

Comment reconnecter les plantes à la vie du sol dans des agrosystèmes durablement productifs ?

Sébastien FONTAINE

INRAE Clermont-Ferrand

sebastien.fontaine@inrae.fr

1. Synthèse des connaissances sur les régulations CNP

REVIEW

Global Change Biology WILEY

Plant-soil synchrony in nutrient cycles: Learning from ecosystems to design sustainable agrosystems

Sébastien Fontaine¹ | Luc Abbadie² | Michaël Aubert³ | Sébastien Barot² | Juliette M. G. Bloor¹ | Delphine Derrien⁴ | Olivier Duchene⁵ | Nicolas Gross¹ | Ludovic Henneron³ | Xavier Le Roux⁶ | Nicolas Loeuille² | Jennifer Michel⁷ | Sylvie Recous⁸ | Daniel Wipf⁹ | Gaël Alvarez¹

One Earth

CellPress

Commentary

A microbial framework for nitrogen cycling solutions in agroecosystems

A. Stuart Grandy,^{1,*} Amanda B. Daly,¹ Thomas Bécu,² Rémi Cardinael,^{3,4,5} Sébastien Fontaine,² Andrea Jilling,⁶ Chloe MacLaren,^{7,*} and Richard P. Phillips⁹



Biogéochimistes

Agronomes

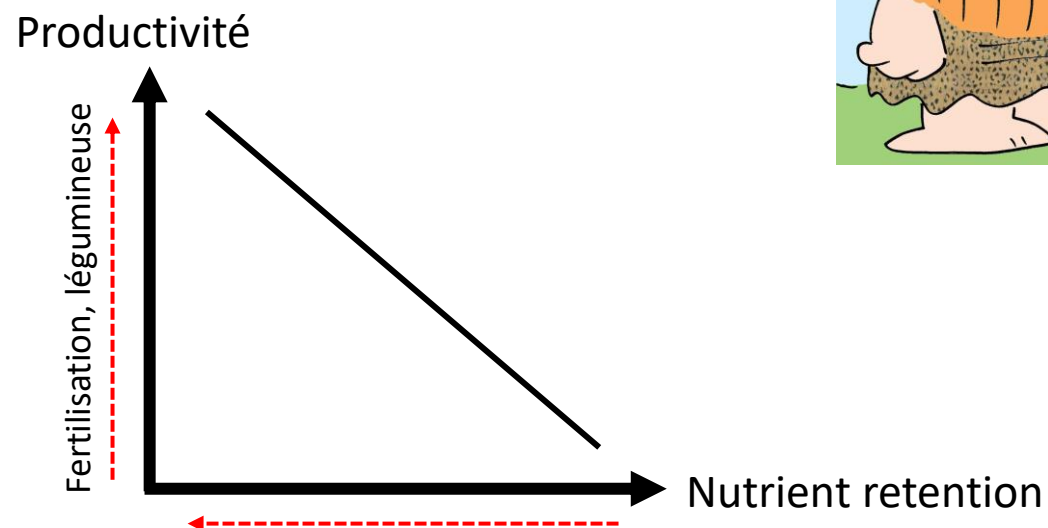
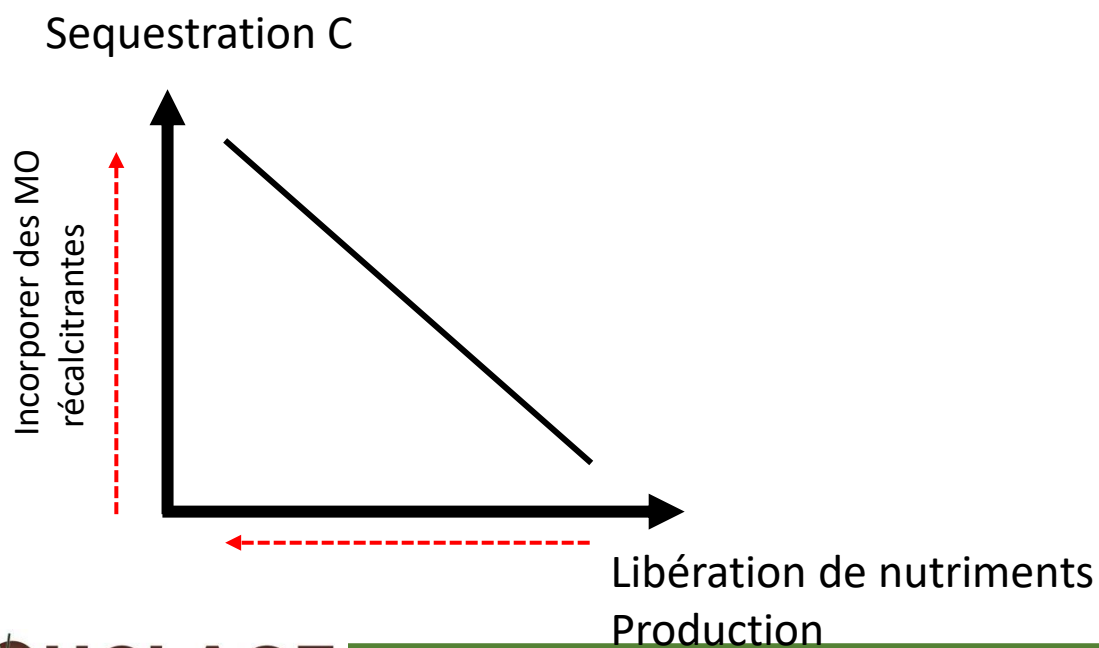
Ecologues

Et des agriculteurs

TCS
Techniques Culturelles Simplifiées
Agronomie, écologie et innovation

Ambition

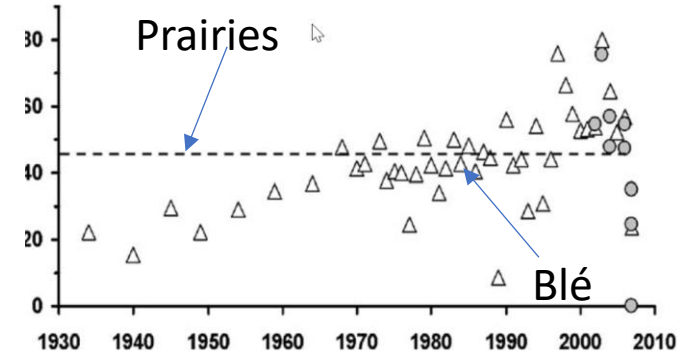
Sortir de l'impasse du compromis entre les fonctions production-durabilité



S'inspirer de la multifonctionnalité des milieux naturels

1) Systèmes naturels : des milieux productifs.

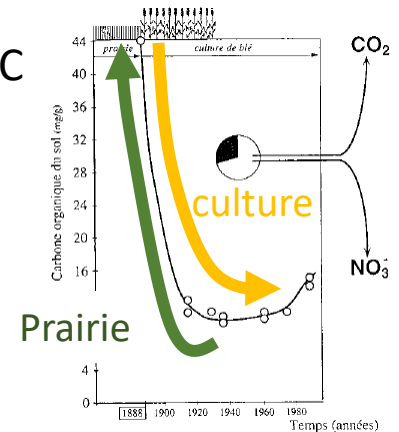
N récolté (kg N ha⁻¹)



Glover et al 2010

2) Stockage de C : supérieur dans les systèmes naturels

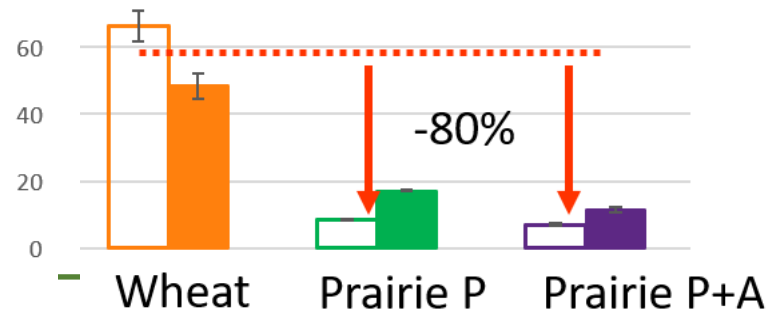
Stock de C
(gC kg⁻¹)



Balesdent et al., 1988

3) Rétention N : supérieur dans les systèmes naturels

Lessivage N (kg N ha⁻¹)

