



Phosphore en agriculture biologique : Principaux enseignements du projet PhosphoBio

Grégory VERICEL
Arvalis

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



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

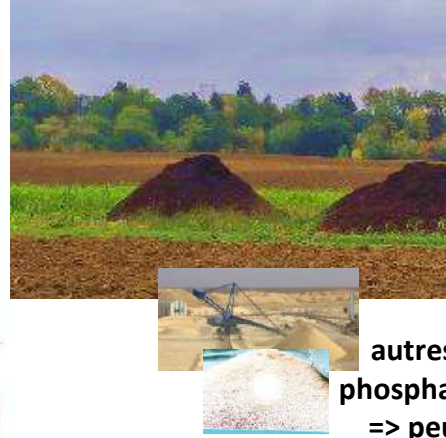
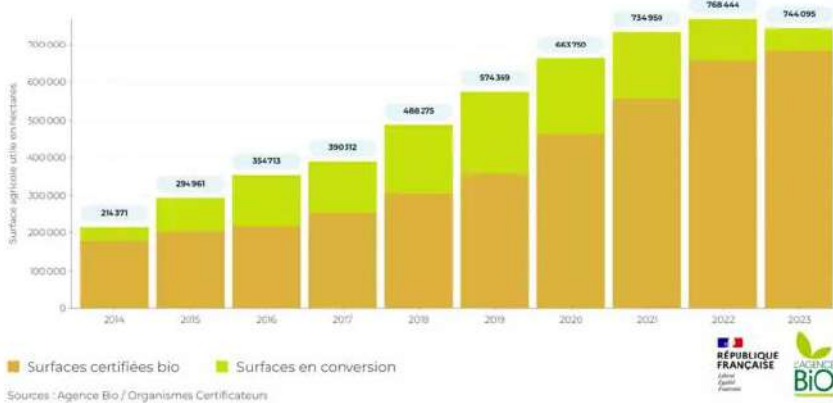


Enjeux autour du phosphore en AB



ÉVOLUTION DES SURFACES BIO OU EN CONVERSION

France entière - Grandes cultures : Toutes les grandes cultures



autres sources :
phosphates naturels
=> peu efficaces

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)

➤ **Risque d'appauvrissement progressif des sols en P :**

- Beaucoup d'exploitations en AB bénéficient encore des stocks constitués avant leur conversion
=> pour combien de temps ?
- Pratiques actuelles en agriculture conventionnelle => Réduction des apports de P
=> Les nouvelles exploitations qui se convertissent en AB bénéficient d'un stock moins confortable ?

➤ **Les exploitations de grandes cultures AB qui fonctionnent en « autonomie » grâce aux légumineuses, avec très peu (ou sans) apports organiques : concernées en premier**

➤ **Les exploitations avec élevage peuvent aussi être concernées notamment si le P apporté par les effluents < P exporté hors de l'exploitation ou si inégale répartition des effluents sur les surfaces de l'exploitation**



Questions soulevées sur la gestion du P en AB

1

Quel est l'état des lieux de la disponibilité en P du sol en AB ?

→ *Les craintes concernant la durabilité de la fertilité phosphatée des systèmes AB sont-elles justifiées ?*

→ *Quel niveau actuel de fertilité des sols en systèmes de grandes cultures et polyculture-élevage AB ?*

2

Faut-il adapter nos outils de diagnostic (et les méthodes de raisonnement qui en découlent) à l'AB ?

→ *Quel effet du phosphore des sols sur le rendement des cultures en AB ?*

→ *Peut-on diagnostiquer de problèmes de fertilité P en utilisant l'analyse de végétaux ?*

3

Comment prévoir l'évolution de la fertilité phosphatée des sols en fonction des pratiques ?



Etat des lieux du P dans les sols bio

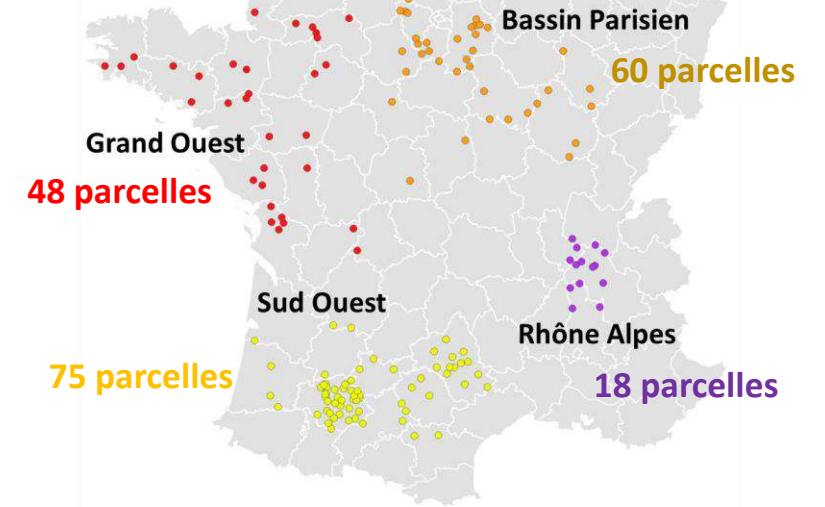
- **Pourquoi ? Des interrogations sur la fertilité P des systèmes bio**
 - Quel **niveau de fertilité P** des sols en grandes cultures et prairies en AB ?
 - **Baisse de la fertilité P des sols en AB** : stock de P diminuent-ils avec l'ancienneté de la conversion ?
 - Quel **impact des pratiques agricoles** sur les stocks de P des sols en AB ?
- **Comment ?**
 - Mise en place d'un **observatoire de 201 parcelles chez 157 agriculteurs**
 - Campagne **d'analyses de terre** sur toutes les parcelles (*AUREA, hiver 2021/2022*)
 - **Enquêtes sur les pratiques culturales** auprès de 153 agriculteurs, portant sur 193 parcelles (*projets étudiants Bordeaux Sciences Agro et ISARA, 2021/2022 et 2022/2023*)



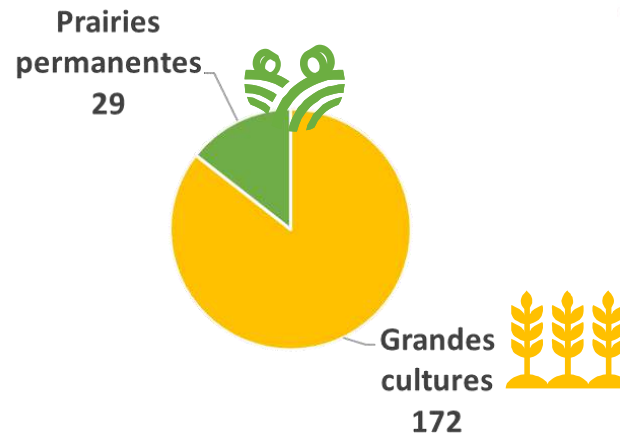
Construction de l'observatoire

- Avis de recherche : candidatures d'agriculteurs et 24 organismes impliqués
 - **4 territoires** : gamme de systèmes de production et contextes pédoclimatiques contrastés
 - Parcelles homogènes, **type de sol et système de culture représentatif** de l'exploitation et de la région
 - Parcelles **converties avant 2016**, **3 classes** (conversion très ancienne, ancienne, récente)
 - Rotation **grandes cultures / prairies permanentes**
 - **Apports** plus ou moins fréquents de P
- Ancienneté de la conversion AB

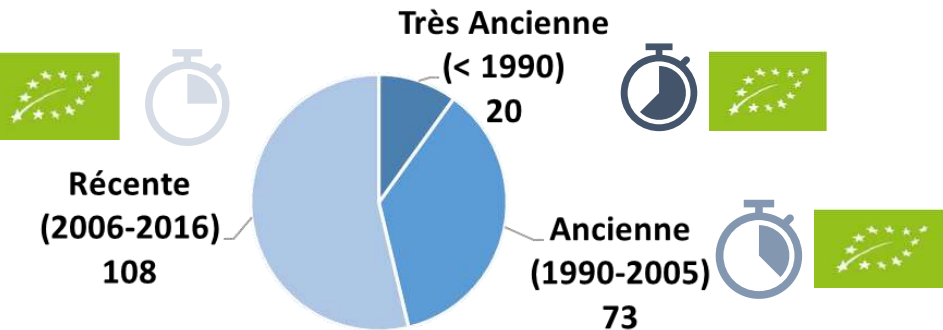
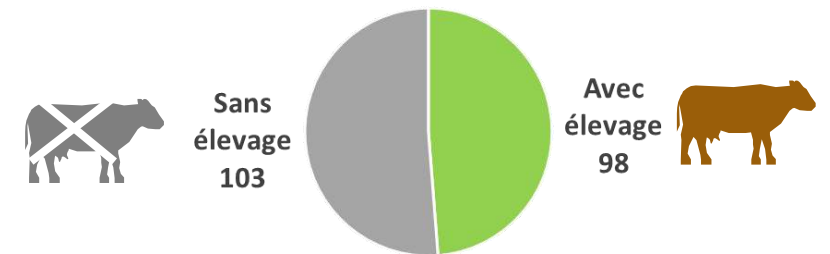
201 parcelles
157 exploitations



