



# Projet I.M.P.A.C.T!

Interactions Microbiennes pour  
l'assimilation du Phosphore en  
Agroforesterie de Climat Tempéré

Quels apports des microorganismes pour  
l'assimilation du Phosphore ?

# Agroécologie & agroforesterie

L'agroécologie est considérée comme un nouveau modèle agricole qui place la gestion durable des sols au cœur de son fonctionnement. Elle s'intéresse à valoriser la biodiversité des systèmes agricoles et les interactions biotiques permettant de diminuer les apports d'intrants (chimiques, ou issus de ressources naturelles non renouvelables) et contribuer à préserver les ressources naturelles (climat, sol, eau). La transition agroécologique est complexe et nécessite des études de terrain, pour comprendre les conditions de mise en œuvre des nombreux services écosystémiques rendus par les pratiques agroécologiques, comme l'agroforesterie.

L'agroforesterie consiste en la diversification des types de végétation intraparcellaires, induisant à terme des modifications de fonctionnement écologique et microbiologique du sol. Une des questions soulevées par ce type de système est de pouvoir identifier les services agroenvironnementaux rendus par les différentes espèces accueillies !

La réponse à cette question est complexe :

- L'étude des sols est difficile et couteuse : les microbes sont par définition invisibles et demandent des techniques scientifiques de pointe (analyses moléculaires, notamment le séquençage de l'ADN)
- Comme tout système vivant, les communautés microbiennes évoluent au gré des saisons, et au fil des ans, en réponse aux pratiques, aux cultures, au climat, et au développement des arbres.
- Le lien entre qualité et fonctionnement microbiologique du sol d'une part, et les résultats agronomiques d'autre part est difficile à établir en raison de l'influence de nombreux autres facteurs comme la météo, l'ensemble des composantes de l'itinéraire technique et le type de sol.
- L'intérêt de la recherche pour les interactions sol-microorganismes-cultures-arbres est relativement récente et peu développée en milieu tempéré.

# Enjeu Phosphore

Le Phosphore est un élément indispensable à la croissance des plantes, en tant que constituant de base de l'ADN notamment. Ce nutriment est souvent un facteur limitant de la croissance des plantes dans les écosystèmes naturels et dans les agroécosystèmes. Il est présent dans le sol sous forme organique et peu assimilable par les plantes. Sa solubilisation nécessite une activité des microorganismes du sol pour le rendre accessible aux plantes sous formes inorganiques (phosphates). Une autre source de Phosphore inorganique provient de la roche mère dégradée progressivement. L'eau du sol est peu concentrée en Phosphore par rapport aux besoins annuels de la culture. Dans nos sols et nos climats, les plantes peuvent souffrir d'une carence de 20 à 80% de leurs besoins.

Pour compenser ces besoins, une variété de produits riches en Phosphore peut être utilisée (engrais minéraux, effluents d'élevage, résidus de cultures, déchets végétaux, etc...). Dans les régions céréalières, les apports sont majoritairement des engrais minéraux, extraits de roches phosphatées. Couramment utilisée depuis les années 60, cette pratique de fertilisation n'est pas durable puisqu'elle repose sur une ressource naturelle risquant de s'épuiser d'ici 50 à 100 ans. Cette pratique est aussi source de contamination par le Cadmium, pour les sols, ainsi que pour l'alimentation produite.

L'érosion subie par les sols agricoles contribue à une large perte par ruissellement du phosphore contenu dans les sols, et qui se retrouve alors dans les eaux de surface contribuant ainsi à la dégradation de la qualité de l'eau.

Le projet **IMPACT** souhaite donc apporter sa pierre à l'édifice en s'intéressant aux microorganismes des sols, aux services qu'ils rendent, et à l'équilibre écologique induit entre arbres et cultures dans des systèmes agricoles de bas intrants.

# Infiniments précieux : microorganismes des sols.

Dans le sol, l'assimilation du Phosphore est facilitée par les microorganismes, en particulier les mycorhizes : champignons dont le rôle écologique est symbiotique. Ces champignons sont associés aux racines des plantes, des arbres, et aident à l'absorption des minéraux.

En augmentant la diversité végétale d'une parcelle avec des arbres et des arbustes, des herbacées pérennes à leur pied, l'agroforesterie est susceptible d'accueillir et de développer une biodiversité accrue de microorganismes par rapport à un système sans arbre. Toute la question est de savoir quelles espèces de microorganismes sont accueillies, et quels sont véritablement leurs rôles dans l'agroécosystèmes et les services agroenvironnementaux effectivement rendus par les différentes espèces accueillies! Le lien entre les communautés de microorganismes, les fonctions rendues, et les possibilités réelles qu'a un agriculteur pour se permettre de réduire les intrants sont très difficiles à établir et à valider.

Ainsi, l'étude des microorganismes des sols et des services qu'ils rendent doit renseigner sur les équilibres écologiques qui s'établissent entre arbres et cultures dans des systèmes agricoles de bas intrants. L'analyse de la répartition des microorganismes au sein du champ en fonction de la distance à l'arbre, de l'essence et pour différents sites d'étude, permet d'apporter des éléments de réponses et d'affiner les hypothèses, de mettre en avant l'impact de la présence des bactéries/champignons identifiés et quant aux potentielles interactions.

## Ectomycorhizes

associations entre des arbres et des champignons Basidiomycètes et Ascomycètes. Ces mycorhizes ne pénètrent pas à l'intérieur des cellules de la plante, mais entourent simplement les racines, formant un manteau de mycélium et un réseau entre les parois des cellules de la racine.