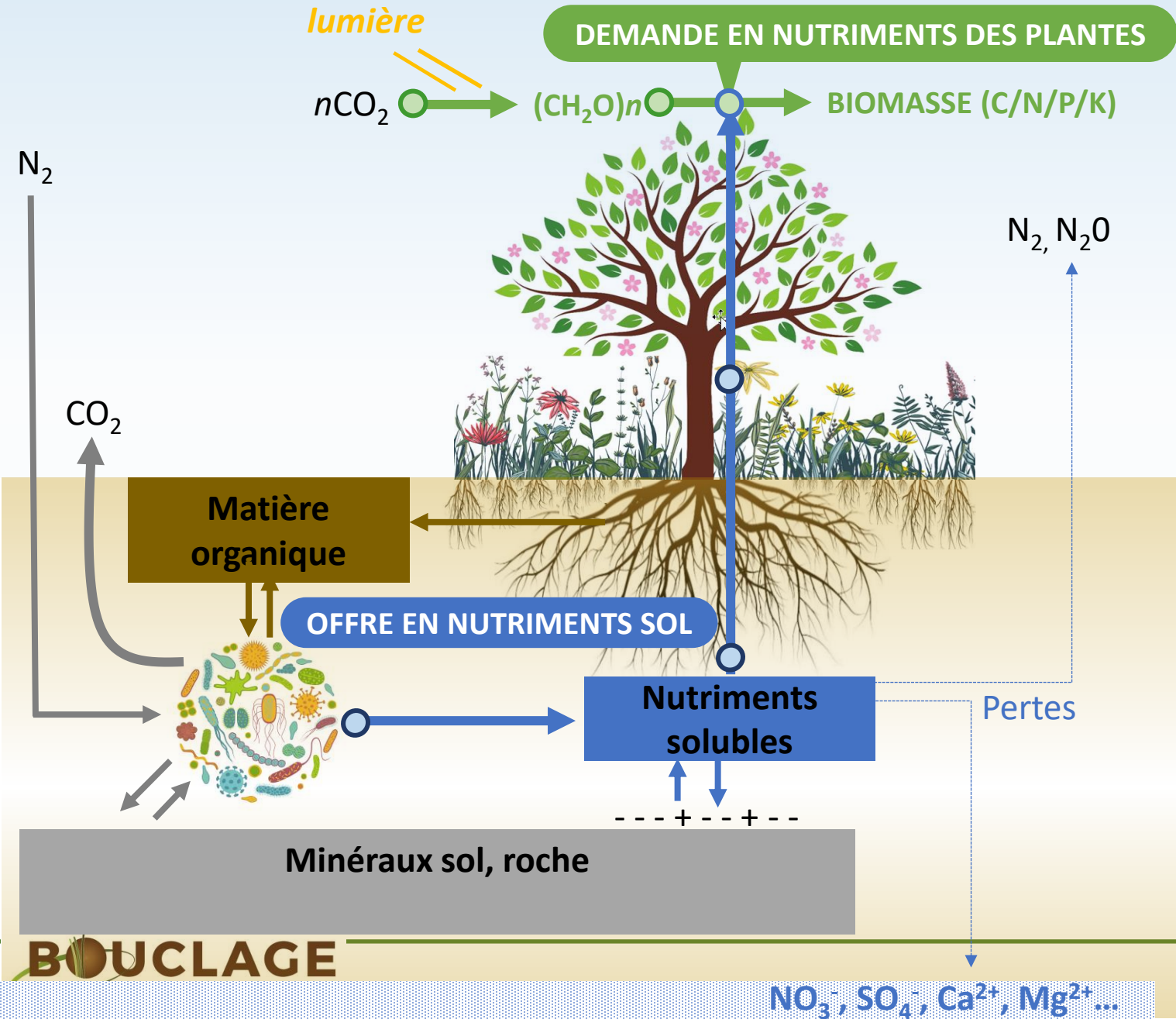


Cros et al 2019

Comment expliquer la multifonctionnalité des écosystèmes?

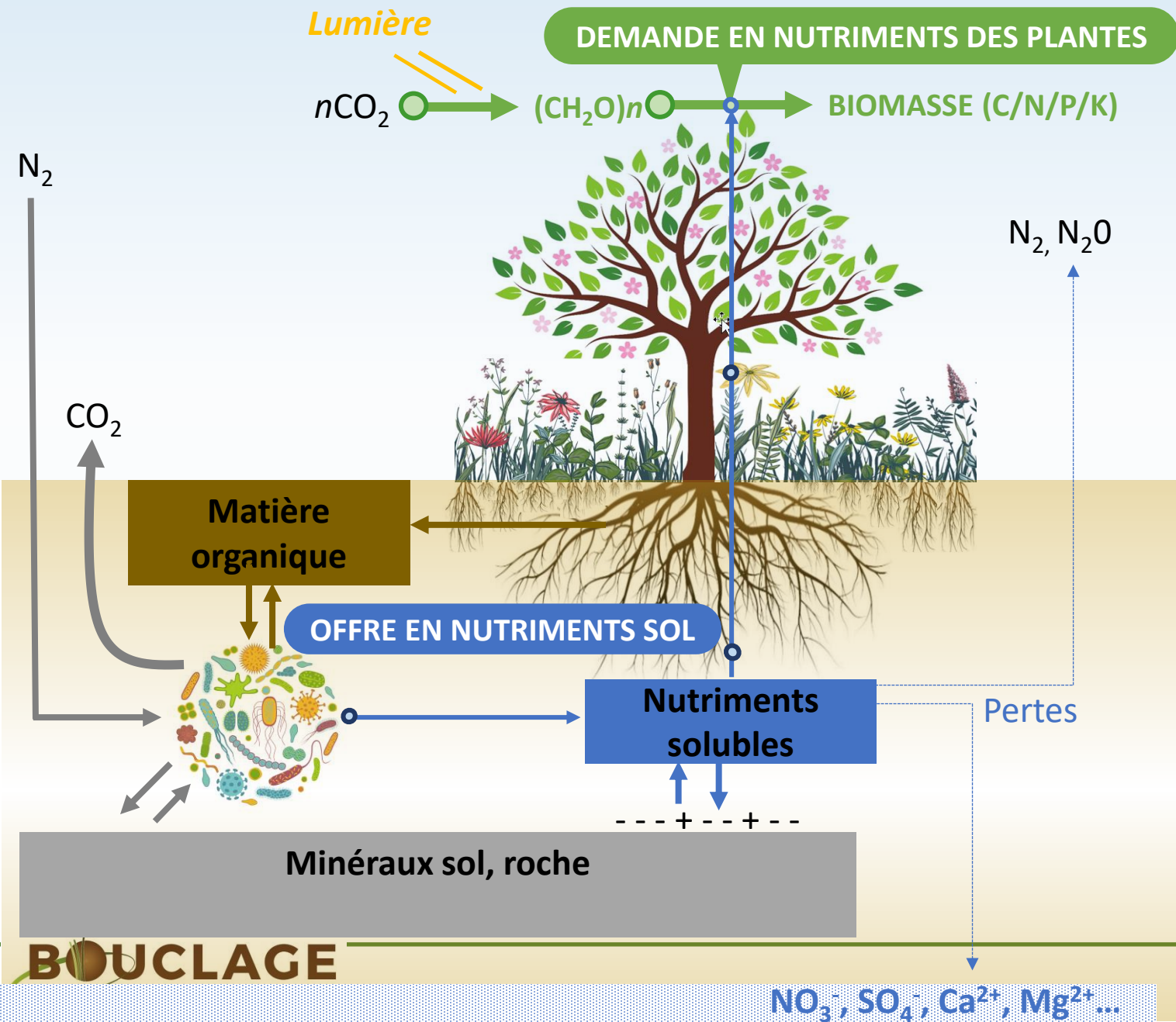
1. La notion de synchronie offre/demande

Les écosystèmes sous contrainte d'équilibre entre offre-demande

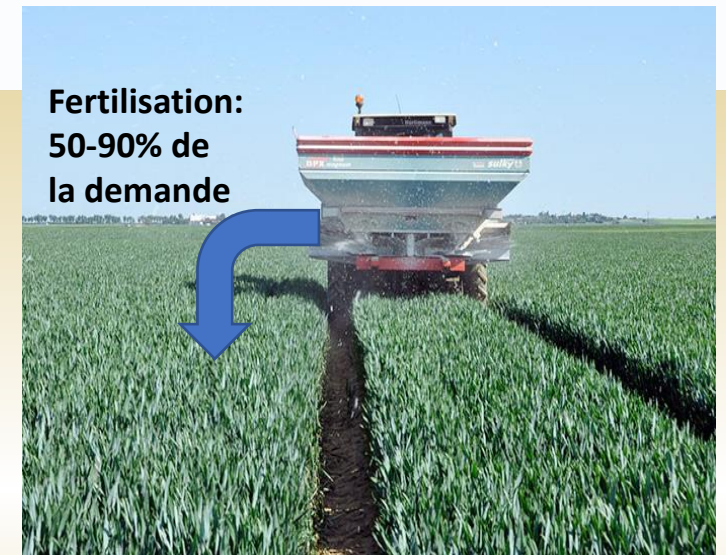


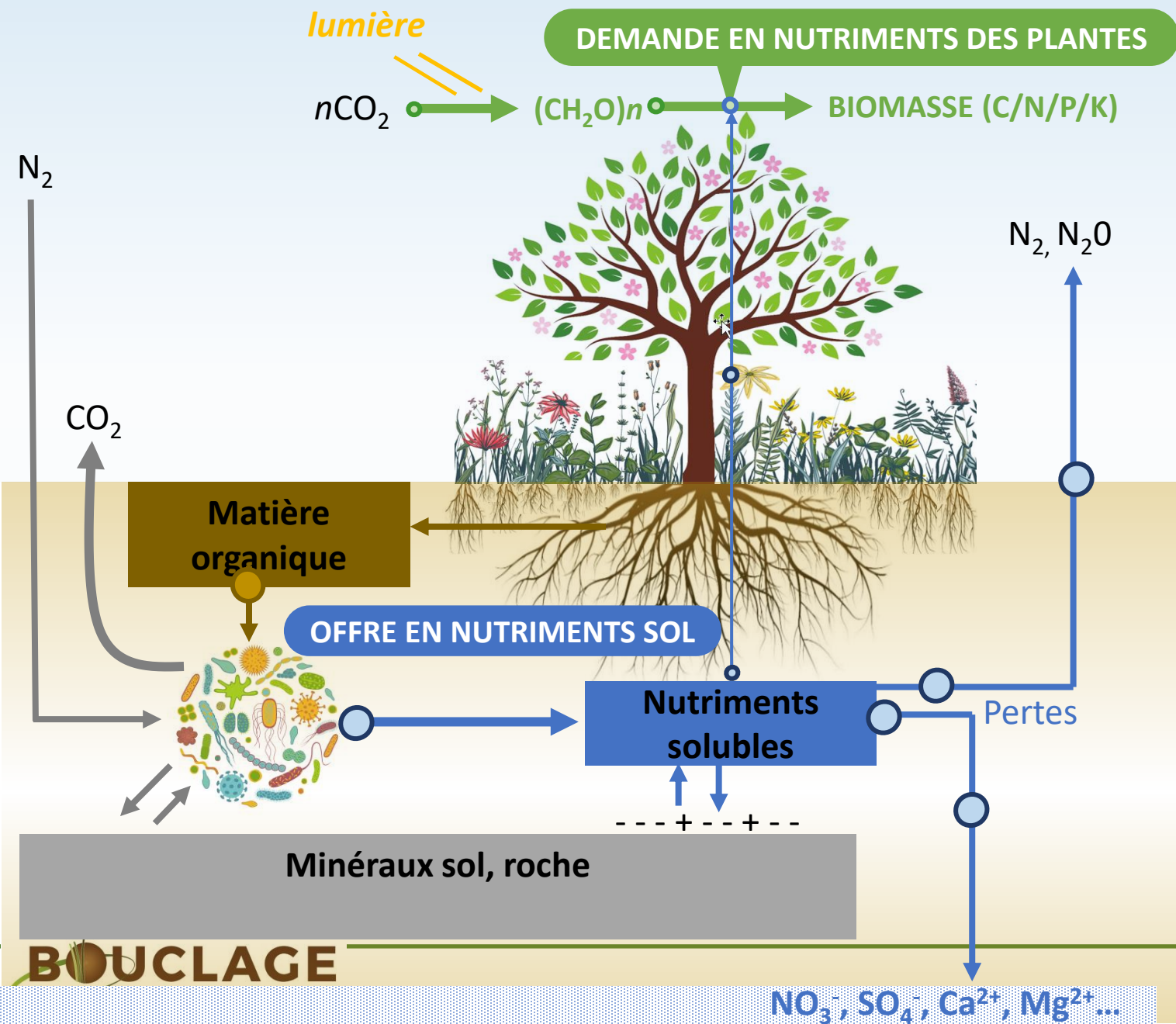
SYNCHRONIE OFFRE-DEMANDE:

