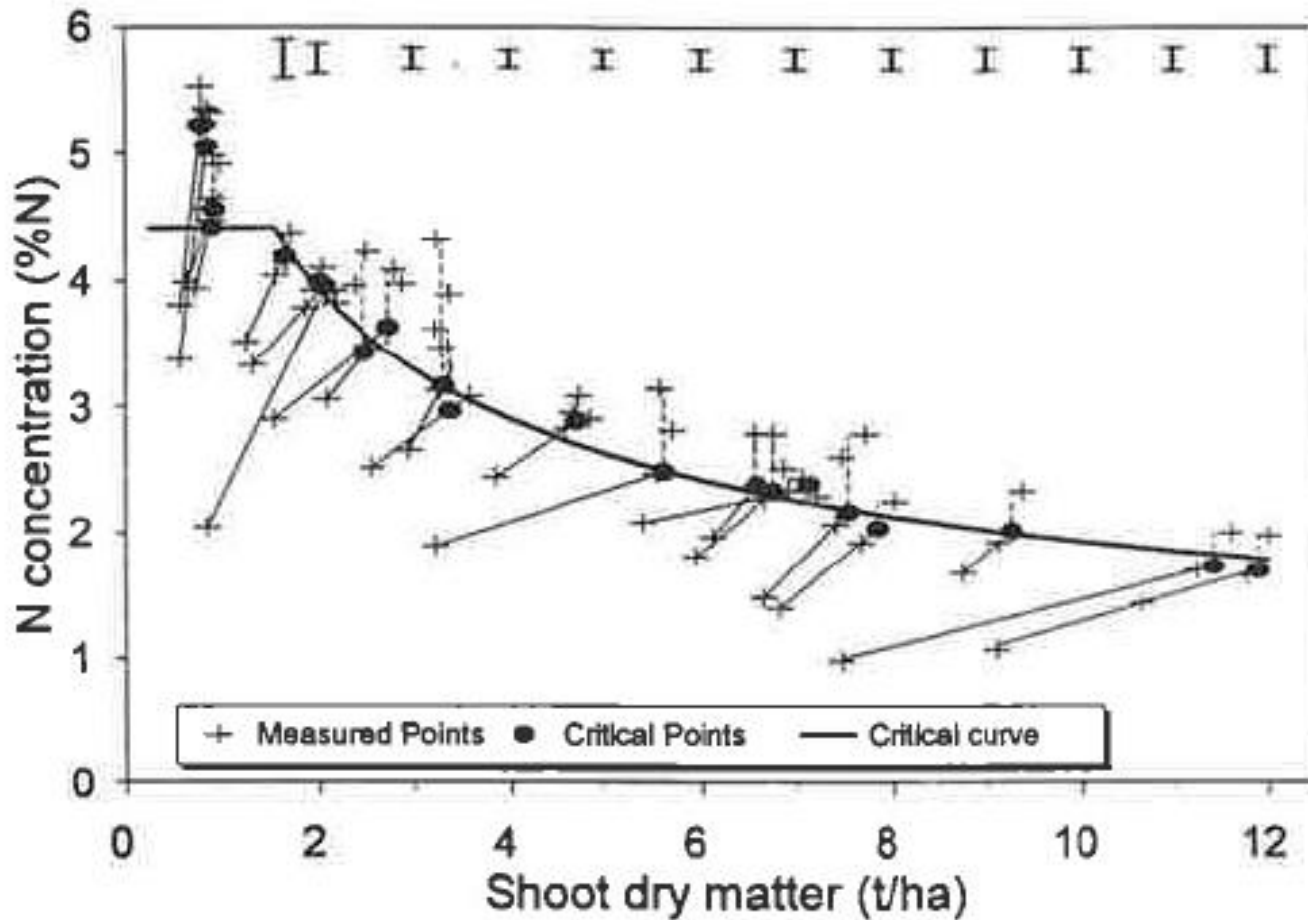
## Construction d'une courbe de dilution



La courbe est construite à partir des points critiques déduits d'essais  
teneur – rendement

# Les éléments minéraux

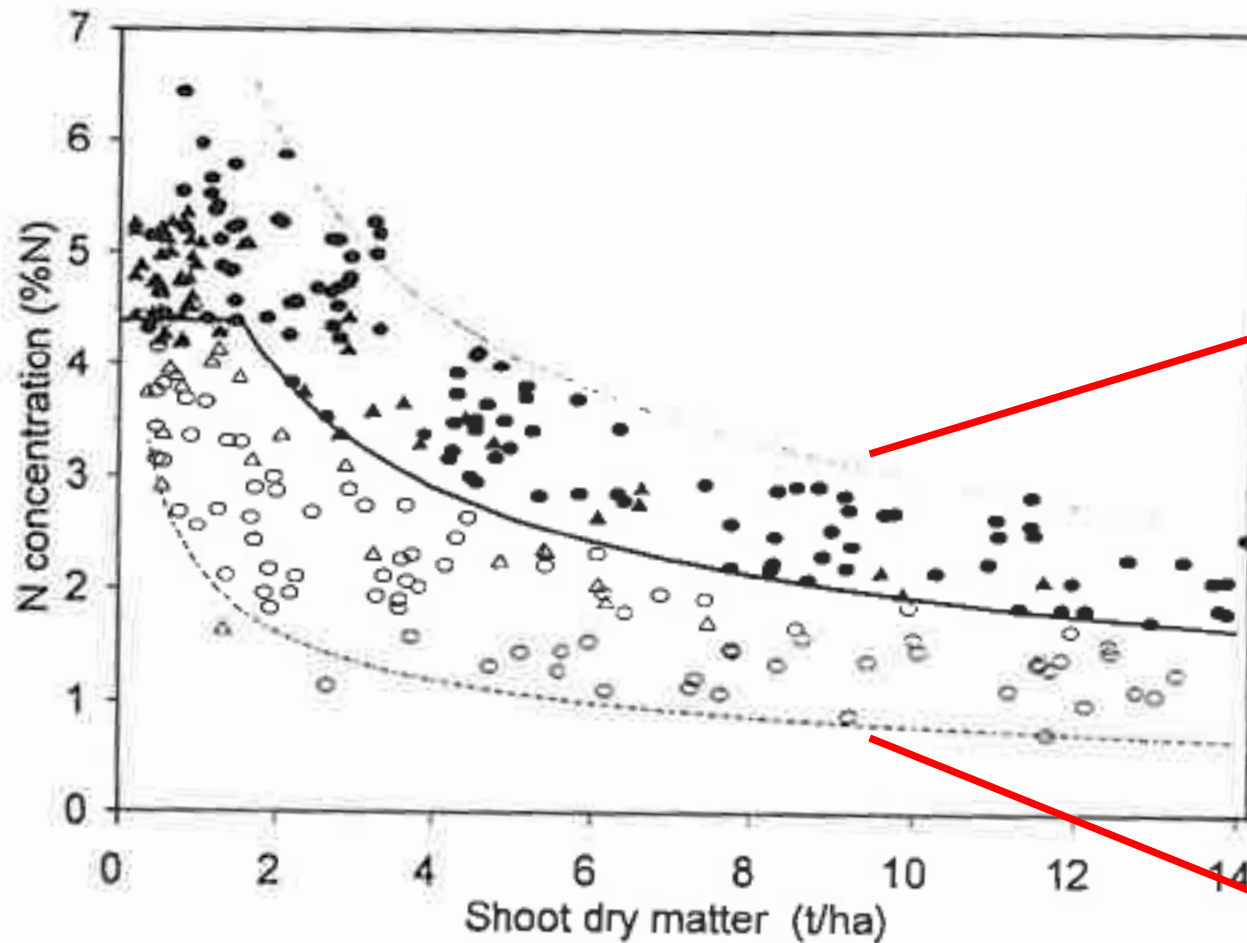
## Construction d'une courbe de dilution





# Les éléments minéraux

## Construction d'une courbe de dilution

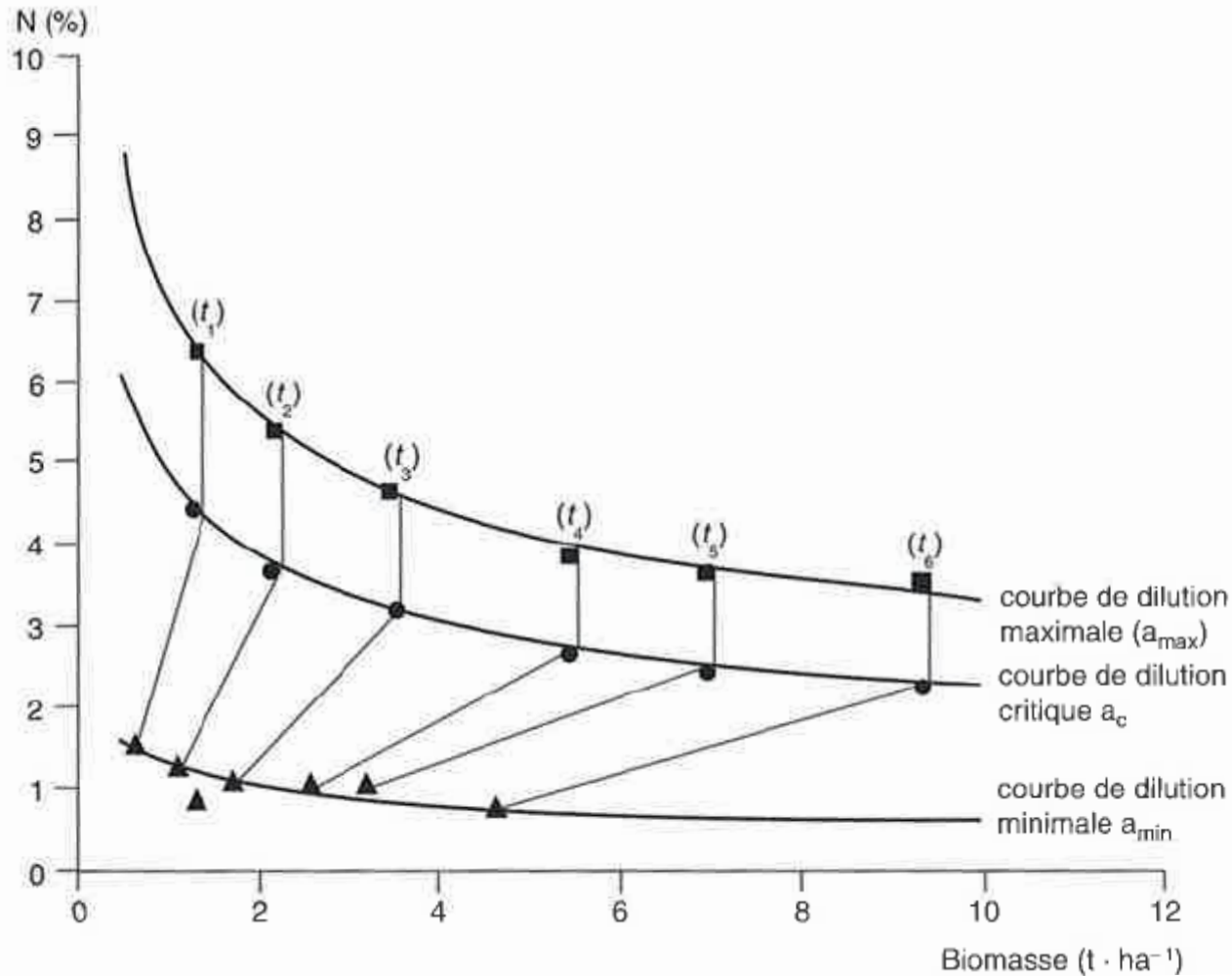


toxicité

carence

# Les éléments minéraux

## Construction d'une courbe de dilution



Consommation de  
luxe  
déficiency

# Les éléments minéraux

## Construction d'une courbe de dilution

- La courbe de dilution ou courbe de teneur en azote critique est de la forme :

$$Nc = a(W)^{1-b}$$

Avec :

- $Nc$  : la teneur en azote critique
- $W$  : la matière sèche produite par le peuplement
- $a$  et  $b$  : des paramètres dépendant de l'espèce

# Les éléments minéraux

## Construction d'une courbe de dilution

Espèce	10a	b	Sources
Graminées C3	48	0,32	Lemaire et salette, 1984
Luzerne C3	48	0,33	Lemaire <i>et al.</i> , 1986
Pois C3	51	0,32	Ney <i>et al.</i> , 1997
Blé C3	53	0,44	Justes <i>et al.</i> , 1994
Colza C3	45	0,25	Colnenne <i>et al.</i> , 1998
Tomate C3	45	0,33	Tei <i>et al.</i> , 2002
Maïs C4	34	0,37	Plénet et Lemaire, 2000
Sorgho C4	39	0,39	Plénet et Cruz, 1997

