

Point d'avancement sur le projet PhosphoBio

Grégory Véricel, Arvalis



Projet CASDAR IP

1^{er} octobre 2020 – 31 décembre 2024

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



Groupe PKMg Comifer - 12 juin 2024 - Paris



Projet PhosphoBio - Contexte

Le Phosphore comme élément clé de la fertilité des sols en Agriculture Biologique (AB) : conception d'outils de diagnostic et évaluation de leviers d'action pour l'améliorer et la gérer durablement



Projet CASDAR IP

1^{er} octobre 2020 – 31 décembre 2024

Avec la contribution financière du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural CASDAR



- **Augmentation des surfaces AB combinée à une faible disponibilité des sources de P utilisables en AB (faible efficacité des roches phosphatées, coût élevé des engrais organiques, évolution de la réglementation : fientes de volailles et lisiers de porcs issus d'élevage industriels non utilisables en AB)**
 - **Des exploitations en AB qui fonctionnent en « autonomie » sans (ou très peu) d'apports organiques : autonomie N assurée par les légumineuses, quid de P, K, S ?**
- **Bilans P déficitaires : risque de baisse de fertilité P y compris dans certaines exploitations d'élevage où les quantités d'engrais de ferme produites ne couvrent pas entièrement les besoins => enjeu montant pour l'AB**



Gestion de la fertilité des sols en AB



Mise au point d'outils de diagnostic de la fertilité vis-à-vis du Phosphore des sols en Agriculture Biologique et évaluation de leviers d'action pour l'améliorer et la gérer durablement

Action 1

Caractérisation de l'état actuel de fertilité P des sols en systèmes de grandes cultures et polyculture-élevage AB

→ Observatoire national de la fertilité chimique des sols en AB constitué de 201 parcelles de grandes cultures et polyculture élevage en AB réparties sur 4 territoires : Sud-Ouest, Bassin Parisien et Grand Ouest, Rhône-Alpes

Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

→ Quantification de l'effet du statut P des sols en AB sur le rendement des cultures

→ Mise au point et adaptation d'outils de diagnostic de la fertilité P à l'AB basés sur l'analyse de végétaux

Action 3

Prévision de l'évolution du statut P des sols en fonction des pratiques agricoles à l'échelle de la parcelle et du territoire

→ Elaboration de références Fertilisation - Exportations adaptées à l'AB

→ Evaluation de l'impact des pratiques culturales sur le statut P des sols

→ Simulation de scénarios d'expansion de l'AB et estimation des effets sur le statut P des sols à l'échelle de territoires

Action 4

Valorisation et transfert des résultats à travers des outils et méthodes opérationnels

→ Construction d'une « calculatrice Fumure - Exportations » spécifique à l'AB et aux contextes Bas Intrants

→ Mise au point d'une méthode de diagnostic de la fertilité P et de pronostic de son évolution

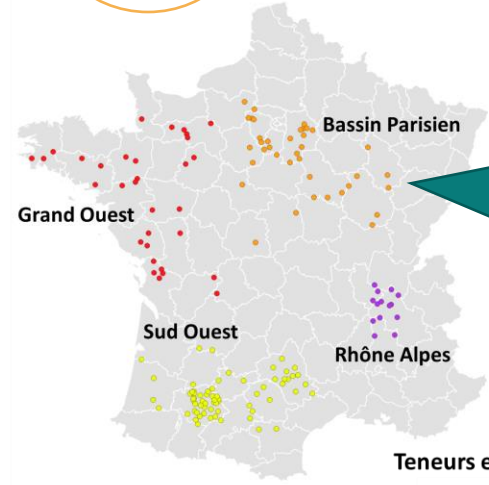
→ Communication et transfert des résultats auprès de divers utilisateurs

Fin du projet
: 31/12/2024



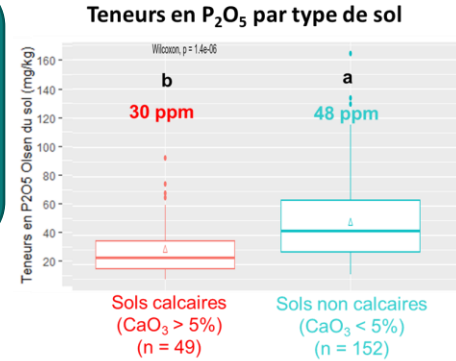
Action 1

Caractérisation de l'état actuel de fertilité P des sols en systèmes de grandes cultures et polyculture-élevage AB

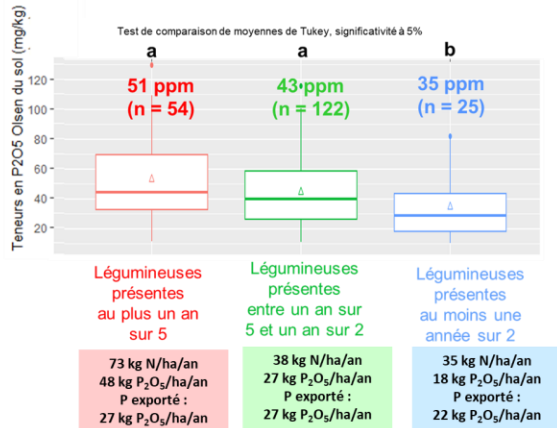


Construction en 2021 d'un observatoire de 201 parcelles de grandes cultures (172) et de prairies permanentes (29) chez 157 agriculteurs bio

- Enquêtes sur les pratiques culturales auprès de 153 agriculteurs, portant sur 193 parcelles
- Calcul de bilans fertilisation - exportations de P sur la période 2017 à 2021 sur 179 parcelles



Teneurs en P₂O₅ du sol selon fréquence de légumineuses



→ Principaux enseignements de l'observatoire de la fertilité des sols en AB

- **En AB, teneurs en P du sol globalement plus faibles qu'en conventionnel** (comparaison à la BDAT) et majoritairement inférieures au seuil impasse du Comifer.
- **Teneurs en P plus faibles en moyenne dans le Sud-Ouest** que dans les autres territoires, **en sols calcaires et lorsque la fréquence de légumineuses dans la rotation augmente.**

➤ **Vigilance nécessaire en AB dans les systèmes où la nutrition N des cultures dépend fortement des légumineuses : risque de carence en P plus important**

Action terminée

Pour en savoir plus :

<https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/observatoire-phosphobio-ces-facteurs-ninfluencent-pas>

<https://www.arvalis.fr/recherche-innovation/nos-travaux-de-recherche/observatoire-phosphobio-ces-elements-jouent-sur-la>

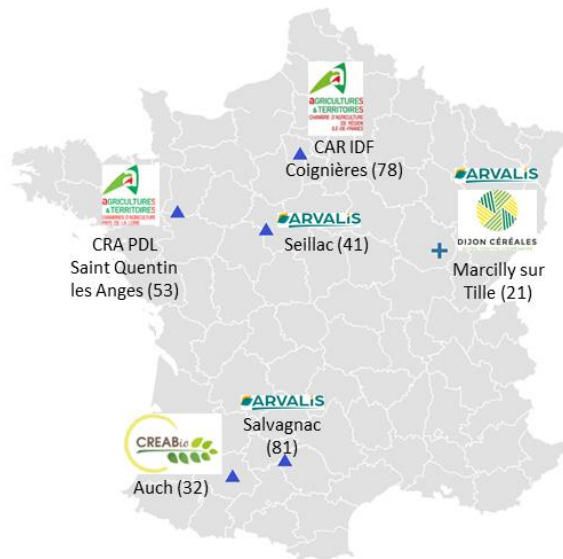
Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

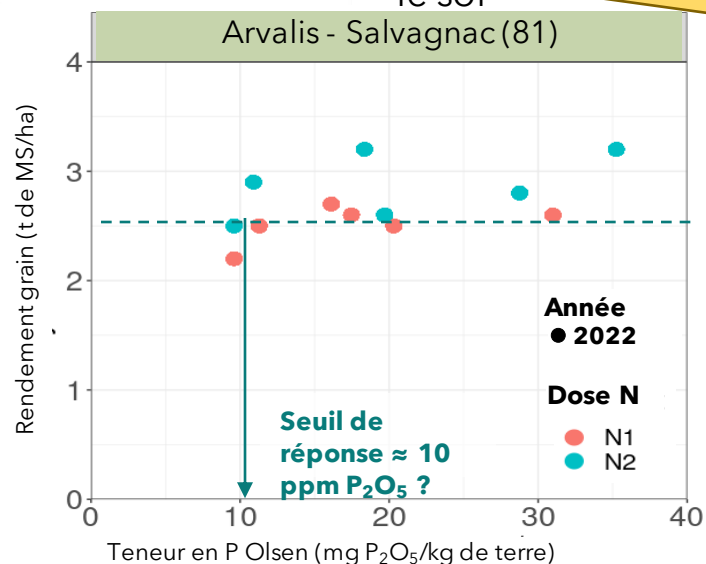
Réponse au phosphore des cultures en AB

→ **Quantification de l'effet du statut P des sols en AB sur le rendement des cultures et définition de seuils de réponse**

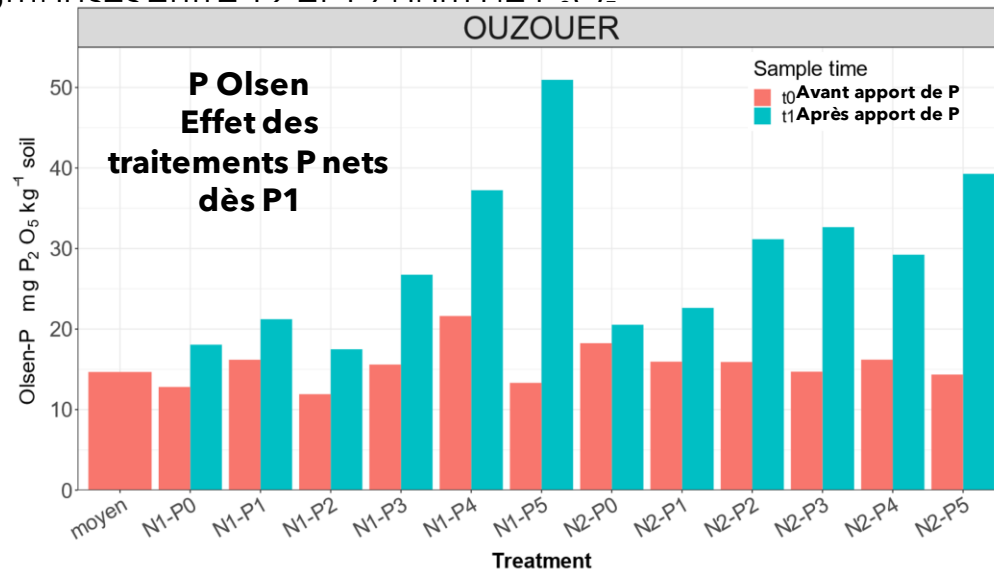
➤ 6 essais bisannuels « courbe de réponse au P » en AB en 2022 et 2023 (9 sur blé et 2 sur maïs)



Traitements :
 6 doses de P (0, 10, 20, 40, 80 et 120 kg P_2O_5 /ha)
 x 2 doses de N (56 et 120 kg N/ha)
 Création d'un gradient de teneurs en P_2O_5 dans le sol



comprises entre 12 et 19 nm de P_2O_5



Seuils Comifer pour le blé sur ce type de sol :

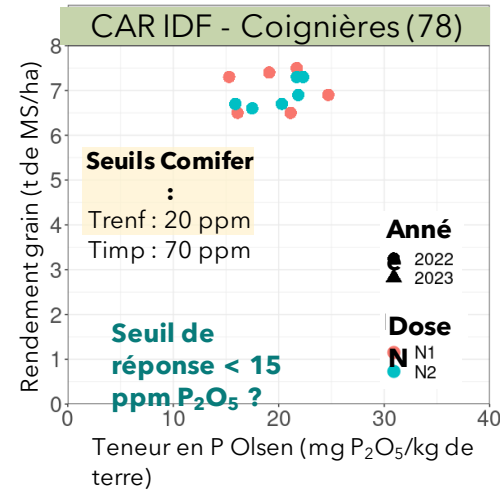
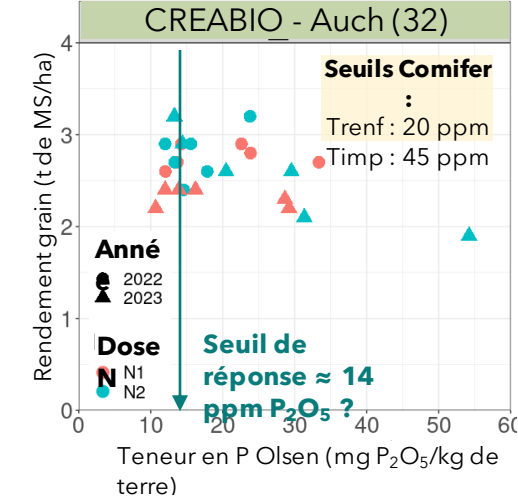
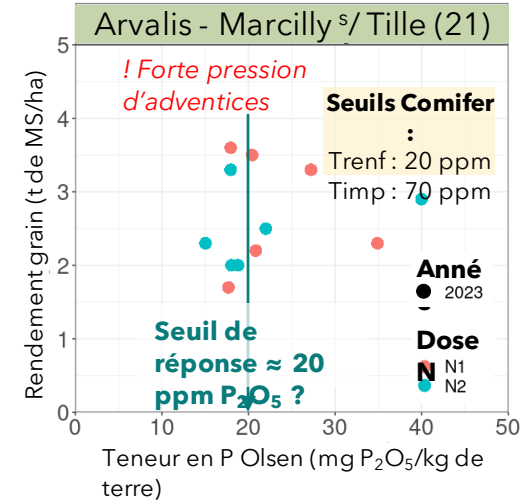
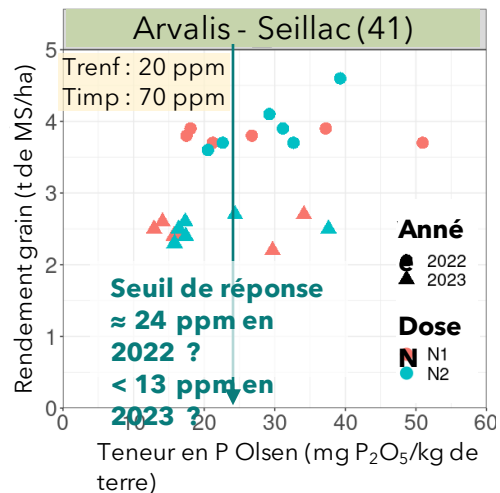
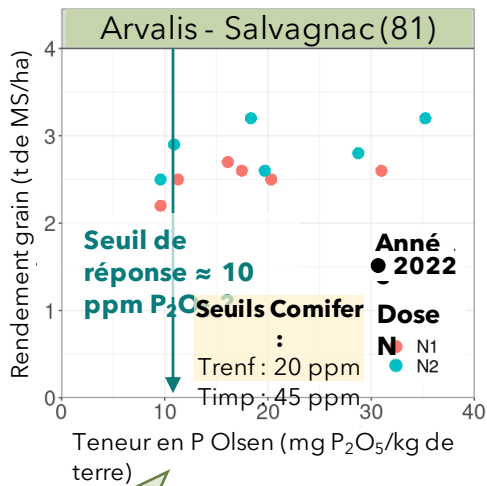
Trenf : 20 ppm
 Timp : 45 ppm



Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

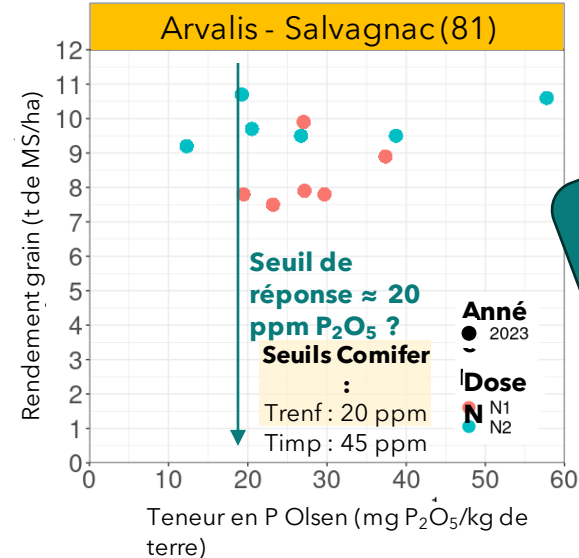
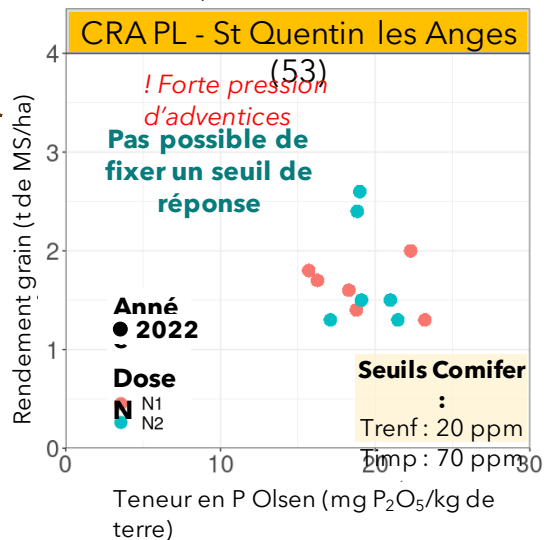
→ Principaux enseignements des essais « courbe de réponse au P »