- 1) *Maximisation de la production*
- 2) *Minimisation des pertes*
- 3) *Construction réserves organiques*



**OFFRE < DEMANDE
=
PRODUCTION REDUITE**





OFFRE > DEMANDE
=
PERTES DE NUTRIMENTS
PERTES DE C DU SOL

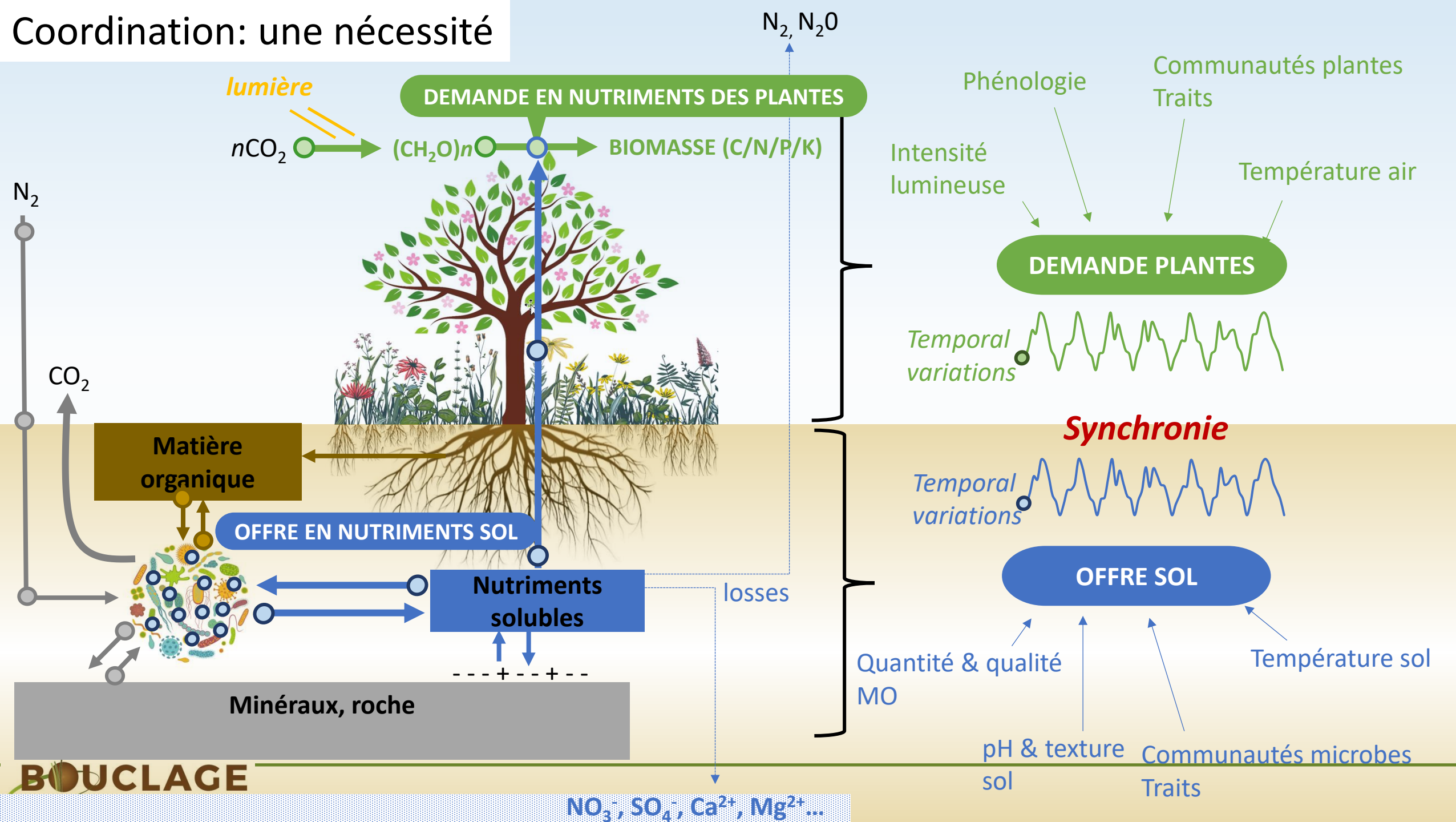


50% de l'N apporté est perdu

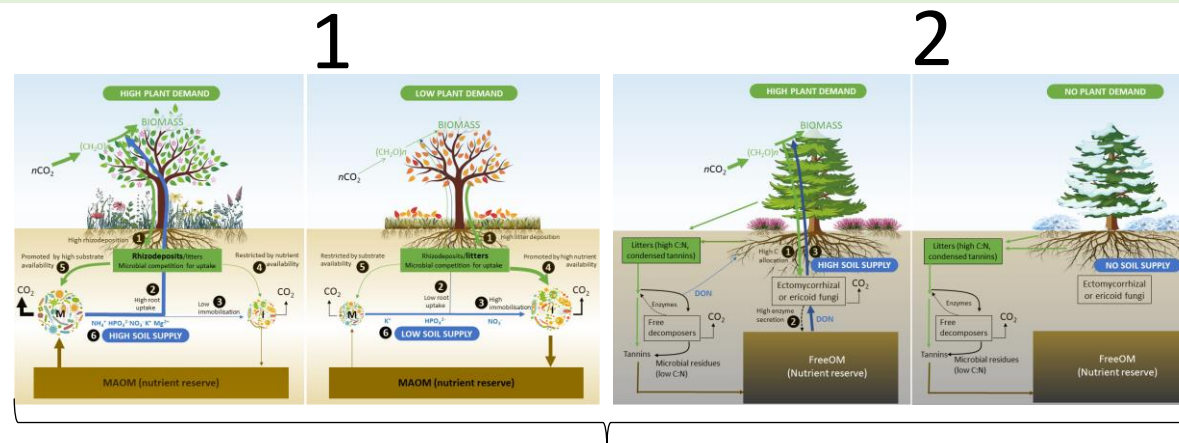
Comment expliquer la multifonctionnalité des écosystèmes?