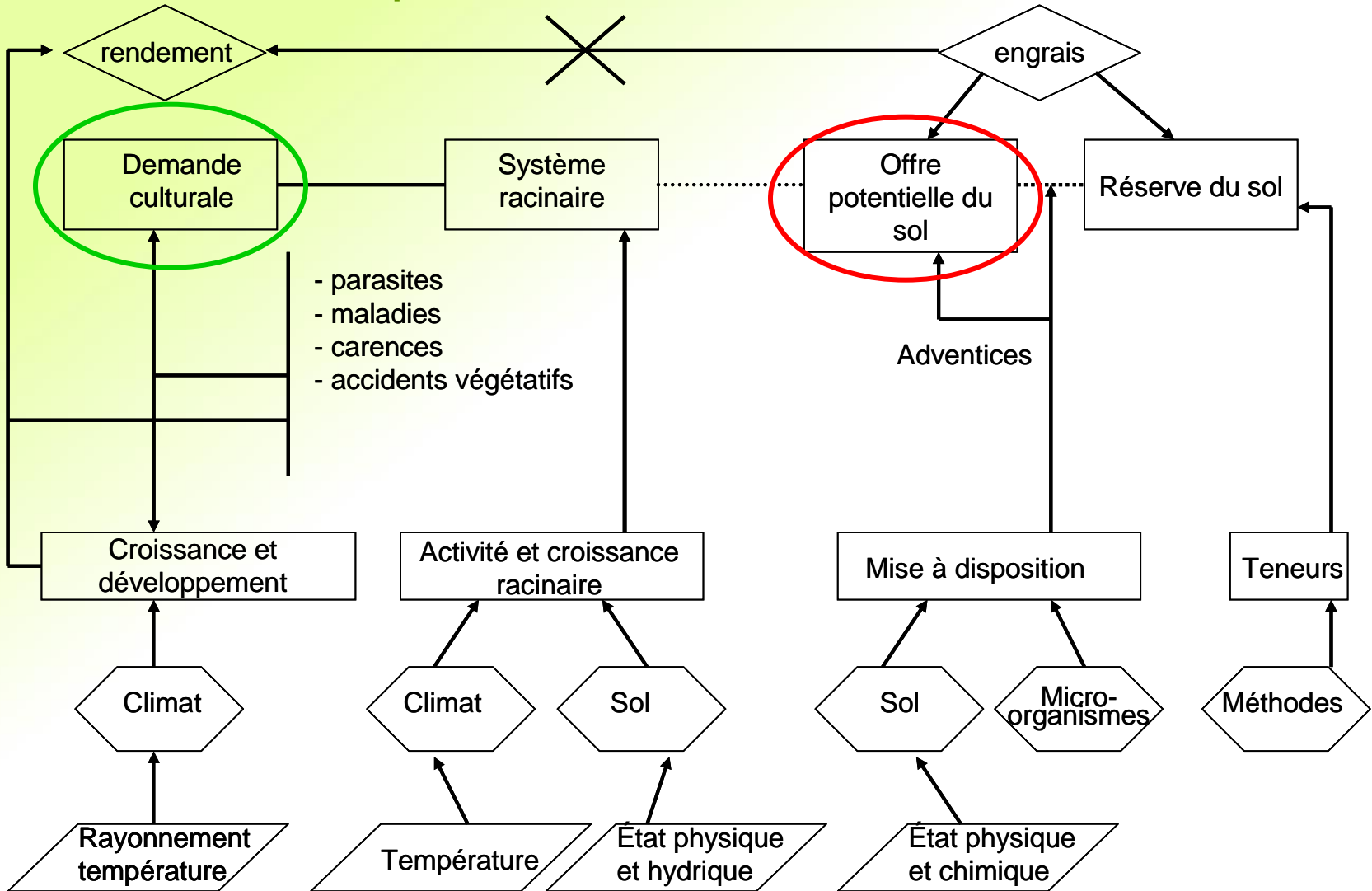




# Les transferts sol-plante

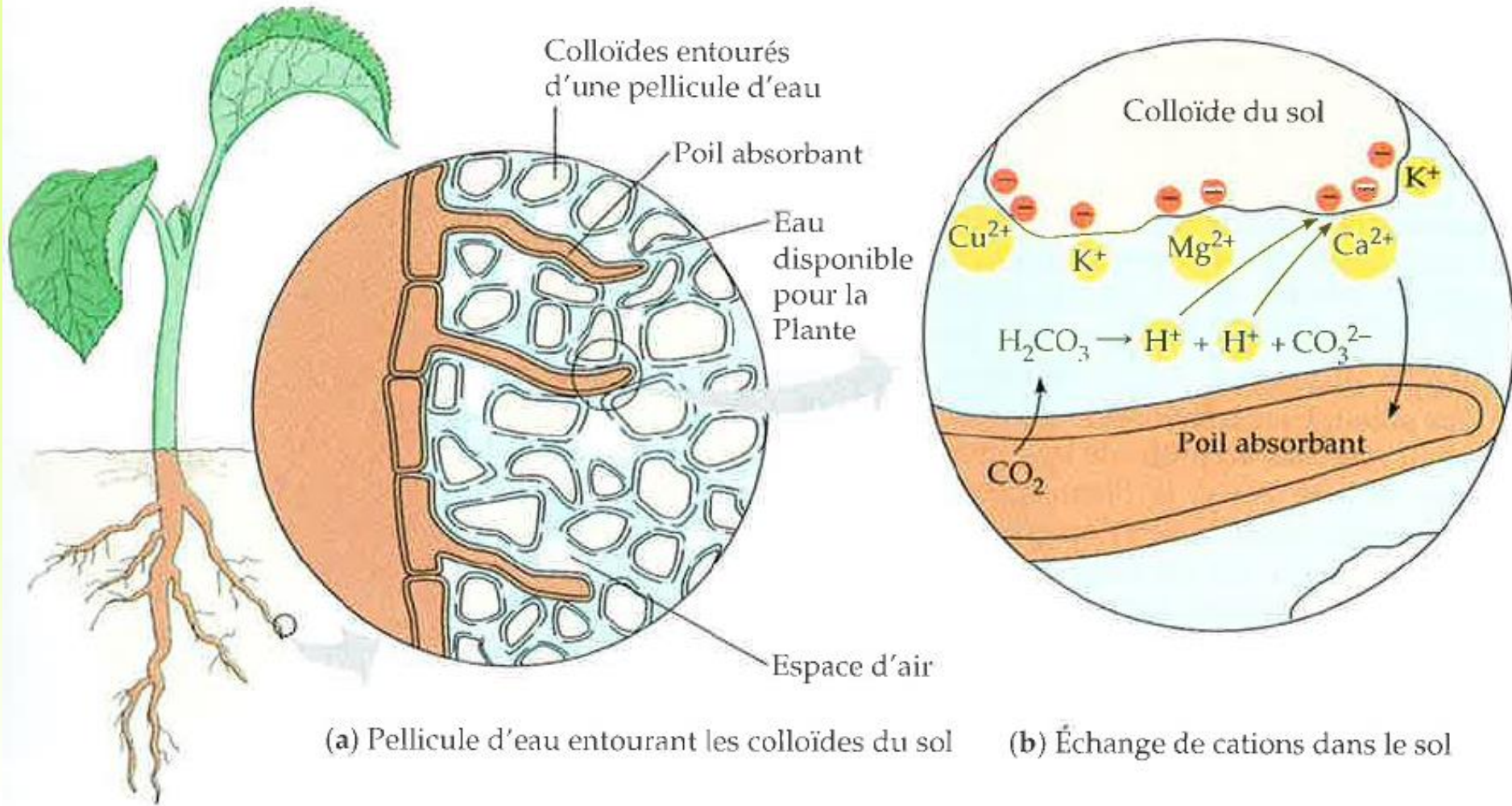
# Les transferts sol-plante

## L'offre potentielle du sol



# Les transferts sol-plante

## Absorption des éléments minéraux

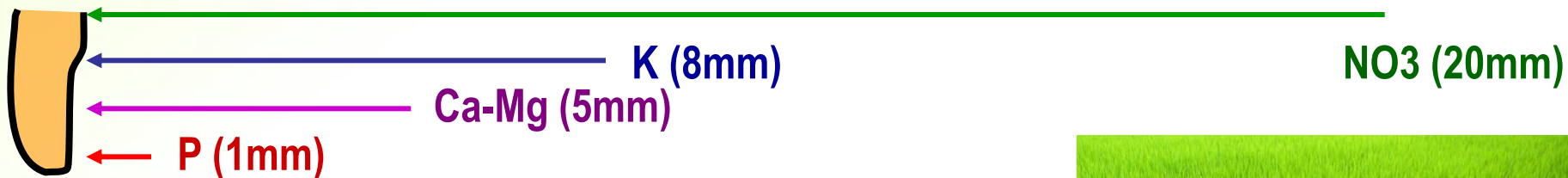




# Les transferts sol-plante

## La mobilité des ions dans le sol

- Les éléments se déplacent dans le sol et viennent au contact des racines :
  - Par diffusion
  - Par le mouvement de l'eau
- Ces mouvements sont faibles !



- Un bon enracinement sera donc utile :
  - À l'ancrage de la plante
  - À la nutrition (offre du sol)



# Les éléments minéraux

## Offre de la solution du sol – Mass flow

Transport passif

	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
<b>Concentration de la solution (mg/l)</b>	20-200	0.45	12	280	42
<b>Éléments contenus dans 300mm d'eau (3000 tonnes) (kg/ha)</b>	60-600	1.4	36	840	125
<b>Besoins pour un blé de 70qtx/ha (kg/ha)</b>	210	84	182	56	28
<b>Rapport apports/besoins</b>	<b>2,86</b>	<b>0,017</b>	<b>0,20</b>	<b>15,00</b>	<b>4,46</b>



# Les transferts sol-plante

## Une absorption racinaire en deux temps

- Deux phases possibles dans l'absorption des éléments nutritifs par le système racinaire :
  - Une phase passive
  - Une absorption liée à l'activité métabolique (besoin énergie !)