Essais blé tendre

Essais maïs grain

- Absence de réponse au Phosphore dans la majorité des situations : le P du sol n'est pas limitant ou d'autres facteurs limitants sont prépondérants (adventices par exemple)
- Pas ou peu d'effet du niveau de nutrition N sur la réponse à P
- Des teneurs en P du sol < aux seuils Comifer ne semblent pas pénaliser les cultures en AB



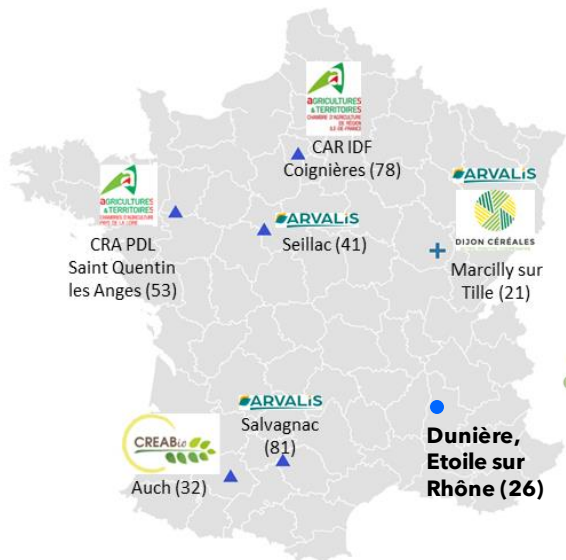
Acquisition de données terminée, Analyse des résultats en cours



Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

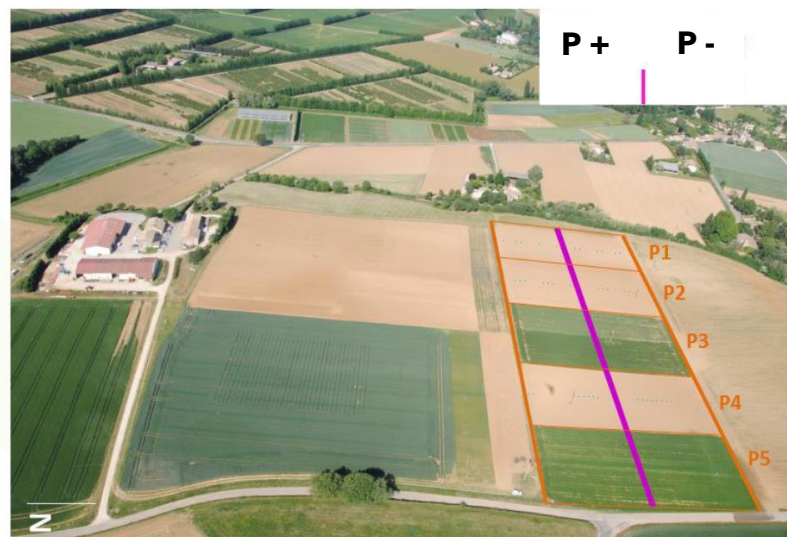
Réponse au phosphore des cultures en AB



→ **Quantification de l'effet du statut P des sols en AB sur le rendement des cultures et définition de seuils de réponse**

➤ 6 essais bisannuels « courbe de réponse au P » en AB en 2022 et 2023 (9 sur blé et 2 sur maïs)
Teneurs en P Olsen initiales comprises entre 12 et 19 ppm de P_2O_5

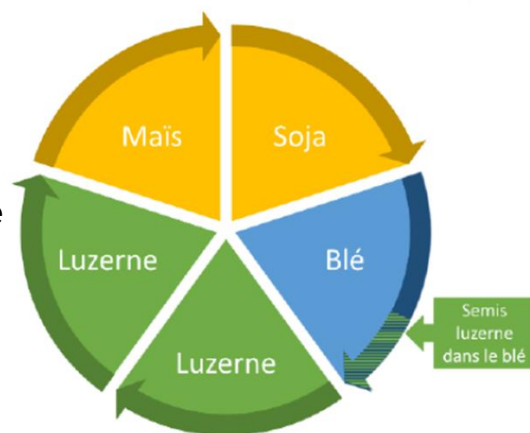
➤ Valorisation de l'essai longue durée AB de Dunière (en AB depuis 2000, 2 modes de gestion différenciés de P



P - :
Fertilisation avec soies de porcs et farines de plumes hydrolysées (apports annuels moyens : 10 kg P_2O_5 /ha, 41 kg N/ha et 13 kg K_2O /ha)

P + :
Fertilisation avec soies de porcs et farines de plumes hydrolysées + Guano ou farine de poisson (apports annuels moyens : 71 kg P_2O_5 /ha, 58 kg N/ha et 20 kg K_2O /ha)

Rotation type :
(luzerne ponctuellement, remplacée par vesce porte graine puis colza, voire tournesol, féverole et chanvre)



Action 2

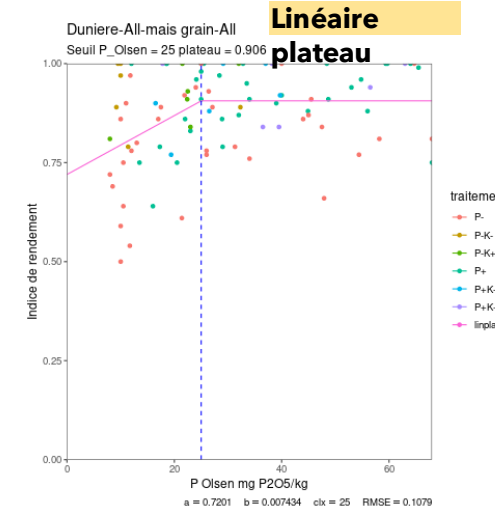
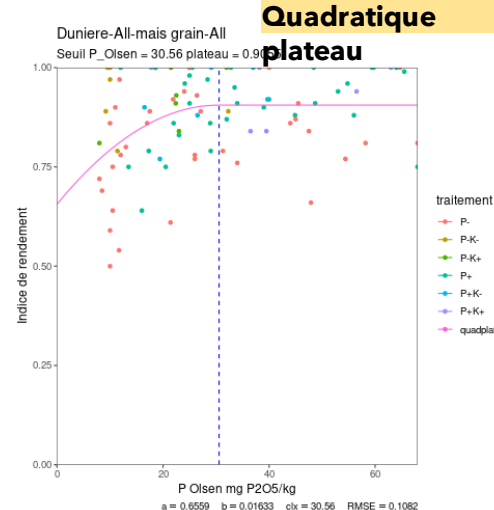
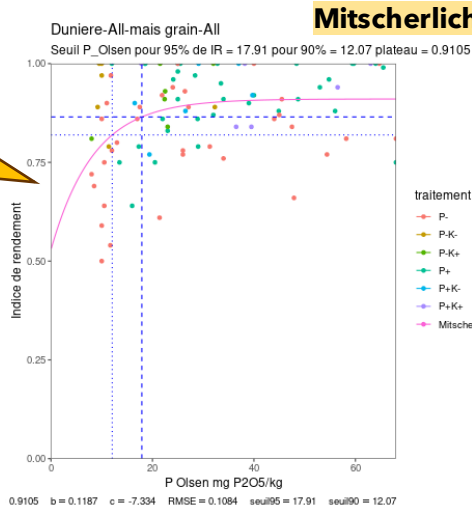
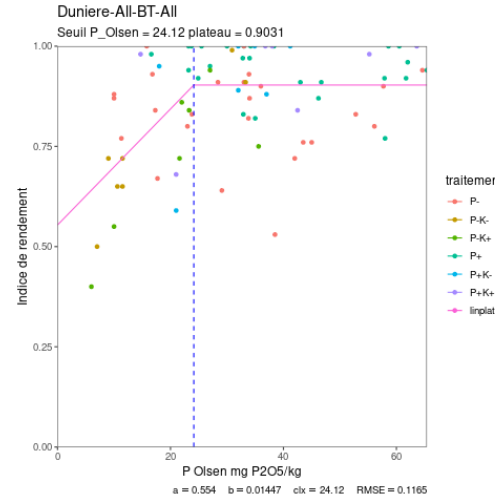
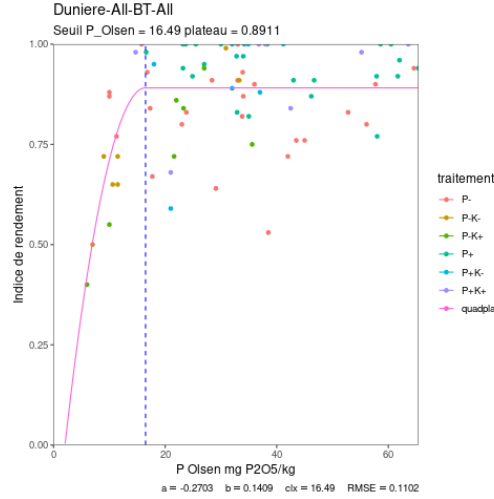
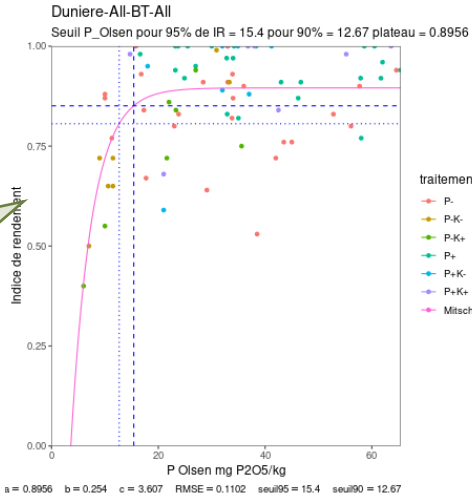
Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

Réponse au phosphore des cultures en AB - Essai de D



Blé tendre
80 valeurs, de 2006 à 2023

Maïs grain
92 valeurs, de 2006 à 2023



| Modèle d'ajustement | Blé tendre | Maïs |
|----------------------------|------------|----------|
| Mitscherlich (seuil à 90%) | 12.7 ppm | 12.1 ppm |
| Mitscherlich (seuil à 95%) | 15.4 ppm | 17.9 ppm |
| Quadratique plateau | 16.5 ppm | 30.1 ppm |
| Linéaire plateau | 24.1 ppm | 25.0 ppm |

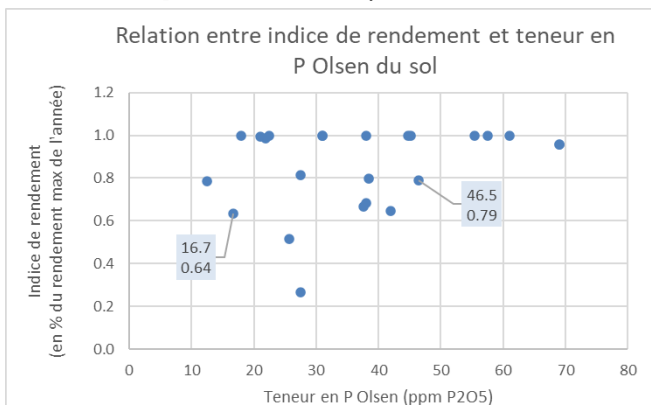


Action 2

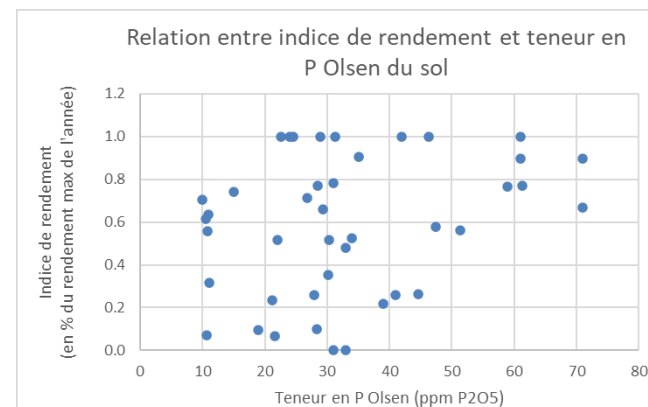
Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

Réponse au phosphore des cultures en AB - Essai de DurPhosphoBio

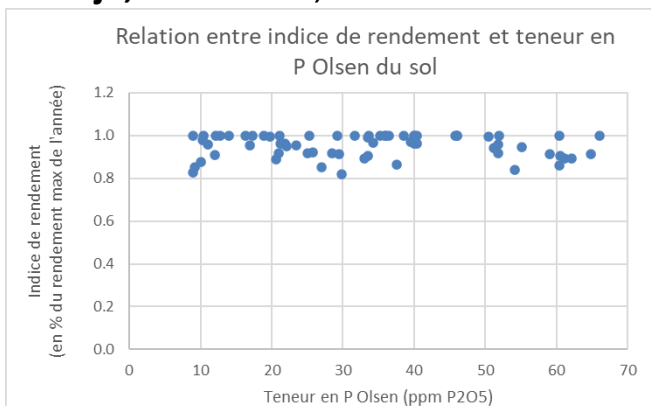
Colza, 24 valeurs, de 2006 à 2017



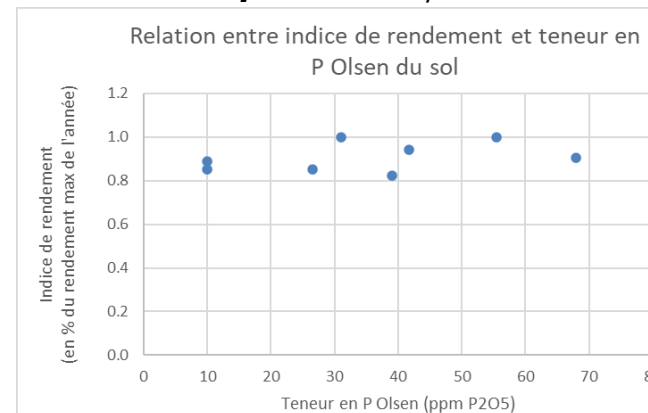
Luzerne porte graines, 42 valeurs, de 2006 à 2023



Soja, 68 valeurs, de 2006 à 2023



Tournesol, 8 valeurs, en 2013 et 2016

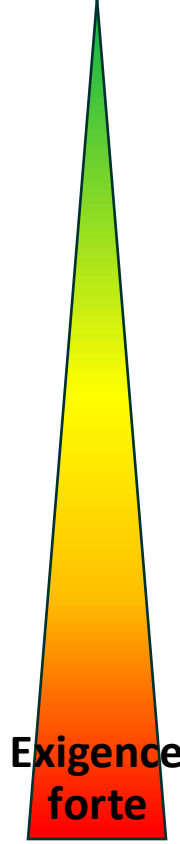


Propositions de seuils de teneurs en P pour l'AB

En cours de validation

Exigence faible

Exigence forte



| Culture | Pertes de rendement liées au P estimées à : | Seuil en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé (ppm de P ₂ O ₅ Olsen) | Pertes de rendement liées au P estimées à : | Seuil au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible (ppm de P ₂ O ₅ Olsen) | Pertes de rendement liées au P estimées à : |
|----------------------|---|---|---|--|---|
| Soja | | Non défini | 11% (entre 0 et 17%, 3 valeurs) | 10 | 4% (entre 0 et 18%, 65 valeurs) |
| Tournesol | | Non défini | 13% (entre 11 et 15%, 2 valeurs) | 10 | 8% (entre 0 et 17%, 6 valeurs) |
| Maïs grain | 20% (entre 0 et 50%, 20 valeurs) | 15 | 11% (entre 0 et 39%, 24 valeurs) | 25 | 10% (entre 0 et 34%, 48 valeurs) |
| Blé tendre | 30% (entre 2 et 60%, 11 valeurs) | 15 | 14% (entre 0 et 41%, 17 valeurs) | 25 | 10% (entre 0 et 47%, 50 valeurs) |
| Colza | | Non défini | 19% (entre 0 et 74%, 17 valeurs) | 45 | 4% (entre 0 et 21%, 7 valeurs) |
| Luzerne-porte graine | | Non défini | 46% (entre 0 et 100%, 35 valeurs) | 50 | 21% (entre 0 et 44%, 7 valeurs) |



Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

Outils de diagnostic de la fertilité P basés sur l'analyse de végétaux sur blé et maïs