2. La synchronie requiert une coordination entre organismes

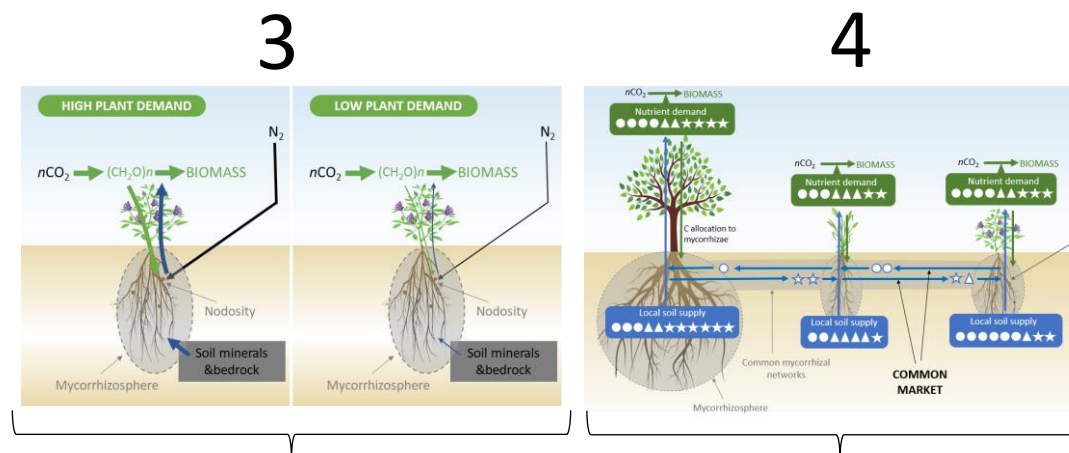
Coordination: une nécessité



4 systèmes « organisent » la synchronie offre/demande



RESERVES ORGANIQUES DES SOLS



RESERVOIRS INORGANIQUES

MARCHE COMMUN

Système de synchronie 1

Basé sur les matières organiques
liées aux minéraux des sols

DEMANDE FORTE

BIOMASSE

$(CH_2O)_n$

nCO_2

Rhizodépôts/litières

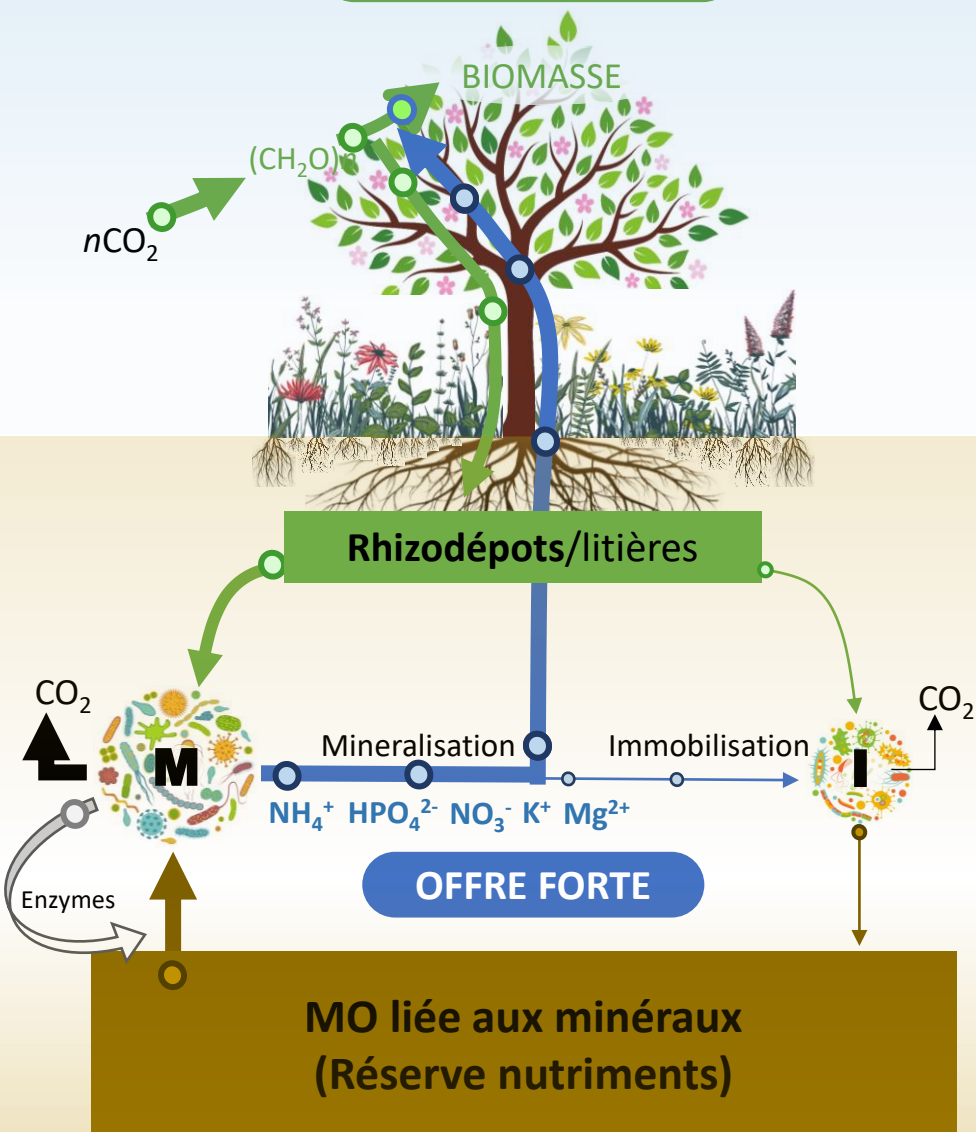
Minéralisation

Immobilisation

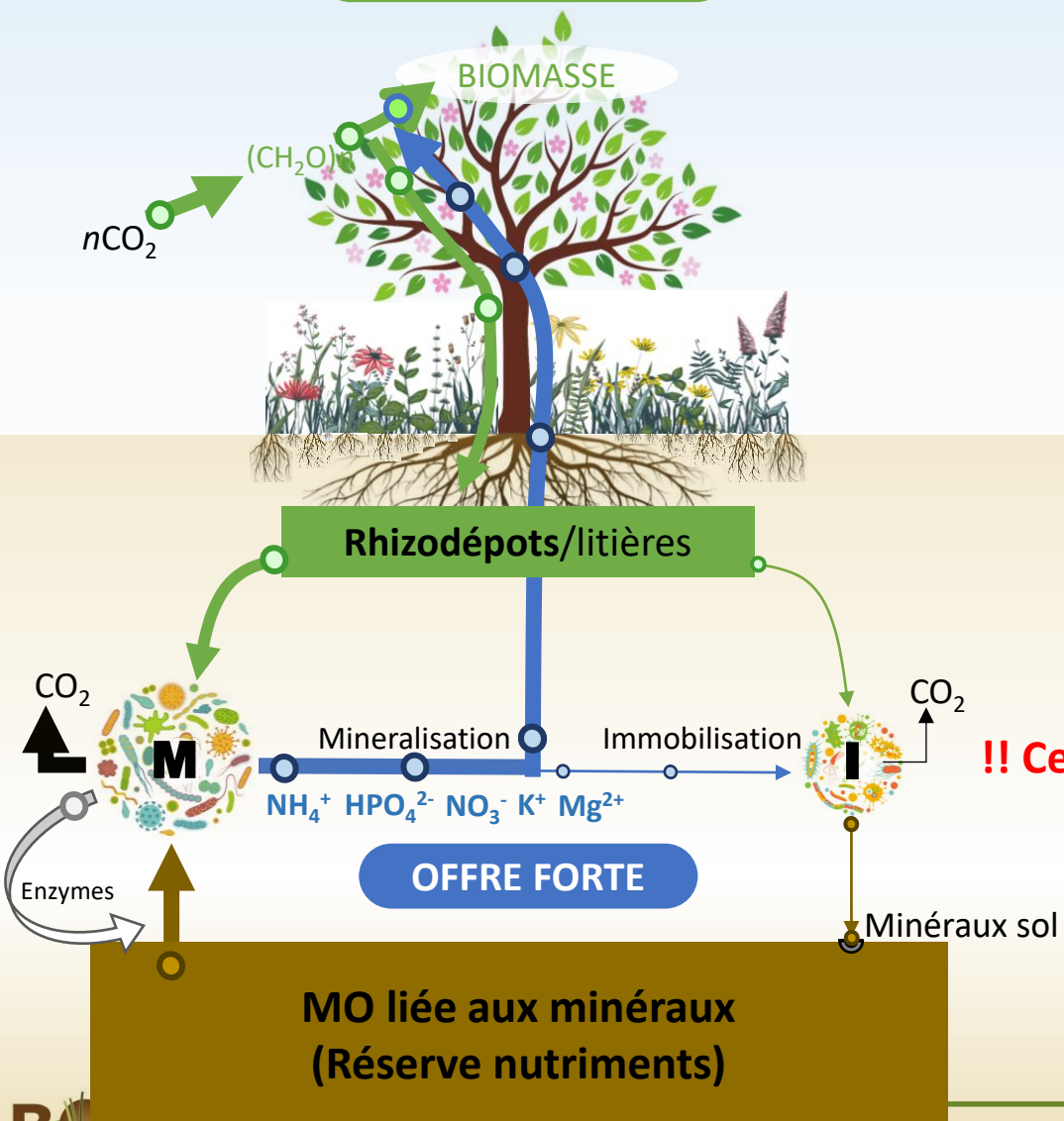
NH_4^+ HPO_4^{2-} NO_3^- K^+ Mg^{2+}

OFFRE FORTE

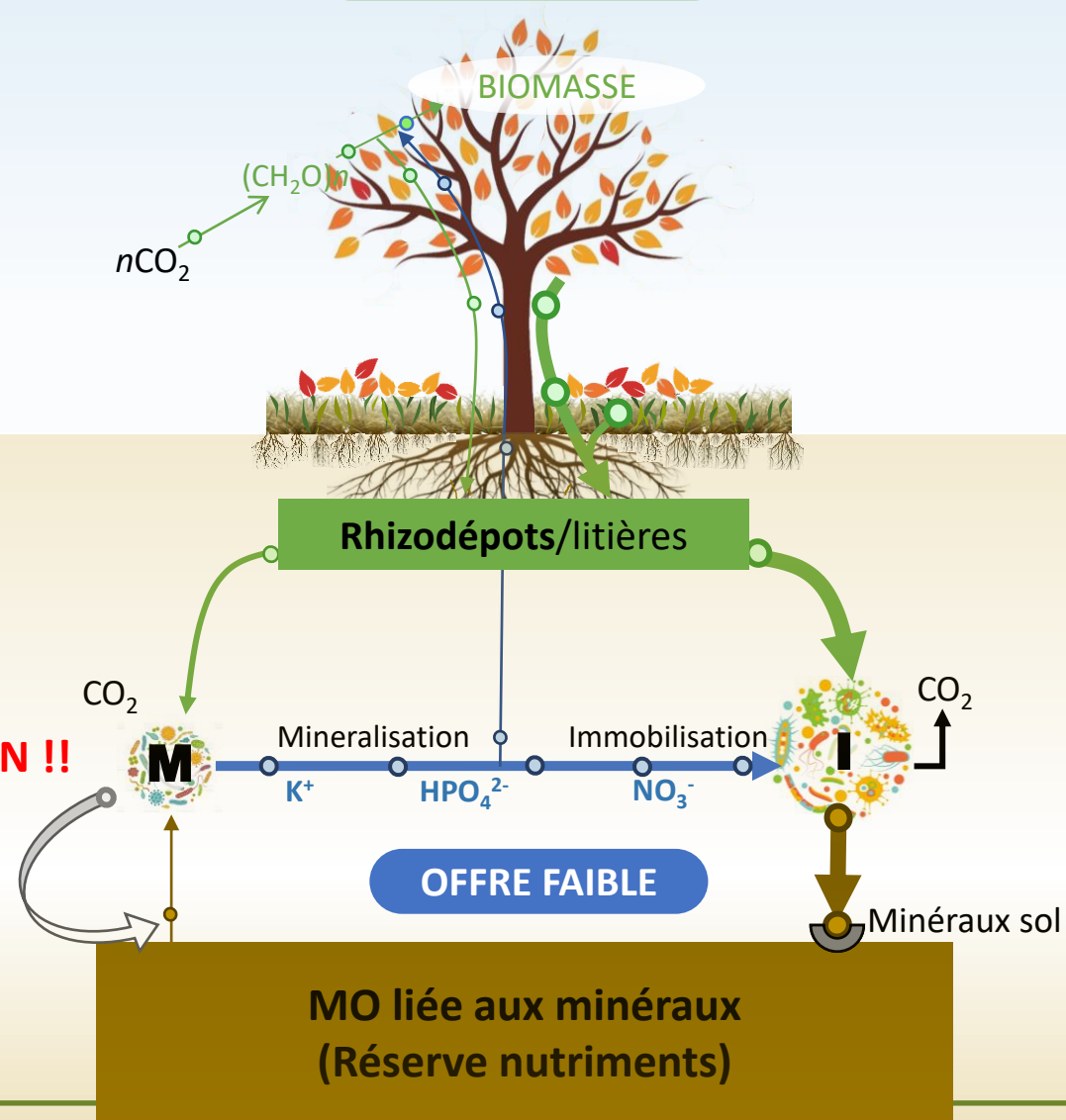
MO liée aux minéraux
(Réserve nutriments)