# Les transferts sol-plante

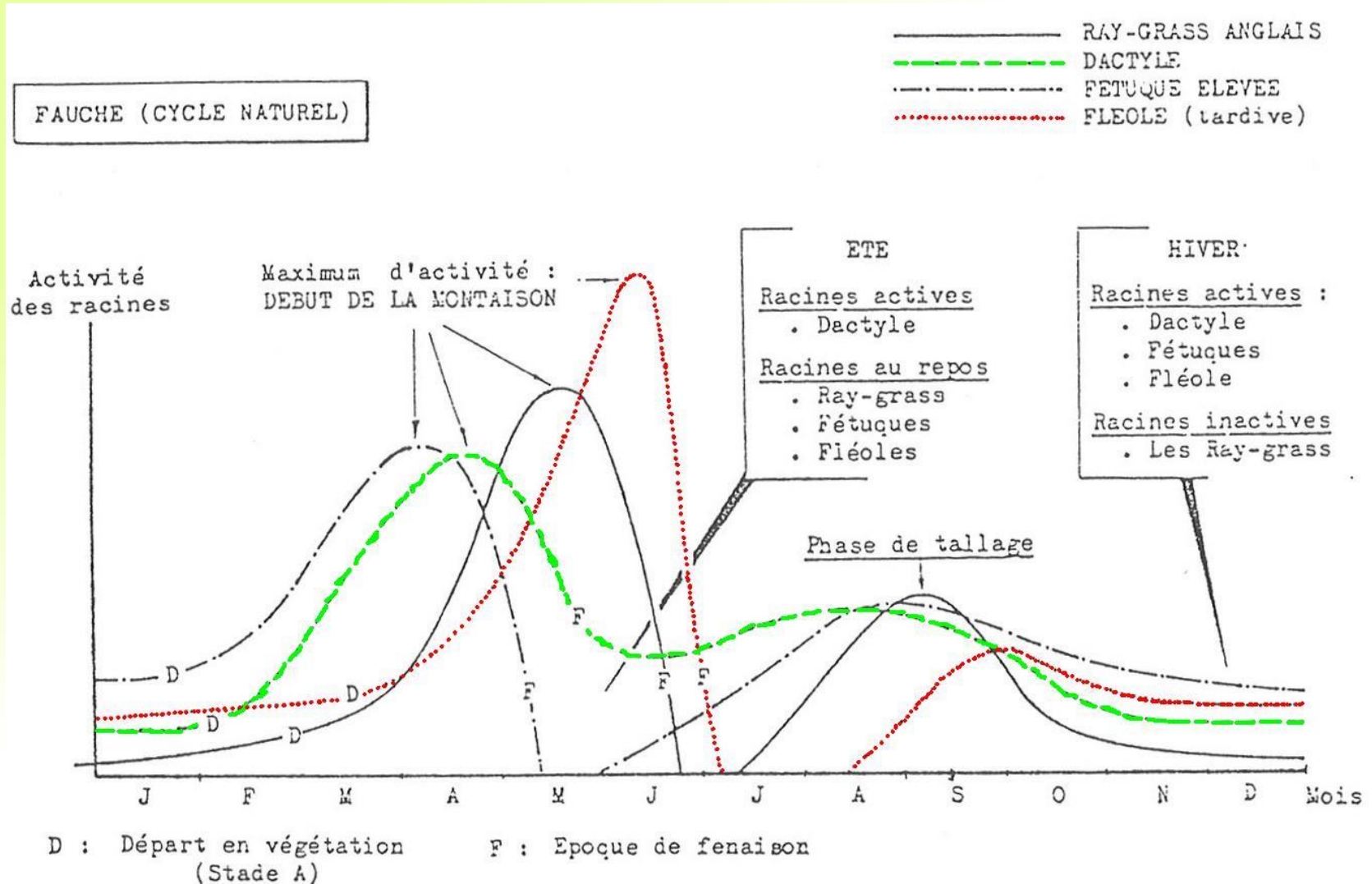
## Conditions de l'activité racinaire

- Etat du peuplement :
  - Stade de développement du peuplement



# Conditions de l'activité racinaire

## Stade de développement du peuplement



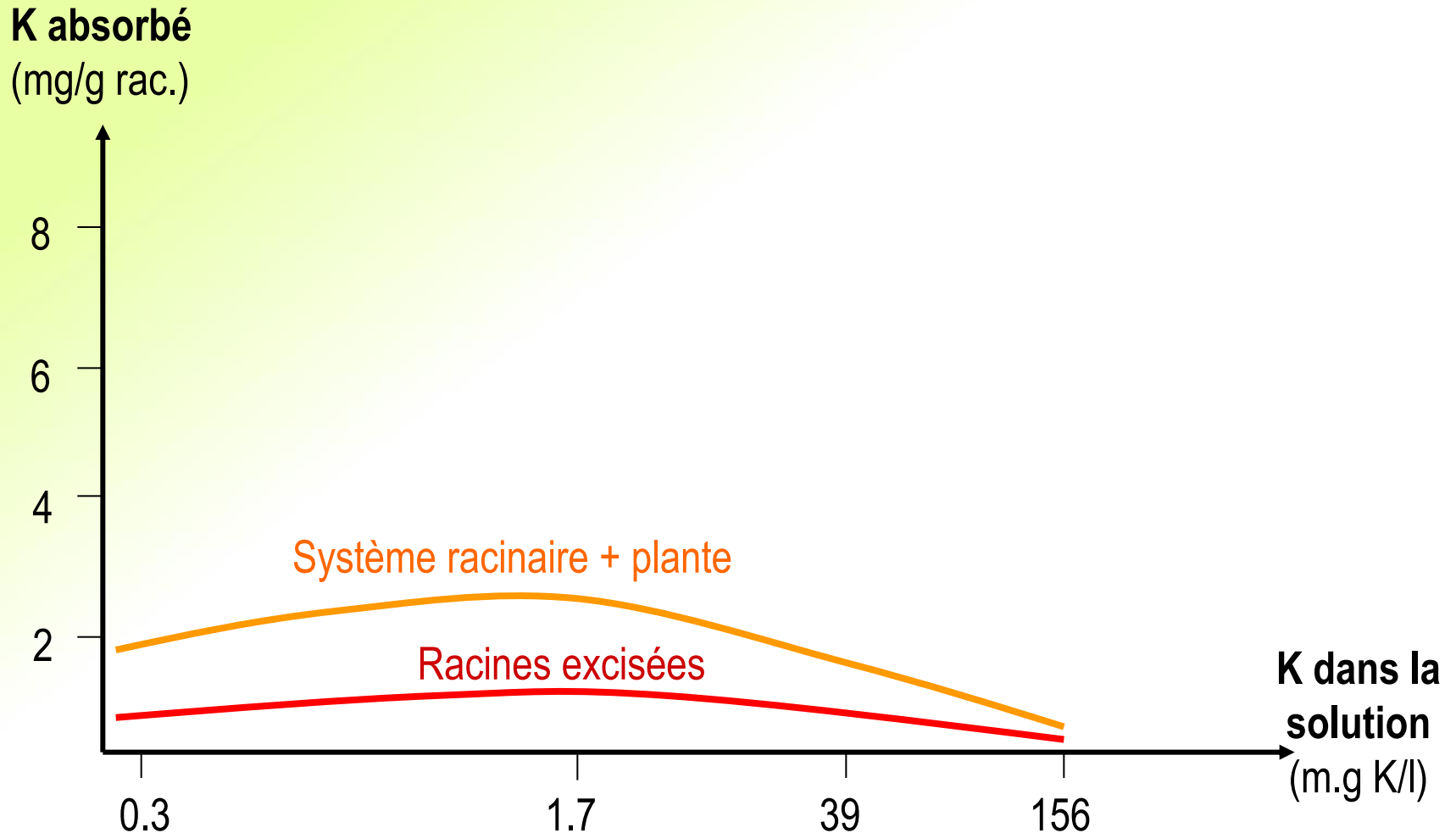
# Les transferts sol-plante

## Conditions de l'activité racinaire

- Etat du peuplement :
  - Stade de développement du peuplement
  - Sous la dépendance du fonctionnement des parties aériennes (besoins + matériaux)

# Conditions de l'activité racinaire

## Dépendance aux parties aériennes





# Les transferts sol-plante

## Conditions de l'activité racinaire

- Etat du peuplement :
  - Stade de développement du peuplement
  - Sous la dépendance du fonctionnement des parties aériennes (besoins + matériaux)
- Conditions du milieu :
  - Températures
  - Humidité (plasticité du sol)
  - Aération et mouvement des gaz dans la rhizosphère (anoxie)
  - Structure du sol (compacité) et obstacles physiques
  - Obstacles chimiques (toxicité aluminique, salinité, résidus phytosanitaires)

# Les transferts sol-plante

## Capacité d'extraction de la plante

La capacité d'extraction du peuplement va être affectée :

- Par la structure du système racinaire :
  - Système pivotant plus sensible à des carences qu'un système fasciculé