## Ascomycètes ( Truffes...)

Les plus abondants dans les sols français (représente 38% des champignons en moyenne), ils dominent dans les sols cultivés en grande culture. Ils sont particulièrement stimulés dans les sols riches en Phosphore.

## Basidiomycètes (Bolets, Cèpes...)

Capables de décomposer les molécules de la matière organique morte, contribuant ainsi au recyclage des nutriments

# Comprendre les caractéristiques et le fonctionnement des communautés microbiennes

Le projet IMPACT étudie de manière approfondie la diversité des microorganismes à proximité des racines de 3 essences d'arbres sélectionnées. Pour ce faire, des échantillons de sol prélevés sur l'horizon 0-20 cm à l'automne ont subi une extraction d'ADN et un panel d'analyse en laboratoire tel que le séquençage du métagénome microbien. Des mesures des activités enzymatiques en lien avec le cycle du Phosphore ont également été réalisées. Afin de contextualiser et de comprendre l'influence du sol dans les processus microbiologiques, des analyses physico-chimiques ont été associées aux analyses microbiologiques.

Les champignons mycorhiziens ou les bactéries solubilisatrices de phosphates sont susceptibles d'interagir pour améliorer l'assimilation du Phosphore par les plantes.

## Endomycorhizes

vésiculaires à arbuscules, présents chez à peu près 70% des espèces de plantes, dont la plupart des cultures. Le mycélium pénètre à l'intérieur des cellules racinaires en créant des interfaces (les arbuscules) entre la membrane plasmique de la cellule fongique et celle de la cellule racinaire.

## Gloméromycètes

Correspond au groupe de champignon mycorhiziens à vésicules et arbuscules qui aident les plantes herbacées à s'approvisionner en eau et en minéraux (phosphore en particulier) puisés dans le sol. Ils ont également la capacité à minéraliser le Phosphore organique en libérant des enzymes appelées Phosphatase acide.

## Bactéries solubilisatrices & minéralisatrices de Phosphore

### Les bactéries solubilisatrices

(Burkholderia, Rhizobium...) rendent disponible le Phosphore minéral bloqué dans le sol (car fixé à des minéraux peu solubles). Elles peuvent sécréter des acides organiques permettant de dissoudre le Phosphore fixé et le rendre disponible sous forme soluble, assimilable par les plantes ( $H_2PO_4^-$ ,  $HP_04^{2-}$ ).

### Les bactéries minéralisatrices

(Streptomyces, Paenibacillus,...) transforment le Phosphore organique (que contient la matière organique notamment) en le minéralisant, grâce à certaines enzymes (comme les phosphatases). Elles rendent le Phosphore organique en Phosphore minéral disponible. Certaines bactéries peuvent utiliser ces deux fonctions : c'est le cas par exemple de Bacillus et Pseudomonas.



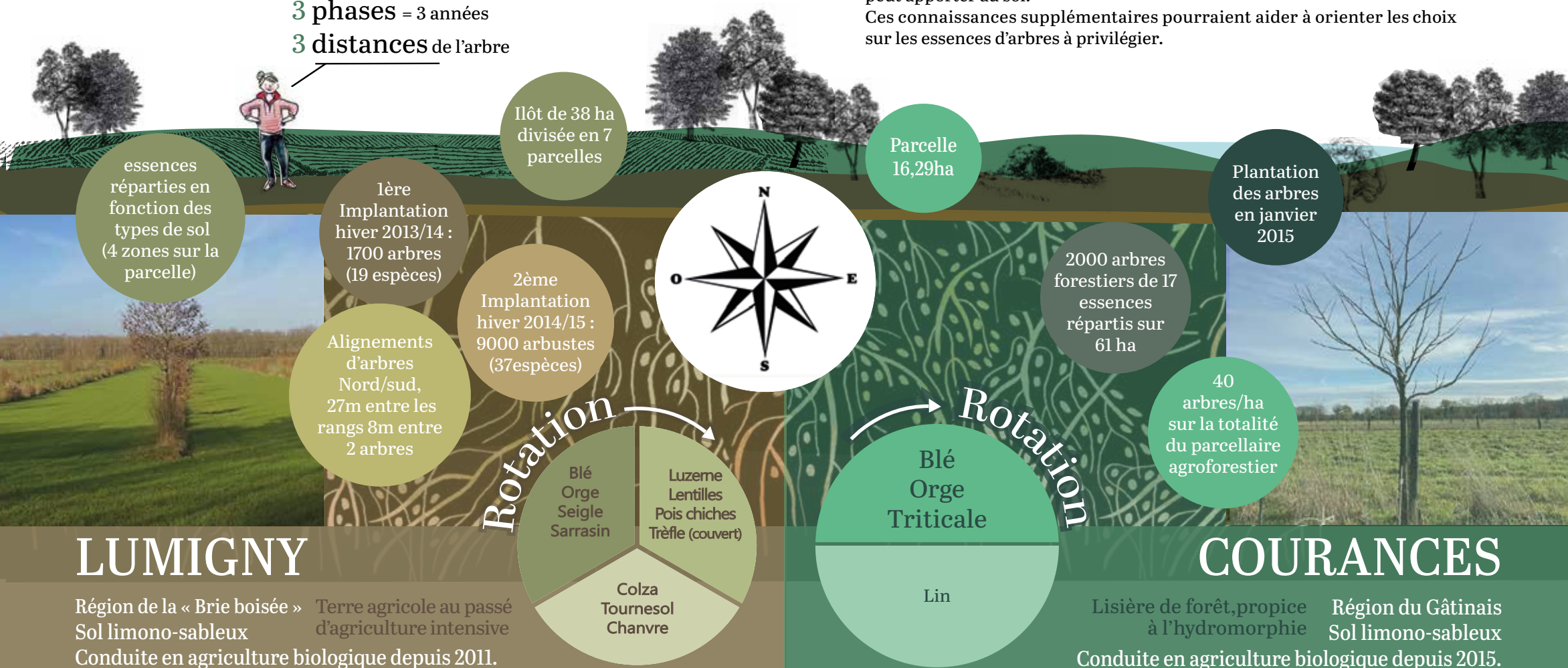
# Le projet IMPACT

Se déroule en 3 phases et se concentre sur des parcelles conduites en agroforesterie et majoritairement en agriculture biologique.