DEMANDE FORTE



DEMANDE FAIBLE





Pratiques favorisant ce type de synchronie



Maintien d'un couvert végétal permanent

Maintien d'un C/N de la biomasse élevé



Lessivage N -70%
Stock C sol +15%
Emissions N₂O -85%

Sélection nouvelles espèces/variétés



plantes pérennes



blés à forte
exsudation

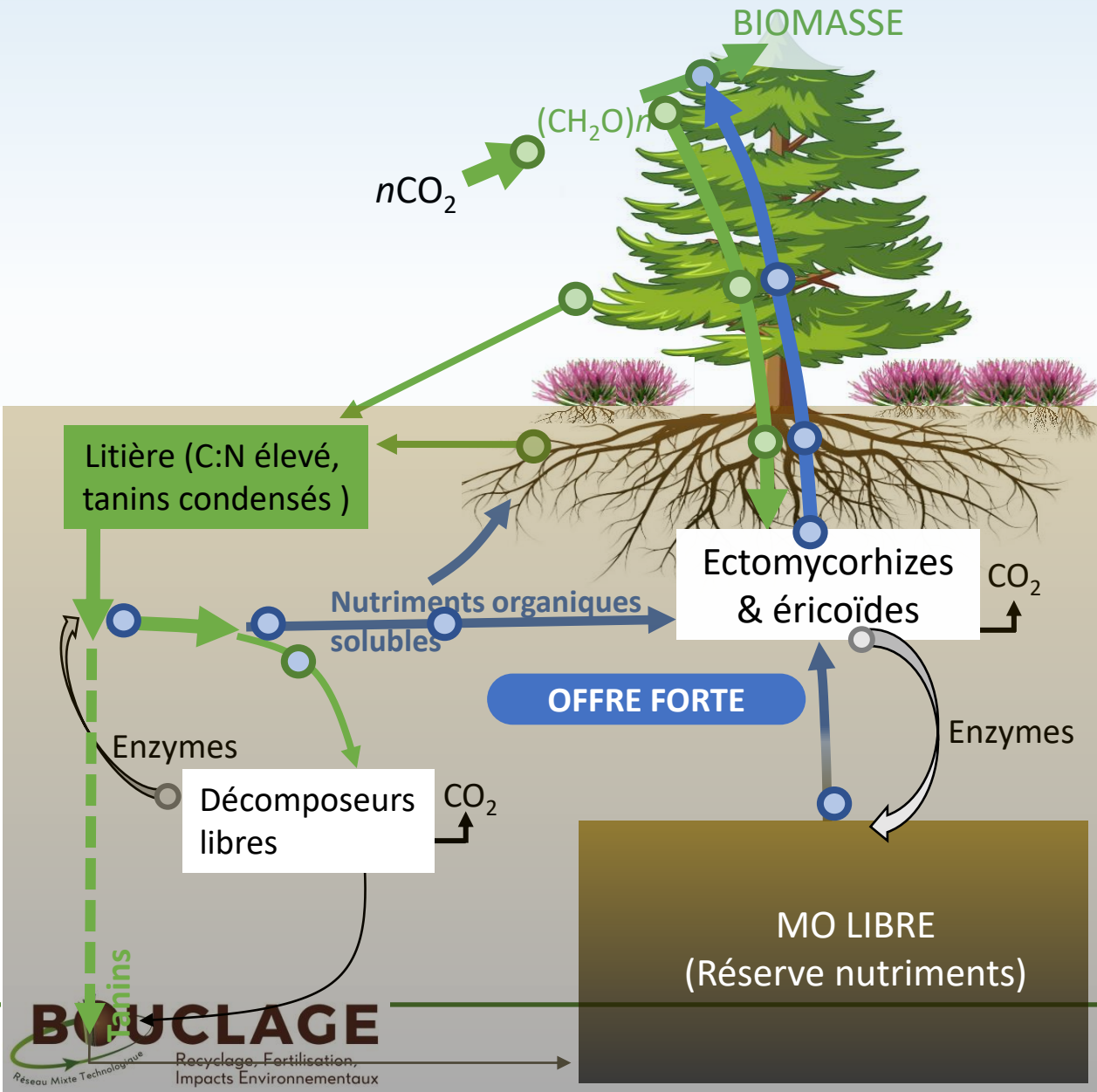
Recyclage nutriments organiques



Système de synchronie 2

Basé sur les matières organiques
libres (horizon organique)

DEMANDE FORTE





Pratiques favorisant ce type de synchronie



Insertion de plantes conservatives



Pâturage des landes à callunes



Pinède dans les Landes

Recyclage nutriments organiques



! NECESSITE d'INNOVER POUR INSERER CETTE SYNCHRONIE DANS LES AGROSYSTEMES !

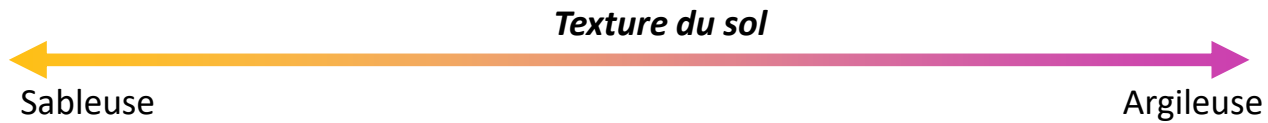
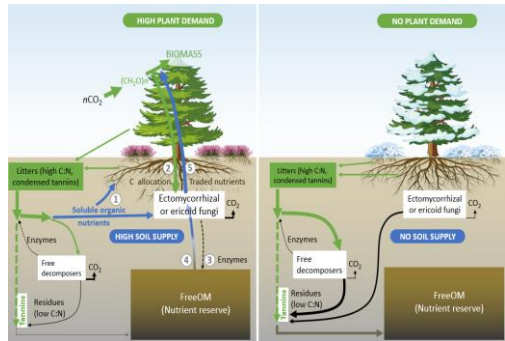
Adapter les types de synchronie et pratiques aux conditions locales



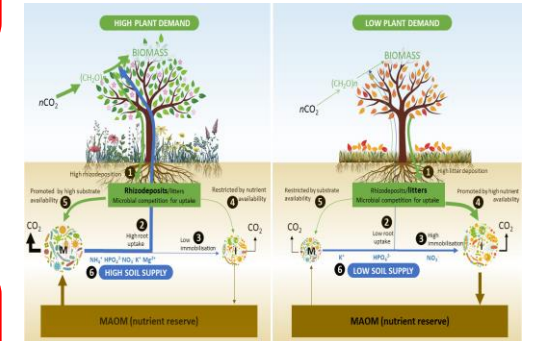
S'adapter aux conditions locales



Système MO libre



Système MO-minéraux



Exemple d'erreur:
Cultiver du blé ou
du maïs sur des sols
sableux



Photographie : Christophe Maltre (INRA)

Système de synchronie 3

Basé les grands réservoirs de
nutriments inorganiques

DEMANDE FORTE

$n\text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \text{BIOMASSE}$



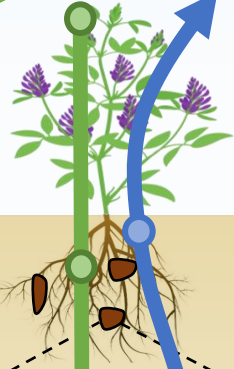
Microbes solubilisateurs



OFFRE FORTE

Minéraux, précipités,
roche

N_2
 $n\text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \text{BIOMASSE}$



Rhizobium



DEMANDE FORTE

DEMANDE FAIBLE

$n\text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \text{BIOMASSE}$

$n\text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \text{BIOMASSE}$

$\text{N}_2 \rightarrow n\text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \text{BIOMASSE}$

$\text{N}_2 \rightarrow n\text{CO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{O})_n \rightarrow \text{BIOMASSE}$

Microbes solubilisateurs

Rhizobium

Microbes solubilisateurs

Rhizobium

!! Dizaines kg P !!

!! Centaines de kg N !!

OFFRE FORTE

OFFRE FAIBLE

Minéraux, précipités,
roche

Minéraux, précipités,
roche



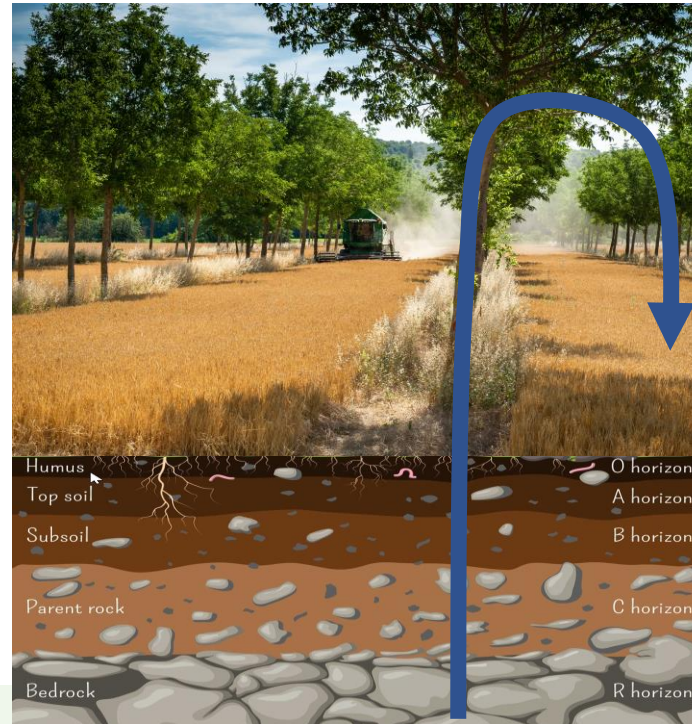
Pratiques favorisant ce type de synchronie



Fertilisant N -55%
Fertilisant P -12%



Insertion de plantes solubilisant
les minéraux (P inorganique)