# Les transferts sol-plante

Capacité variable à coloniser le sol

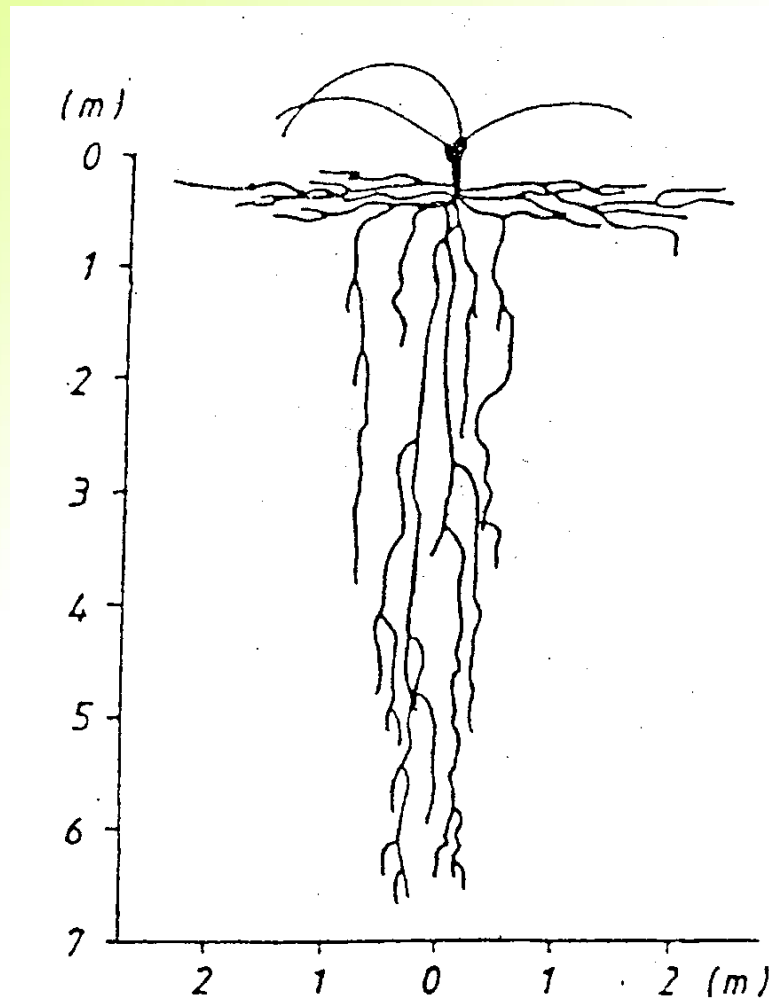
**Coton**



# Les transferts sol-plante

## Capacité variable à coloniser le sol

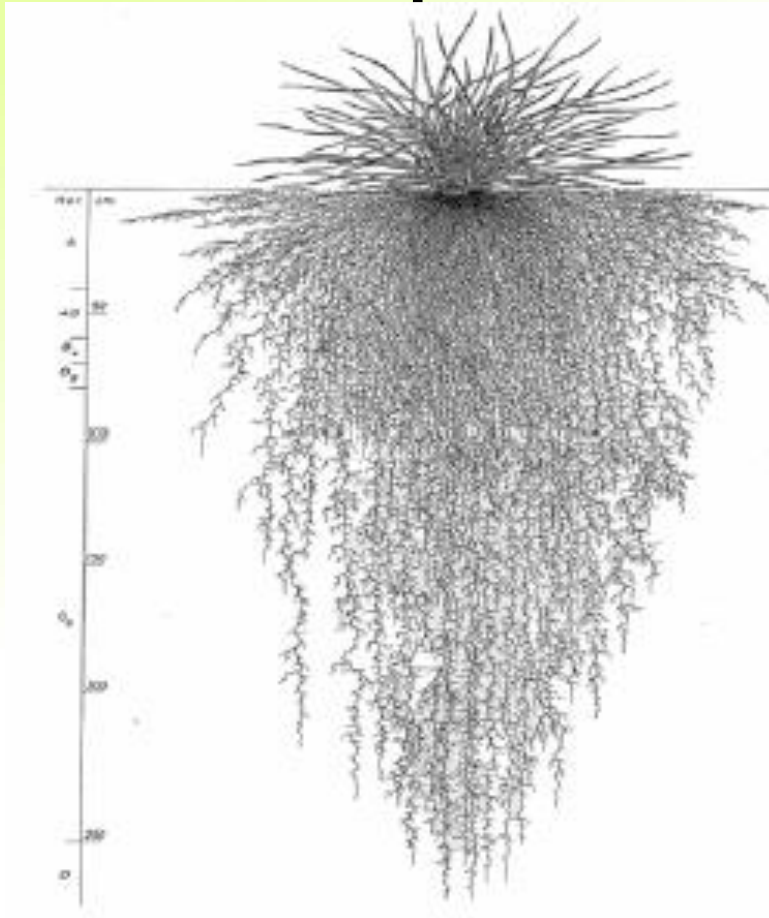
### Vigne



# Les transferts sol-plante

Capacité variable à coloniser le sol

**Fétuque élevée**



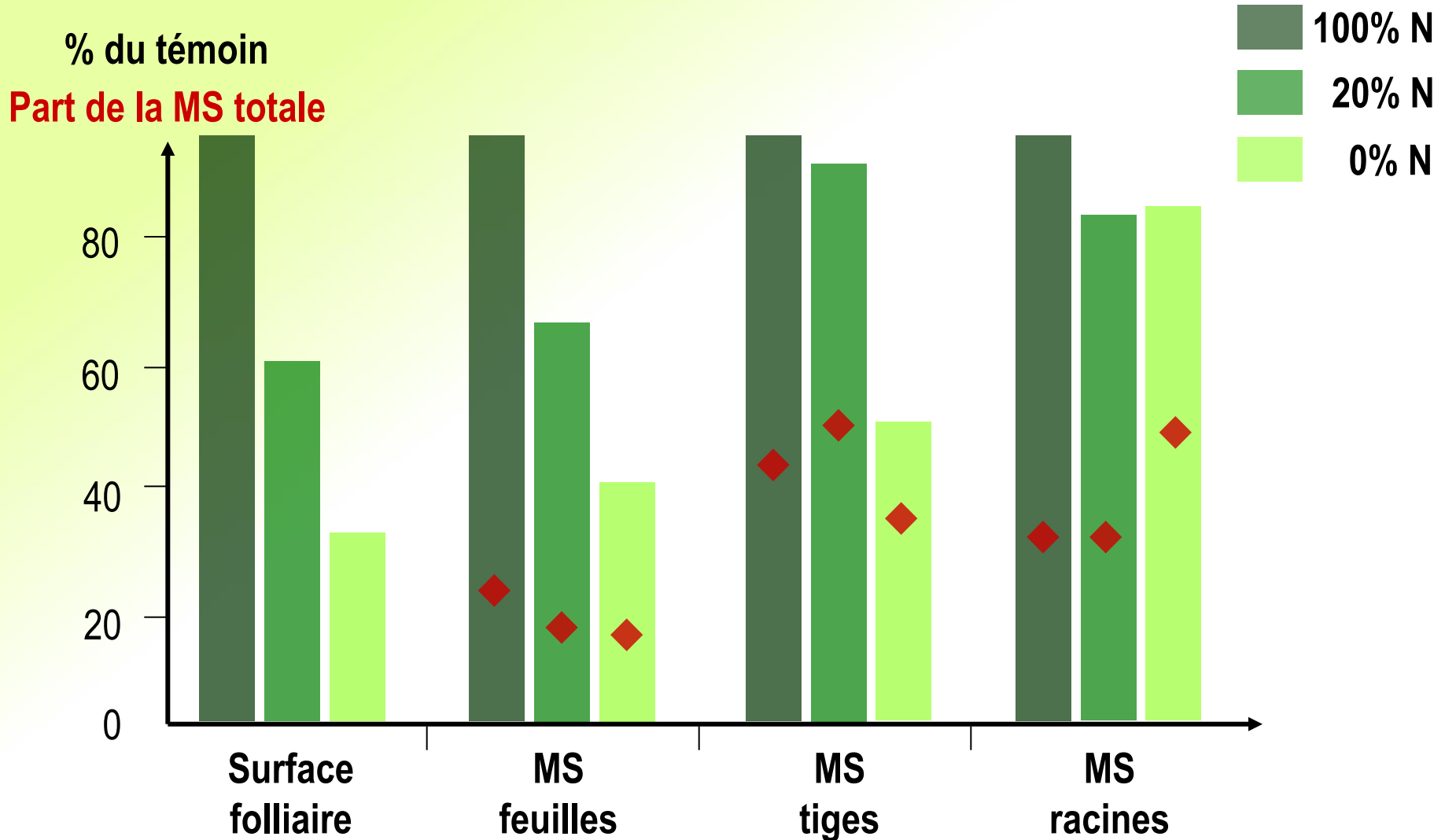
**Ray-grass**





# Les transferts sol-plante

Le système racinaire est favorisé



# Les transferts sol-plante

## Capacité d'extraction de la plante

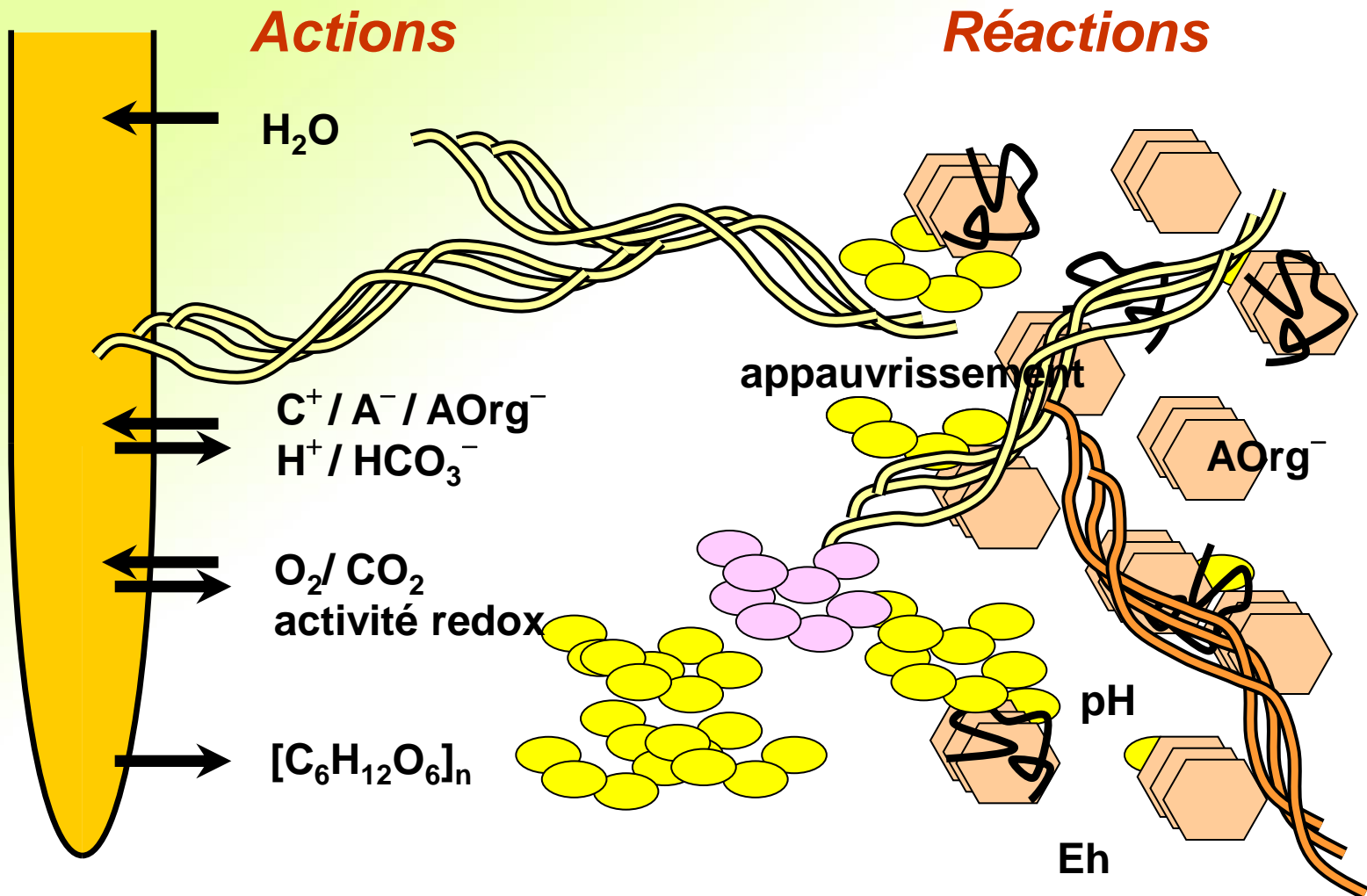
La capacité d'extraction du peuplement va être affectée :

- Par la structure du système racinaire :
  - Système pivotant plus sensible à des carences qu'un système fasciculé
- Par la dynamique des besoins :
  - Croissance rapide → besoins instantanés plus importants
- La plante modifie le milieu par les excrétions racinaires et la consommation d'éléments minéraux :
  - Modification du pH de la rhizosphère
  - Excrétion d'enzymes
  - Cortèges mycorhiziens et bactéries



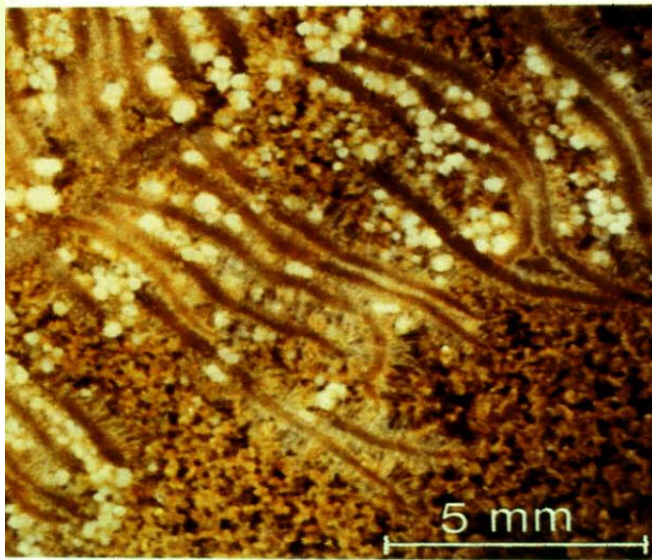
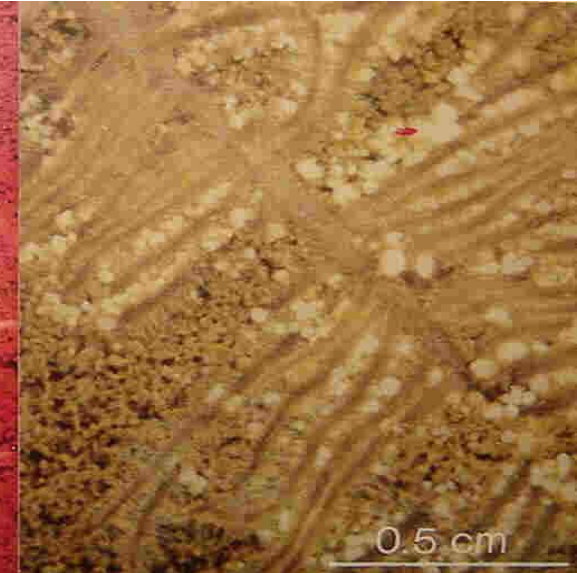
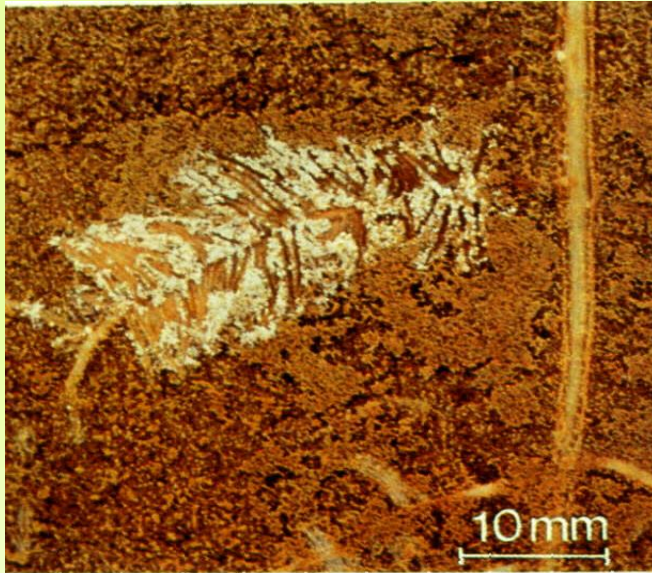
# Les transferts sol-plante

La plante agit sur et réagit à son milieu



# Les transferts sol-plante

## Acidification/Alcalinisation du milieu

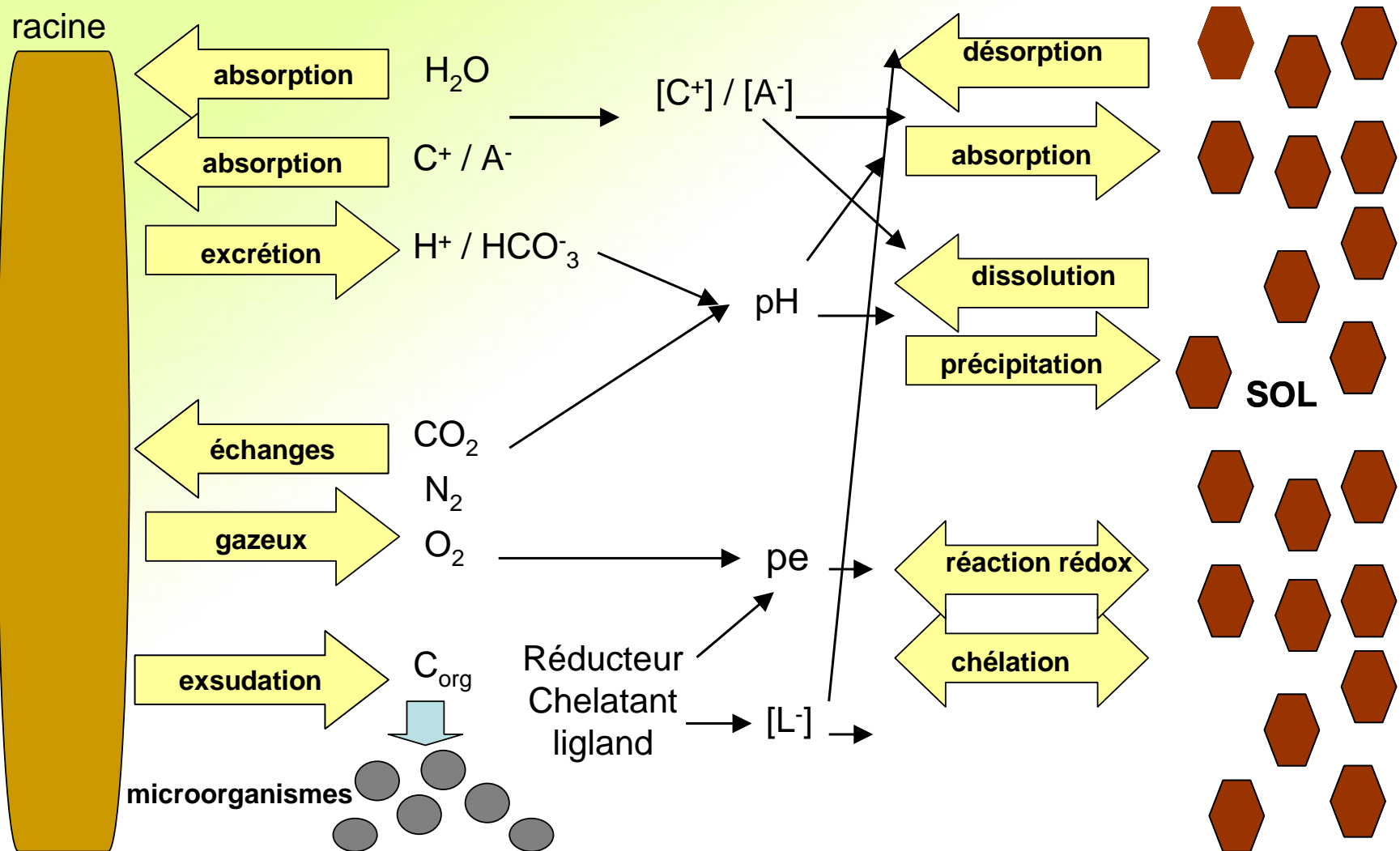


*Cristaux de citrate de calcium  
précipités dans la rhizosphère  
de racines protéoïdes de lupin blanc  
cultivé en sol calcaire pauvre en P*



# Les transferts sol-plante

## Capacité d'échange cationique





# Les transferts sol-plante

## Compétition sol-peuplement végétal

La compétition entre ces deux CEC pour les éléments minéraux du sol va varier avec :

- La nature et la concentration des minéraux :
  - Dépend de la charge des ions
  - Dépend de sa mobilité
- Le pouvoir fixateur du sol :
  - Fort pouvoir fixateur → moins d'ions en solution