- 2 fermes centrales  
+3 fermes «satellites»
- 3 essences
- 3 phases = 3 années
- 3 distances de l'arbre

L'objectif du projet est d'investiguer in situ l'influence de l'arbre sur le fonctionnement microbiologique et le cycle du Phosphore dans le sol. Pour mieux comprendre ces processus, le projet a porté sur 3 essences d'arbres (Aulne, Noyer et Merisier) et sur 2 exploitations différentes, étudiées au cours des années 2023 et 2024. Chaque essence a été étudiée à raison de 3 arbres par parcelle. Des analyses complètes de sol (physico-chimie et microbiologie) ont été réalisées à 3 distances de l'arbre : au pied de l'arbre, en bord de culture et en milieu de culture pour estimer la distance d'effet des arbres. Suite aux 2 premières années du projet, 3 nouvelles parcelles ont été suivies en 2025 avec un effort d'échantillonnage plus modéré afin d'évaluer la généralité des résultats obtenus. Les premiers éléments de réponse apportés à la question de l'âge à partir duquel l'arbre commence à avoir un effet sur le sol, et également quelle diversité microbienne chaque essence peut apporter au sol.

Ces connaissances supplémentaires pourraient aider à orienter les choix sur les essences d'arbres à privilégier.



## 3 essences



**MERISIER**  
commun  
(Prunus Avium)

Apprécie les sols riches, frais et profonds.

Système racinaire puissant, traçant et profond.

Belle floraison de début de printemps.

Fruits très appréciés des oiseaux.  
Bois d'œuvre intéressant quoiqu'un peu passé de



**AULNE**  
glutineux  
(Alnus Glutinosa)

Apprécie les zones humides, et les bords de cours d'eau dont il retient les berges.

Ses racines accueillent des symbioses actinorhiziennes qui fixent l'azote atmosphérique

Fournit du pollen aux insectes dès la sortie d'hiver.

Bon bois de chauffage, également apprécié des artisans (ameublement et bardage de bâtiments).



**NOYER**  
commun  
(Juglans Regia)

Robuste et généralement moins sensible aux maladies que certaines autres essences forestières.

Bonne capacité à résister aux ravageurs et stress environnementaux.

Racine pivot prospectant en profondeur.

Bois d'œuvre recherché, bon bois de chauffage.

Fournit des fruits et de l'huile appréciés.

## 3 phases

**N1** Conception d'un protocole d'échantillonnage sur la parcelle de Lumigny, auprès de 3 sujets de 2 essences. Les prélèvements sont effectués à l'automne, un mois minimum après un travail du sol et/ou apport d'engrais, hors gel et hors condition d'engorgement.



**N2** La deuxième saison de prélèvements s'est intéressée à éprouver la reproductibilité des résultats de la première année sur une deuxième ferme en agroforesterie. A Lumigny, l'étude a inclus une troisième essence.



**N3** En troisième phase, le protocole a été appliqué à 3 autres parcelles agroforestières franciliennes âgées de plus de 6 ans. Les objectifs sont de tester la généricité possible des résultats des deux premières années, d'impliquer plus d'agriculteurs quant à ces résultats en leur fournissant un diagnostic du fonctionnement du sol. Les différents indicateurs sont à mettre en regard des pratiques agricoles mises en oeuvre sur chacune de ses fermes conjointement à l'agroforesterie (et a priori favorable à la microbiologie : (réduction du travail du sol, amendements organiques, pâturage ovin de couverts végétaux, ...), et de les discuter avec les agriculteurs. Ces résultats ne sont pas présentés dans cette plaquette, mais seront disponibles sur [www.agrofile.fr](http://www.agrofile.fr)

## 3 distances de prélèvement



**D0** Au pied de l'arbre



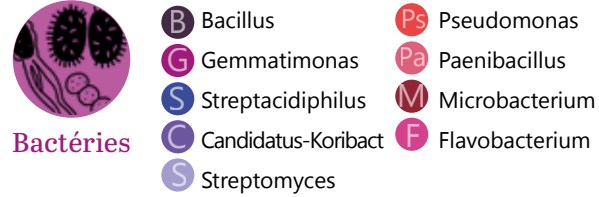
**D1** Dans les premiers rangs de la culture (1,5-2m)