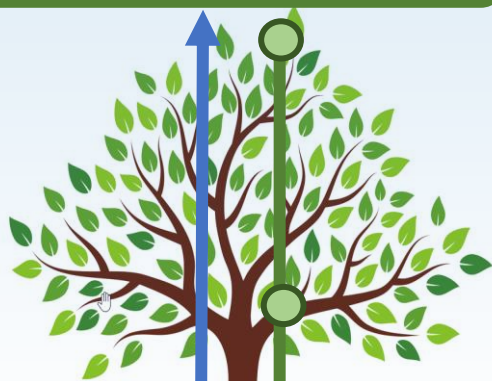
Ascenseur à nutriments

Système de synchronie 4

Basé un marché commun

$n\text{CO}_2$ → BIOMASSE

Demande en nutriments

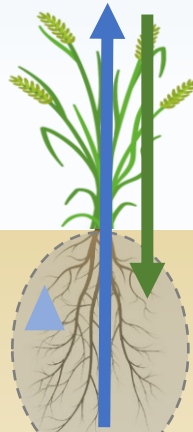


Offre locale sol



$n\text{CO}_2$ → BIOMASSE

Demande nutriments

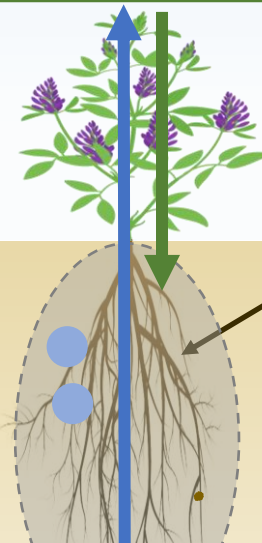


Offre locale sol



$n\text{CO}_2$ → BIOMASSE

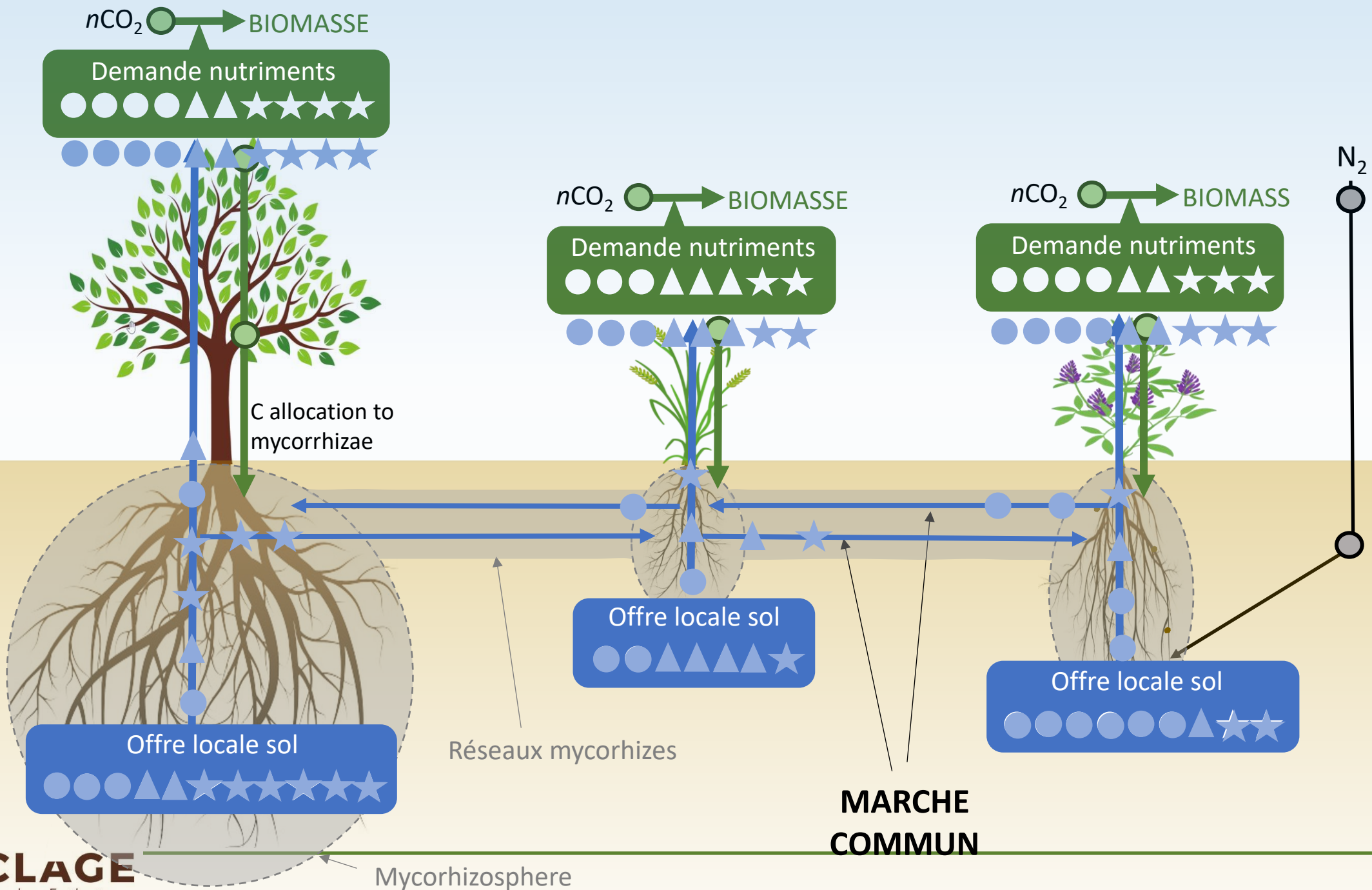
Demande nutriments



Offre locale sol



N_2





Pratiques favorisant ce type de synchronie



Association des espèces avec des besoins contrastés (e.g. C/N biomasse contrastés)



Association des espèces avec des stratégies d'acquisition en nutriments contrastés (MO des sols, N₂, minéraux des roches)



Conclusions



Reconcevoir le concept de fertilité



Définition historique

- Capacité inhérente des sols à soutenir à soutenir une production en fournissant des nutriments en quantité suffisante et dans les bonnes proportions

(FAO Global Soil Partnership 2023)

Ce que nous dit la synchronie

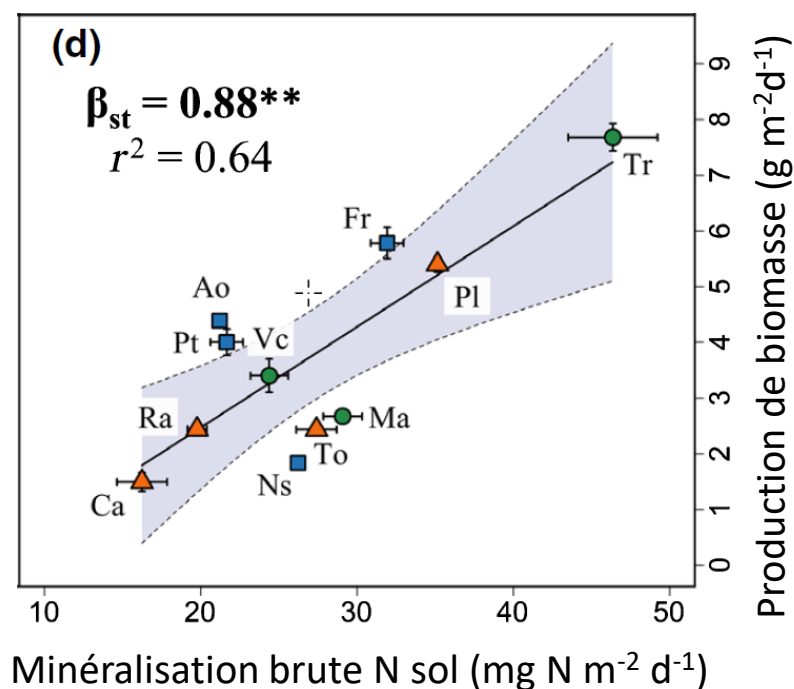
- La plante contrôle la quantité et la proportion des nutriments fournis par le sol
- Des interactions plante-sol et plante-plante tend à ajuster l'offre à la demande
- La **fertilité est une propriété émergente** des écosystèmes



Conséquences pratiques



Comparaison de 12 espèces fourragères



Un même sol peut
soutenir des
niveaux de
production très
différents

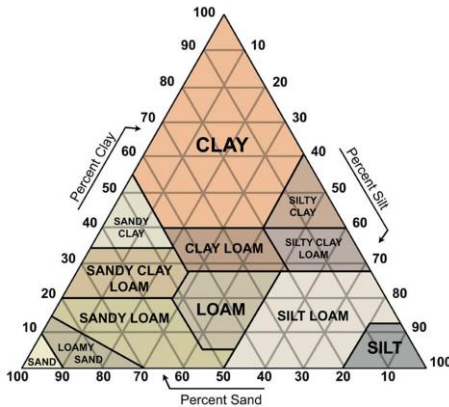
Possibilité d'une
intensification
écologique



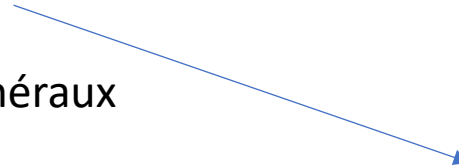
Approche pour concevoir des pratiques durables adaptés aux conditions locales



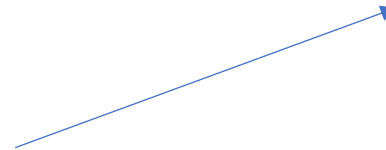
ETAPE 1



Texture sol
pH
Composition roche/minéraux



Evapotranspiration
Précipitation
Saisonnalité



Identifier les systèmes de synchronie à promouvoir



Approche pour concevoir des pratiques durables adaptés aux conditions locales



ETAPE 2 : installer des pratiques agricoles promouvant les systèmes de synchronie