➤ Mode d'occupation du sol



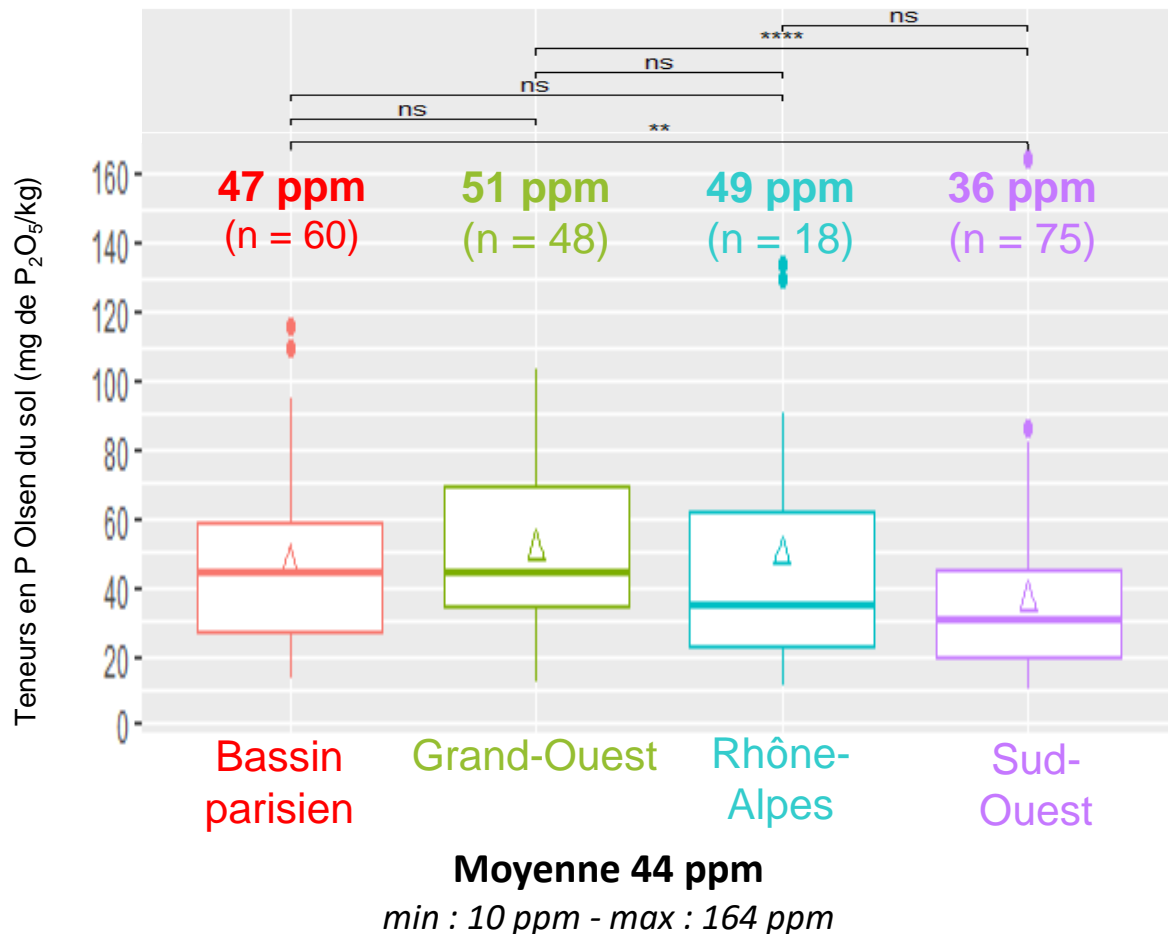
➤ Elevage sur l'exploitation



Impact de la localisation géographique sur les teneurs en P des sols



Distribution des teneurs en P Olsen des parcelles de l'observatoire selon le territoire PhosphoBio

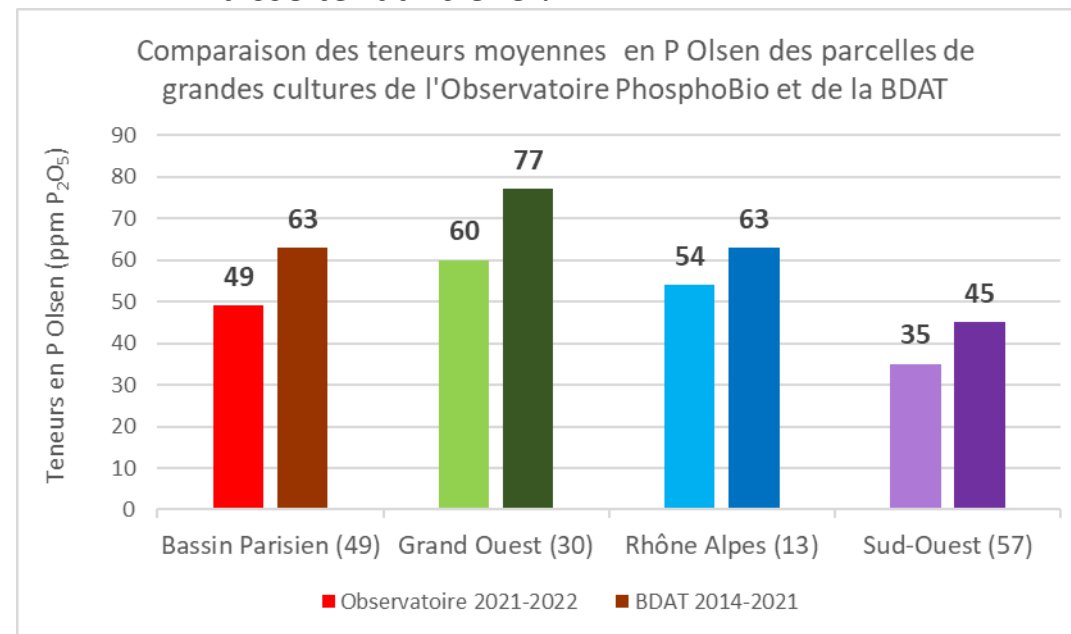


• Différences significatives :

- Sud-Ouest vs Bassin Parisien
- Sud-Ouest vs Grand-Ouest

• Teneurs plus faibles que les valeurs BDAT (2014-2021)

- Bio vs conventionnel ?
- + Baisse tendancielle ?



BDAT = Base de Données des Analyses de Terre : résultats d'analyses de terre des principaux laboratoires de France métropolitaine



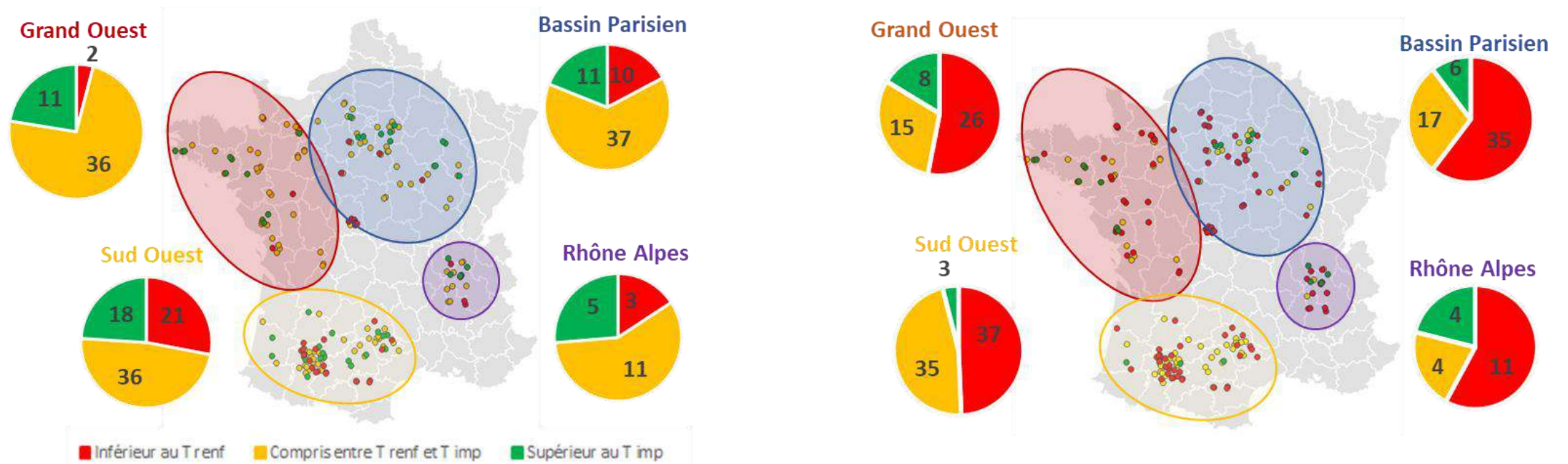
Positionnement des teneurs P par rapport aux seuils COMIFER



Nombre de parcelles réparties selon le positionnement de leur teneur en P_2O_5 Olsen par rapport aux seuils d'impasse et de renforcement de la fertilisation (norme COMIFER)

Cultures à faible exigence (blé tendre, maïs grain, tournesol, soja ,...)