Adaptation des outils de diagnostic basés sur l'analyse de végétaux à l'AB

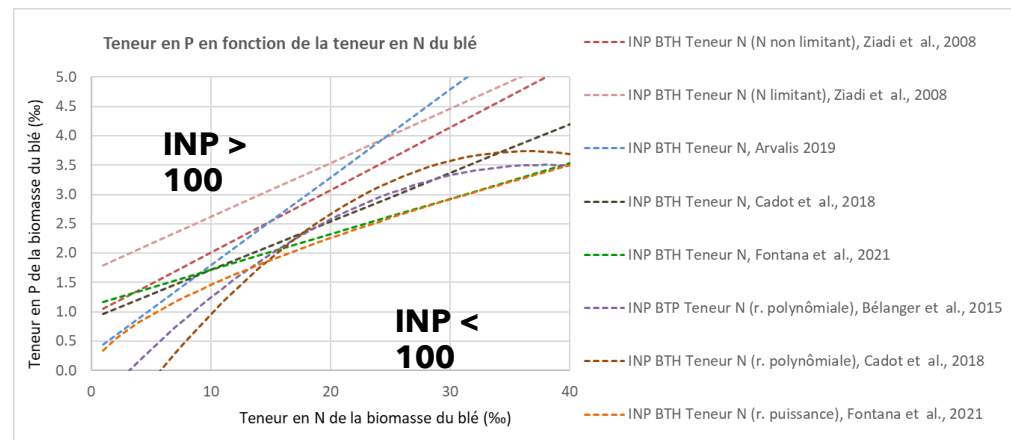
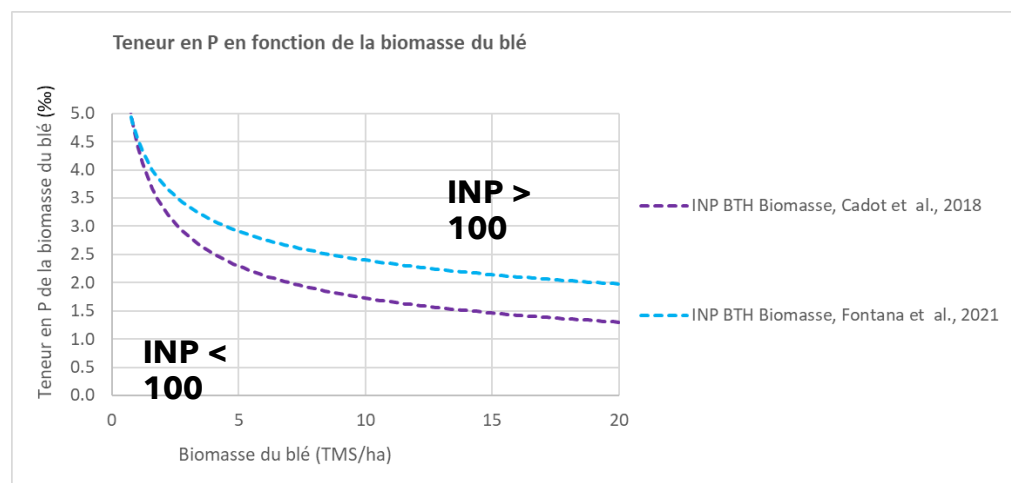
Mise en relation d'indices de nutrition P de la littérature et indices de rendement obtenus sur dans des essais en A pour définir des seuils de réponse

Relations définissant la teneur en P critique du blé tendre

| Référence biblio | Origine | Type de relation | Modèle | a | b | c |
|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|---|-------|--------|----------|
| Ziadi et al. 2008 (N limitant)* | Canada | Relation linéaire teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b$ | 0.092 | 1.7 | / |
| Ziadi et al. 2008 (N non limitant)* | Canada | Relation linéaire teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b$ | 0.107 | 0.94 | / |
| Cadot et al. 2018 | Suisse | Relation linéaire teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b$ | 0.083 | 0.88 | / |
| Essai Arvalis 2019 | France | Relation linéaire teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b$ | 0.15 | 0.29 | / |
| Fontana et al. 2021 | Suisse | Relation linéaire teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b$ | 0.061 | 1.1 | / |
| Bélangier et al. 2015* | Canada | Relation polynômiale teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b + c \times tN^2$ | 0.221 | -0.677 | -0.00292 |
| Cadot et al. 2018 | Suisse | Relation polynômiale teneurs N et P | $P_c = a \times tN + b + c \times tN^2$ | 0.291 | -1.557 | -0.004 |
| Fontana et al. 2021 | Suisse | Relation puissance teneurs N et P | $P_c = a \times tN^b$ | 0.34 | 0.632 | / |
| Cadot et al. 2018 | Suisse | Courbe dilution biomasse | $P_c = a \times Biomasse^b$ | 4.44 | -0.41 | / |
| Fontana et al. 2021 | Suisse | Courbe dilution biomasse | $P_c = a \times Biomasse^b$ | 4.56 | -0.279 | / |

P_c et tN en g/kg, Biomasse en t de MS/ha printemps

* Blé tendre de



Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

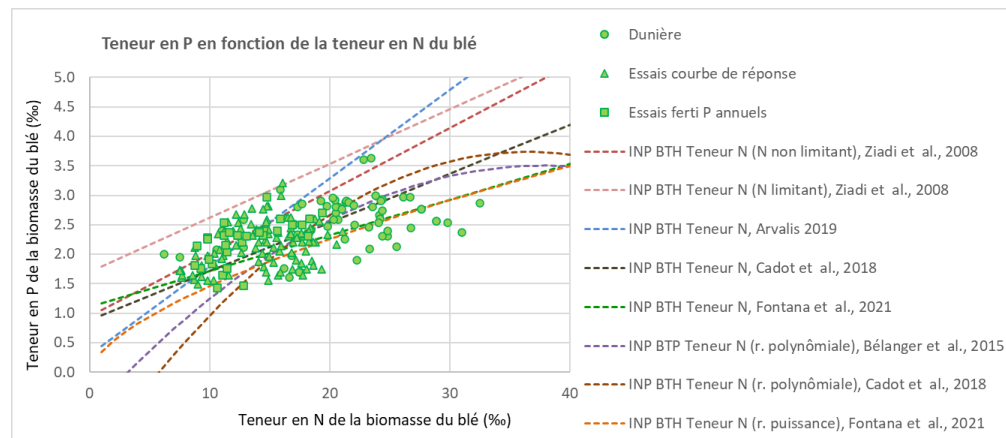
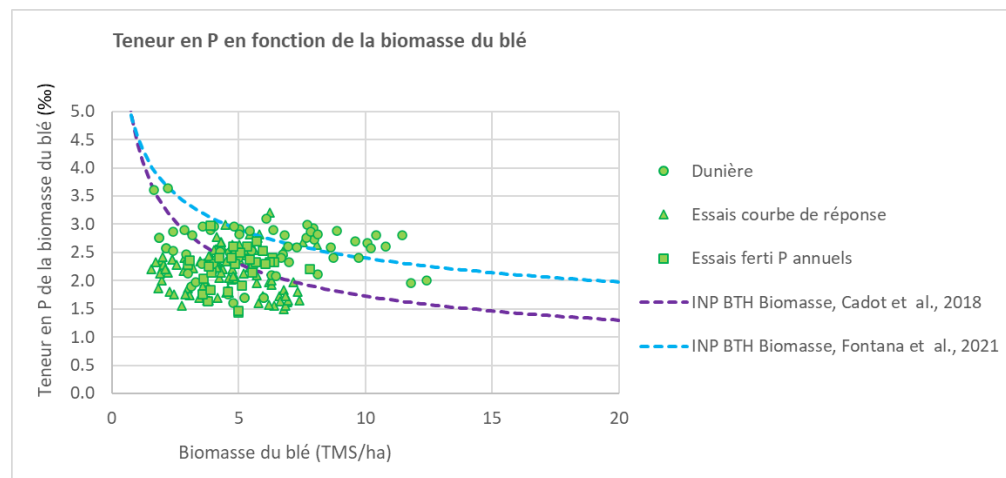
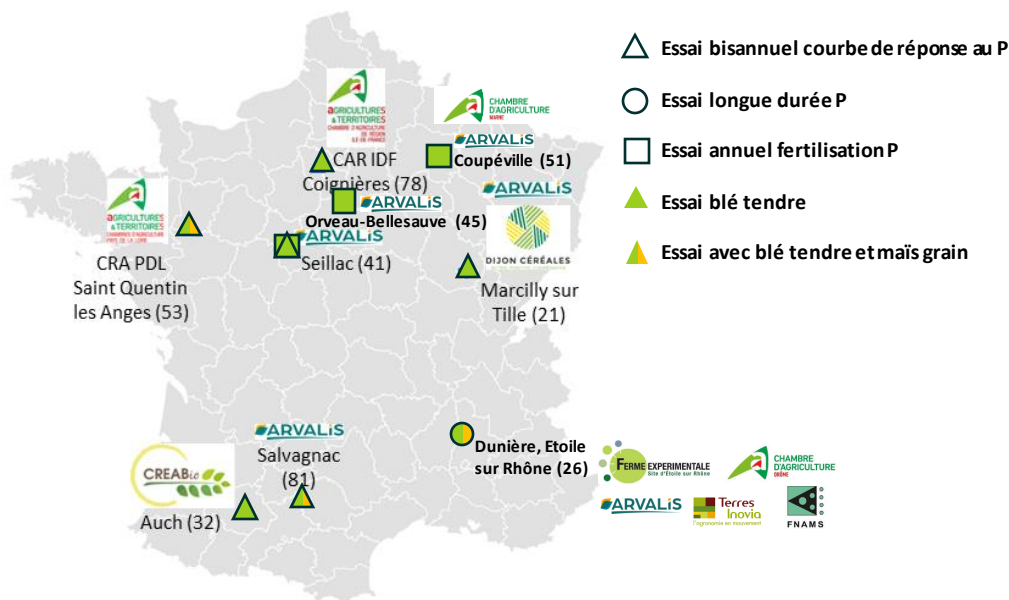
Outils de diagnostic de la fertilité P basés sur l'analyse de végétaux sur blé et maïs

Adaptation d'outils de diagnostic basés sur l'analyse de végétaux à l'AB

Mise en relation d'indices de nutrition P de la littérature et indices de rendement obtenus sur dans des essais en AB pour définir des seuils de réponse

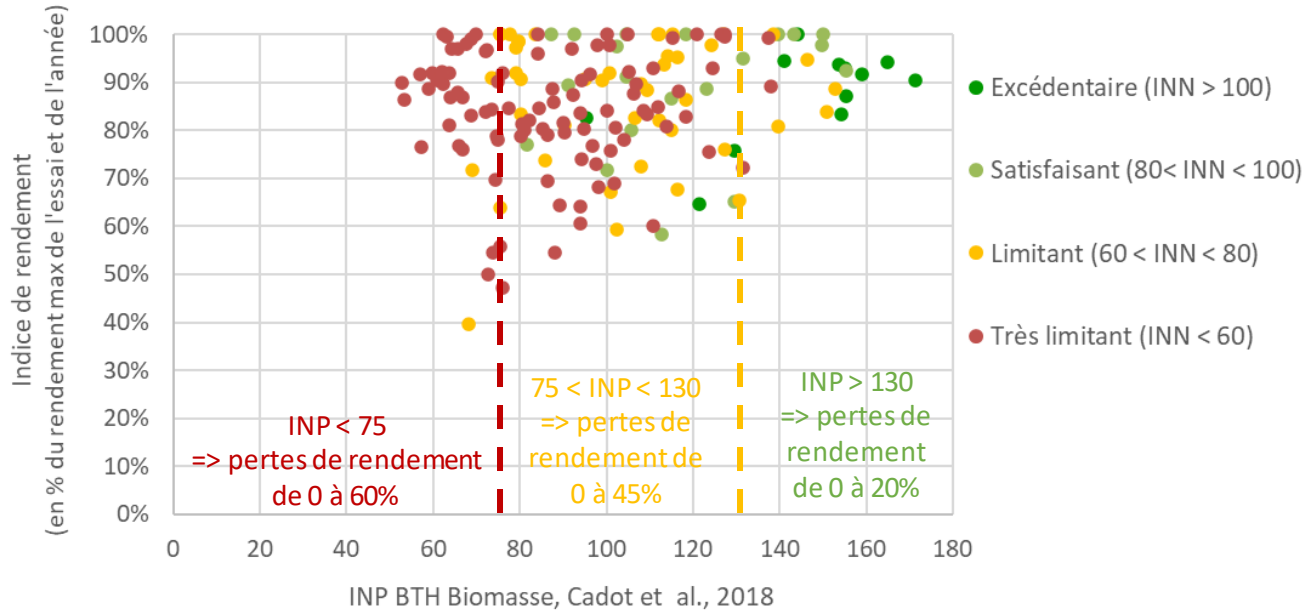
Essais retenus avec données permettant de calculer :

- des indices de nutrition (P critique en fonction de la biomasse ou de la teneur en N)
- des indices de rendement (rendement en % du rendement max)

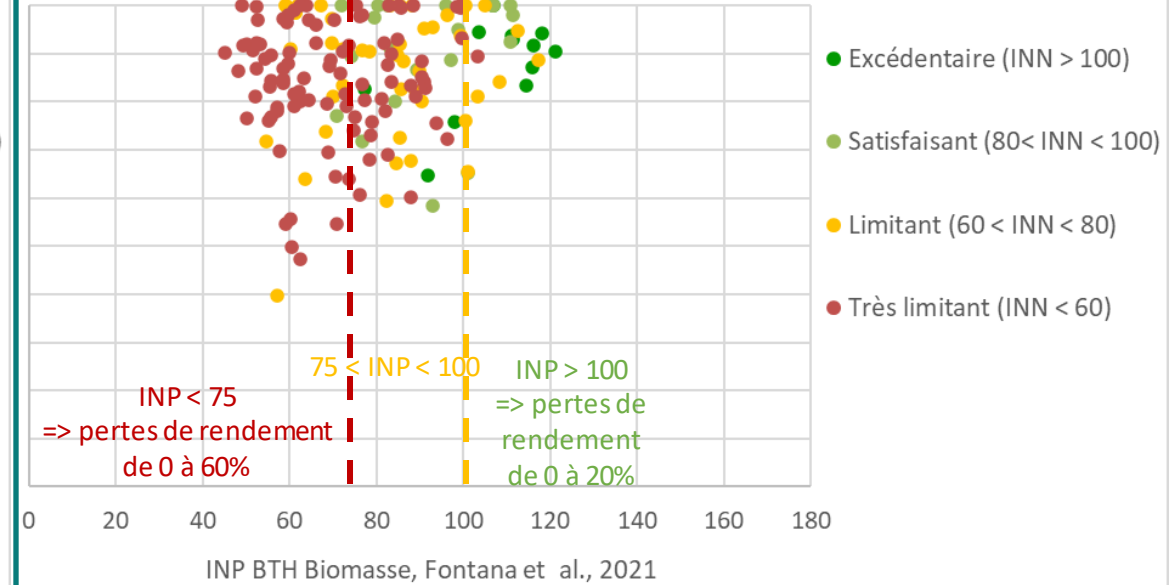


Relation entre INP blé (biomasse) et indice de rendement

Indice de rendement en fonction de l'INP blé (Cadot et al., 2018 - biomasse)



Indice de rendement en fonction de l'INP blé (Fontana et al., 2021 - biomasse)



| Indice de rendement | INP Cadot et al., 2018 (Biomasse) | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | Très limitant (INP ≤ 0.75) | Limitant (0.75 < INP < 1.3) | Non limitant (INP ≥ 1.3) |
| Très limitant (IR < 0.6) | 3 | 5 | 0 |
| Limitant (0.6 < IR < 0.8) | 7 | 27 | 2 |
| Peu limitant (IR > 0.8) | 27 | 79 | 22 |

Bons diagnostics : 30%
Diagnostics « acceptables » : 27,84%
Mauvais diagnostics : 16%

| Indice de rendement | INP Fontana et al., 2022 (Biomasse) | | |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| | Très limitant (INP ≤ 0.75) | Limitant (0.75 < INP < 1) | Non limitant (INP ≥ 1) |
| Très limitant (IR < 0.6) | 6 | 2 | 0 |
| Limitant (0.6 < IR < 0.8) | 18 | 15 | 3 |
| Peu limitant (IR > 0.8) | 56 | 51 | 21 |

Bons diagnostics : 24%
Diagnostics « acceptables » : 67%
Mauvais diagnostics : 33%