Table de correspondance entre systèmes de synchronie et pratiques

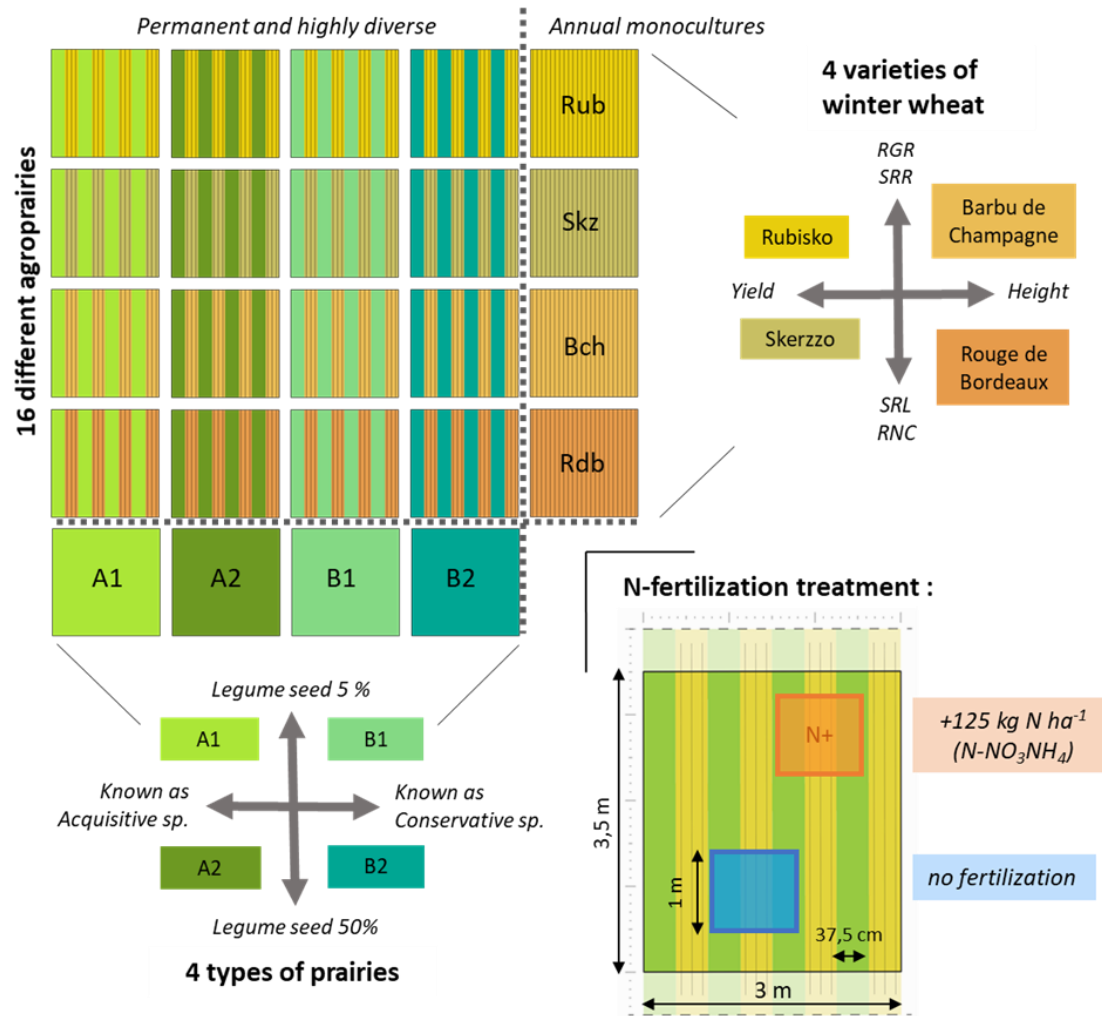
Synchrony	Conditions of synchrony	Combination of practices to set up for promoting the targeted synchrony
Sync-MAOM	-Acquisitive plant species -Continuous activity of microbes M & I -Reserve of MAOM in soil	- Use or genetically select acquisitive species with high C rhizodeposition rate - The C/N of plant species or organic residues must be high enough. Ideally, the different plant species have contrasting C/N ratios (a, c, j, k) - Maintain a continuous cover of active plants fueling microbes in energy (all pictures but e) - Recycle organic nutrients at local scale (farm-watershed) to preserve soil organic reserve on the long-term (d, e, f)
Sync-FreeOM	-Conservative plant species -Mycorrhizal fungi -Reserve of FreeOM in soil	- Use or genetically select conservative species producing recalcitrant litter with reactive compounds (e, f)* - Amendment of recalcitrant organic residues harboring reactive compounds partly charged in organic nutrients (e) - Recycle organic nutrients at local scale (farm-watershed) to preserve soil organic reserve (d, e, f)
Sync-Inorganic	-Plant symbiosis with mycorrhizal fungi & N₂ fixing bacteria -Nutrients stored in bedrock, soil minerals and/or precipitates	- Use or genetically select of species with strong capacity of mobilizing nutrients from rock and soil minerals - Use of plant with deep roots colonizing bedrock (g, h, i) - Use of legumes (a, c, k) - Inoculation with mixed mycorrhizal fungi & N₂ fixing bacteria in highly degraded soils
Sync-Market	-Plant species with complementary nutritional needs -Common mycorrhizal networks	- Mix plant species with different nutrient acquisition strategies and carbon:nutrient ratios (a, c, l, j, k) - Promote perennial plants (f, g, h, i, k) and/or permanent plant cover (all pictures but e) to fuel mycorrhizae in energy-rich carbon - No or limited use of soil tillage (b) and pesticides to preserve mycorrhizae networks - Inoculation with mixed mycorrhizal fungi in highly degraded soils
Increasing overall synchrony	-Synchrony systems adapted to pedoclimatic context -Complementary synchrony systems -Plant plasticity & reserve	- Analyzing the soil profile and climate, adapt the proportion of the different synchrony systems accordingly - Mixing plant species with different nutrient acquisition strategies (a, c, l, j, k) - Select crops species for their suitability to association - Promote perennial plants with high reserve and organ plasticity (f, g, h, i, j, k)

Les Agroprairies: une innovation issu de la recherche

- Cette innovation répond à trois objectifs
 - ♣ Nécessité d'insérer un haut de diversité végétale dans les cultures céréalières
 - ♣ Concevoir des agrosystèmes avec un haut niveau de synchronie
 - ♣ Multifonctionnels (productif, stockant du C, épurant les eaux drainantes...), faibles intrants



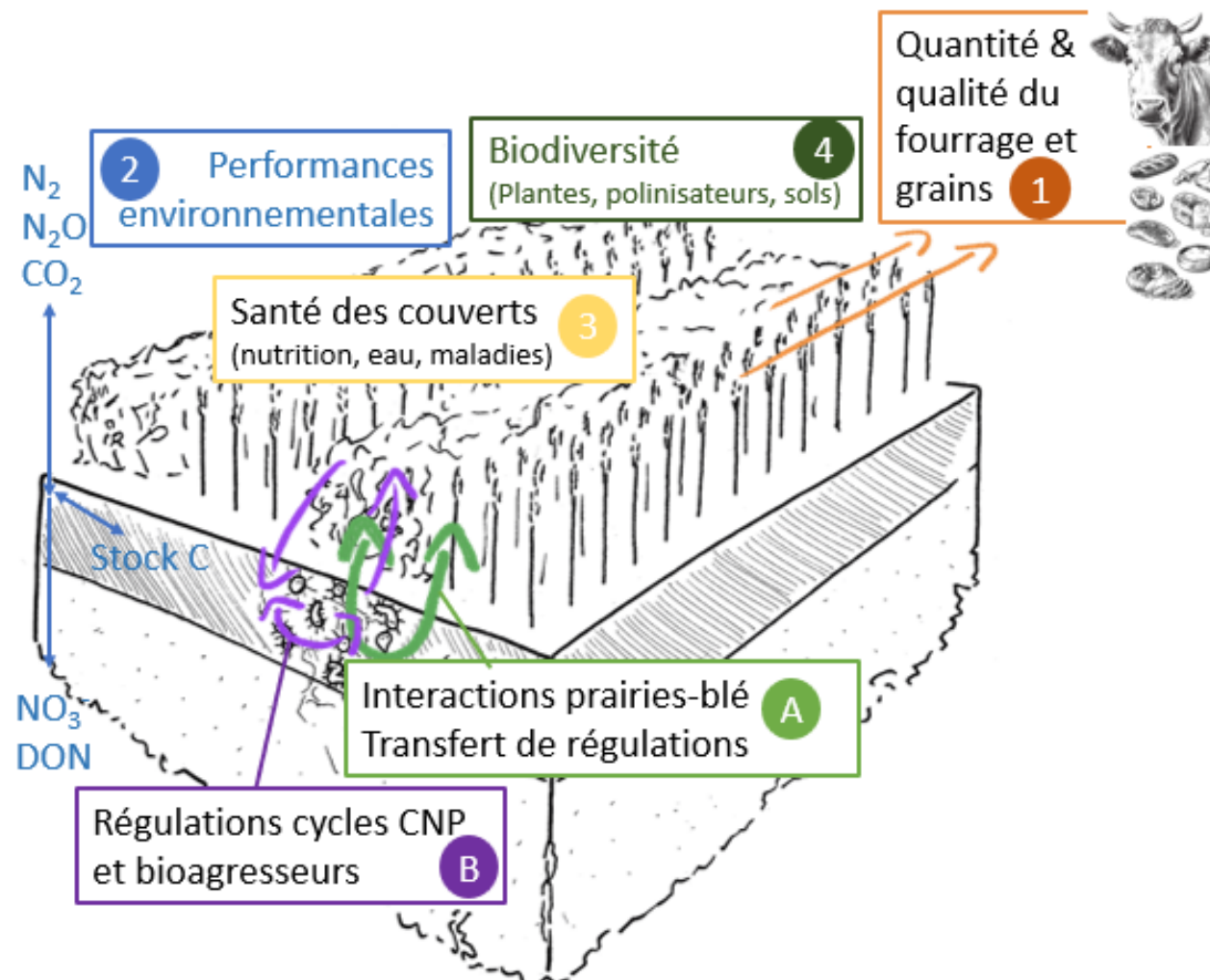
Les Agroprairies: une expérimentation au champs



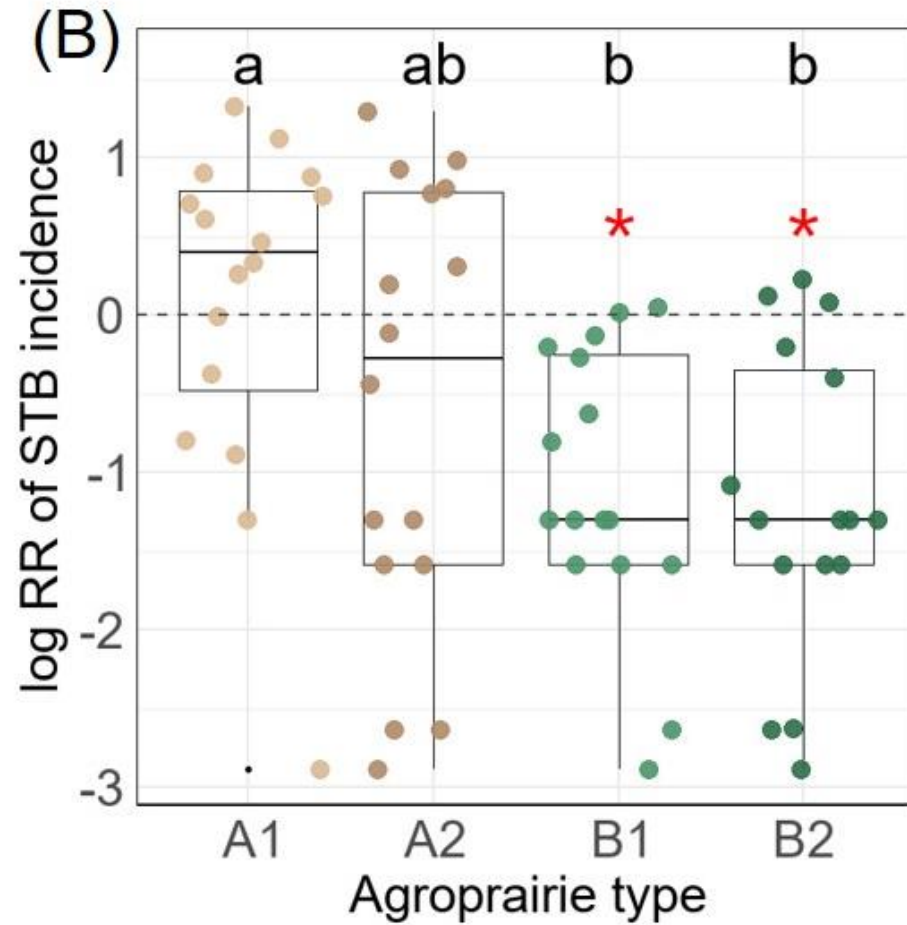
- INRAE de Clermont-Ferrand, site de Crouël (sol argilo-limoneux calcaire)
- 160 parcelles, **280 placettes d'étude**, 80 traitements étudiés sur 5000 m² incluant 3 types d'écosystèmes : prairies, cultures de blé et un système agroécologique.
- **6 Unités** de recherche, 3 thèses