Cultures à moyenne exigence (maïs fourrage, orge, pois, ray-grass,...)



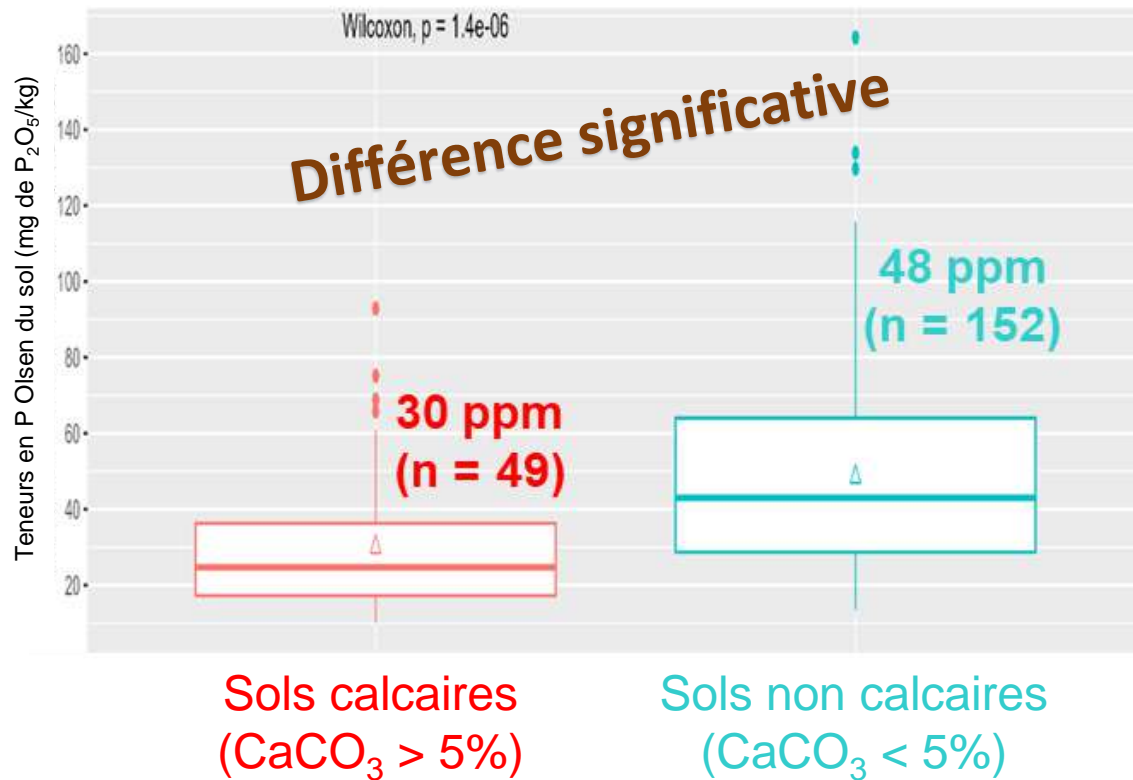
- Majorité de parcelles aux teneurs < Timpasse
- Des bassins de production plus confrontés que d'autres aux faibles teneurs en P
- Attention au niveau d'exigence des cultures



Impact du type de sol sur les teneurs en P des sols

CaCO₃

Distribution des **teneurs en P Olsen** des parcelles de l'observatoire selon la **teneur en calcaire du sol**



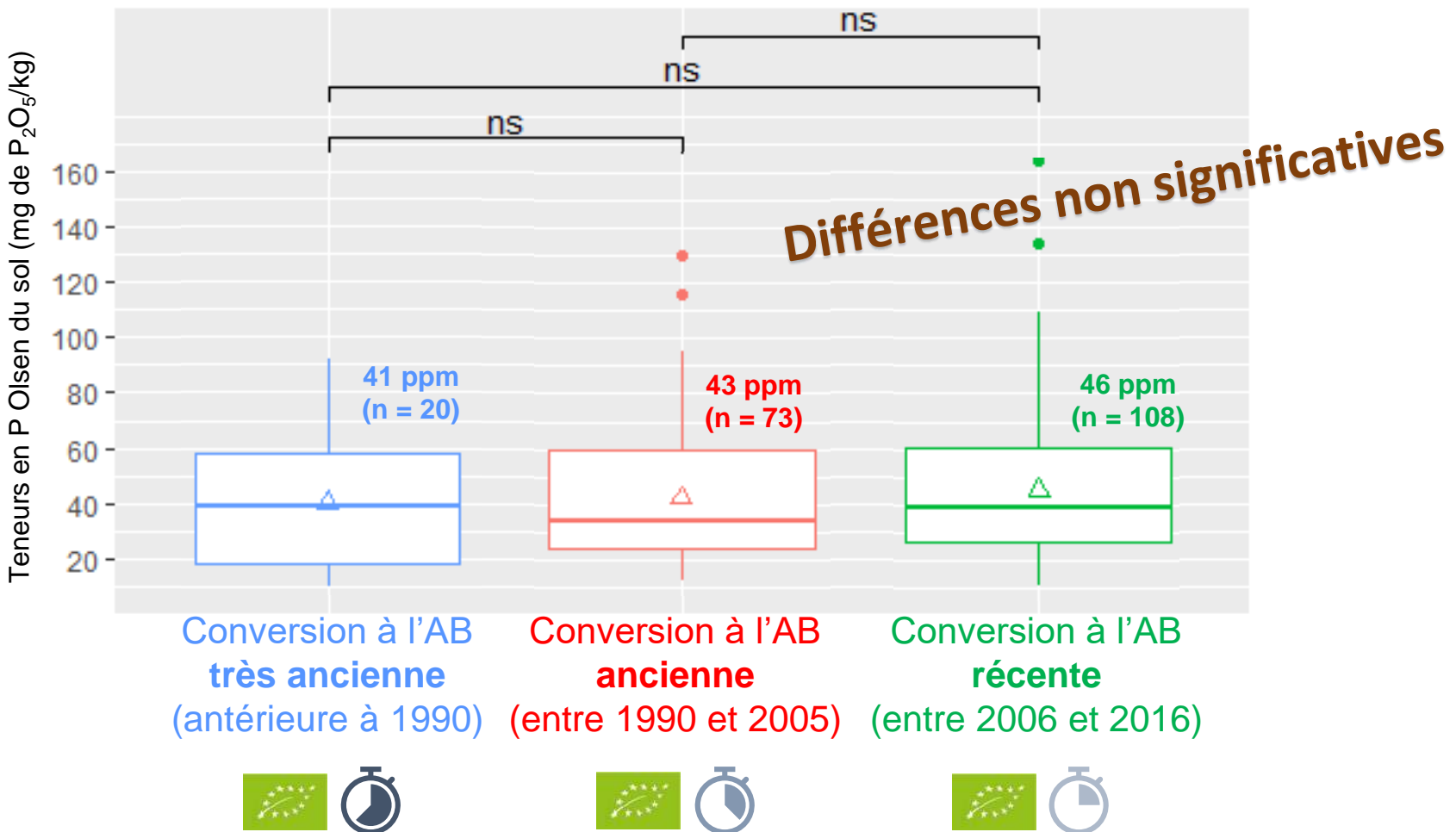
- Teneurs significativement plus faibles en sols calcaires : pouvoir tampon et/ou rétrogradation plus marqués ?
 - Sols calcaires majoritairement dans le Sud-Ouest (74% des parcelles calcaires)
- ⇒ **Teneur P₂O₅ plus faibles** en sols calcaires et dans le **Sud-Ouest** : des disparités par territoire qui peuvent s'expliquer par l'effet type de sol