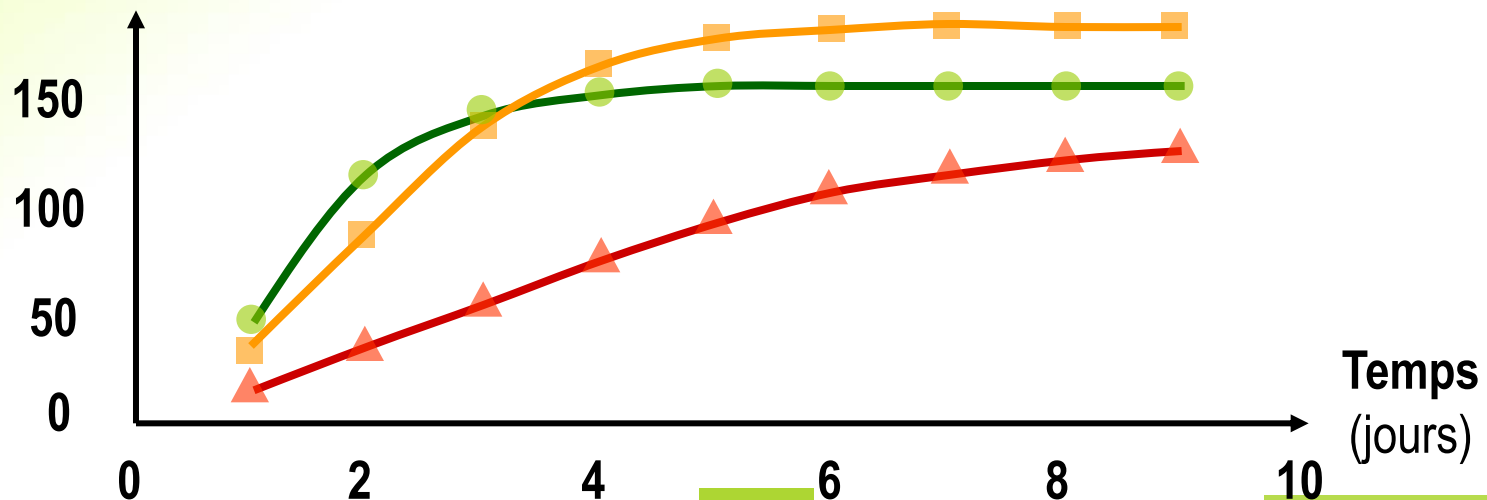
# Compétition sol-peuplement

## Importance du pouvoir fixateur du sol

**P prélevé**  
(kg/j)



**Cumul**  
(kg)



# Les transferts sol-plante

## Compétition sol-peuplement végétal

La compétition entre ces deux CEC pour les éléments minéraux du sol va varier avec :

- La nature et la concentration des minéraux :
  - Dépend de la charge des ions
  - Dépend de sa mobilité
- Le pouvoir fixateur du sol :
  - Fort pouvoir fixateur → moins d'ions en solution
- La nature du peuplement :
  - Capacité d'extraction
  - Dynamique de prélèvements
- Les conditions du milieu :
  - Compacité, humidité, etc.





# Gérer la fertilisation





# Gérer la fertilisation

## Favoriser le peuplement cultivé

Il faut favoriser le peuplement dans sa compétition avec le sol pour les minéraux :

- Bonnes conditions de croissance racinaire pour une prospection maximale du sol
  - Travail du sol, implantation des cultures et irrigation
- Optimisation de la disponibilité des éléments :
  - Travail du sol et irrigation
- Favoriser la croissance du peuplement :
  - Implantation, irrigation, protection...

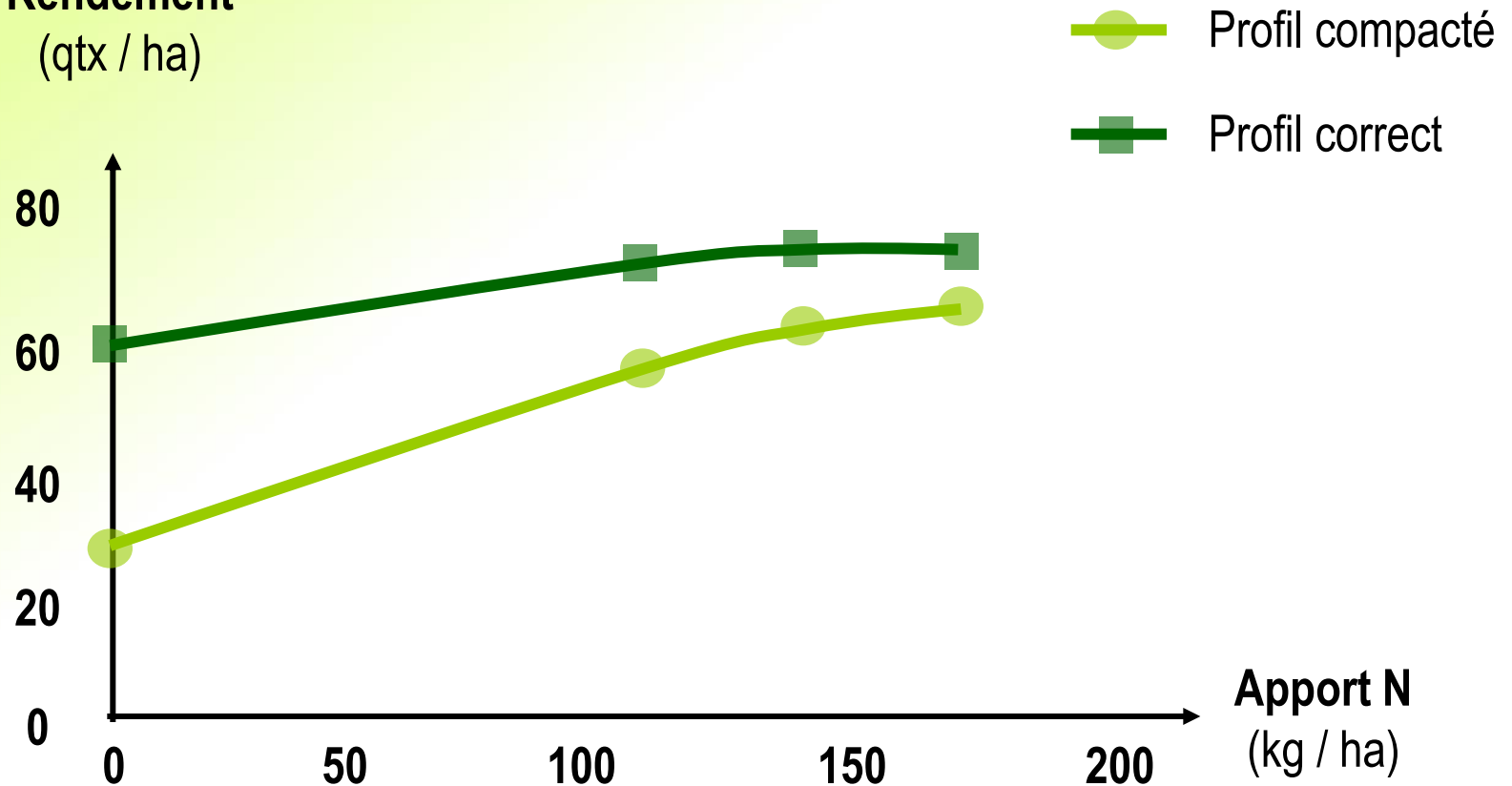




# Gérer la fertilisation

## Favoriser la prospection racinaire

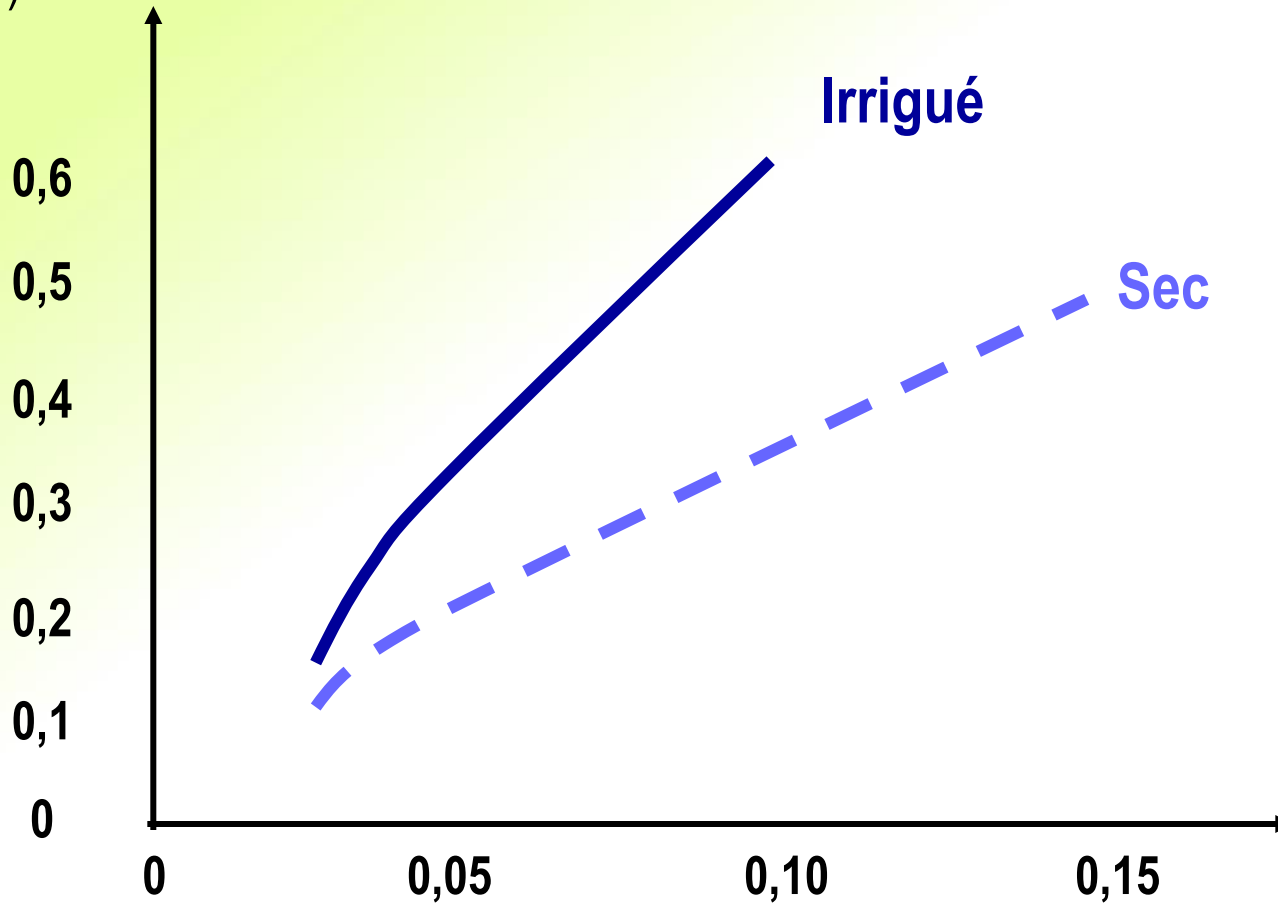
**Rendement**  
(qtx / ha)



# Gérer la fertilisation

## Améliorer la biodisponibilité des éléments

**Pabsorbé**  
(g/pl)



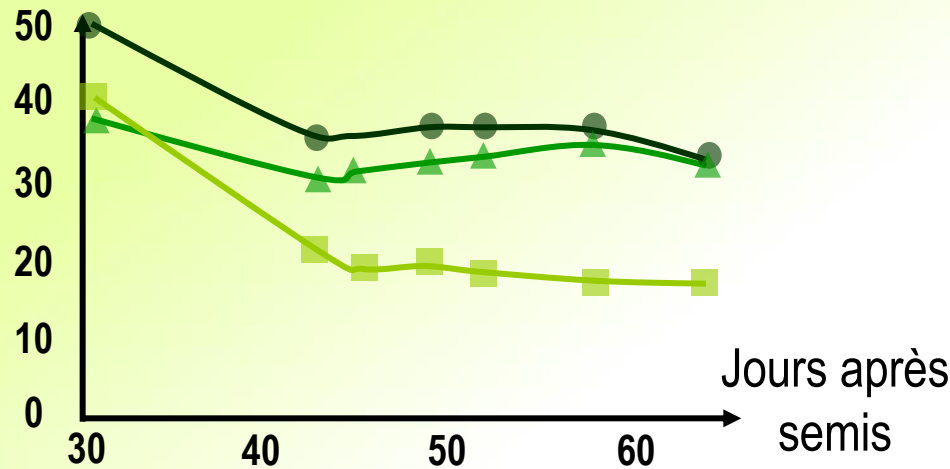
Teneur du  
sol en  
 $P_2O_5$   
(kg/ha)

# Gérer la fertilisation

## Utiliser les bons indicateurs

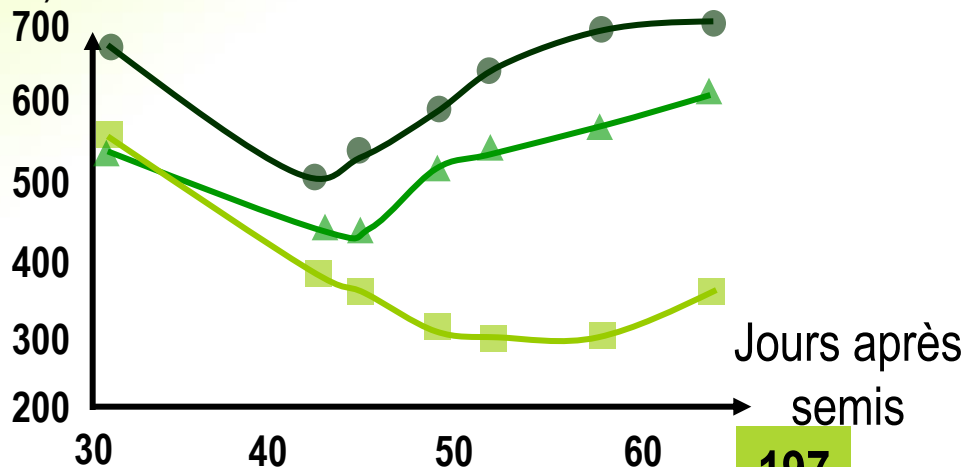
N foliaire

(g/kg)