Les différents suivis



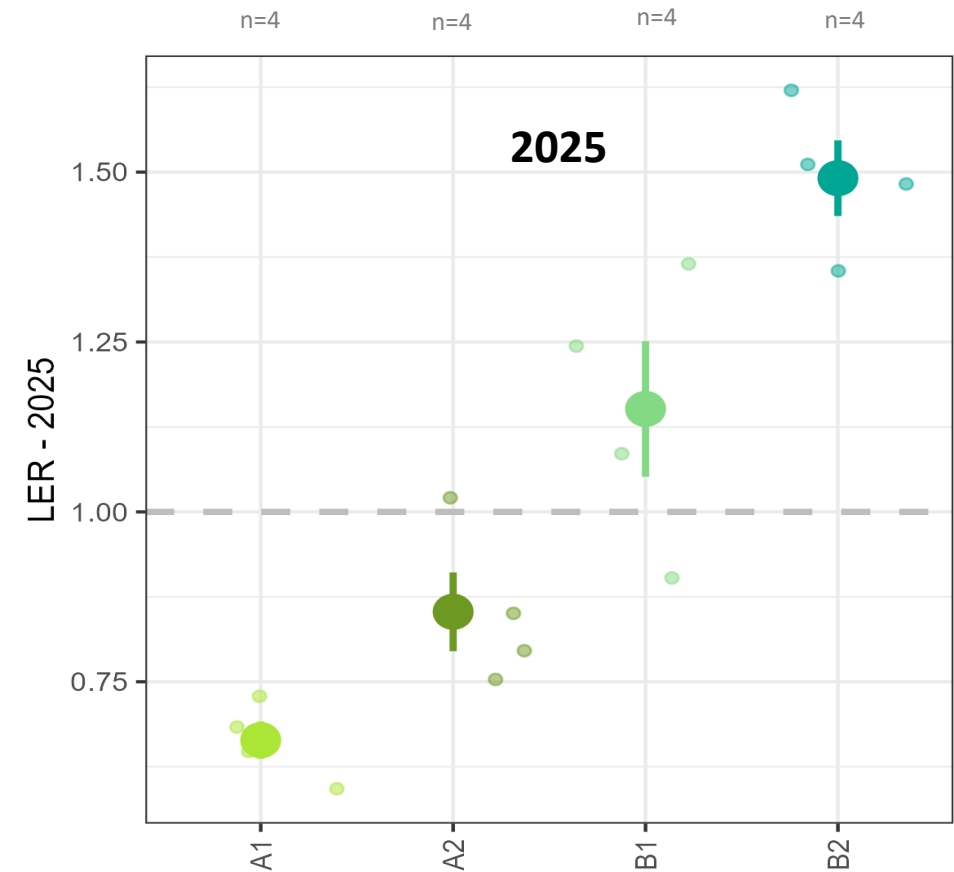
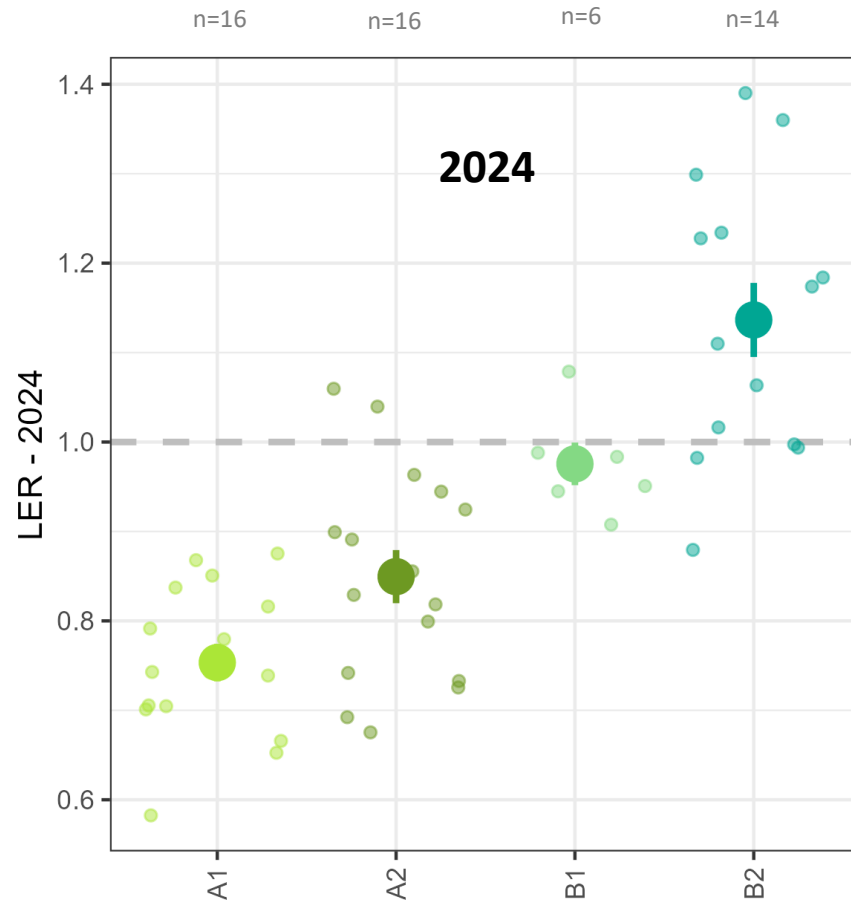
Les premiers résultats: effet des agroprairies sur la septoriose du blé



- Réduction de 50% de la septoriose du blé dans deux types d'agroprairies
- Expliqué par un effet barrière (lien positif entre régulation septoriose et biomasse herbe)

Les premiers résultats: production totale

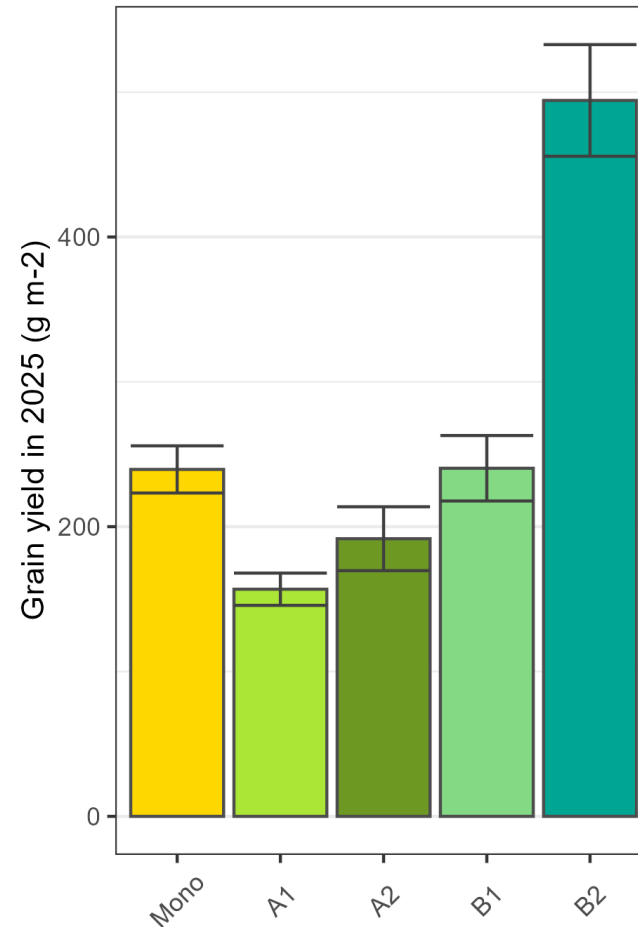
$$\text{LER} = \frac{\text{Production AP}}{50\% \text{ production Blé monoculture} + 50\% \text{ production prairie}}$$



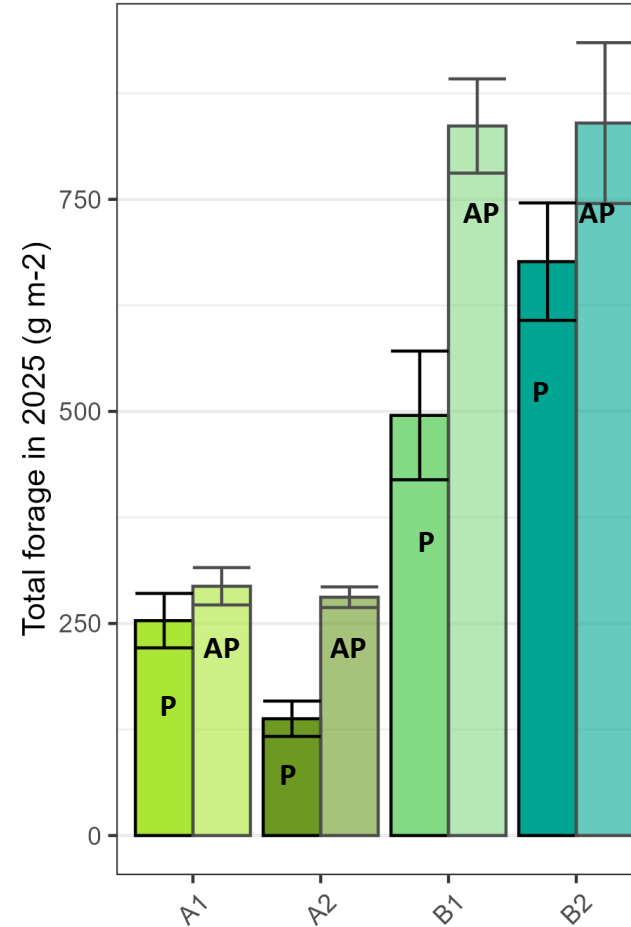
Effet massif des associations sur la production (-30 à +50%) dont le sens dépend de la composition des prairies

Les premiers résultats: productions grains & fourrage en 2025

GRAINS BLE (n=8)



FOURRAGE (n=8)



- Production de fourrage systématiquement supérieure en agroprairie
- +100% de production de grains de blé associé à la prairie B2!