Pas d'impact de l'ancienneté de conversion en AB sur la teneur en P des sols

Distribution des **teneurs en P Olsen** des parcelles de l'observatoire selon l'**ancienneté de conversion en AB**

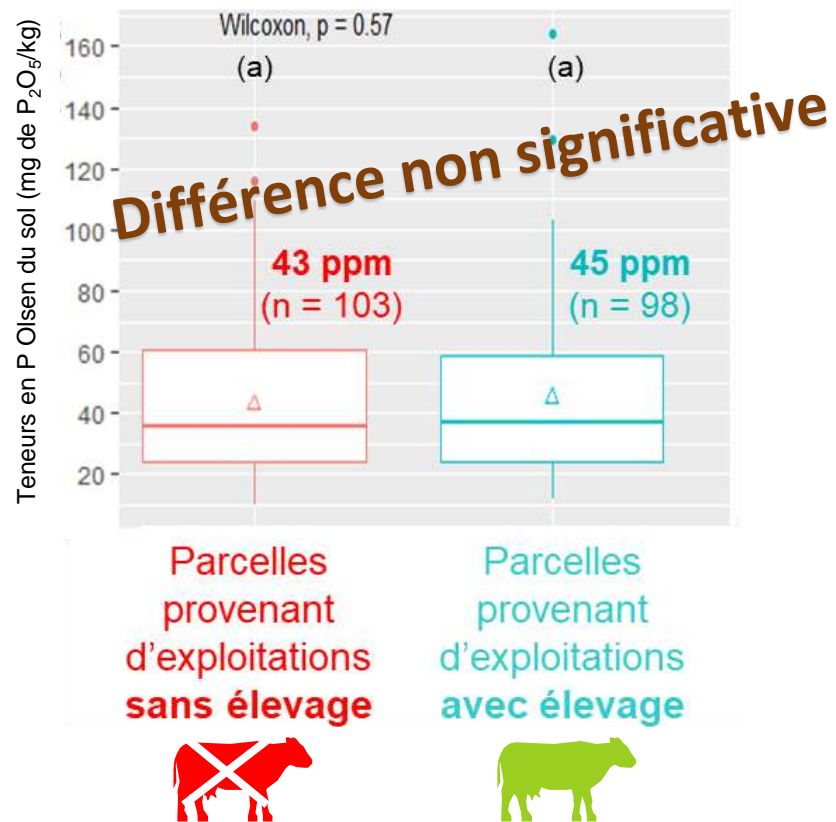
Test de comparaison de moyennes de Tukey, significativité à 5%



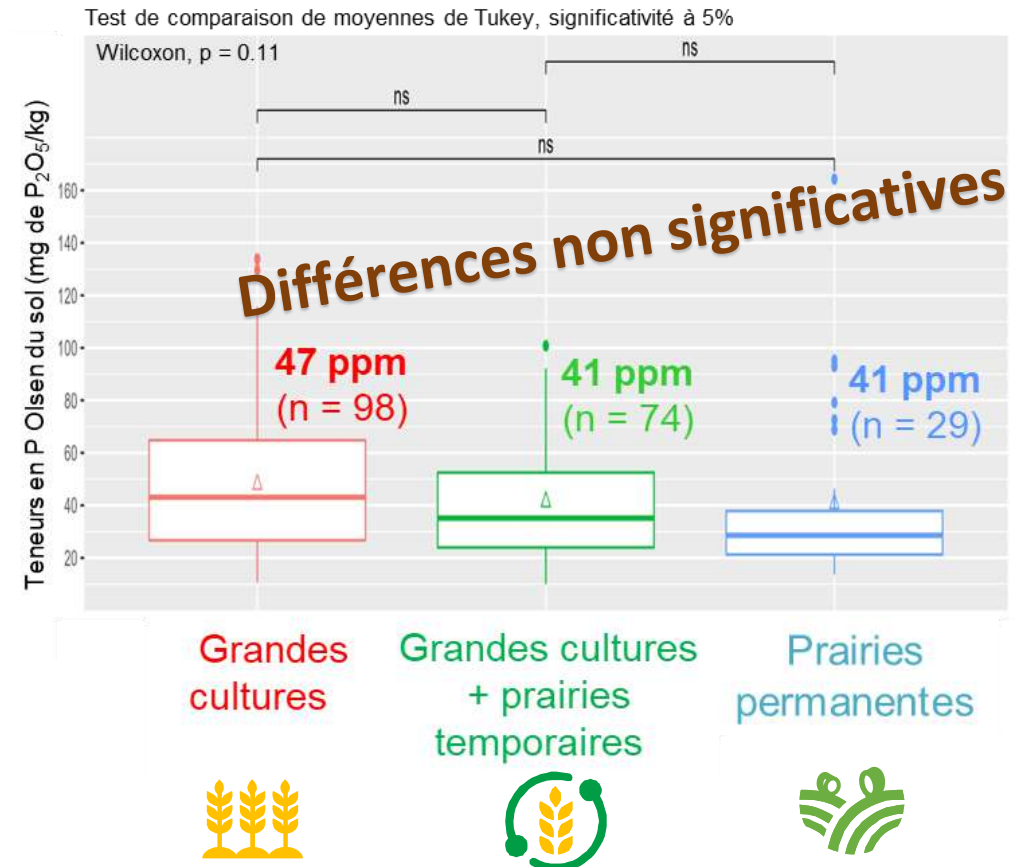
Pas d'impact de l'élevage et du mode d'occupation du sol sur les teneurs en P des sols