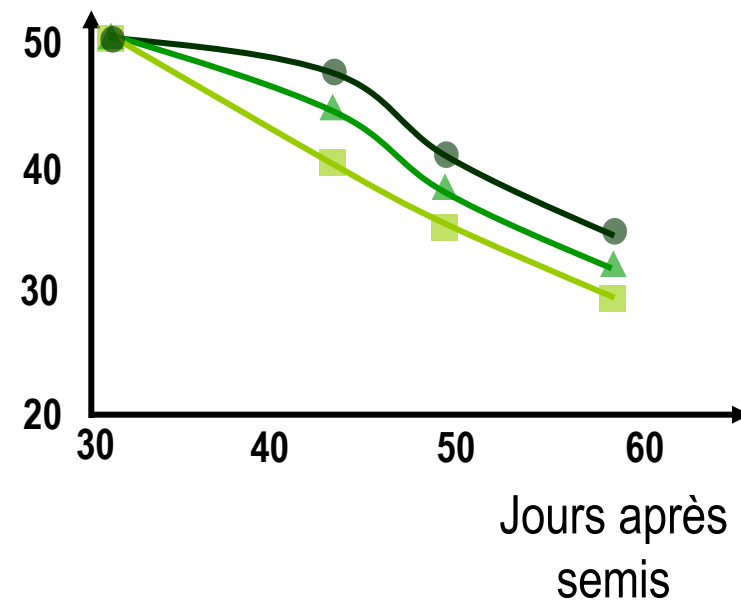
Teneur en chlorophylle

(mg/m<sup>2</sup>)



Photosynthèse

(g/kg)



# Les éléments minéraux

## Evaluation de l'état de nutrition azotée

Teneur en azote

(%MS)

$$INN = \frac{N\%}{Nc\%}$$

1 T.ha-1

Nc%

N%

Biomasse  
(T.ha-1)

# Gérer la fertilisation

## Tableau de synthèse

	Forte demande		Faible demande	
	Racines faibles	Racines fortes	Racines faibles	Racines fortes
Réponse à l'apport	Réponse forte	Réponse faible	Réponse nulle à faible	Réponse nulle
Elément non retenu N, S, Oligo-éléments	Apports = besoins - fournitures du sol, fractionnement		Apports minimum selon sensibilité de la plante voire nuls	
Elément retenu, P, K, Ca	Apports ≥ exportations	Apports = exportations Apports = exportations		




# Peuplement et ressources

- Nutrition carbonée d'un peuplement végétal
- Alimentation hydrique d'un peuplement
- Peuplement végétal cultivé et nutrition minérale
- Le partage des ressources au sein d'un peuplement

# Peuplement et ressources

- Nutrition carbonée d'un peuplement végétal
- Alimentation hydrique d'un peuplement
- Peuplement végétal cultivé et nutrition minérale
- Le partage des ressources au sein d'un peuplement
  - Compétition au sein du peuplement
  - Répartition des ressources entre puits

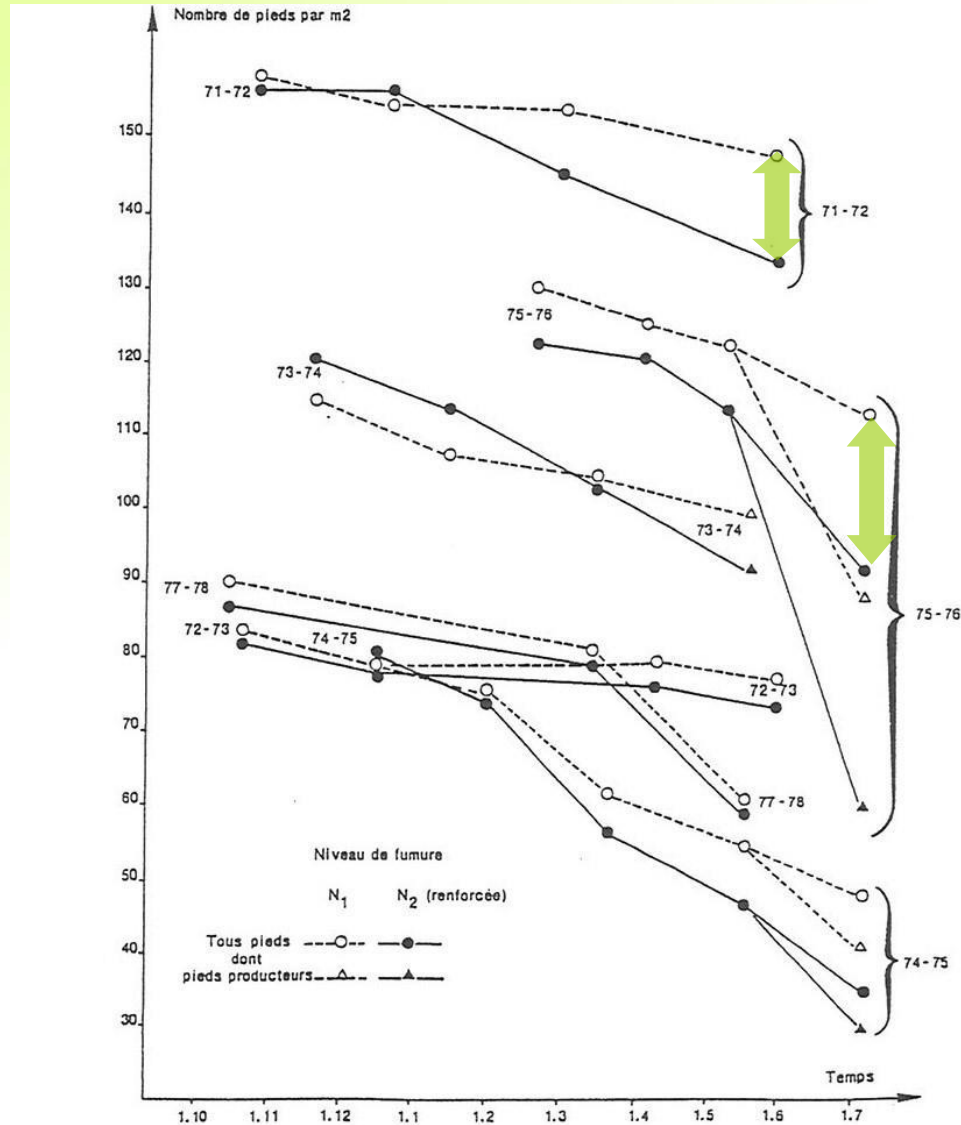




# Compétition pour les ressources dans le peuplement

# Compétition dans le peuplement

## Effet de la densité





# Compétition dans le peuplement

## Sélection des plus forts

Variations des critères mesurés en février ou avril selon le devenir des pieds

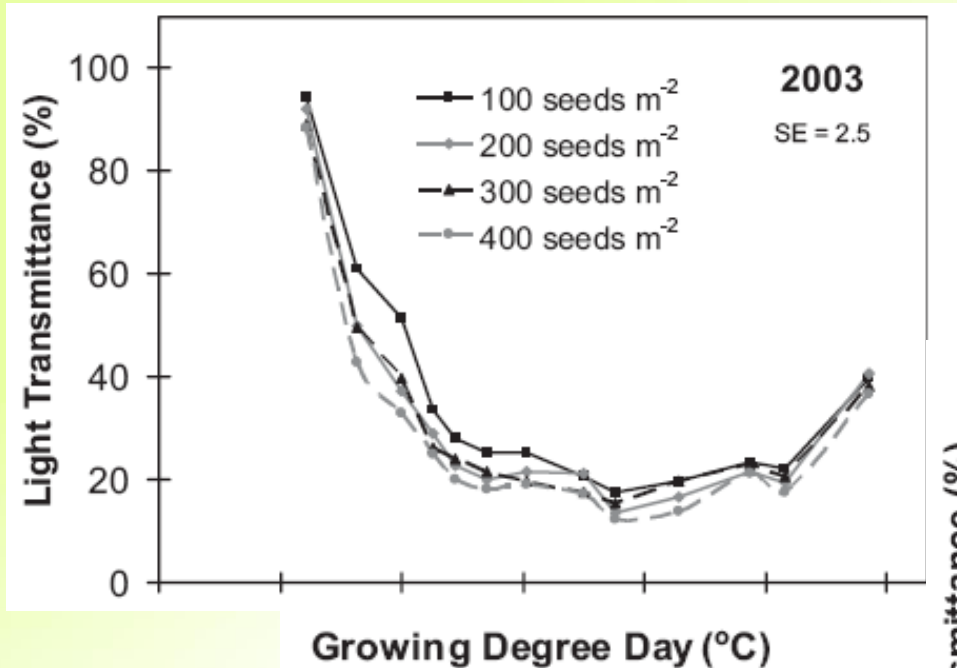
Date des relevés		4 février 1975			24 février 1976		12 avril 76
Critères mesurés		Diamètre au collet (en mm)	Nombre de feuilles vertes	Somme des largeurs de feuilles (cm)	Diamètre au collet (en mm)	Nombre de feuilles vertes	Hauteur en cm
Catégories de pieds	Pieds disparaissant entre février et mars - avril	1,59 <sub>a</sub>	3,82 <sub>a</sub>	27,50 <sub>a</sub>	1,83 <sub>a</sub>	4,75 <sub>a</sub>	-
	Pieds disparaissant entre mars-avril et juillet	2,19 <sub>b</sub>	5,37 <sub>b</sub>	65,19 <sub>b</sub>	1,98 <sub>a</sub>	4,72 <sub>a</sub>	15,50 <sub>a</sub>
	Pieds présents à la récolte et non producteurs	2,08 <sub>b</sub>	5,15 <sub>b</sub>	54,46 <sub>b</sub>	3,40 <sub>b</sub>	6,52 <sub>b</sub>	32,70 <sub>b</sub>
	Pieds présents à la récolte et producteurs	2,92 <sub>c</sub>	6,04 <sub>c</sub>	94,33 <sub>c</sub>	4,15 <sub>c</sub>	6,99 <sub>b</sub>	43,78 <sub>c</sub>

a, b, c : On indexe de la même lettre les résultats de catégories de pieds qui ne sont pas différents à  $p = 0,05$  pour un caractère.

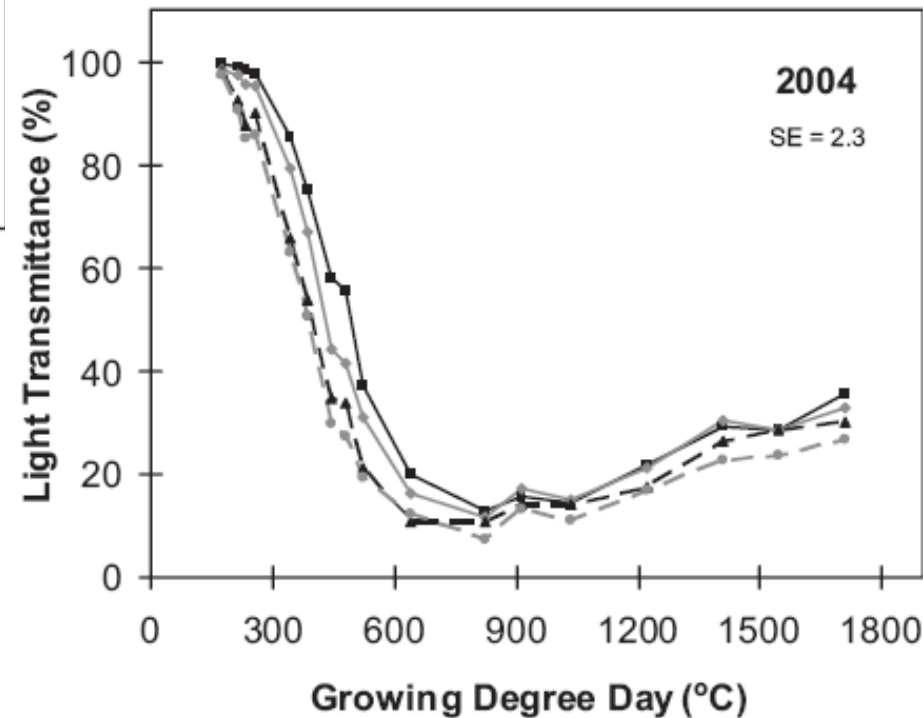


# Compétition dans le peuplement

## Compétition pour la lumière



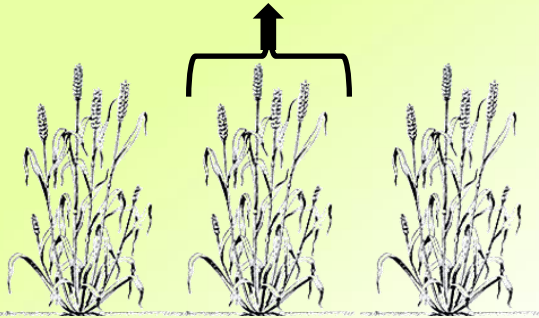
Transmittance dans un couvert de légumineuses fouragères