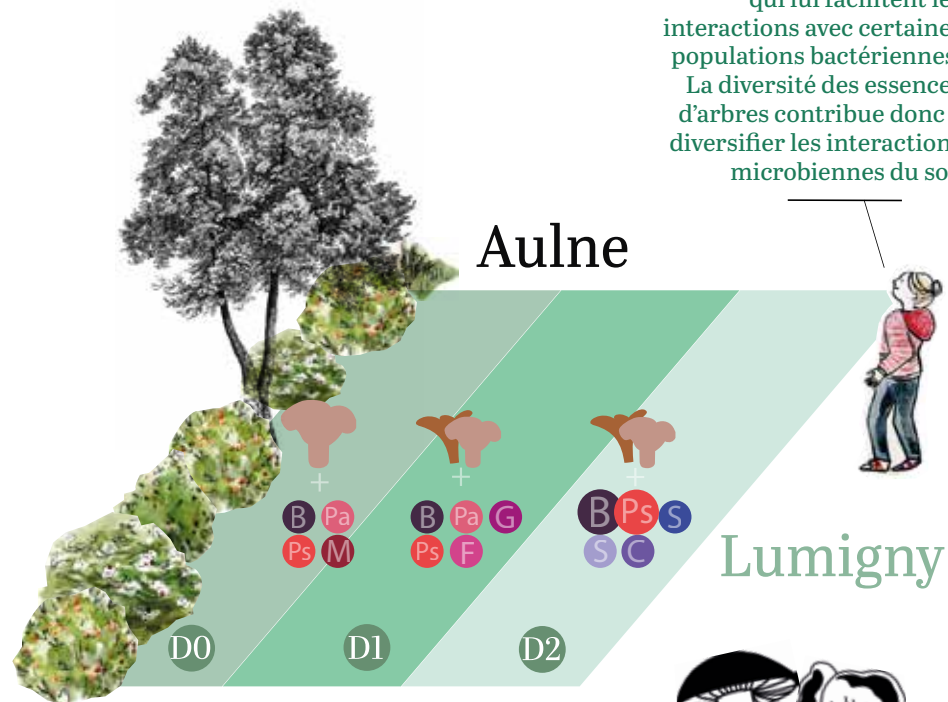
**D2** au centre de la bande cultivée (13,5-19m)



# Résultats – Exemple de Lumigny et Courances



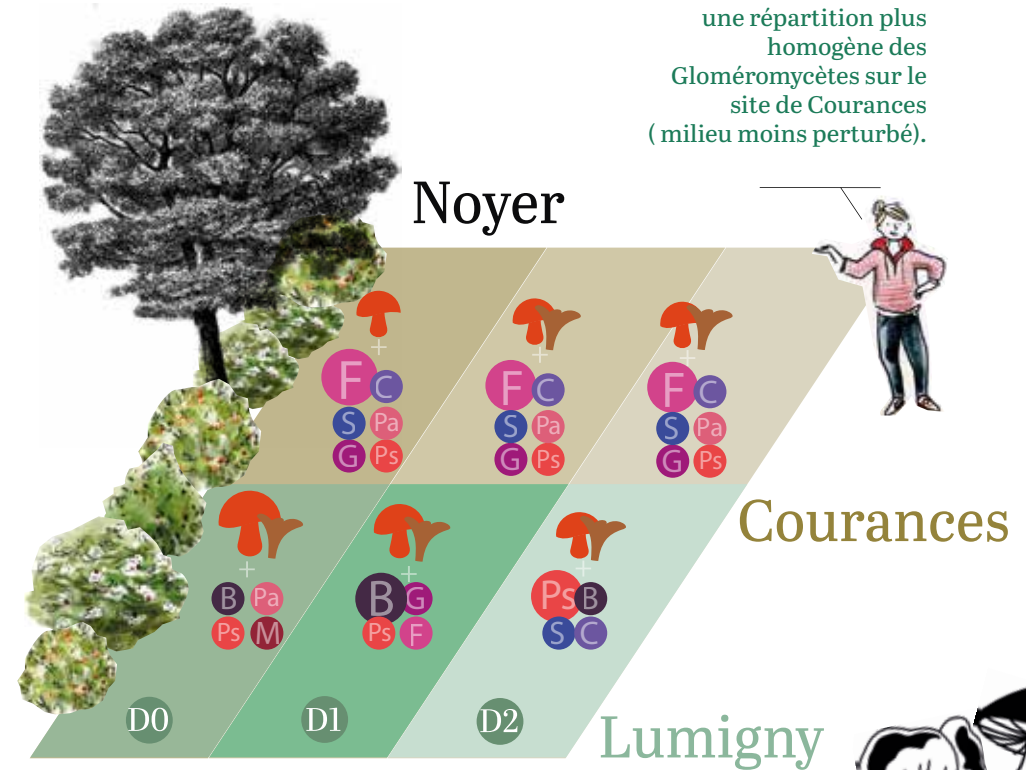
Chaque essence sélectionne des champignons spécifiques qui lui facilitent les interactions avec certaines populations bactériennes. La diversité des essences d'arbres contribue donc à diversifier les interactions microbiennes du sol.



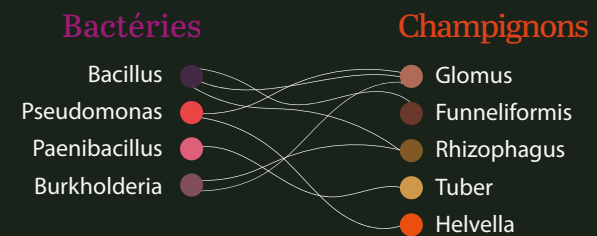
# Effet «essence» & effet «distance»

L'arbre n'est jamais seul, il est accompagné d'un cortège d'herbacées, et d'autres arbres sur le rang".

On observe une répartition plus homogène des Gloméromycètes sur le site de Courances (milieu moins perturbé).