En cours de validation

Relation retenue

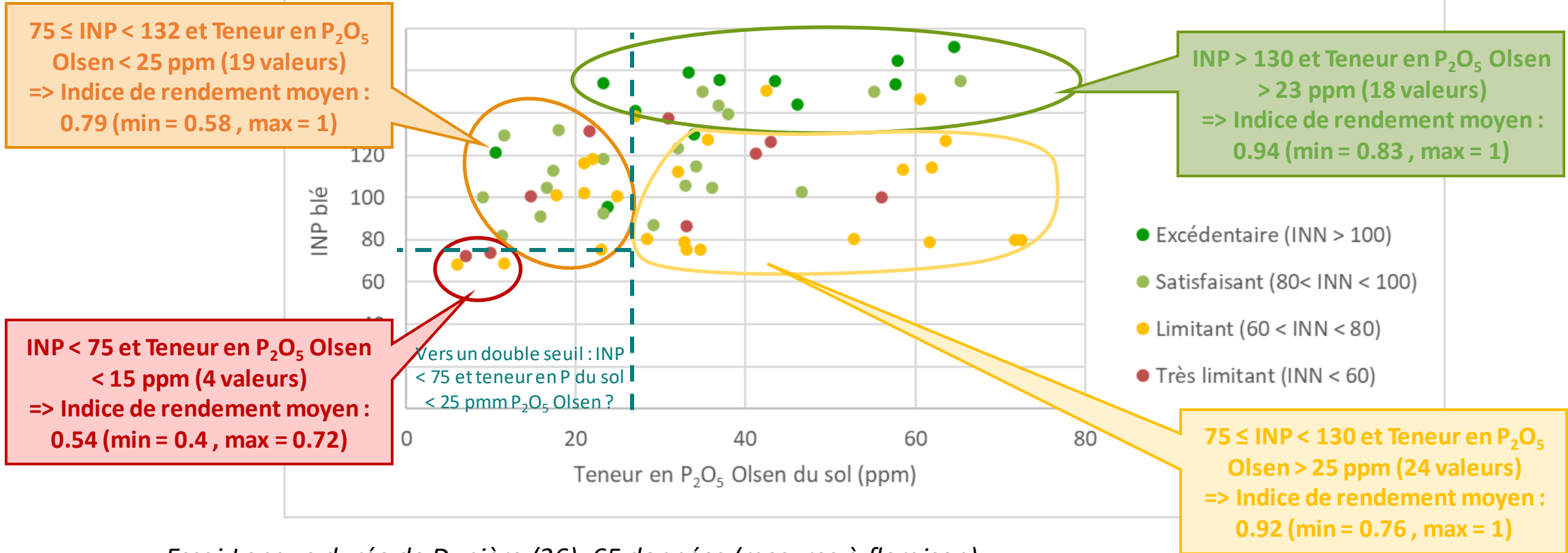
172 données de biomasse et indice de rendement en AB

Groupe PKMg Comifer - 12.06.2024 - Paris



Relation entre INP blé (fonction biomasse) et teneur en P du sol

INP blé (Cadot et al., 2018 - biomasse) selon la teneur en P₂O₅ Olsen du sol



Essai Longue durée de Dunière (26), 65 données (mesures à floraison)



Comparaison diagnostic analyse terre et INP (fonction biomasse)

| Indice de rendement | Analyse de terre | | |
|---------------------------|---|---|--|
| | Très limitant (P ₂ O ₅ Olsen ≤ 15 ppm) | Limitant (15 < P ₂ O ₅ Olsen < 25 ppm) | Non limitant (P ₂ O ₅ Olsen ≥ 25 ppm) |
| Très limitant (IR < 0.6) | 3 | 5 | 0 |
| Limitant (0.6 < IR < 0.8) | 13 | 14 | 6 |
| Peu limitant (IR > 0.8) | 10 | 41 | 57 |



En cours de validation

Bons diagnostics : 50%
Diagnostics « acceptables » : 93%
Mauvais diagnostics : 7%

| Indice de rendement | INP Cadot et al., 2018 (Biomasse) | | |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | Très limitant (INP ≤ 0.75) | Limitant (0.75 < INP < 1.3) | Non limitant (INP ≥ 1.3) |
| Très limitant (IR < 0.6) | 3 | 5 | 0 |
| Limitant (0.6 < IR < 0.8) | 6 | 25 | 2 |
| Peu limitant (IR > 0.8) | 23 | 63 | 22 |



Bons diagnostics : 30%
Diagnostics « acceptables » : 84%
Mauvais diagnostics : 16%

| Indice de rendement | Diagnostic combinant analyse de terre et INP Cadot et al., 2018 (Biomasse) | | |
|---------------------------|---|--|--|
| | Très limitant (P ₂ O ₅ Olsen < 25 ppm et INP ≤ 0.75) | Limitant (P ₂ O ₅ Olsen < 25 ppm et INP > 0.75) | Non limitant (P ₂ O ₅ Olsen ≥ 25 ppm) |
| Très limitant (IR < 0.6) | 3 | 5 | 0 |
| Limitant (0.6 < IR < 0.8) | 6 | 21 | 6 |
| Peu limitant (IR > 0.8) | 21 | 30 | 57 |



X



Bons diagnostics : 54%
Diagnostics « acceptables » : 86%
Mauvais diagnostics : 14%

149 données avec analyse de terre, biomasse et indice de rendement en AB



Outils de diagnostic de la fertilité P basés sur l'analyse de végétaux sur blé et maïs

→ Adaptation d'outils de diagnostic basés sur l'analyse de végétaux à l'AB

➤ Mise en relation d'indices de nutrition P de la littérature et indices de rendement obtenus sur dans des essais en AB pour définir des seuils de réponse

Travaux similaires sur blé tendre avec relations permettant de calculer P critique en fonction de la teneur en N

Travaux similaires sur maïs

En cours de validation

| Culture | Type d'équation | Equation Pc retenue | Pertes de rendement liées au P estimées à : | Seuil INP en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé | Pertes de rendement liées au P estimées à : | Seuil INP au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible | Pertes de rendement liées au P estimées à : |
|-------------------|----------------------------|---|---|--|---|---|---|
| Blé tendre | $P_c = f(\text{biomasse})$ | Cadot et al. 2018 $P_c = 4.44 \times \text{Biomasse}^{-0.41}$ | 31% (entre 0 et 60%, 7 valeurs) | 75 | 13% (entre 0 et 42%, 37 valeurs) | 130 | 8% (entre 0 et 28%, 21 valeurs) |
| Blé tendre | $P_c = f(\text{teneur N})$ | Cadot et al. 2018 $P_c = 0.083 \times \text{tN} + 0.88$ | 19% (entre 0 et 60%, 9 valeurs) | 75 | 13% (entre 0 et 50%, 48 valeurs) | 120 | 9% (entre 0 et 28%, 11 valeurs) |
| Maïs grain | $P_c = f(\text{biomasse})$ | Gagnon et al. 2020 $P_c = 3.98 \times \text{Biomasse}^{-0.28}$ | 17% (entre 0 et 31%, 7 valeurs) | 75 | 13% (entre 0 et 46%, 50 valeurs) | 130 | 6% (entre 0 et 16%, 9 valeurs) |
| Maïs grain | $P_c = f(\text{teneur N})$ | Cadot et al. 2018 $P_c = 0.083 \times \text{tN} + 0.39$ | 20% (entre 0 et 39%, 7 valeurs) | 100 | 12% (entre 0 et 46%, 46 valeurs) | 140 | 9% (entre 0 et 47%, 13 valeurs) |



Action 2

Estimation de l'effet du statut phosphore des sols sur la productivité des cultures et construction d'outils de diagnostic

Outils de diagnostic de la fertilité P basés sur l'analyse de végétaux sur

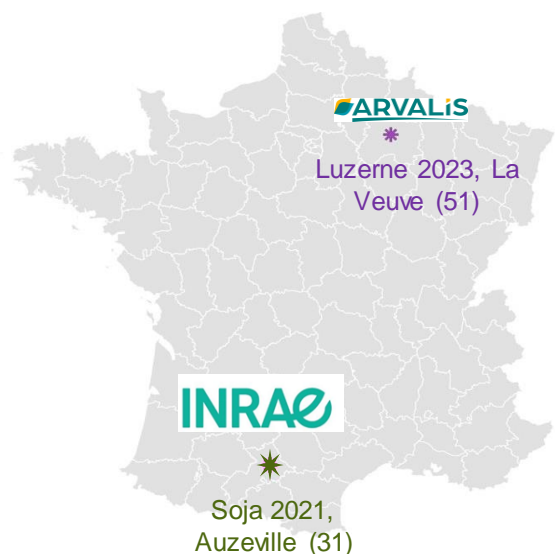
soja et luzerne

→ Mise au point d'outils de diagnostic basés sur l'analyse de végétaux pour l'AB

2 essais « indices de nutrition P » en conventionnel :

➤ Soja sur essai P de l'INRAE Auzeville (31) en 2021

➤ Luzerne dans un essai annuel Arvalis à La Veuve (51) en 2023



Sol de craie, 52 ppm de P_2O_5 Olsen
4 niveaux de P x 2 niveaux de N en 2022-2023 :

- 0, 40, 80 et 120 kg P_2O_5 /ha au semis (été 2022)
 - 0 et 80 kg N/ha en sortie d'hiver (février 2023)
- (Essais en conventionnel)**

Sol d'alluvions argilo-calcaires
4 niveaux de P différenciés depuis 1969 :

P0 : 0 kg P_2O_5 /ha/an, 5.9 ppm P_2O_5 Olsen
P1 : 25 kg P_2O_5 /ha/an, 11.5 ppm P_2O_5 Olsen
P2 : 50 kg P_2O_5 /ha/an, 25.9 ppm P_2O_5 Olsen



Mesures et analyses

- Analyse physico-chimique complète de sol à l'implantation
- Biomasse + teneur NPK à **4 dates différentes du premier cycle de coupe** (stades végétatif, initiation florale, bourgeonnement et début floraison = récolte)
- Rendement du 1^{er} cycle de coupe

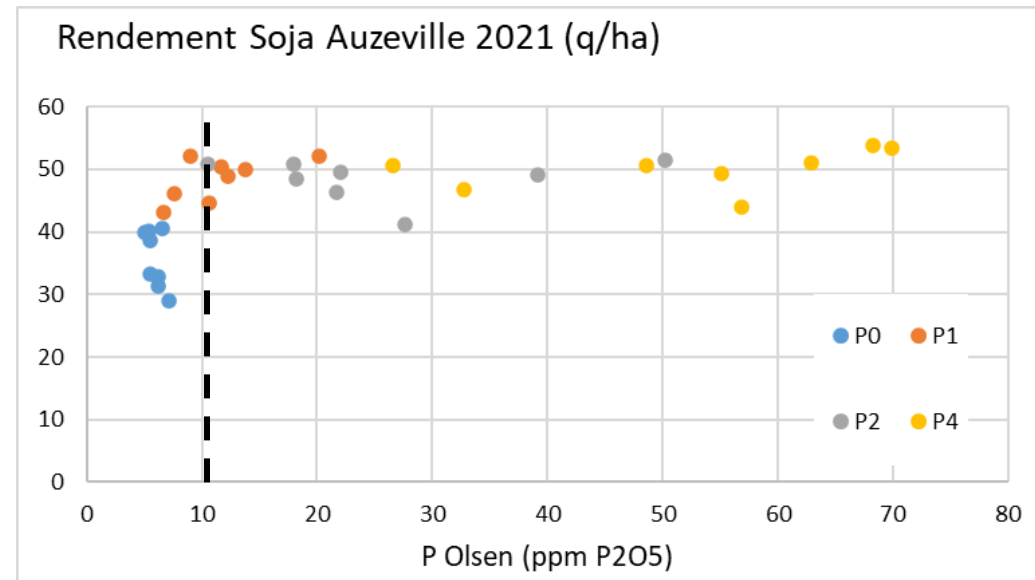


Mesures et analyses

- Analyse du P Olsen du sol sur chaque microparcelle en 2021
- Biomasse + teneur NP à **11 dates**
- Rendement



Mise au point de seuils d'interprétation pour l'INP sur soja



**P Olsen < 10 ppm de
P₂O₅ :**

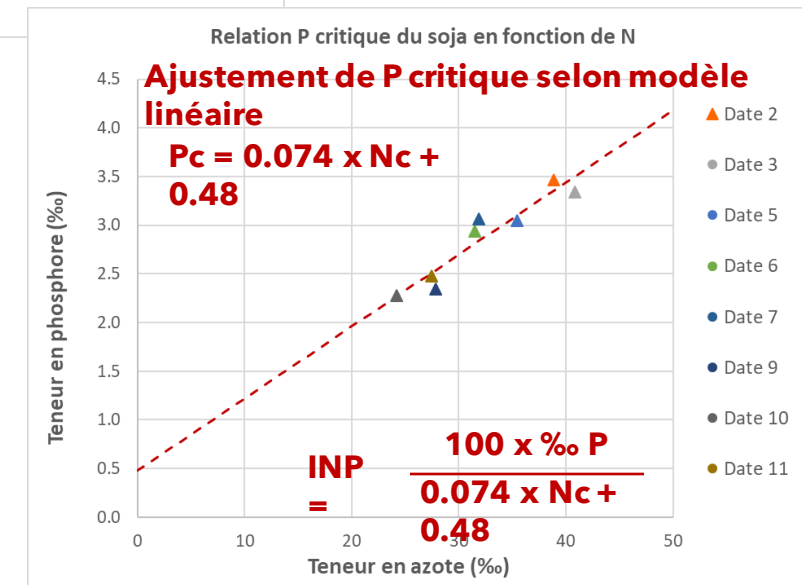
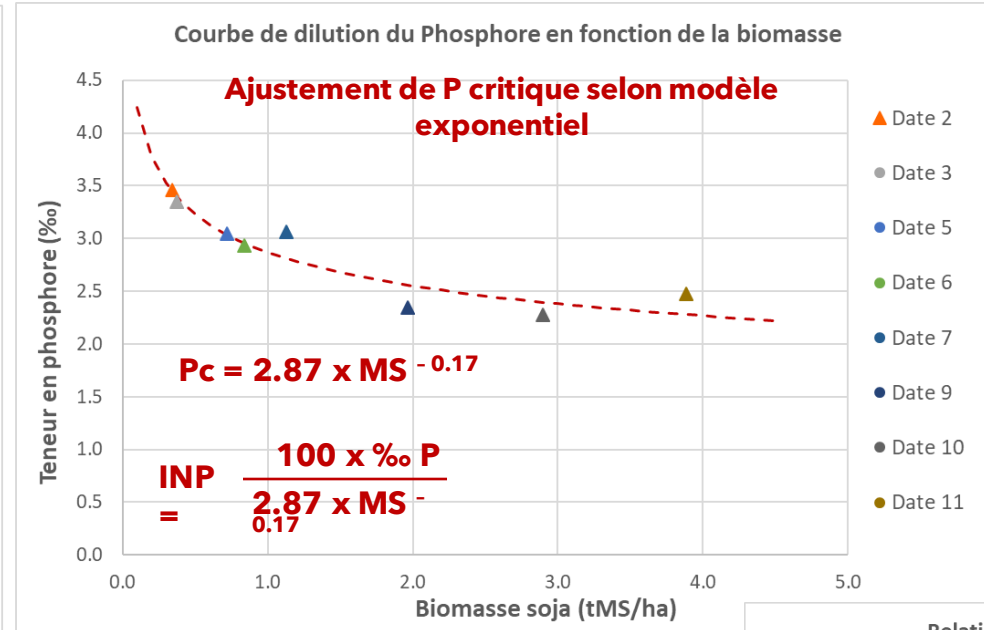
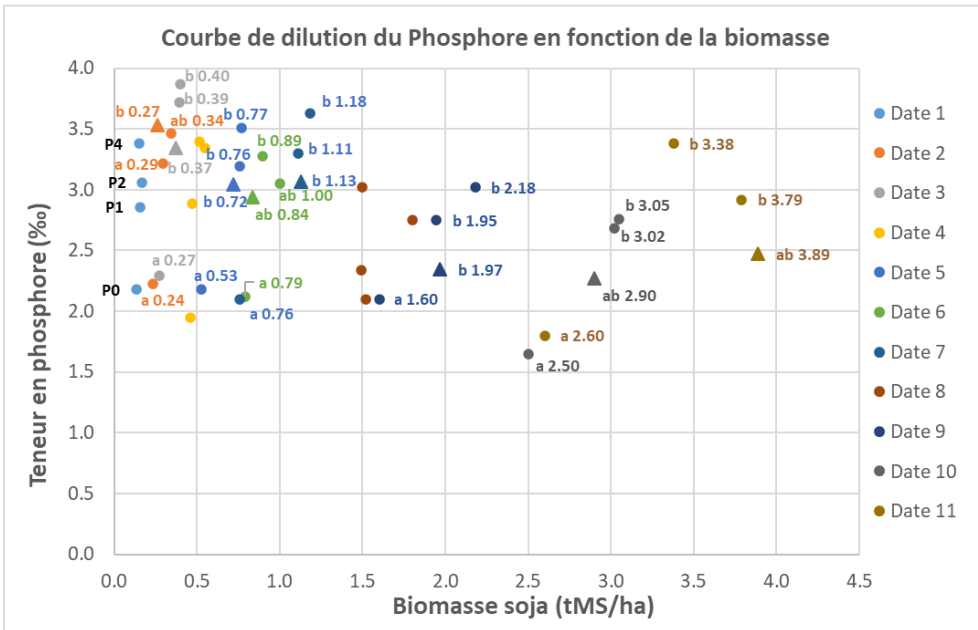
Perte de rendement
moyenne : 28%
(entre 3 et 46%,
11 valeurs)