Distribution des teneurs en P Olsen des parcelles de l'observatoire

selon la présence d'élevage ou non sur l'exploitation



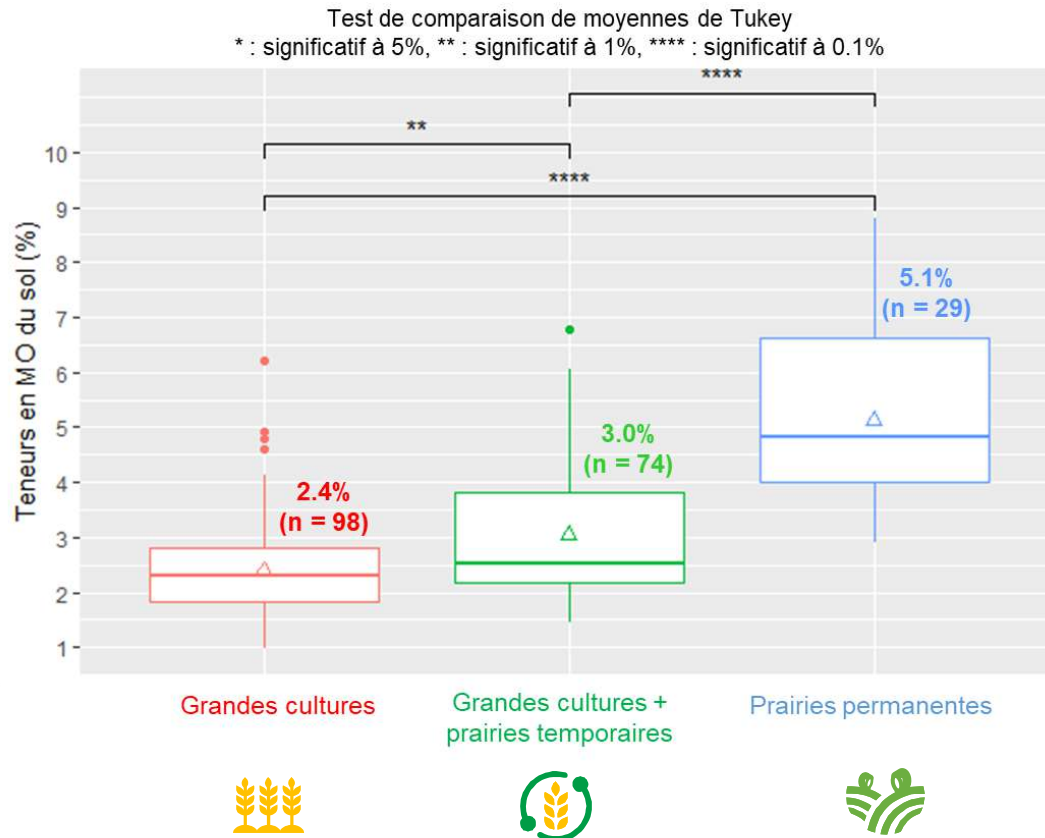
selon le mode d'occupation du sol



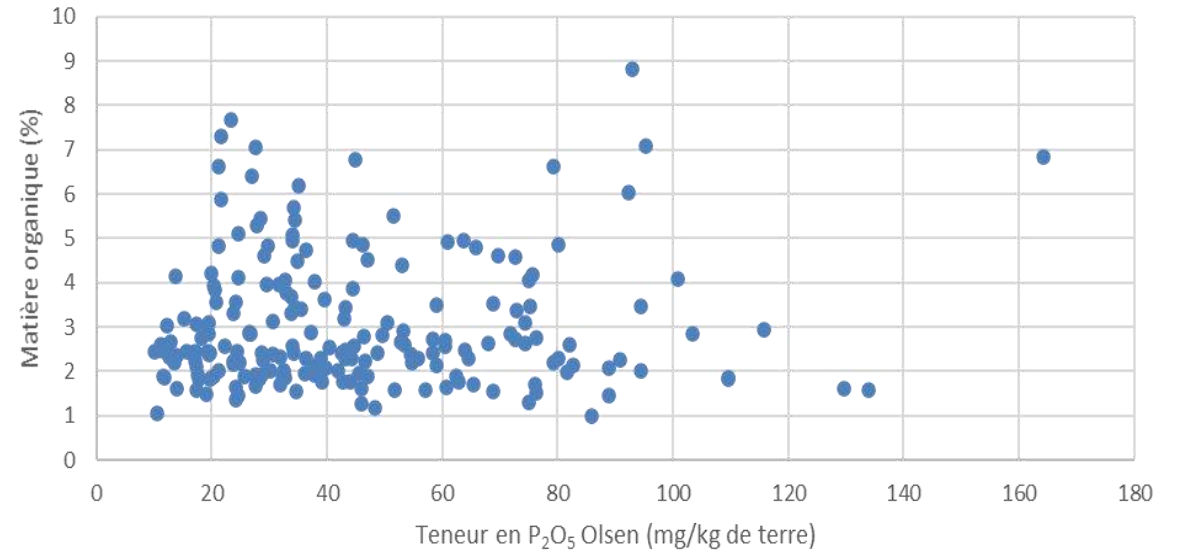
Des teneurs en P des sols indépendantes des teneurs en MO



Distribution des teneurs en **matière organique** des parcelles de l'observatoire selon le **mode d'occupation du sol**



Relation entre la matière organique et la teneur en P_2O_5 Olsen des sols



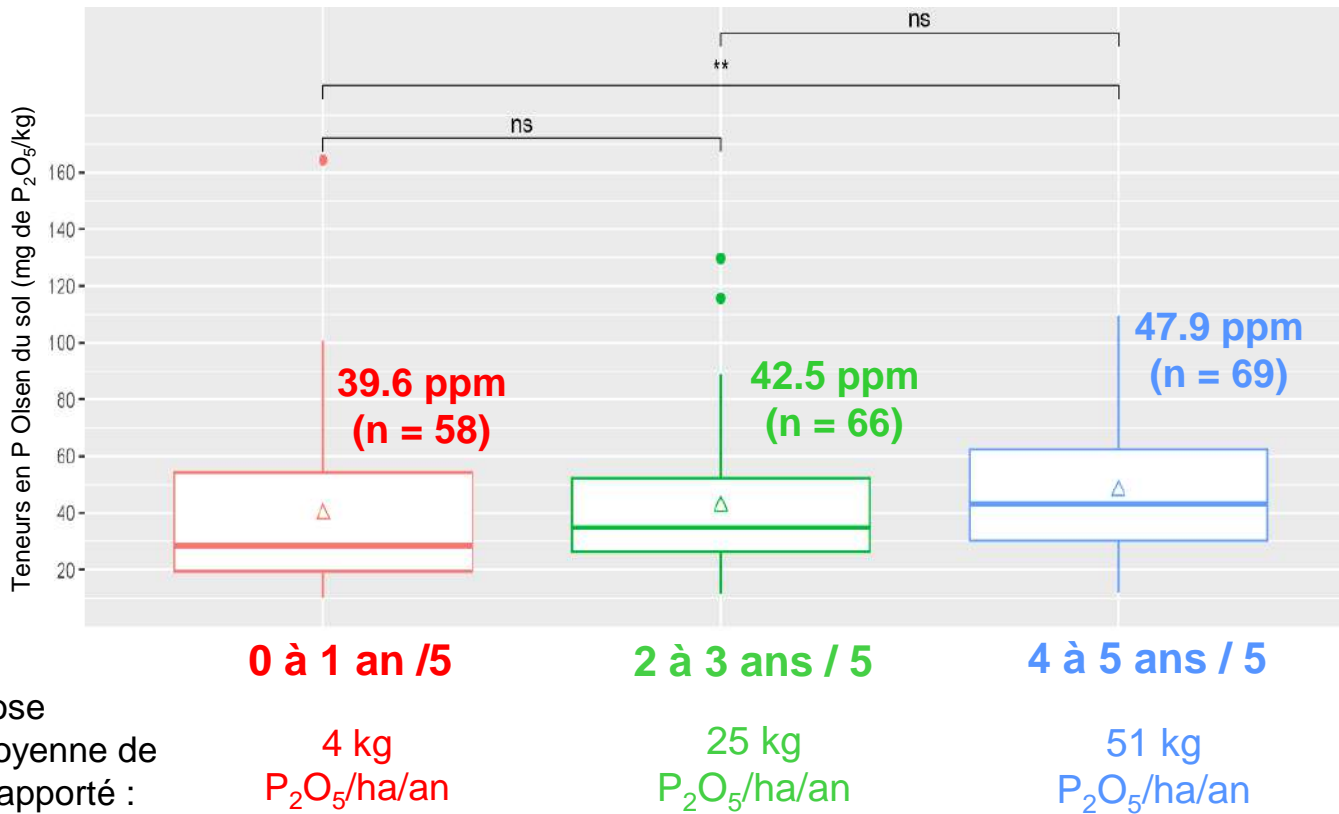
- Différences significatives des teneurs en MO suivant l'occupation du sol
- Pas de corrélation entre teneur en MO et teneur en P des sols



Impact des apports de P sur la teneur en P des sols



Distribution des **teneurs en P Olsen** des parcelles de l'observatoire selon la **fréquence d'apports de P**



- Fréquence et dose d'apport en P sont liées
- Teneur P du sol **d'autant plus élevée** que fréquence d'apport est élevée, en lien avec la dose moyenne de P apporté

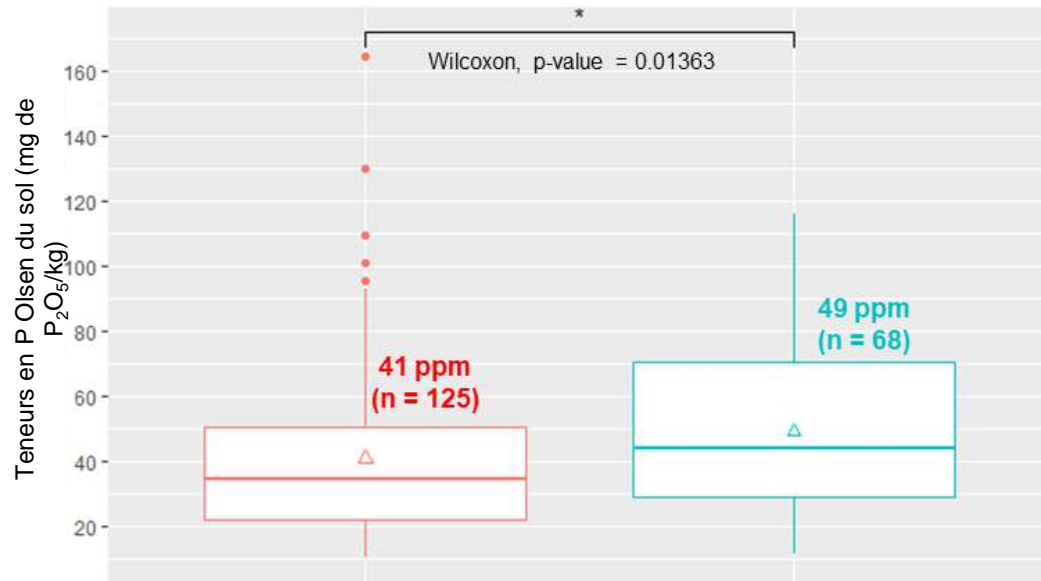
Dose
moyenne de
P apporté :



Impact des couverts végétaux sur les teneurs en P des sols



Distribution des **teneurs en P Olsen** des parcelles de l'observatoire selon la **présence de couverts végétaux** ou non



Pas de couverts végétaux
sur les 5 dernières années
(2017 - 2021)

Présence de couverts
végétaux **au moins une année**
sur les 5 dernières années
(2017 - 2021)