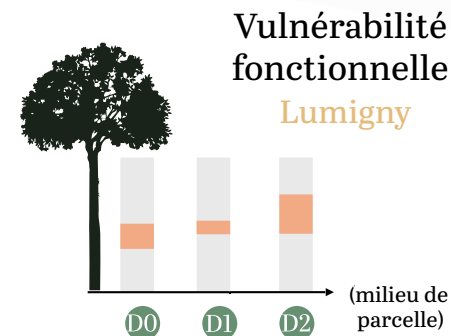
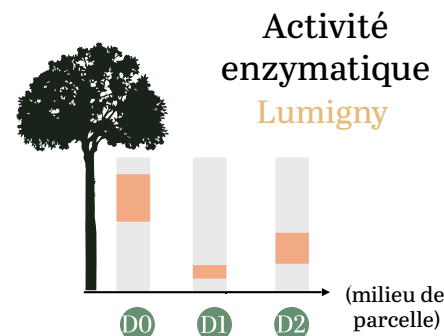
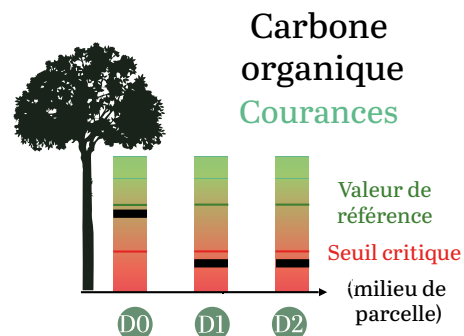
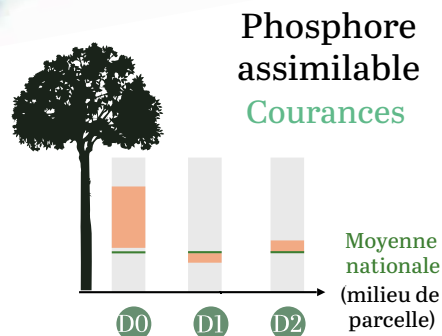


Exemples d'interactions entre bactéries et champignons identifiés dans les échantillons

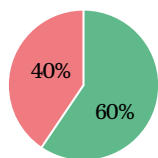


# Quels sont les effets de l'arbre sur le fonctionnement du sol ?

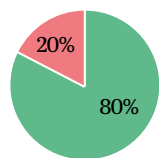
## Résultats – Exemple du Merisier



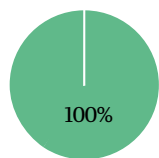
### Généricité des résultats



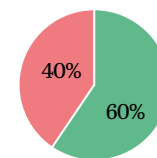
- Plus de Phosphore au pied de l'arbre que dans la culture.  
- Mise à disposition de Phosphore par l'action directe ou indirecte de l'arbre.



- Carbone organique en plus grande quantité au pied de l'arbre : restitution de MO au sol par les racines, les branches, les feuilles. Cette MO contient du Phosphore, qui se retrouve concentré au pied de l'arbre.



- Activité phosphatase plus élevée au pied de l'arbre.  
- Stimulation de la minéralisation du Phosphore en Phosphate.



Baisse de la vulnérabilité fonctionnelle au pied de l'arbre.  
- Les fonctions sont portées par plusieurs espèces.

### Généricité des résultats

## Résumé et conclusions

- Augmentation de la quantité de phosphore
- Augmentation de la biomasse et de l'activité microbienne
- Mobilisation de communautés bactérienne et fongique spécifiques
- Stimulation des enzymes de minéralisation du phosphore

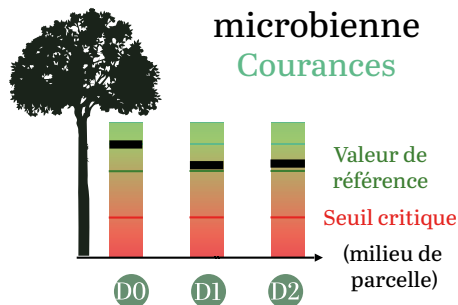
### Quels bénéfices de l'arbre pour le sol et a culture ?

(Le gradient s'estompe très vite, mais ce sont des arbres encore relativement jeunes)

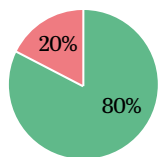
- Enrichissement du sol en MO
- Amélioration de la qualité microbiologique du sol
- Libération de phosphore inorganique

### Biomasse microbienne

Courances



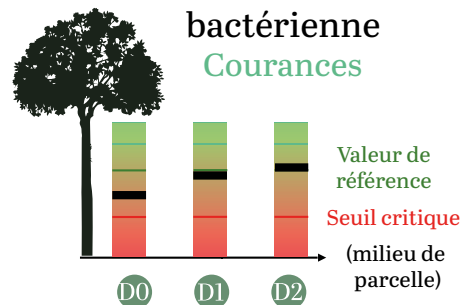
### Généricité des résultats



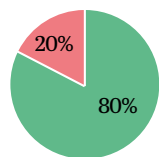
- Plus de biomasse microbienne au pied de l'arbre que dans la culture.