**P Olsen ≥ 10 ppm de
P₂O₅ :**

Perte de rendement
moyenne : 9%
(entre 0 et 23%,
21 valeurs)



Mise au point d'indice de nutrition phosphatée sur soja



Des lettres différentes correspondent à des groupes de biomasses statistiquement différentes

Pas de différence statistique de biomasse entre traitements aux dates 1, 4 et 8

Teneur critique en phosphore pour chaque date :

Teneur en P associée à la valeur de biomasse la plus faible séparant 2 groupes statistiquement différents

Relation teneur critique en P en fonction de la teneur en azote : teneur en azote associée, pour chaque date, à la valeur de biomasse la plus faible séparant 2 groupes statistiquement différents



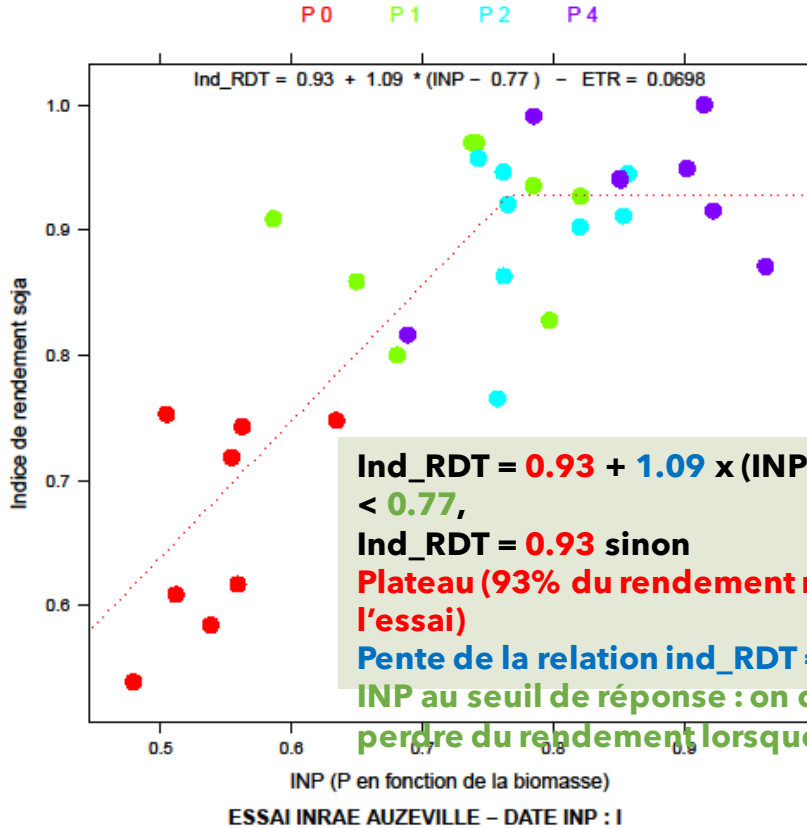
Mise au point de seuils d'interprétation pour l'INP sur soja

En cours de validation

Relation entre indice de rendement et INP (équation teneur P et biomasse)
 ➤ Ajustement selon modèle linéaire plateau

ETR = 0.0688

Relation indice de rendement du soja en fonction de l'INP



Travail similaire pour les 11 dates de mesure de biomasse et pour la relation entre indice de rendement et INP (équation teneurs P et N)

Seuils d'interprétation INP (équation teneur P et

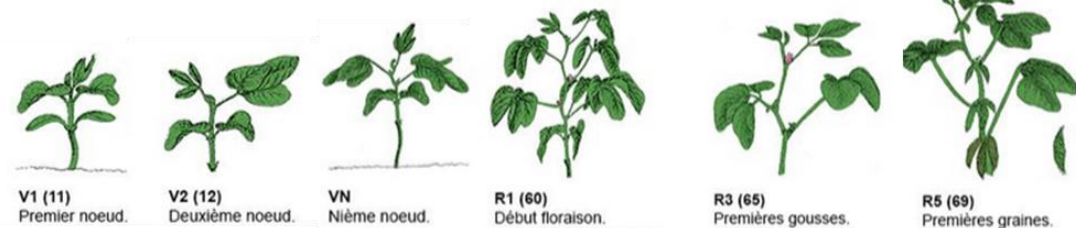
| DATE | p | biomasse) | s_INP | ETR |
|--------------|------------------|-----------|-------|-------|
| I (V2) | 0.93 | 1.09 | 0.77 | 0.070 |
| II (V2-V3) | 0.99 | 0.49 | 1.17 | 0.085 |
| III (V3-V4) | Pas d'ajustement | | | |
| IV (V4-V6) | 0.91 | 1.25 | 0.77 | 0.068 |
| V (V4-V6) | 1.00 | 0.49 | 1.27 | 0.080 |
| VI (V6-V8) | Pas d'ajustement | | | |
| VII (V6-V9) | | | | |
| VIII (V7-V9) | | | | |
| IX (V8-V11) | 0.91 | 0.47 | 1.05 | 0.108 |
| X (R1-R3) | 0.90 | 1.18 | 0.84 | 0.076 |
| XI (R4-R5) | 0.91 | 0.82 | 1.01 | 0.067 |

Seuils d'interprétation INP (équation teneur P et teneur N)

| DATE | p | N) | s_INP | ETR |
|------|------------------|------|-------|-------|
| I | 0.91 | 1.18 | 0.84 | 0.077 |
| II | 0.91 | 0.79 | 0.92 | 0.079 |
| III | 0.91 | 0.86 | 0.98 | 0.081 |
| IV | Pas d'ajustement | | | |
| V | 0.90 | 1.11 | 0.93 | 0.086 |
| VI | 0.91 | 0.92 | 0.99 | 0.075 |
| VII | Pas d'ajustement | | | |
| VIII | | | | |
| IX | | | | |
| X | 0.90 | 0.68 | 1.04 | 0.109 |
| XI | 0.91 | 0.70 | 0.96 | 0.086 |

Seuil moyen : 0.98

Seuil moyen : 0.95



Mise au point de seuils d'interprétation pour l'INP sur soja

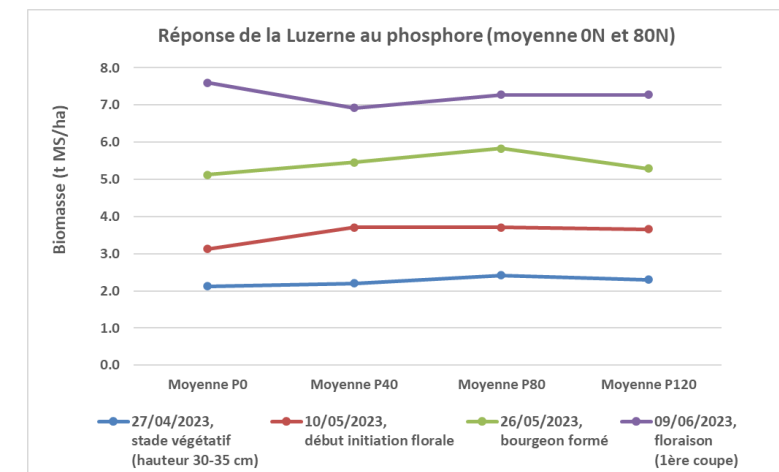
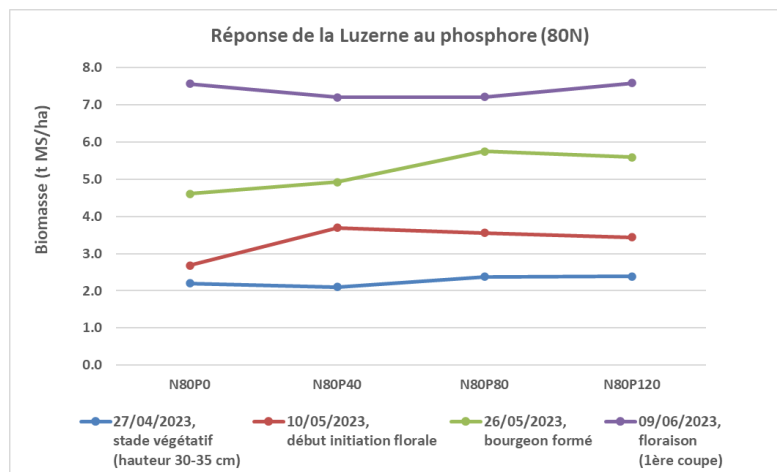
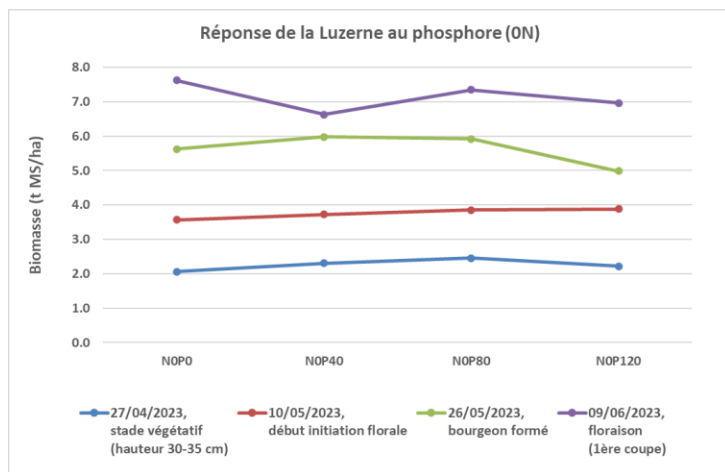
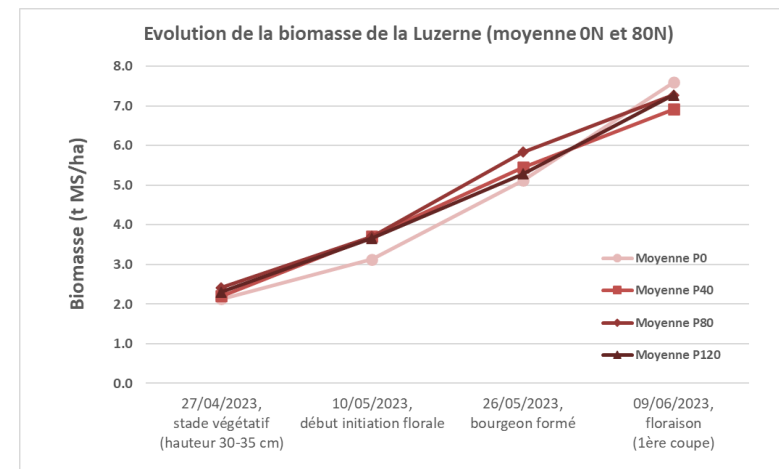
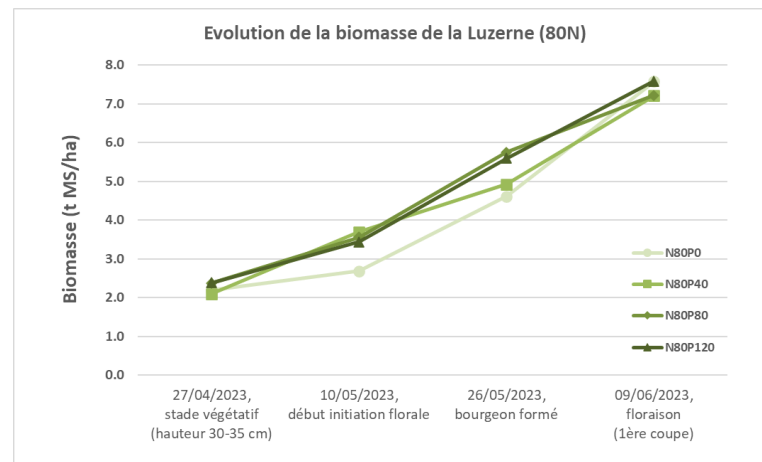
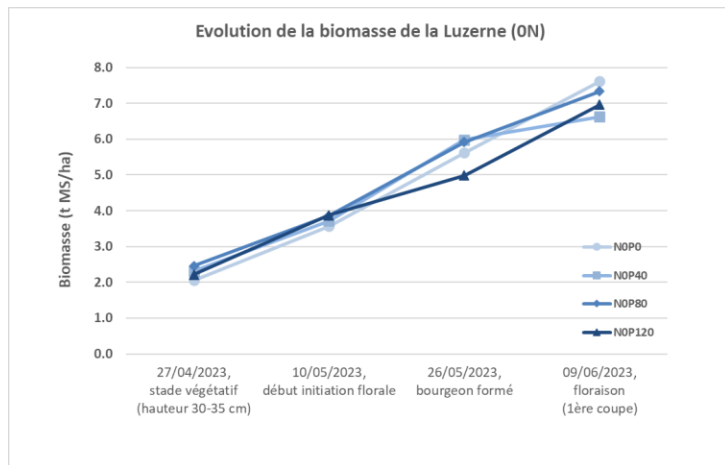
En cours de validation

| Culture | Type d'équation | Equation Pc | Pertes de rendement liées au P estimées à : | Seuil en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé | Pertes de rendement liées au P estimées à : | Seuil au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible | Pertes de rendement liées au P estimées à : |
|---------|------------------|--|---|--|---|---|---|
| Soja | Pc = f(biomasse) | $Pc = 2.97 \times \text{Biomasse}^{-0.17}$ | 28% (entre 1 et 46%, 98 valeurs) | 80 | 10% (entre 0 et 46%, 204 valeurs) | 120 | 9% (entre 0 et 23%, 50 valeurs) |
| | Pc = f(teneur N) | $Pc = 0.074 \times \text{tN} + 0.48$ | 26% (entre 1 et 46%, 118 valeurs) | 90 | 11% (entre 1 et 38%, 54 valeurs) | 100 | 9% (entre 0 et 28%, 180 valeurs) |
| | Analyse de terre | | | 28% (entre 3 et 46%, 11 valeurs) | 10 ppm de P₂O₅ Olsen | 9% (entre 0 et 23%, 21 valeurs) | Non défini |

Pc et tN en g/kg, Biomasse en t de MS/ha



Mise au point d'indice de nutrition phosphatée sur luzerne

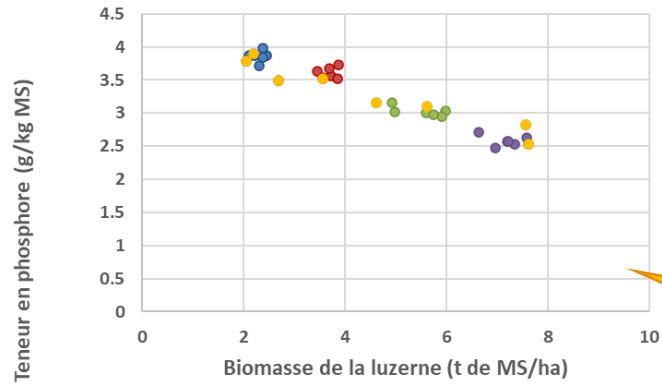


Pas de réponse significative de la luzerne au P
(teneur en P Olsen = 52 ppm P₂O₅ et forte pression des repousses d'orge malgré désherbage manuel)



Mise au point d'indice de nutrition phosphatée sur luzerne

Dilution du Phosphore en fonction de la biomasse



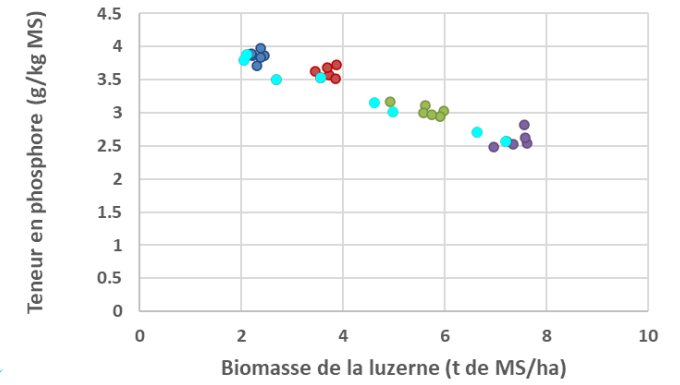
● 27/04/2023, stade végétatif (hauteur 30-35 cm) ● 10/05/2023, début initiation florale ● 26/05/2023, bourgeon formé ● 09/06/2023, floraison (1ère coupe) ● OP