P apporté : 26 kg $P_2O_5/ha/an$
P exporté : 25 kg $P_2O_5/ha/an$

32 kg $P_2O_5/ha/an$
26 kg $P_2O_5/ha/an$

- Teneur P **significativement plus élevée** si **au moins 1 couvert implanté** au cours des 5 dernières années
 - Mais la présence de couvert s'accompagne de doses de P apporté supérieures
- ⇒ Difficile de conclure sur l'effet des couverts sur la teneur en P

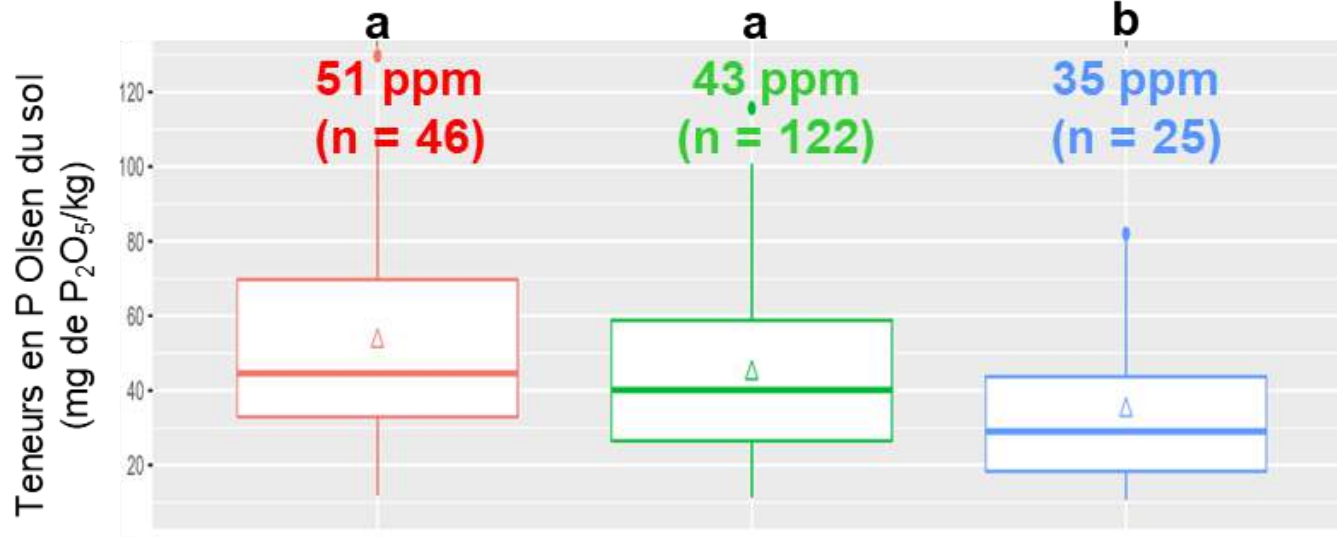


Impact des légumineuses sur les teneurs en P des sols



Distribution des teneurs en P Olsen des parcelles de l'observatoire selon la fréquence des légumineuses* sur 5 ans

Test de comparaison de moyennes de Tukey, significativité à 5%



- Plus les légumineuses sont fréquentes dans la rotation, plus la teneur en P du sol est faible
- Dose moyenne de P apporté également inversement proportionnelle à la fréquence de légumineuses
- Impact indirect de la gestion de l'azote en AB sur les teneurs en P des sols

+ légumineuses
+ autonomie N

- apports organiques

- P apporté

Légumineuses présentes

au plus 1 an sur 5

entre 1 an sur 5 et 1 an sur 2

plus d'1 an sur 2

N apporté : 73 kg N/ha/an
P apporté : 48 kg P₂O₅/ha/an
P exporté : 27 kg P₂O₅/ha/an

38 kg N/ha/an
27 kg P₂O₅/ha/an
27 kg P₂O₅/ha/an


35 kg N/ha/an
18 kg P₂O₅/ha/an
22 kg P₂O₅/ha/an

* Légumineuses en couvert d'interculture : non comptabilisées, légumineuses associées à une céréale : comptent pour moitié

Pour résumer : effets de différents facteurs sur la teneur en phosphore dans les sols bio

- Pas ou peu d'impact

 Ancienneté de la conversion

 Présence d'élevage sur expl. ou non

 Mode d'occupation des sols

 Teneur en MO du sol

Impact sur les rendements en AB ?
Seuils adaptés à l'AB ?

- Facteurs qui influencent teneur P

Type de sol

CaCO_3

Teneurs en P **plus faibles** en sols calcaires et **sud-ouest**

 Territoire

Gestion du P en AB en interaction avec N et équilibre du système bio ?

 Légumineuses

Teneurs en P **plus faibles** quand **légumineuses fréquentes** dans la rotation en lien avec doses d'apports P plus faibles

 Fréquence et dose d'apports P

Teneurs en P **plus élevées** en présence de **couverts** en lien avec doses d'apports P plus élevées

 Teneurs en P des sols en AB globalement **plus faibles** qu'en conventionnel et majoritairement inférieures au seuil impasse du Comifer

Faut-il adapter nos outils de diagnostic à l'AB ?

1

Quels seuils d'interprétation pour l'analyse de terre ?

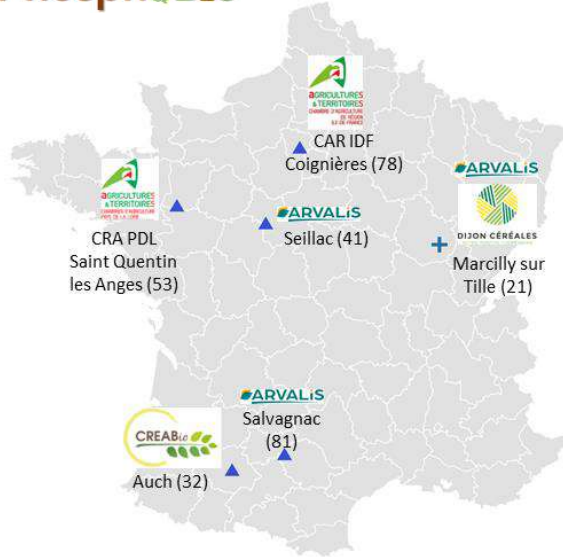
2

Peut-on diagnostiquer de problèmes de fertilité P en utilisant l'analyse de végétaux ?



Quel effet de la disponibilité en P des sols sur la production des cultures en AB ?

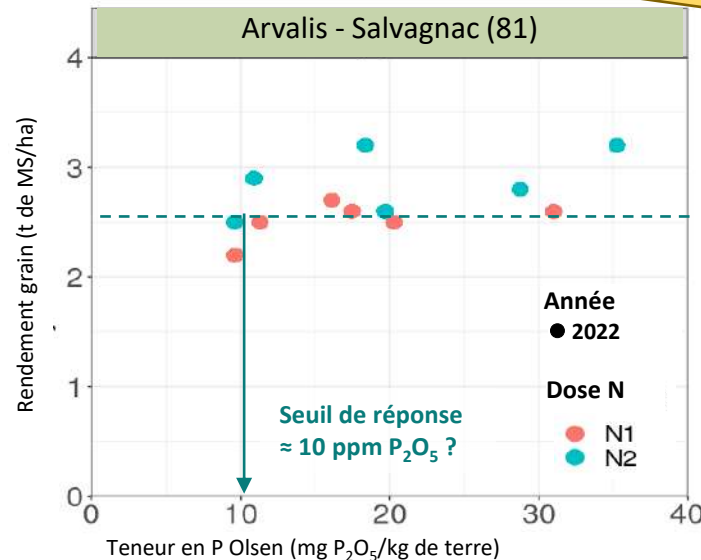
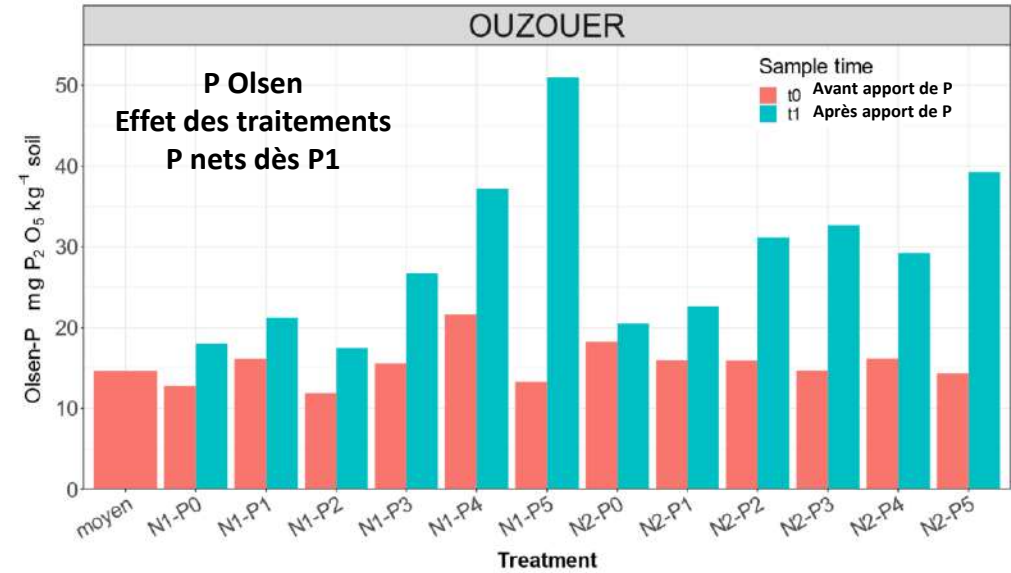
PhosphoBio