### Diversité bactérienne

Courances



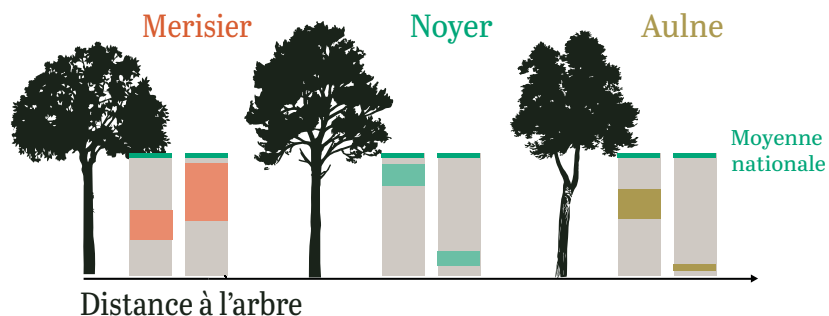
### Généricité des résultats



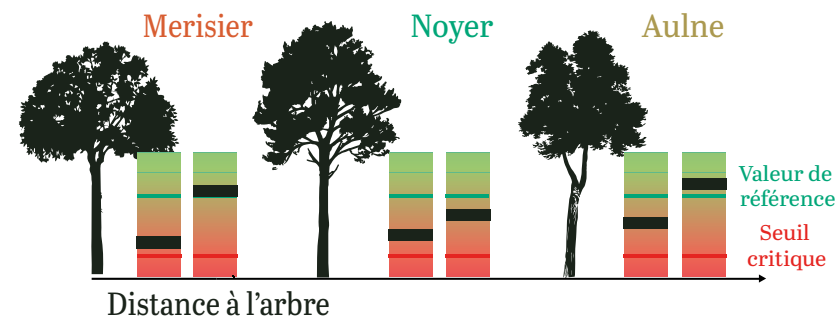
- Diversité microbienne plus faible au pied de l'arbre : la diversité au pied des arbres diminue car il y a une sélection de l'arbre pour certains microorganismes.