Pas de réponse significative de la luzerne au P (teneur en P Olsen = 52 ppm P_2O_5 et forte pression des repousses d'orge malgré désherbage manuel)

=> En absence de réponse à P, l'essai ne permet pas des teneurs critiques en P aux différentes dates de mesure

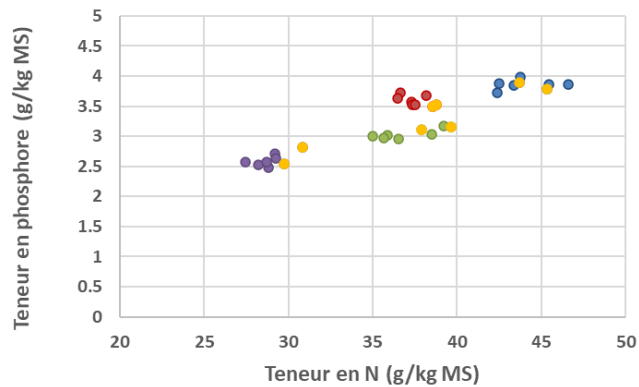
Tentative d'ajustement de P critique à partir des valeurs de biomasse et des teneurs en P et en N des modalités OP

Dilution du Phosphore en fonction de la biomasse



● 27/04/2023, stade végétatif (hauteur 30-35 cm) ● 10/05/2023, début initiation florale ● 26/05/2023, bourgeon formé ● 09/06/2023, floraison (1ère coupe) ● Pc min biomasse

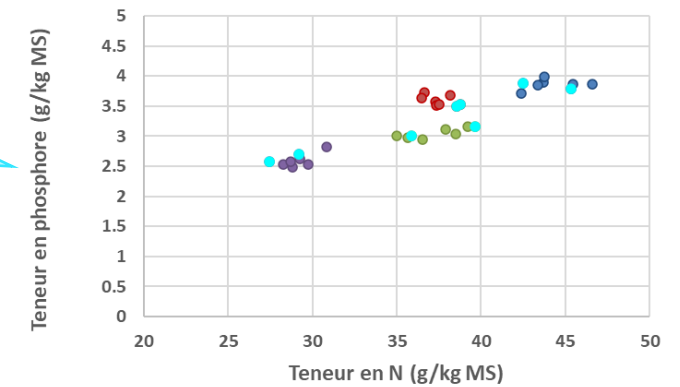
Teneur en Phosphore en fonction de la teneur en N



● 27/04/2023, stade végétatif (hauteur 30-35 cm) ● 10/05/2023, début initiation florale ● 26/05/2023, bourgeon formé ● 09/06/2023, floraison (1ère coupe) ● PO

Tentative d'ajustement de P critique en retenant les valeurs de biomasse minimales pour chaque date de mesure et chaque niveau d'azote et les teneurs en P et en N correspondantes

Teneur en Phosphore en fonction de la teneur en N



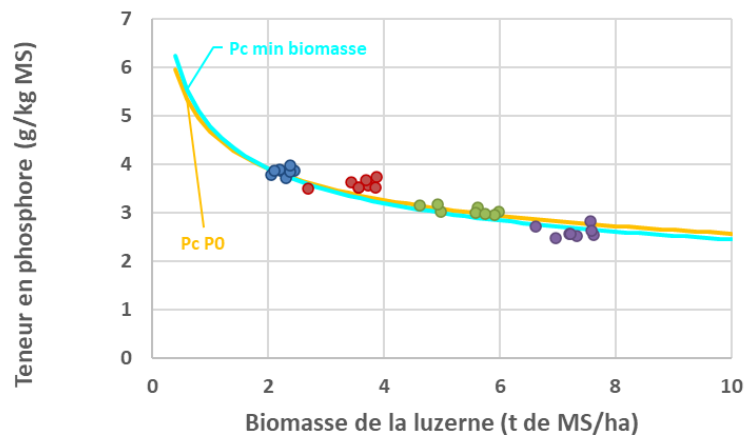
● 27/04/2023, stade végétatif (hauteur 30-35 cm) ● 10/05/2023, début initiation florale ● 26/05/2023, bourgeon formé ● 09/06/2023, floraison (1ère coupe) ● Pc min biomasse



Mise au point d'indice de nutrition phosphatée sur luzerne

Pas de réponse significative de la luzerne au P
(teneur en P Olsen = 52 ppm P₂O₅ et forte pression des repousses d'orge malgré désherbage manuel)

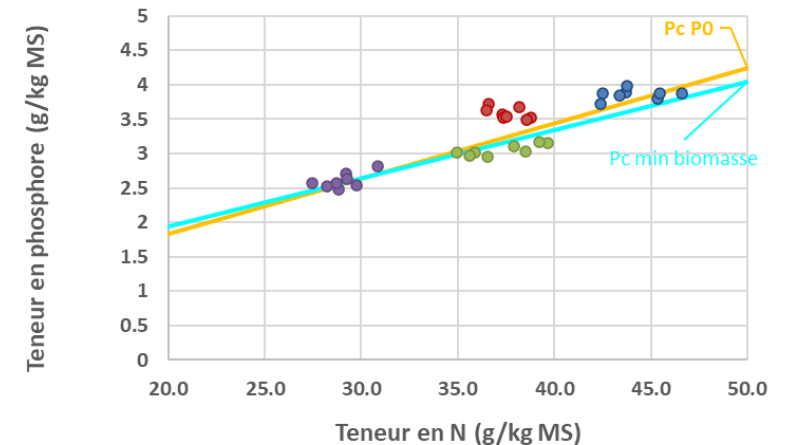
Dilution du Phosphore en fonction de la biomasse



● 27/04/2023, stade végétatif (hauteur 30-35 cm) ● 10/05/2023, début initiation florale ● 26/05/2023, bourgeon formé ● 09/06/2023, floraison (1ère coupe)

Ajustement de P critique à partir des valeurs de biomasse et des teneurs en P et en N des modalités 0P ou à partir des valeurs de biomasse minimales pour chaque date de mesure et chaque niveau d'azote et des teneurs en P et en N correspondantes

Teneur en Phosphore en fonction de la teneur en N



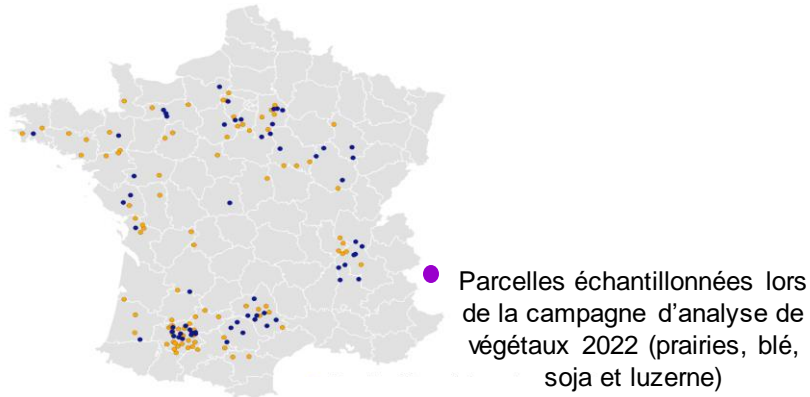
● 27/04/2023, stade végétatif (hauteur 30-35 cm) ● 10/05/2023, début initiation florale ● 26/05/2023, bourgeon formé ● 09/06/2023, floraison (1ère coupe)

| Espèce | Méthode | Equation P _{critique} | Source |
|---------|---|---------------------------------------|--|
| Luzerne | P _{critique} = f(%N) avec P0 | Pc = 0.08 x Nc + 0.24 | PhosphoBio, 2024 Essai INP Arvalis, La Veuve (51), 2023 |
| | P _{critique} = f(Biomasse) avec P0 | Pc = 4.68 x MS^{-0.26} | |
| | P _{critique} = f(%N) avec min biomasse | Pc = 0.07 x Nc + 0.54 | |
| | P _{critique} = f(Biomasse) avec min biomasse | Pc = 4.78 x MS^{-0.29} | |

Du fait de la très faible réponse au P de l'essai, les relations qui ont été établies surestiment très probablement la teneur en P critique de la luzerne

Action 2 : Estimation de l'effet du statut P des sols sur la productivité des cultures et mise au point d'outils de diagnostic de la fertilité P en AB

→ Test des indices de nutrition P sur les parcelles de l'observatoire



- **Campagne de prélèvements de végétaux sur les parcelles de l'observatoire** (printemps/été 2022 puis 2023)
=> 84 parcelles prélevées (65 parcelles prélevées en 2022 et 19 en 2023)
 - Blé : 40 parcelles vers épisaison
 - Soja : 15 parcelles avant floraison
 - Luzerne : 9 parcelles, stade végétatif à bourgeonnement
 - Prairies : 20 parcelles vers épisaison des graminées

- **Mesures de biomasse + analyses de végétaux :**
 - **Analyse plante entière => indices de nutrition**
 - Analyse foliaire (2^{ème} et 3^{ème} feuilles sous l'épi)

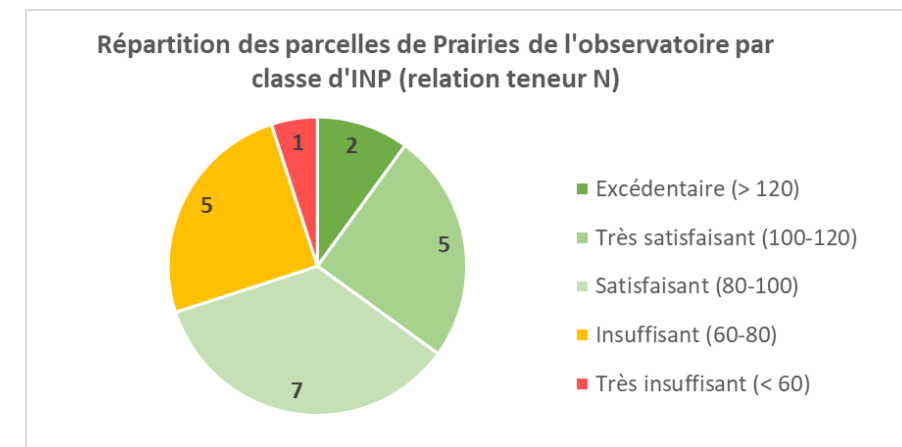
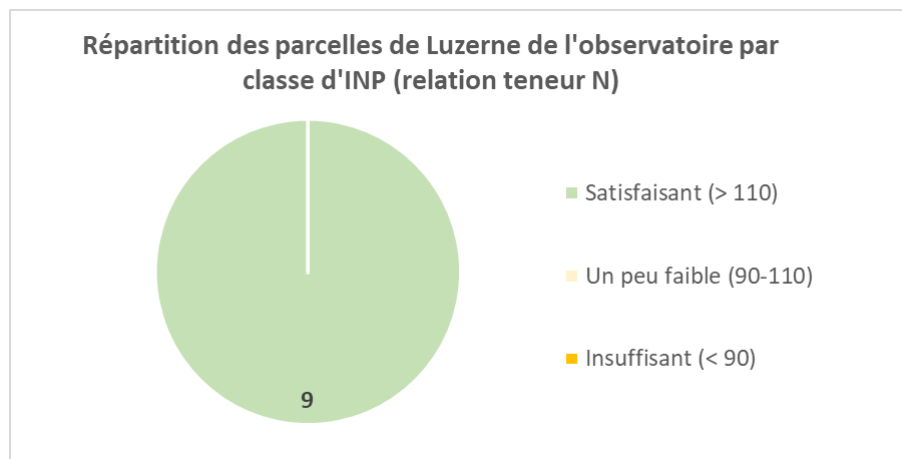
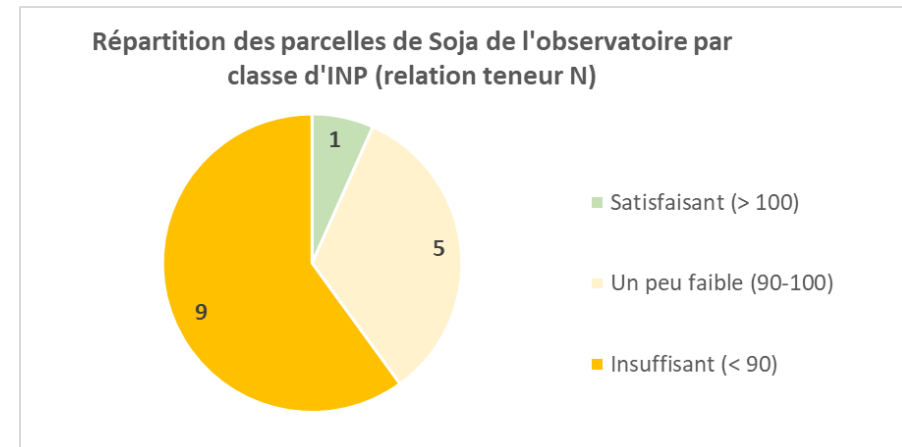
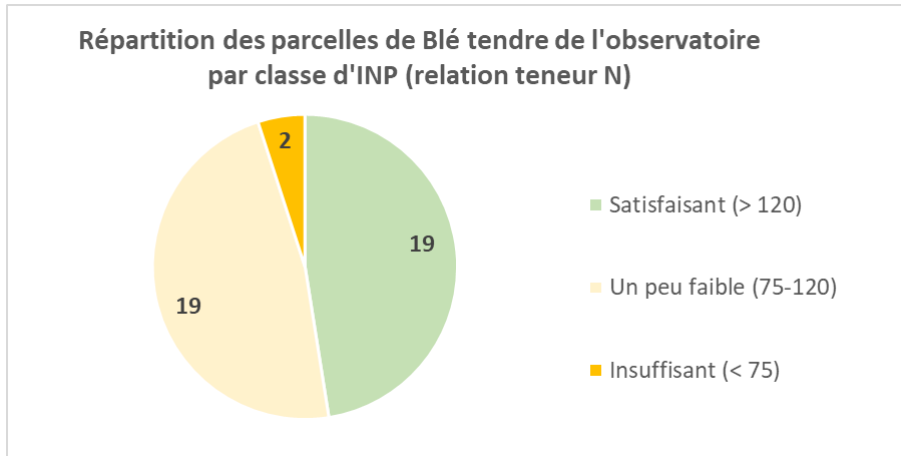
$$\text{Calcul d'indices de nutrition P : INP} = \frac{\text{Teneur en P mesurée}}{\text{Teneur en P critique}}$$



Action 2 : Estimation de l'effet du statut P des sols sur la productivité des cultures et mise au point d'outils de diagnostic de la fertilité P en AB

→ Test des indices de nutrition P sur les parcelles de l'observatoire

INP obtenus à partir de la teneur en azote

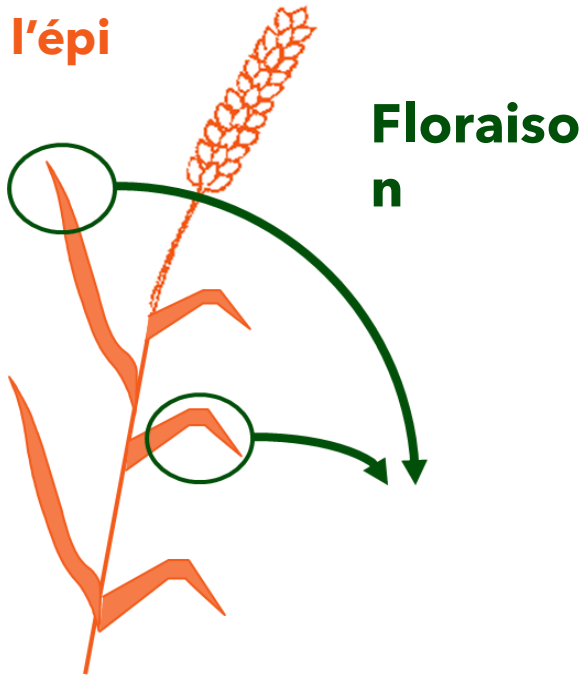


Action 2 : Estimation de l'effet du statut P des sols sur la productivité des cultures et mise au point d'outils de diagnostic de la fertilité P en AB

→ Test du diagnostic foliaire sur les parcelles de l'observatoire

Blé

2^e + 3^e feuille sous l'épi



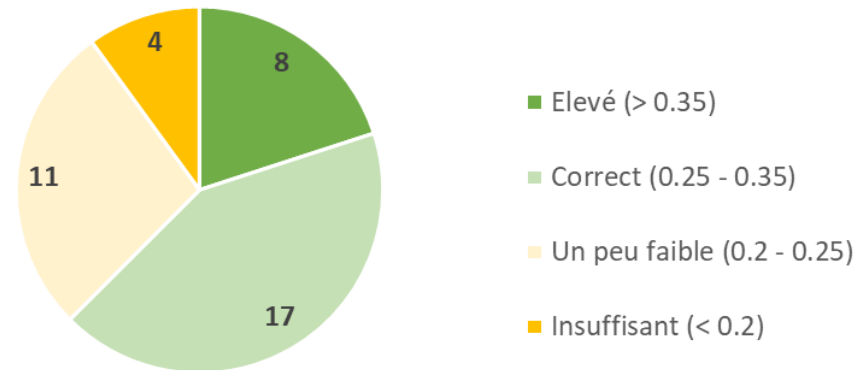
Blé : sur 50 tiges (de préférence les maîtres brins), au stade pleine floraison, prélever toutes les feuilles F2 et F3 (50 F2 + 50 F3)