# Compétition dans le peuplement

## Compétition pour la lumière

61,1 qtx/ha



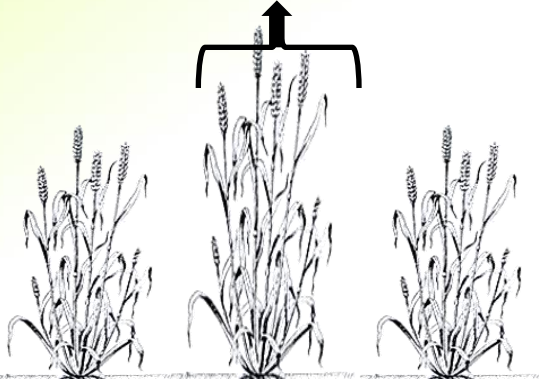
*'Courtot' entre 2 'Courtot'*

56,4 qtx/ha



*'Courtot' entre 2 'Choisy'*

55,4 qtx/ha



*'Choisy' entre 2 'Courtot'*

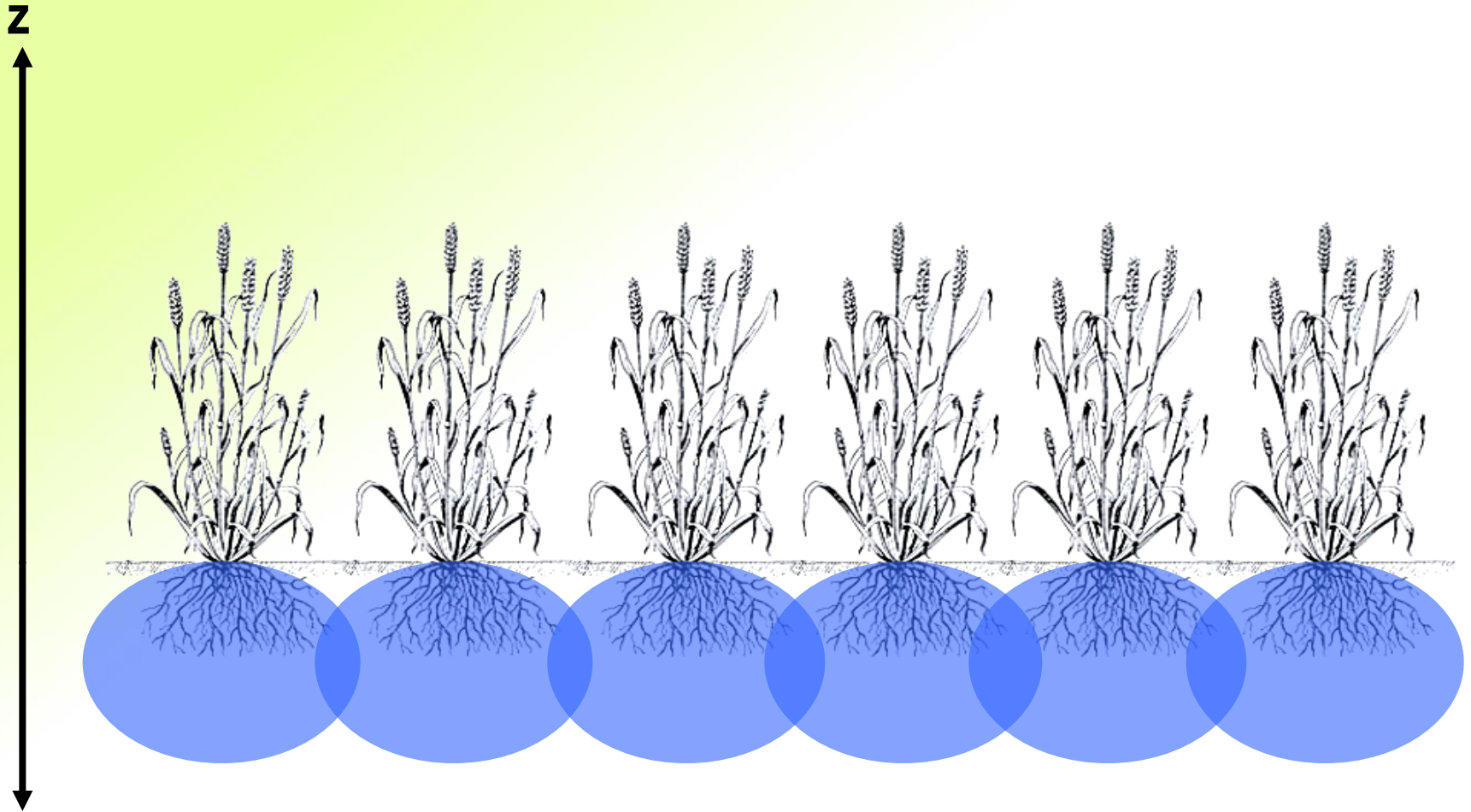
52,6 qtx/ha



*'Choisy' entre 2 'Choisy'*

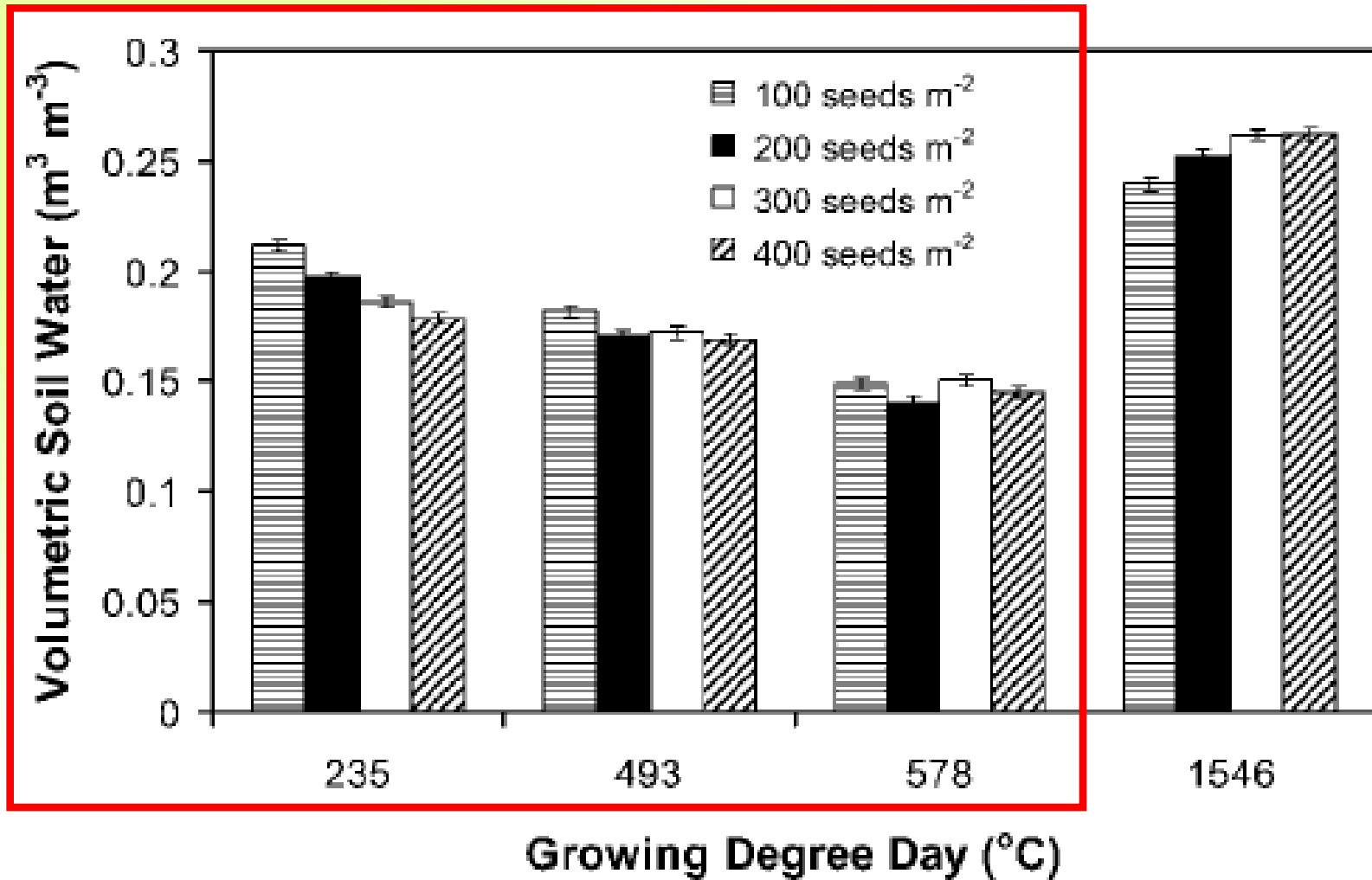
# Compétition dans le peuplement

## Compétition pour les ressources souterraines



# Compétition dans le peuplement

## Compétition pour l'eau



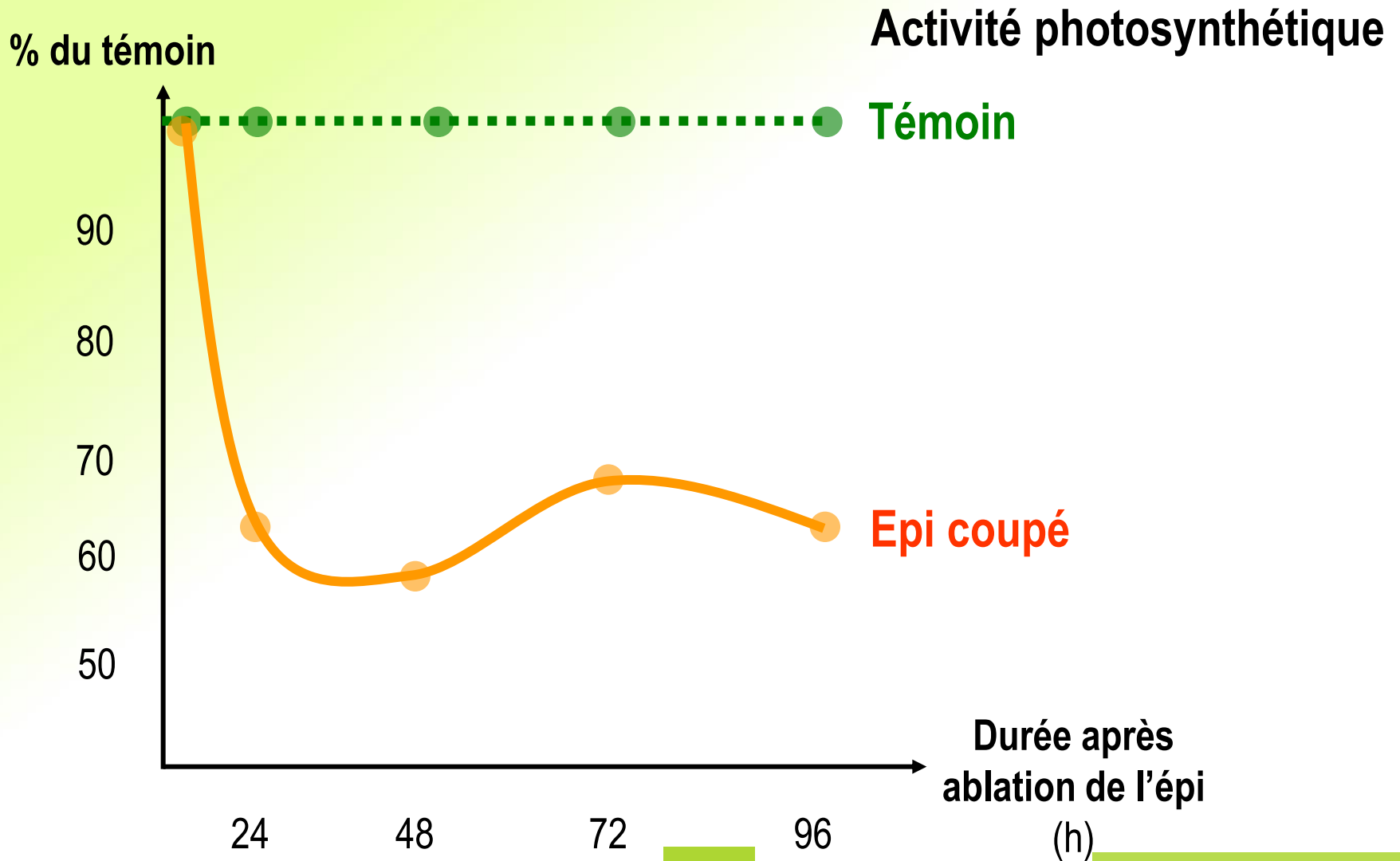
A vibrant field of sunflowers under bright sunlight. The foreground features a large, detailed sunflower head with bright yellow petals and a dark brown, textured center. Other sunflowers are visible in the background, slightly out of focus. A semi-transparent white rectangular box is centered horizontally across the middle of the image, containing the title text.