→ 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

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



Seuils Comifer pour le blé sur ce type de sol :
Trenf : 20 ppm
Timp : 45 ppm



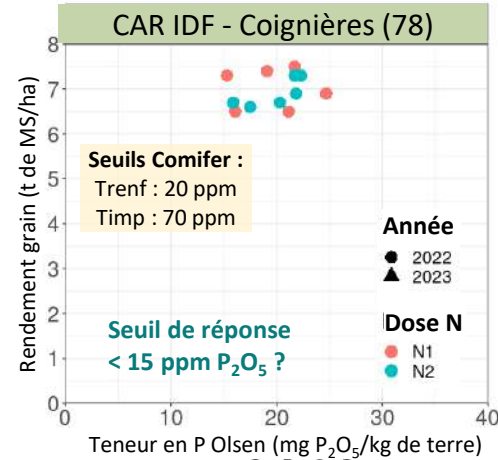
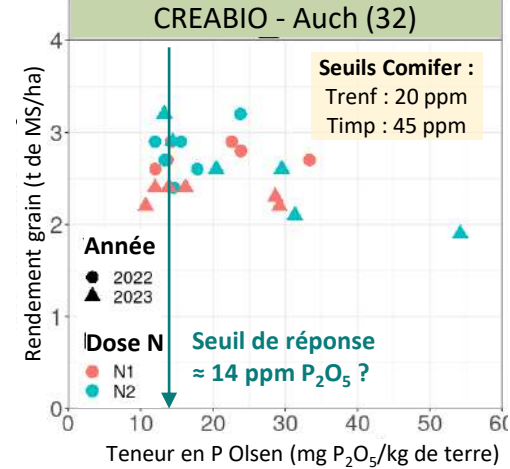
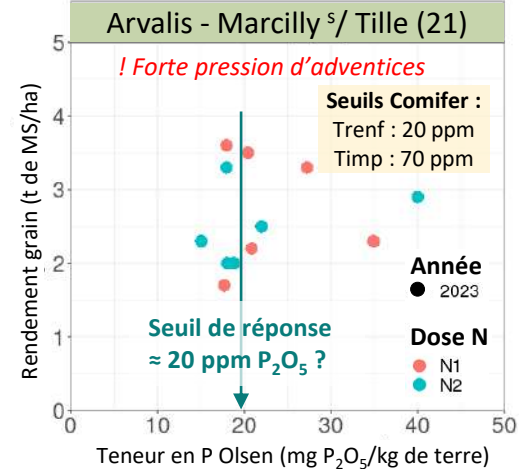
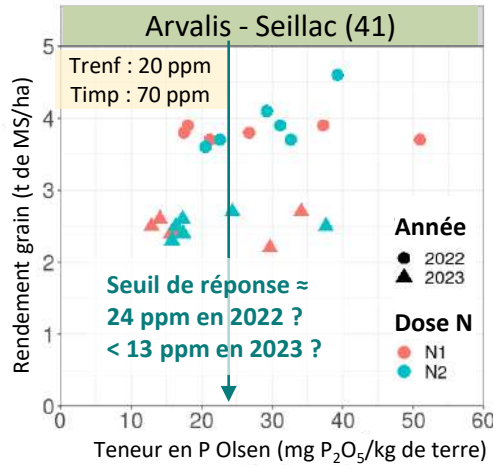
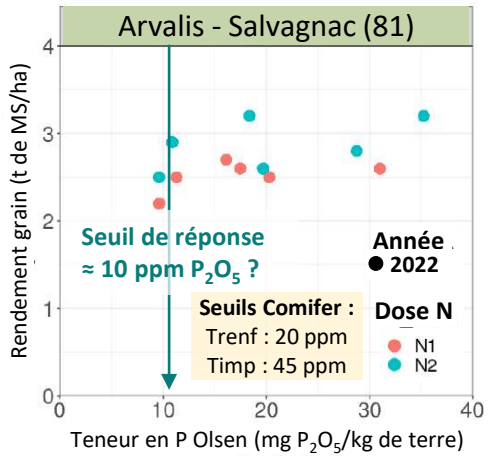
13-0-0



6-15-3

ARVALIS

Courbes de réponse à P en AB



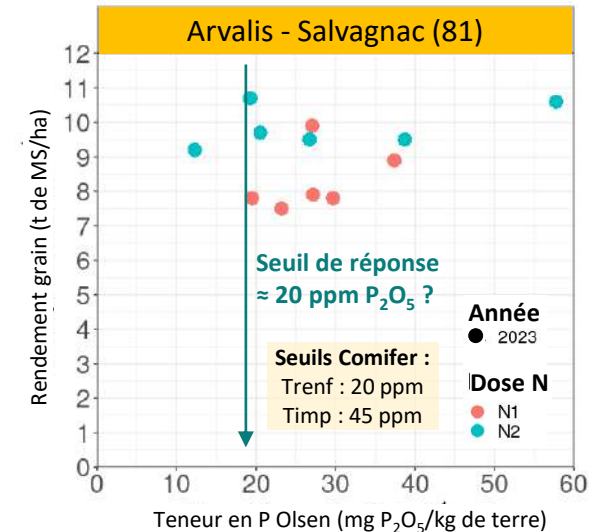
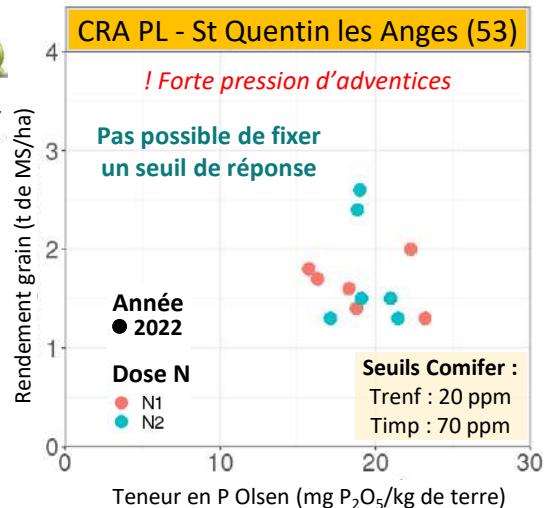
Essais blé tendre