Seuils développés pour le phosphore

(des seuils ont aussi été développés sur blé pour N, K, S, Mg, Ca, Mn, B, Cu, Zn)

| Stade | Organe | Insuffisant | Un peu faible | Correct | Source |
|-----------|--|-------------|---------------|-------------|--------------|
| Tallage | Plante entière | | | 0.3 - 0.4 | ITCF, Mangel |
| Floraison | 2 ^e me et 3 ^e me feuilles sous l'épi | < 0.2 | 0.2 - 0.25 | 0.25 - 0.35 | ITCF, Loué |

Répartition des parcelles de Blé de l'observatoire par classe de diagnostic foliaire

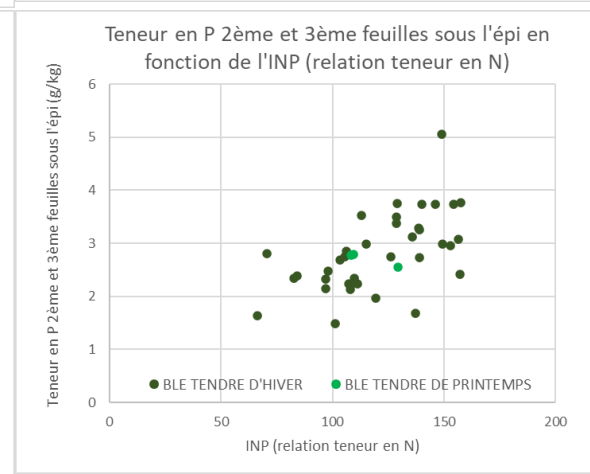
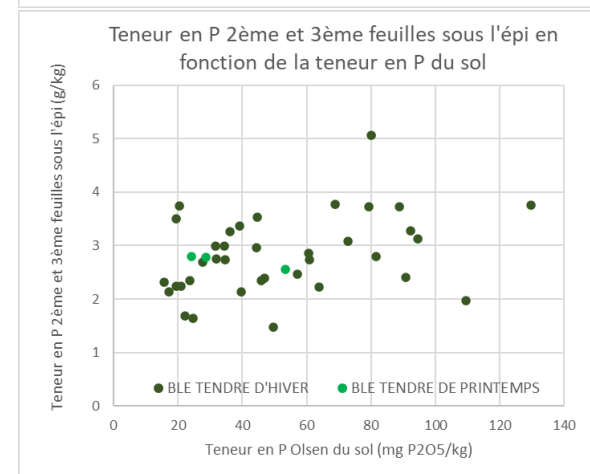
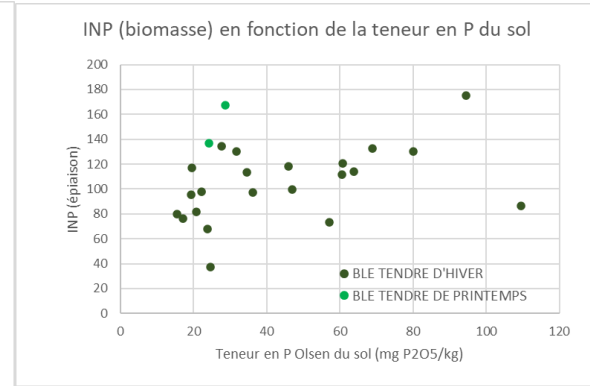
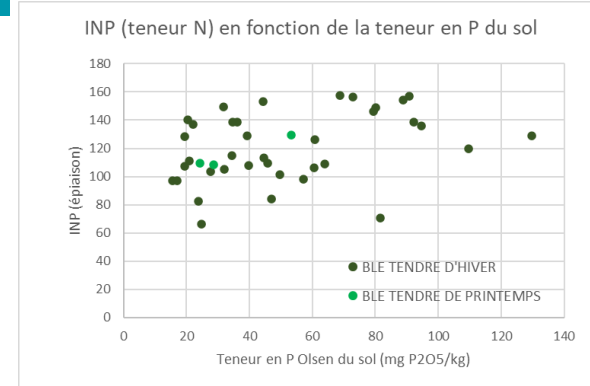


Action 2 : Estimation de l'effet du statut P des sols sur la productivité des cultures et mise au point d'outils de diagnostic de la fertilité P en AB

→ Comparaison des outils de diagnostic sur les parcelles en blé de

| INP %N | INP MS | Diagnostic foliaire P | Analyse de terre P | Nombre de parcelles |
|---------------|----------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| Insuffisant | Insuffisant | Insuffisant | Un peu faible | 1 |
| Un peu faible | Insuffisant | Un peu faible | Un peu faible | 1 |
| Un peu faible | Insuffisant | Un peu faible | Satisfaisant | 1 |
| Un peu faible | Un peu faible | Insuffisant | Satisfaisant | 1 |
| Un peu faible | Un peu faible | Un peu faible | Un peu faible | 4 |
| Un peu faible | Un peu faible | Un peu faible | Satisfaisant | 3 |
| Un peu faible | Un peu faible | Correct | Satisfaisant | 2 |
| Un peu faible | Satisfaisant | Correct | Un peu faible | 1 |
| Un peu faible | Satisfaisant | Correct | Satisfaisant | 2 |
| Satisfaisant | Un peu faible | Insuffisant | Un peu faible | 1 |
| Satisfaisant | Un peu faible | Correct | Satisfaisant | 3 |
| Satisfaisant | Un peu faible | Elevé | Un peu faible | 1 |
| Satisfaisant | Satisfaisant | Correct | Satisfaisant | 1 |
| Satisfaisant | Satisfaisant | Elevé | Satisfaisant | 2 |
| Insuffisant | non disponible | Correct | Satisfaisant | 1 |
| Un peu faible | non disponible | Insuffisant | Satisfaisant | 1 |
| Un peu faible | non disponible | Un peu faible | Satisfaisant | 1 |
| Un peu faible | non disponible | Correct | Satisfaisant | 1 |
| Un peu faible | non disponible | Elevé | Satisfaisant | 1 |
| Satisfaisant | non disponible | Un peu faible | Satisfaisant | 1 |
| Satisfaisant | non disponible | Correct | Satisfaisant | 6 |
| Satisfaisant | non disponible | Elevé | Un peu faible | 1 |
| Satisfaisant | non disponible | Elevé | Satisfaisant | 3 |

Tableau



Diagnosics concordants : 16/40

Diagnosics plutôt cohérents : 19/40

Diagnosics discordants : 5/40



Action 3

Prévision de l'évolution du statut P des sols en fonction des pratiques agricoles à l'échelle de la parcelle et du territoire

→ Evaluation de l'impact des pratiques culturales sur le statut P des sols

- Mise en relation des bilans fertilisation - exportations de P calculés sur des essais longue durée AB avec les teneurs en P Olsen du sol mesurées pour estimer la vitesse d'évolution des teneurs en P du sol



Données terminées, Analyse des résultats en

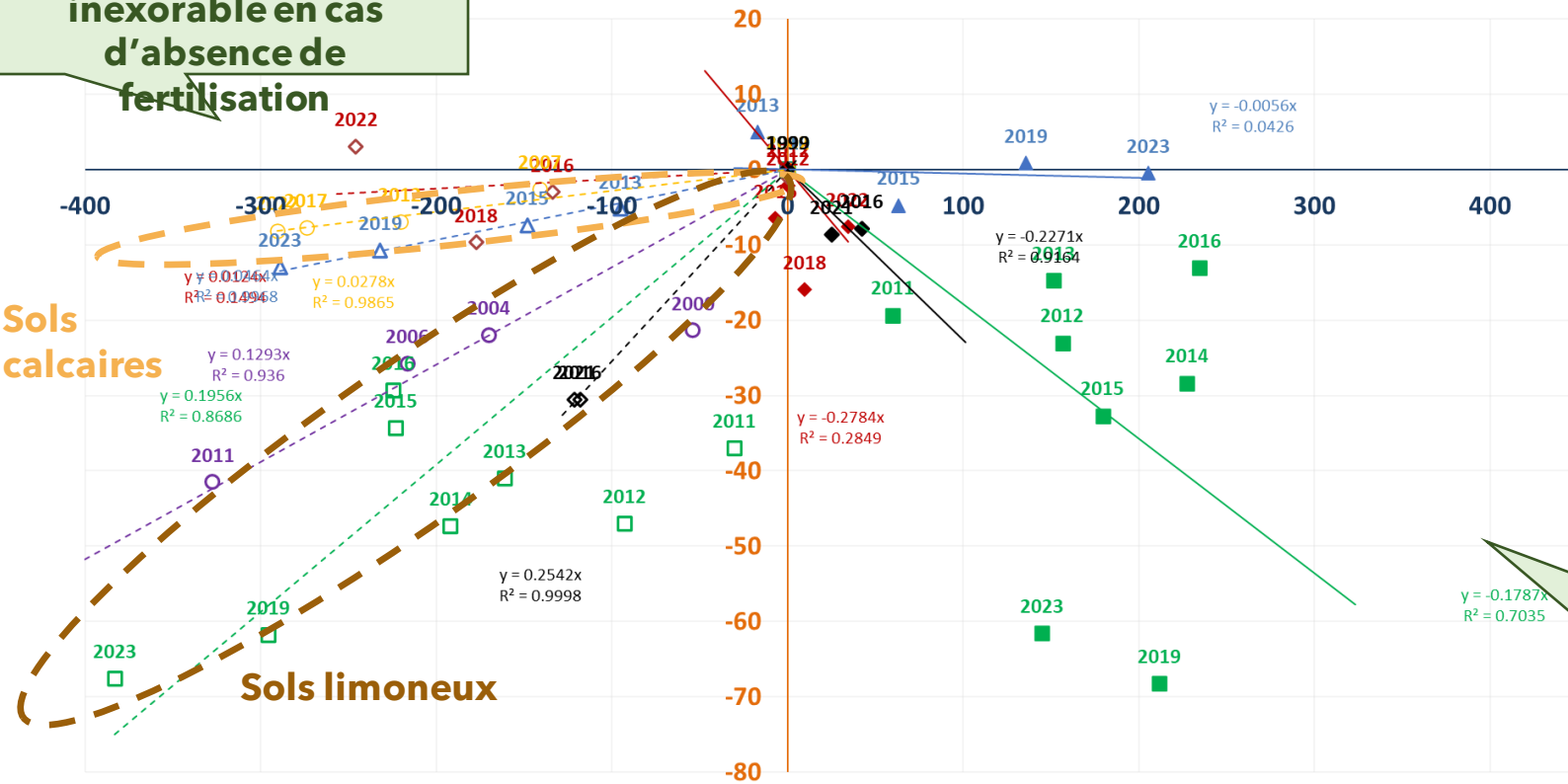
| Site | Type de sol | Régime de fertilisation | Types de produits | Période suivie |
|--|------------------------|---------------------------------------|--|----------------|
| La Hourre | Argilo-calcaire | P+ (12 parcelles) | Fientes, Farines de plume et de viande | 1999-2022 |
| Dunière | Limonosableux calcaire | P++ (10 parcelles) | 2006-2007 : Farine de poissons, 2009-2014 : Farine de plume, 2015-2023 : Farine de viande, 2012-2023 : Guanito | 2005 - 2023 |
| | | P- (10 parcelles) | 2009-2014 : Farine de plume, 2015-2020 : Farine de sang | |
| Boigneville | Limons | P- (10 parcelles) | Aucun | 2008-2023 |
| La Saussaye | Limons | P++ (1 parcelle, 3 zones) | Compost de déchets verts et de fumier de cheval, AxeN 12 | 2011-2023 |
| | | P- (1 parcelle, 3 zones) | Aucun | |
| Rotalég | Limon sablo-argileux | P+ (3 parcelles) | Farine de plumes, Farine de sang, PAT / fiente / guano | 2010-2023 |
| | | P- (12 parcelles) | Aucun | |
| Système AB Ferme des Bordes Jeu-Les-Bois* | Sablo-limoneux | P++ (4 parcelles) P+ (2 parcelles) | Compost et fumiers de bovins + fientes de volailles et lisiers de porc depuis 2016 | 2002-2021 |



Mise en relation des bilans fertilisation - exportation de P avec l'évolution de la teneur en P du sol

Nette diminution des teneurs en P des systèmes dont les bilans de P sont négatifs:
Perte de fertilité inexorable en cas d'absence de fertilisation

Evolution de la teneur du sol en P₂O₅ Olsen (mg.kg⁻¹) sur 0-30 cm



- Calculs des bilans réalisés en appliquant un coefficient d'équivalence au phosphore des engrais (Keq P) pour tenir compte de la faible solubilité du P de certains produits (farines d'os et phosphates naturels : Keq P estimé à 0.1)
- Calculs réalisés pour chaque parcelle de chaque essai (ici, ce sont les moyennes par système de culture qui sont présentées)
- Estimation de la vitesse d'évolution de la teneur en P Olsen en fonction du bilan de P

Dans les systèmes dont les bilans de P sont positifs, stabilité voire même diminution des teneurs en P (mais pas d'augmentation):
difficile de « rattraper » des situations à la fertilité dégradée

Pourquoi les teneurs en P n'augmentent pas lorsque le bilan est positif?
 ⇒ Effet tampon du sol, en particulier en sols alcalins?

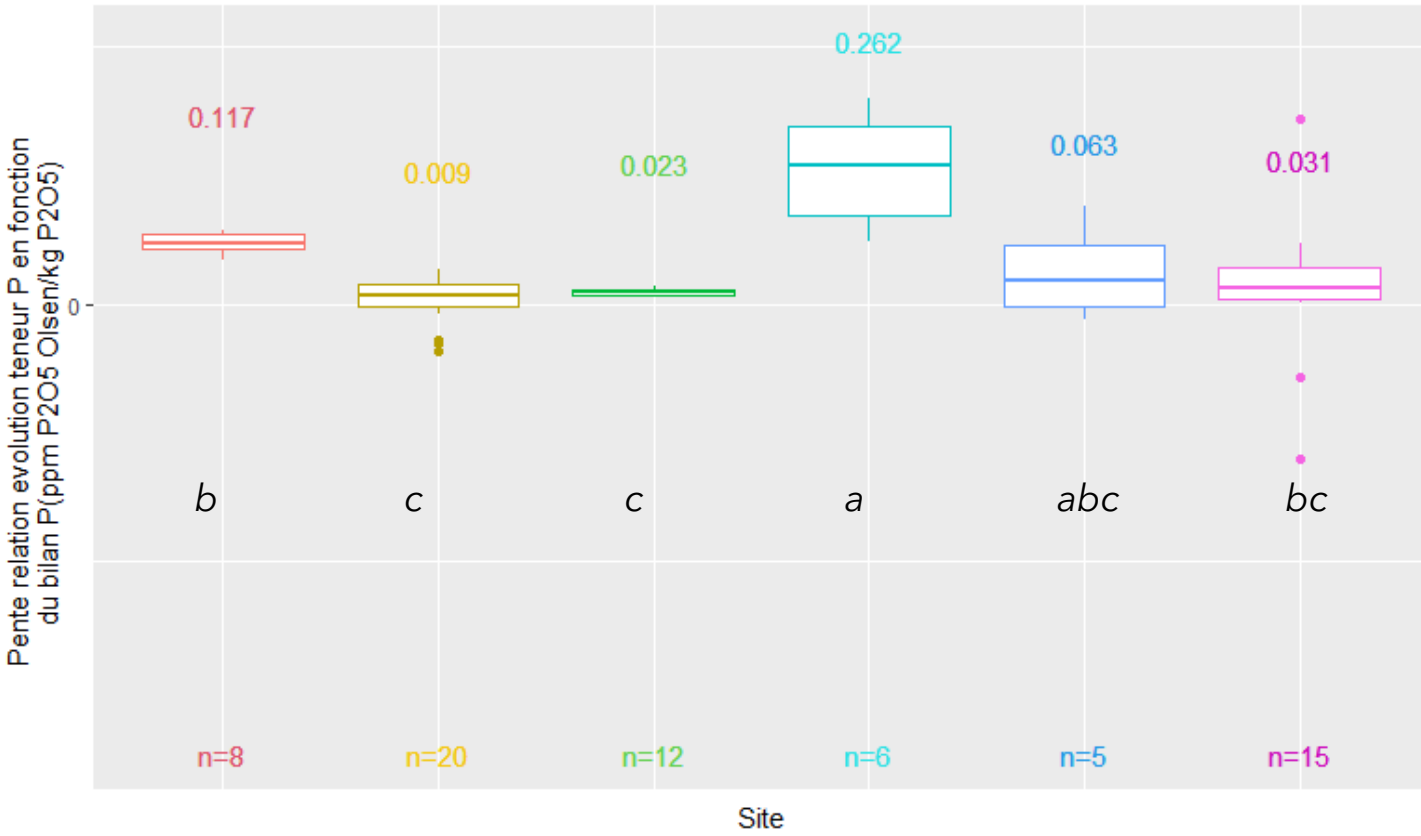
Bilan cumulé de phosphore : Fumure - Exportations (kg P₂O₅ / ha)