# Résultats – Exemple de Lumigny

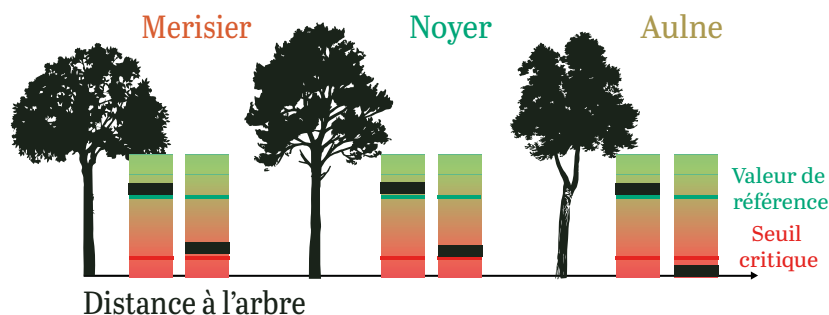
## Phosphore assimilable



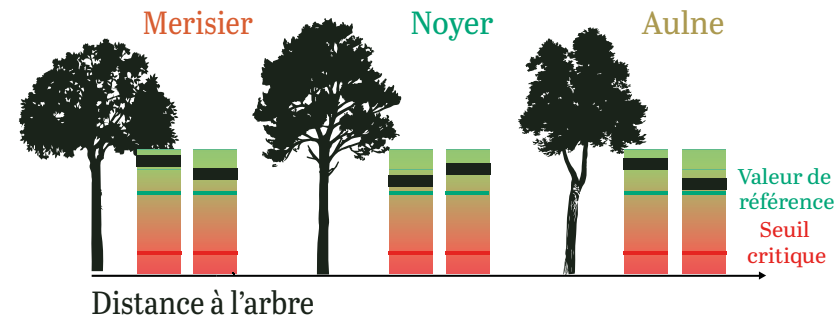
## Diversité bactérienne



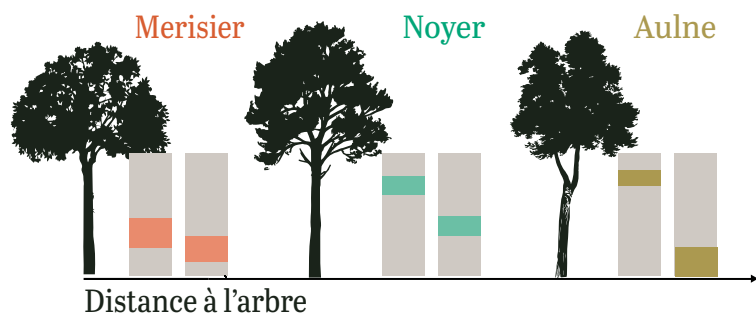
## Carbone organique



## Biomasse microbienne



## Activité enzymatique



## Résumé et conclusions

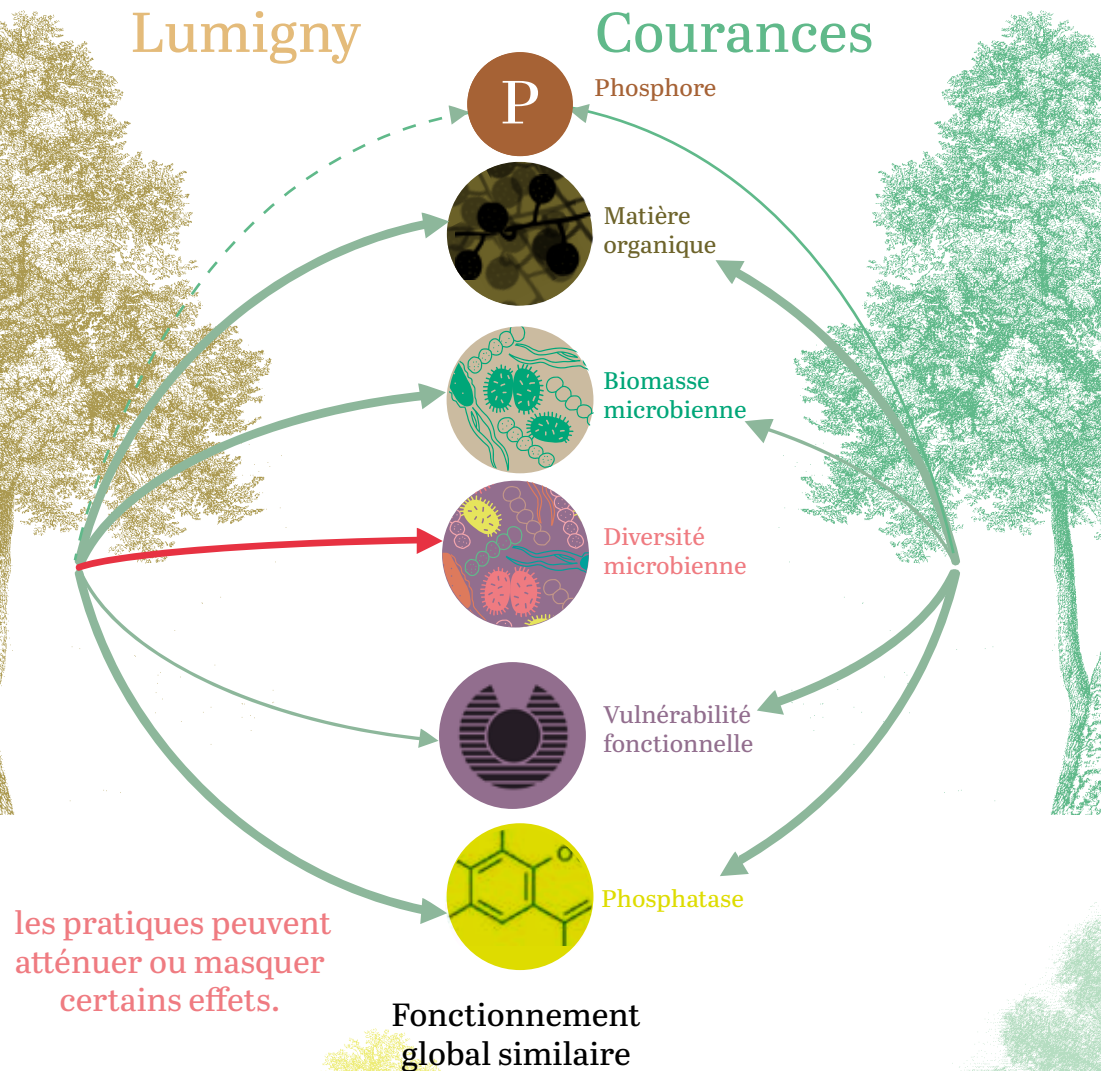
### A Lumigny

- Impact similaire sur la MO, la diversité microbienne et sur les champignons mycorhiziens
- Merisier n'induit pas d'augmentation de phosphore  
Effet masqué par des apports de fiente sur la parcelle?
- Noyer n'induit pas d'augmentation de la biomasse et de l'activité microbienne
- Stimulation des enzymes de minéralisation du phosphore dans tous les cas.

### Quelle essence choisir pour sa parcelle ?

- Selon les spécificités des bénéfiques  
Multi-espèces : combinaison des bénéfiques sur la parcelle.

# Est-ce que l'agroforesterie a un effet dans tous les types de sols ou systèmes de culture étudiés ?



## Conclusion

Dix ans après implantation, les arbres agroforestiers ont marqué significativement les sols.

En travaillant sur deux systèmes cultivés céréaliers franciliens, le projet a mis en évidence des effets de l'arbre sur les deux parcelles étudiées. A ce stade, le projet IMPACT conforte plusieurs **bénéfices de l'arbre pour le sol**: un **enrichissement du sol en matière organique**, une **amélioration de la qualité microbiologique du sol**, et la **libération de phosphore inorganique** grâce à une **stimulation de l'activité enzymatique**. Intégrer une diversité d'essences d'arbres permet également de **favoriser différents réseaux mycorhiziens**. Ces observations amendent les études réalisées ailleurs dans le monde avec des résultats obtenus en systèmes agroforestiers de climat tempéré.

En comparant différents systèmes cultivés, les analyses effectuées orientent sur un fonctionnement global du sol, nuancé par certaines pratiques agricoles. Différentes observations démontrent que des pratiques peuvent « masquer » l'impact de l'arbre. En milieu perturbé par des travaux du sol plus agressifs, la bande arborée peut apporter un équilibre important, de la stabilité, notamment en initiant la mise en place de réseaux mycorhiziens, une activité biologique plus importante, et l'amélioration des paramètres physico-chimiques.

Un projet agroforestier se construit en réfléchissant à la multifonctionnalité du système, avec de nombreux critères de choix pour les essences et leur disposition spatiale : production des arbres, adaptation au sol et au climat, orientation des arbres, accueil d'auxiliaires, effet brise-vent, etc.

La méthode employée dans IMPACT permettrait à terme d'**étudier une plus grande diversité d'essences et dans différents systèmes**. **Orienter le choix d'essences par rapport au fonctionnement des microorganismes du sol en interaction avec le végétal** : il s'agit de pouvoir favoriser l'abondance et la diversité des microorganismes, **optimiser le potentiel des symbioses microbiennes** avec tous les bénéfices que les arbres apportent au sol.

**La Fabrique Végétale** est une ferme biologique au cœur de la Brie. La ferme est pionnière en agroforesterie dans la région, mène différents projets de recherche en partenariat avec Agrof'île et fortement soutenue pour ses pratiques et les études scientifiques par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Elle a vu ses pratiques agroforestières récompensées par le prix national du Concours Général Agricole de 2020.