# Répartition des ressources entre puits



# Répartition des ressources

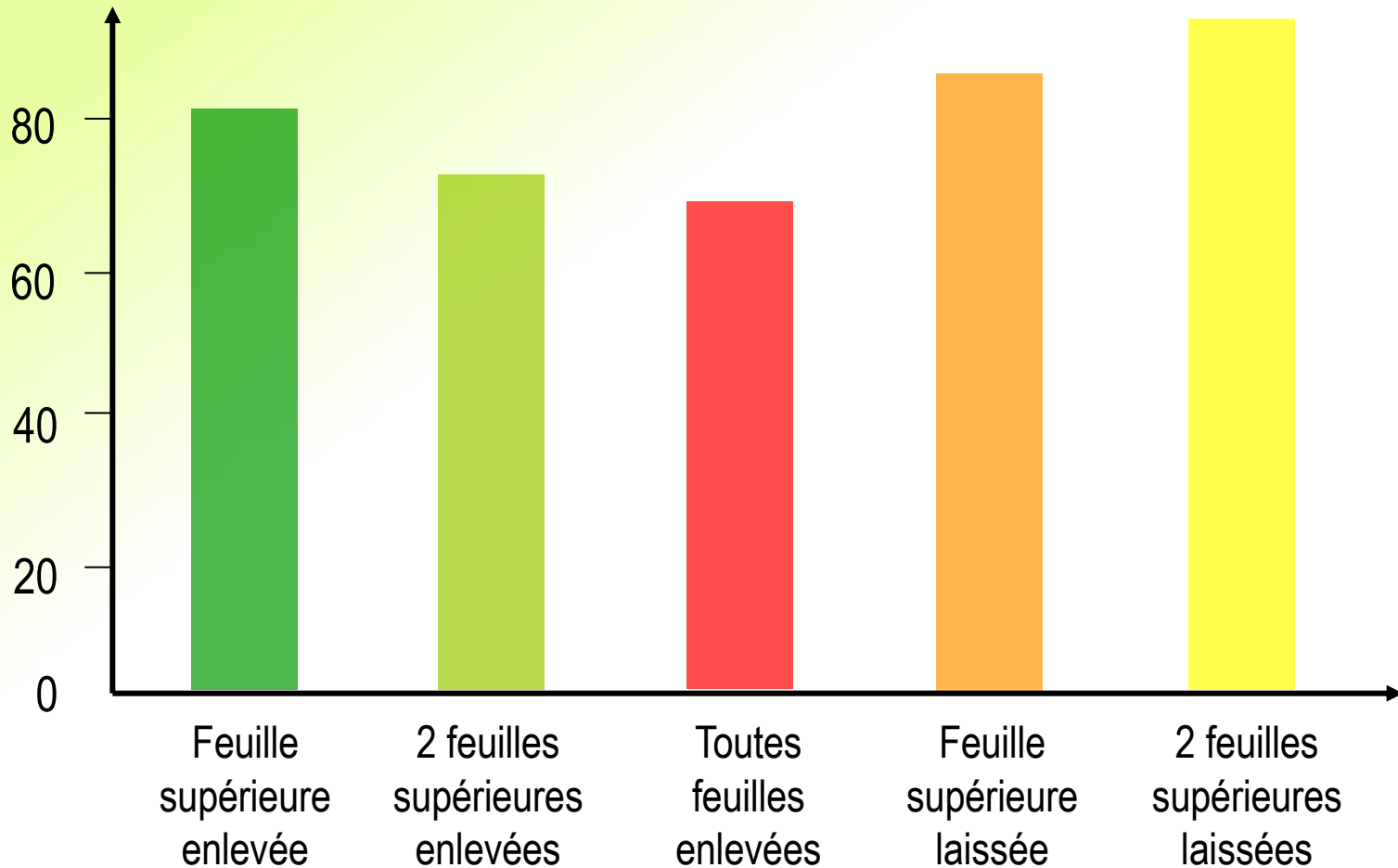
## Equilibre sources/puits



# Répartition des ressources

## Activité des sources de carbone

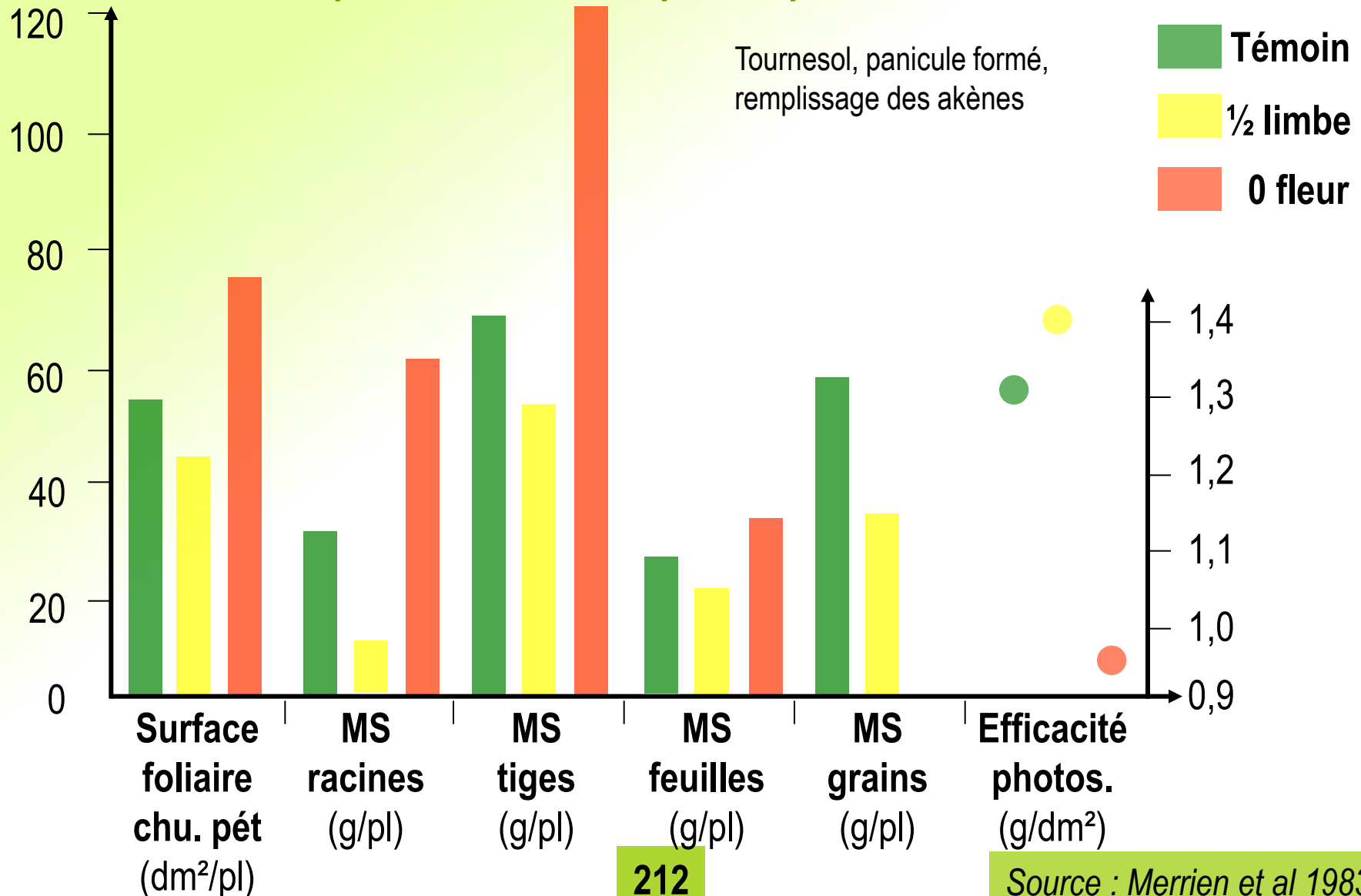
% du rendement  
témoin



**Blé**

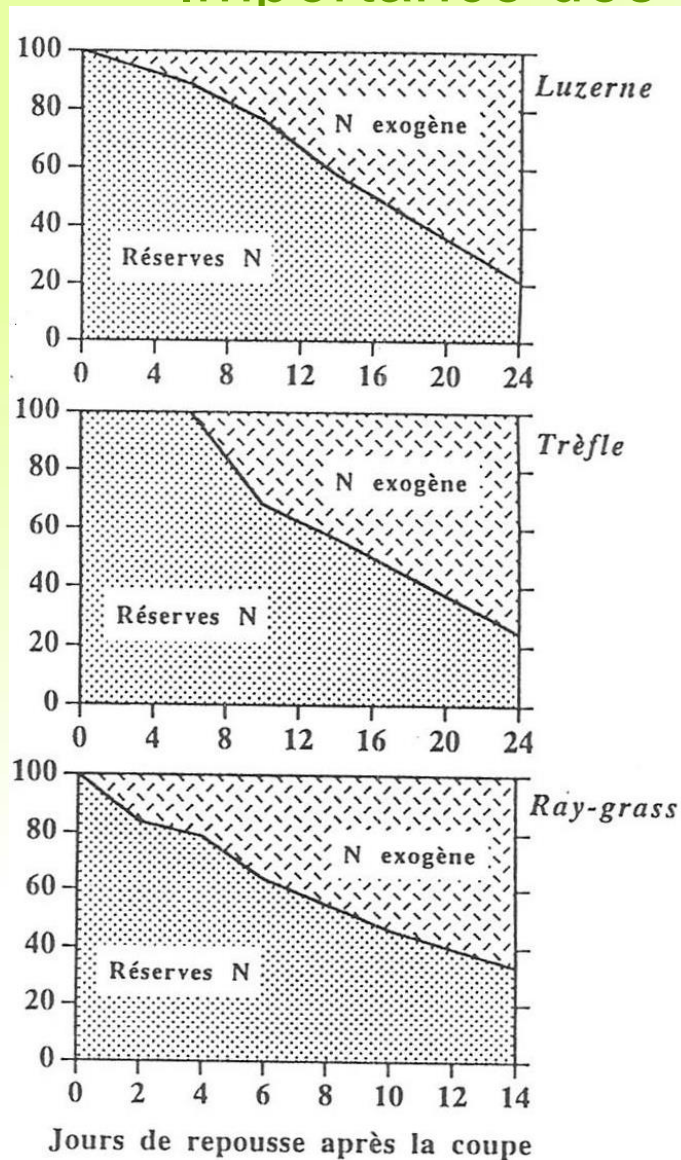
# Répartition des ressources

## Compétition entre puits pour le carbone



# Répartition des ressources

## Importance des réserves

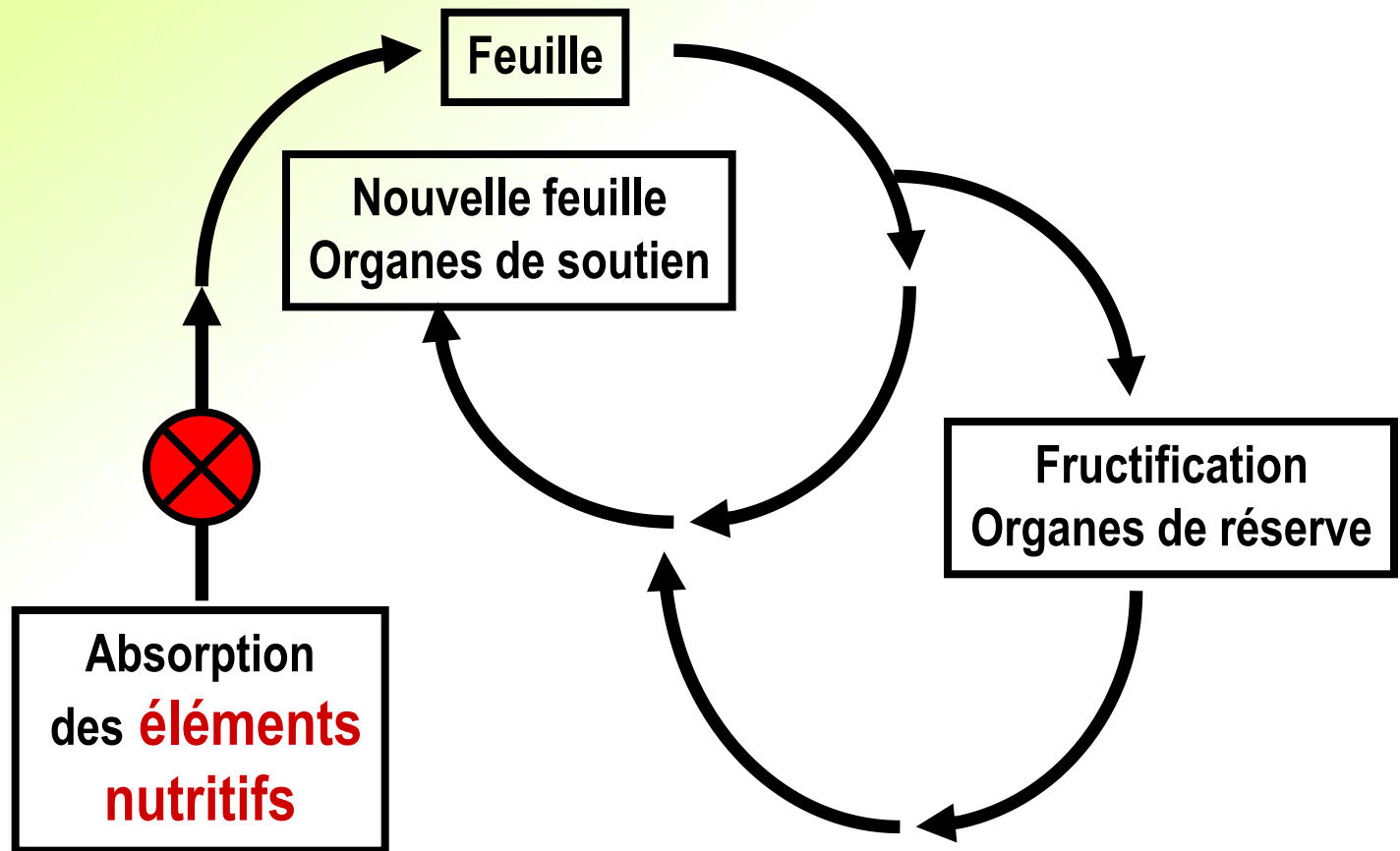


Contribution de l'azote issu des réserves azotées et de l'azote exogène (fixation ou absorption) à l'azote total des parties aériennes au cours d'une repousse.

% de l'azote total au moment de la récolte

# Répartition des ressources

## Affectation des assimilats et minéraux





# Répartition des ressources

O = Offre (Sources)

B = Besoins (Puits)

R = Réserves

## Affectation des ressources