- ◆ Rotaleg P+
- ◇ Rotaleg P-
- La Saussaye P+
- La Saussaye P-
- Boigneville
- ▲ Dunière P+
- △ Dunière P-
- La Hourre
- ◆ Jeu-Les-Bois P++
- ◇ Jeu-Les-Bois P+

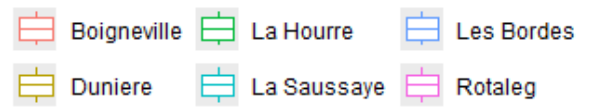
Pour un site et un système donné, regroupement de plusieurs parcelles

Pente de la relation entre évolution de la teneur en P du sol et bilan fertilisation - exportation de P

Dispersion des pentes de la relation évolution de la teneur en P2O5 Olsen en fonction du Bilan de P selon le site



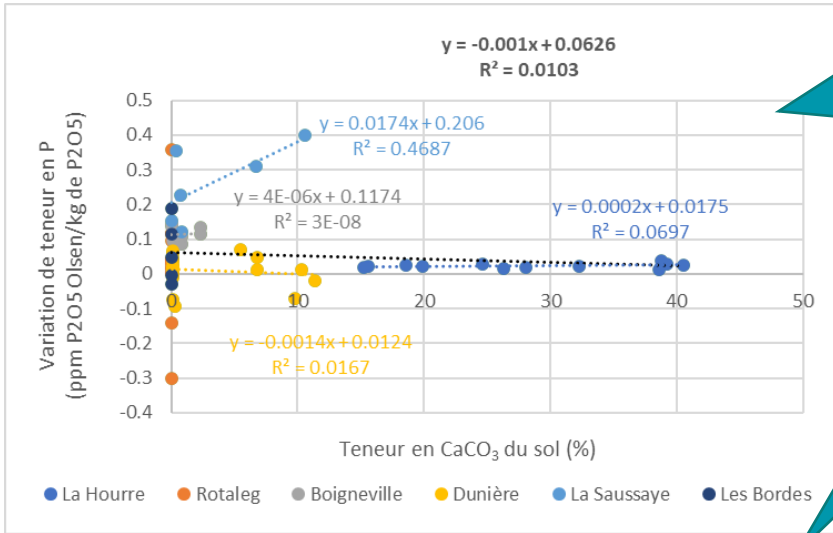
| Site | Type de sol | pH | CaCO3 % | MO % | CEC |
|--|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| La Hourre (12 parcelles) | Argilo-calcaire | 8.4 (8.2 à 8.6) | 28 (15 à 41) | 2.1 (1.4 à 3.2) | 12 (9 à 16) |
| Dunière (20 parcelles) | Limono-sableux calcaire | 7.2 (6.4 à 7.9) | 2 (0 à 11) | 1.8 (1.4 à 2.5) | 10 (9 à 12) |
| Boigneville (10 parcelles) | Limons | 7.8 (7.3 à 8.1) | 1 (0 à 2) | 1.9 (1.6 à 2.4) | 16 (15 à 17) |
| La Saussaye (6 parcelles) | Limons | 7.9 (7.3 à 8.2) | 3 (0 à 11) | 2.8 (2.2 à 4.2) | 19 (16 à 26) |
| Rotaleg (15 parcelles) | Limon sablo-argileux | 5.4 (5.0 à 5.8) | 0 | 1.8 (1.5 à 1.9) | 6 (5 à 7) |
| Système AB Ferme des Bordes Jeu-Les-Bois (6 parcelles) | Sablo-limoneux | 5.9 (5.2 à 6.2) | 0 | 3.1 (1.7 à 5.0) | 7 (4 à 10) |



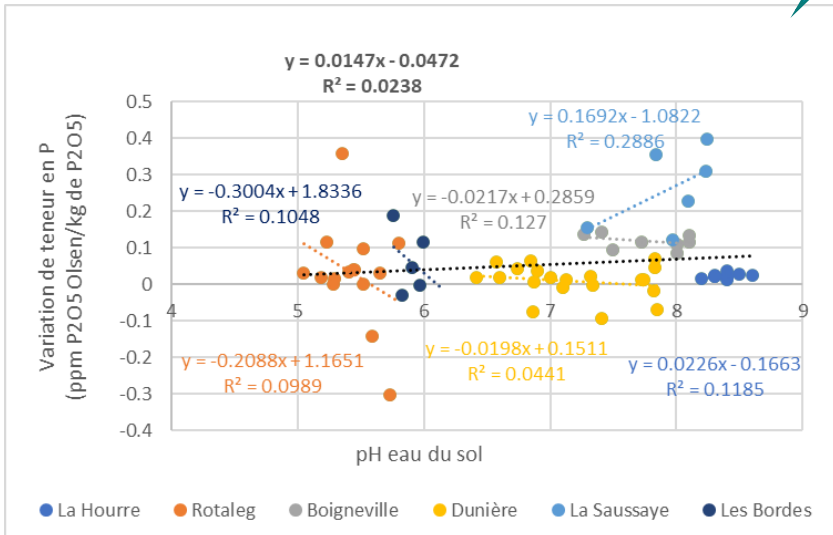
Test de comparaison des moyennes de Wilcoxon, significativité à 5%



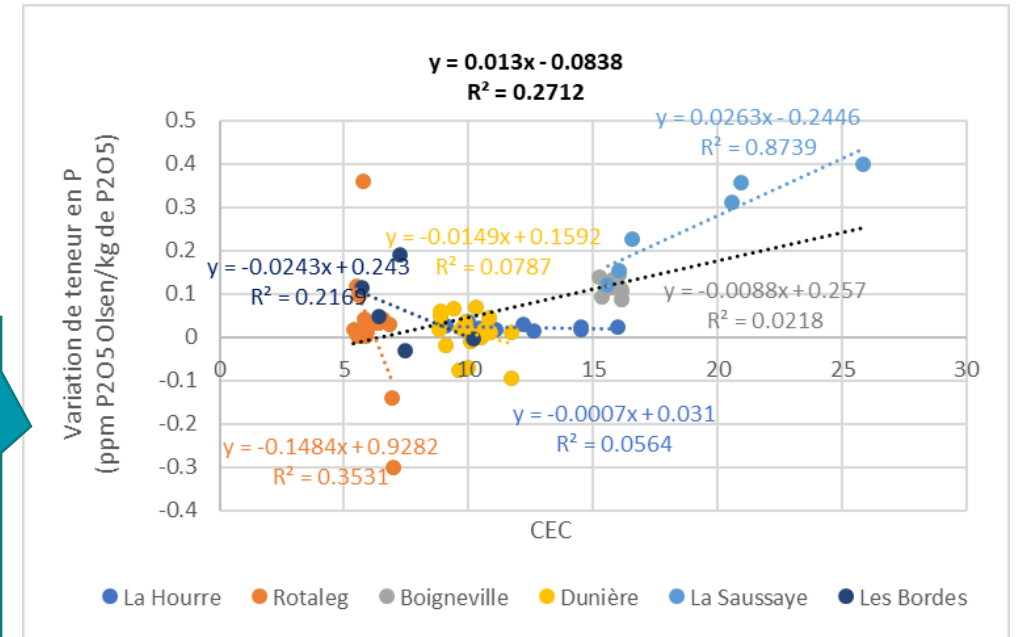
Facteurs explicatifs de la pente de la relation entre évolution de la teneur en P du sol et bilan fertilisation - exportation de P



La pente de la relation entre évolution de la teneur en P du sol et bilan fertilisation - exportation de P est très peu corrélée à la teneur en calcaire et au pH du sol



relation entre évolution de la teneur en P du sol et bilan fertilisation - exportation de P semble légèrement corrélée à la CEC du

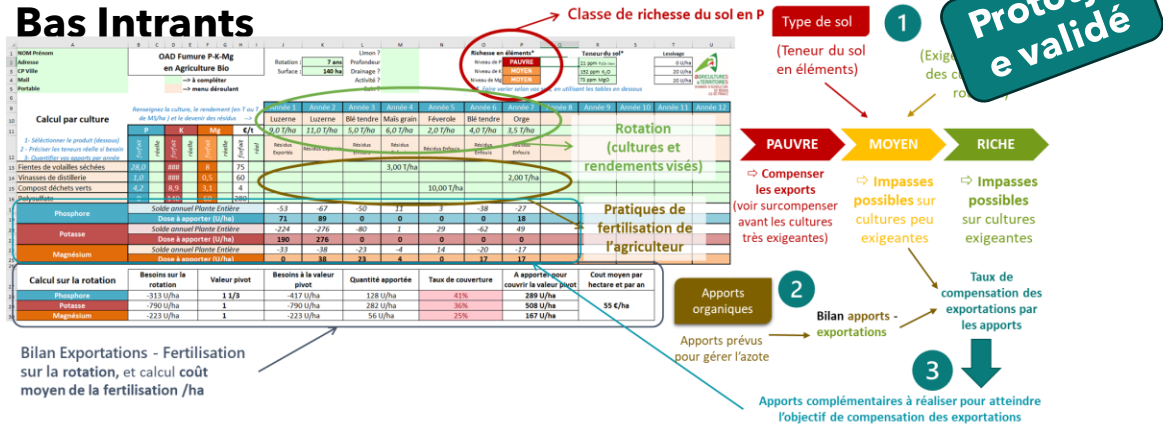


| Type de sol | Pente relation évolution teneur en P ₂ O ₅ en fonction du bilan de P | | | |
|---------------|--|---------|----------|------------|
| | Décile 2 | Moyenne | Décile 8 | Nb valeurs |
| CEC > 15 | 0.11 | 0.17 | 0.24 | 15 |
| 10 < CEC < 15 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 22 |
| CEC < 10 | 0.00 | 0.03 | 0.08 | 29 |

Action 4

Valorisation et transfert des résultats à travers des outils et méthodes opérationnels

→ Construction d'une « calculette Fumure - Exportations » spécifique à l'AB et aux contextes Bas Intrants



→ Mise au point d'une méthode de diagnostic de la fertilité P et de pronostic de son évolution « de l'analyse au champ à l'interprétation »

« Guide de gestion durable du Phosphore en AB » en préparation pour fin 2024.

→ Communication et transfert des résultats auprès de divers utilisateurs

- 2 Posters lors des rencontres Comifer-GEMAS 2021 et 2023
- 2 articles parus dans Perspectives Agricoles sur les résultats de l'observatoire
- 5 numéros parus de la Newsletter PhosphoBio
- 1 article scientifique en cours de finalisation sur les Bilans de P de l'observatoire

Valorisation en cours



Action 4

Valorisation et transfert des résultats à travers des outils et méthodes opérationnels

Travaux en cours

→ Construction d'une « calculette Fumure - Exportations » spécifique à l'AB et aux contextes Bas Intrants

Etape 1 : Description de la rotation

| Durée de la rotation | | | | | | | | | | | | 9 ans | | | | | | |
|--|----------------|---------|-------|-----|---------|-------|-----|---------|---------|---------|---------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|------------|---------|
| * en kg / unité apport produit brut | unité d'apport | P2O5 | | | K2O | | | MgO | | Ntotal | | Coût €/t | Rotation | Année 1 | Année 2 | Année 3 | Année 4 | Année 5 |
| | | Teneur* | Coef. | ea. | Teneur* | Coef. | ea. | Teneur* | Teneur* | Teneur* | Culture | | Luzerne déshydratée | Luzerne déshydratée | Luzerne déshydratée | Blé tendre | Blé tendre | |
| Produits fertilisants utilisés | | | | | | | | | | | | Organes récoltés | parties aériennes | parties aériennes | parties aériennes | grain | grain | |
| | | | | | | | | | | | | Rendement (t/ha) | 8.4 t/ha | 10.8 t/ha | 10.8 t/ha | 4.1 t/ha | 3 t/ha | |
| | | | | | | | | | | | | Rendement paille (t/ha) | | | | | | |
| Fientes de poules pondeuses (sèchée) | | | | | | | | | | | | Apport en /ha | | | | | 2.5 | |
| Vinasse concentrée de mélasse de betterave | | | | | | | | | | | | Apport en /ha | | | | | | |
| Composts de déchets verts | | | | | | | | | | | | Apport en /ha | | | | | | |
| Kiésérite | | | | | | | | | | | | Apport en /ha | 0.15 | 0.15 | 0.15 | | | |

Etape 2 : Description des apports de fertilisants

Etape 3 : Calcul des bilans de P₂O₅ et de K₂O sur la rotation

| | APPORTS TOTAUX | EXPORTATIONS | BILAN APPORTS - EXPORTATIONS |
|------|----------------|--------------|------------------------------|
| P2O5 | 165 kg/ha | 312 kg/ha | -147 kg/ha |
| K2O | 579 kg/ha | 1073 kg/ha | -494 kg/ha |

Références teneurs en P (et K) des organes exportés en AB



Action 4

Valorisation et transfert des résultats à travers des outils et méthodes opérationnels

→ Construction d'une « calculette Fumure - Exportations » spécifique à l'AB et aux contextes Bas Intrants

Travaux en cours

Etape 4 : Diagnostic de fertilité PK en début de rotation

Etape 5 : Diagnostic de fertilité PK en fin de rotation

| | | |
|-----------------|---|-------------|
| Région | Centre Bassin parisien | |
| Nom Parcelle | | (indicatif) |
| Type de sol | limons battants | |
| | <ul style="list-style-type: none"> limons battants limons de Beauce sables limons sableux Argilo-calcaires superficiels cail Argilo-calcaires profonds peu c. Argilo-calcaires de Beauce | |
| Richesse en élé | | |
| Teneur | | |
| | | Méthode |
| P205 | 22 | Olsen |
| K20 | 183 | |

A RISQUE
BON

Références seuils de teneur en P du sol adaptés à l'AB (seuils Comifer pour K)

Références de coefficients de pentes d'évolution des teneurs en PK par type de sol

| | APPORTS TOTAUX | EXPORTATIONS | BILAN APPO EXPORTATIONS | Evolution prévisionnelle de la teneur en élément du sol | Teneur du sol en élément à l'issue de la rotation | Niveau de la teneur finale |
|------|----------------|--------------|----------------------------|---|---|----------------------------|
| P205 | 165 kg/ha | 312 kg/ha | -147 kg/ha | -13 | 9 | CRITIQUE |
| K20 | 579 kg/ha | 1073 kg/ha | -494 kg/ha | -5 | 178 | A RISQUE |



Action 4

Valorisation et transfert des résultats à travers des outils et méthodes opérationnels

→ Construction d'une « **calculatrice Fumure - Exportations** » spécifique à l'AB et aux contextes Bas Intrants

Travaux
en cours

Choix du
système
dans une
liste
déroulante

- **Bio :**

- Références teneurs en PK des organes exportés et indices de rendement AB
- Liste des engrais réduite à ceux utilisables en AB
- Références de teneurs seuils en P des sols adaptées à l'AB

- **Conventionnel :**

- Références teneurs en PK des organes exportés Comifer et indices de rendement conventionnels
- Liste des engrais complète
- Références de teneurs seuils en P des sols Comifer

- **Conventionnel « extensif »** (faibles niveaux de rendement, équivalents ou légèrement supérieurs aux rendements AB de la région):

- Références teneurs en PK des organes exportés et indices de rendement AB
- Liste des engrais complète
- Références de teneurs seuils en P des sols adaptées à l'AB

Agenda

- **Fin du projet : 31/12/2024**
- **Séminaire de clôture : PhosphoBio - Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?**

21/11/2024, format mixte : présentiel centre INRAE Bordeaux-Aquitaine et distanciel

Page web de l'évènement :

<https://www.arvalis.fr/evenements/phosphobio-21-novembre-2024-bordeaux>

- **Pour en savoir plus : Newsletter PhosphoBio**

(5 numéros parus disponibles sur la page PhosphoBio du site du RMT Bouclage : <http://www.rmt-fertilisationenvironnement.org/moodle/course/view.php?id=175>)



Merci de votre attention !

PhosphoBio

Projet CASDAR IP
1^{er} octobre 2020 – 31 décembre 2024

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR


**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE L'ALIMENTATION**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