**Rémi Seingier** y cultive des céréales et oléoprotéagineux majoritairement transformés en farine et huile pour une vente la plus locale possible.

**Claire Bertrand** y mène un atelier de production de plantes à parfum, aromatiques et médicinales, de distillation d'huiles essentielles, d'hydrolats et eaux florales, de plantes séchées. En parallèle, elle mène le projet IMPACT en tant qu'ingénieure en écologie microbienne.

**Colin Jeanne** s'est récemment installé en maraîchage sur sol vivant et commercialise en AMAP.

**Agrof'île** est une association de promotion de l'agroforesterie et des sols vivants pour l'Île-de-France, et membre du Réseau CIVAM. Elle sensibilise et accompagne les agriculteurs, trices et autres opérateurs agricoles dans la prise en compte des arbres dans les fermes, de leur multifonctionnalité et de leur rôle dans la réalisation de nombreux services agroenvironnementaux au bénéfice des territoires.

**Novasol Experts** est un bureau d'étude qui accompagne les acteurs travaillant en lien avec le sol à mieux comprendre et intégrer la qualité écologique des sols pour une gestion plus durable des sols. Il est spécialisé dans le diagnostic microbiologique des sols et utilise des bases d'indicateurs et des référentiels issus de la recherche, il a pour mission d'accompagner les acteurs de terrain travaillant en lien avec les sols. L'accompagnement de Novasol bénéficie au développement d'innovations en faveur des sols en apportant une preuve de résultats.

L'Institut National de Recherche en Agriculture et Environnement (INRAE) et L'Unité Mixte de Recherchelaboratoire UMR Agroécologie du centre INRAE de Dijon apportent leur expertise scientifique sur la microbiologie des sols et le lien aux pratiques agricoles.

La plateforme de biochimie environnementale **Biochem-Env** est rattachée à l'UMR INRAE/AgroParisTech ECOSYS, et localisée sur le Campus AgroParis-Saclay à Palaiseau, elle offre ses services aux équipes de recherche académiques et du secteur privé dans les domaines de l'agroécologie et de l'écotoxicologie. Elle réalise le développement et la mesure d'indicateurs biochimiques dans l'environnement et les organismes des écosystèmes continentaux. La plateforme a effectué les analyses enzymologiques pour le projet.

## Bibliographie

- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). *Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture*. **Frontiers in Microbiology**, 8, 971
- Hinsinger, P., Herrmann, L., Lesueur, D., Robin, A., Trap, J., Waithaisong, K., & Plassard, C. (2015). *Impact of roots, microorganisms, and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere*. In W. Plaxton & H. Lambers (Eds.), **Phosphorus metabolism in plants in the post-genomic era: From gene to ecosystems**. John Wiley & Sons.; Ibrahim, M., Iqbal, M., Tang, Y.-T., Khan, S., Guan, D.-X., & Li, G. (2022). *Phosphorus mobilization in plant-soil environments and inspired strategies for managing phosphorus: A review*. **Agronomy**, 12(10), 2539.
- Karimi, B., Dequiedt, S., et al. (2019). *Biogeography of soil bacterial networks along a gradient of cropping intensity*. **Scientific Reports**, 9, 3812
- Lehr, P. P., Gschwendtner, S., Du, B., Rennenberg, H., Schloter, M., & Zörb, C. (2025). *Grapevines and trees: A biodiversity study of microbiomes in an established temperate agroforestry system*. **Journal of Environmental Management**, 379, 124882.
- Li, W., Ullah, S., Liu, F., Deng, F., Han, X., Huang, S., Xu, Y., & Yang, M. (2024). *Synergistic variation of rhizosphere soil phosphorus availability and microbial diversity with stand age in plantations of the endangered tree species Parashorea chinensis*. **Frontiers in Plant Science**, 15, 1372634
- Mortier, E., Lamotte, O., Martin-Laurent, F., & Recorbet, G. (2020). *Forty years of study on interactions between walnut tree and arbuscular mycorrhizal fungi: A review*. **Agronomy for Sustainable Development**, 40, 43
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). *Role of phosphatase enzymes in soil*. In E. K. Bünemann, A. Oberson, & E. Frossard (Eds.), **Phosphorus in Action**. *Soil Biology*, vol. 26, pp. 215–243. -Springer;
- O'Connor, C., Zeller, B., Choma, C., Delbende, F., Siah, A., Waterlot, C., & Andrianarisoa, K. S. (2023). *Trees in temperate alley-cropping systems develop deep fine roots 5 years after plantation: What are the consequences on soil resources?* **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 345, 108339. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108339>.
- Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). *Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales*. **Annual Review of Plant Biology**, 62, 227–250
- Spohn, M., & Kuzyakov, Y. (2013). *Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation: Coupling soil zymography with <sup>14</sup>C imaging*. **Soil Biology and Biochemistry**, 67, 106–113
- Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). *The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems*. **Ecology Letters**, 11, 296–310
- Wezel, A., & Soldat, V. (2009). *A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline agroecology*. **International Journal of Agricultural Sustainability**, 7(1), 3–18
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). *Agroecology as a science, a movement and a practice: A review*. **Agronomy for Sustainable Development**, 29, 503–515.



Conception graphique et illustration: Clémence Monnet  
imprimé par Avenir Numérique.



Ce projet a bénéficié du soutien financier de





Porteurs du projet:

La Fabrique Végétale  
-Claire BERTRAND-  
Agriculture et recherches  
en agroforesterie et  
écologie des sols.

Agrof'île  
Agroforesterie et sols vivants