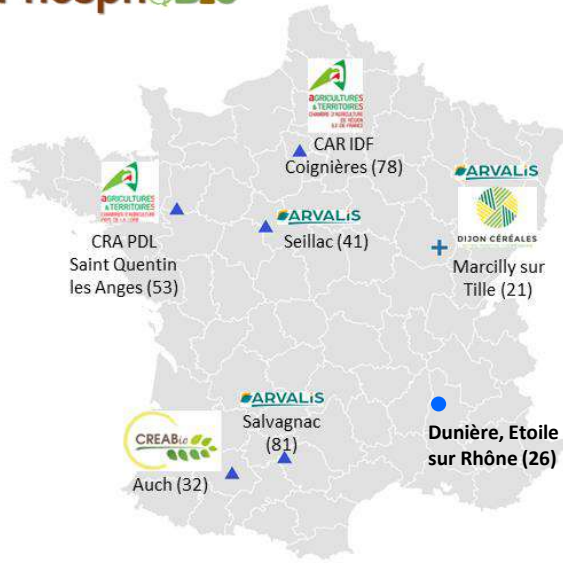
Essais maïs grain



- 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



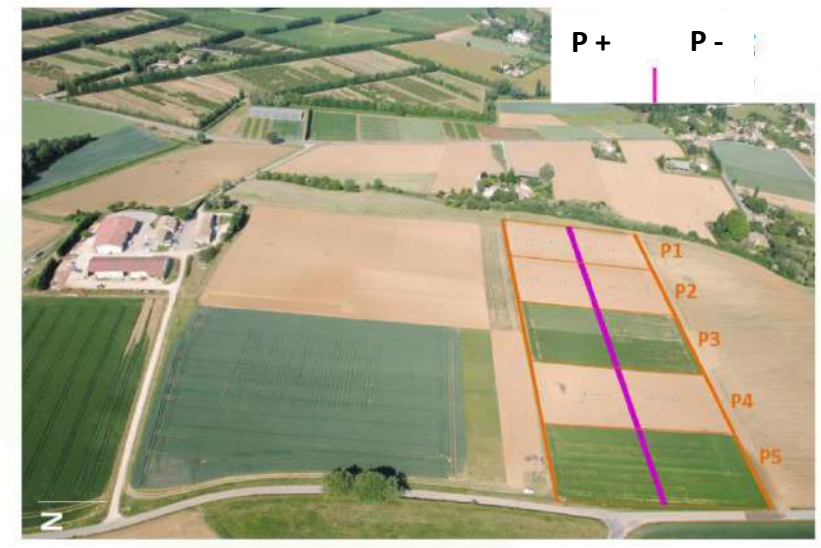
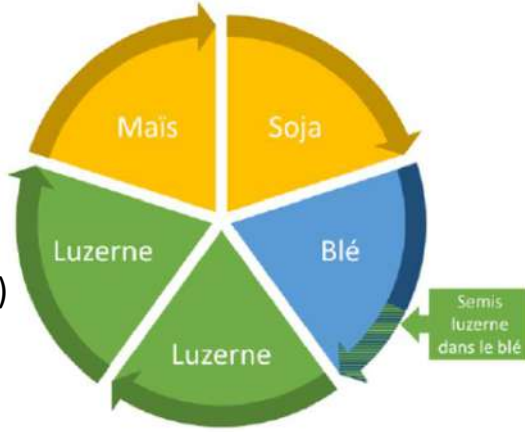
Réponse au phosphore des cultures en AB



- 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 depuis 2005)



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



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)

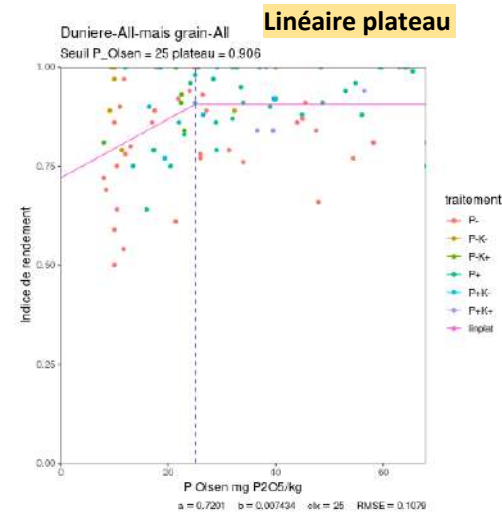
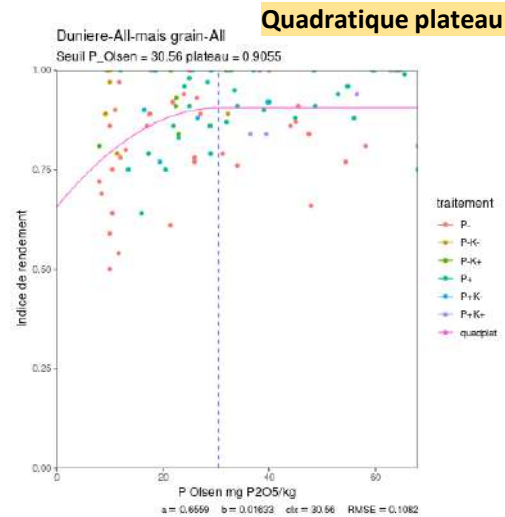
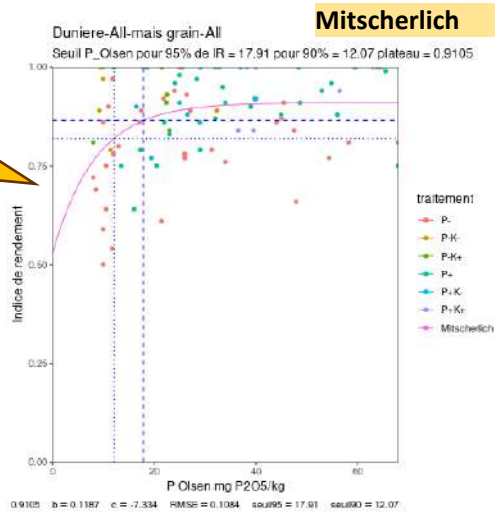
P + :
Fertilisation avec soies de porcs et farines de plumes hydrolysées + Guano ou farine de poisson (apports annuels moyens : 71 kg P_2O_5 /ha, 58 kg N/ha et 20 kg K_2O /ha)

Apports ≈ 2 x Exportations

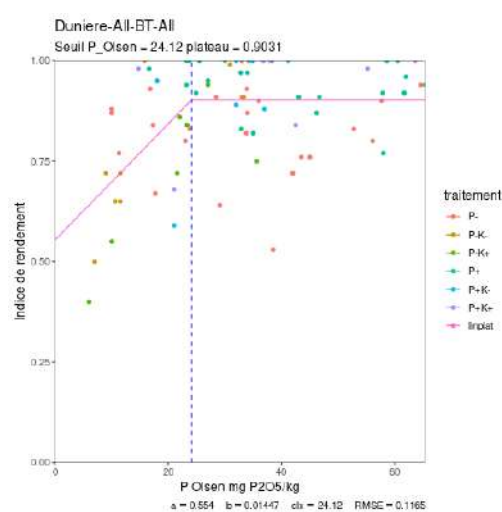
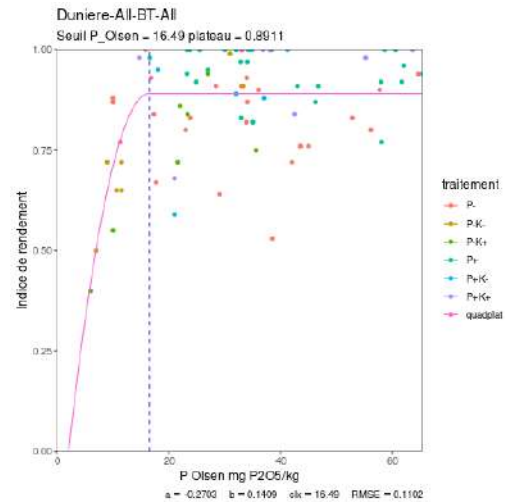
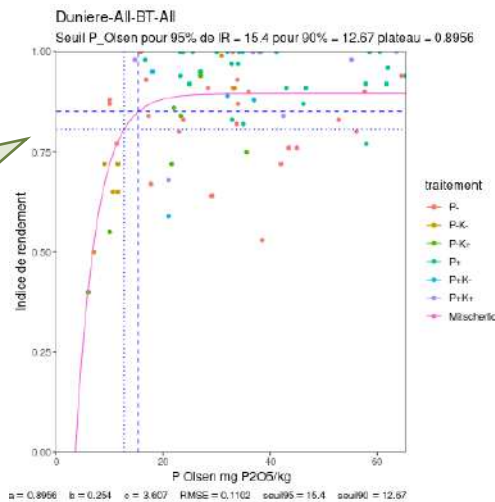


Réponse au phosphore des cultures en AB - Essai de Dunière

Maïs grain
92 valeurs,
de 2006 à
2023



Blé tendre
80 valeurs,
de 2006 à
2023



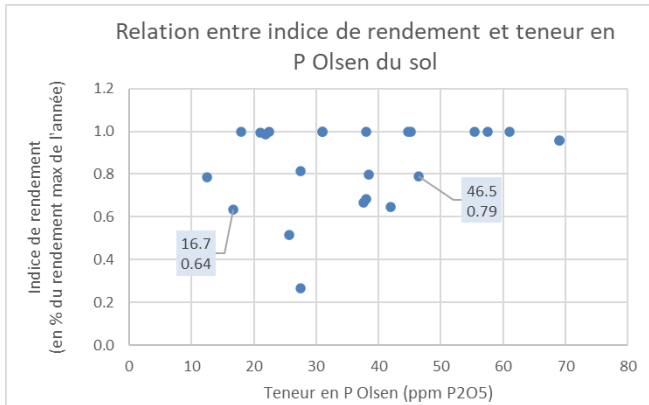
Modèle d'ajustement	Maïs	Blé tendre
Mitscherlich (seuil à 90%)	12.1 ppm	12.7 ppm
Mitscherlich (seuil à 95%)	17.9 ppm	15.4 ppm
Quadratique plateau	30.1 ppm	16.5 ppm
Linéaire plateau	25.0 ppm	24.1 ppm



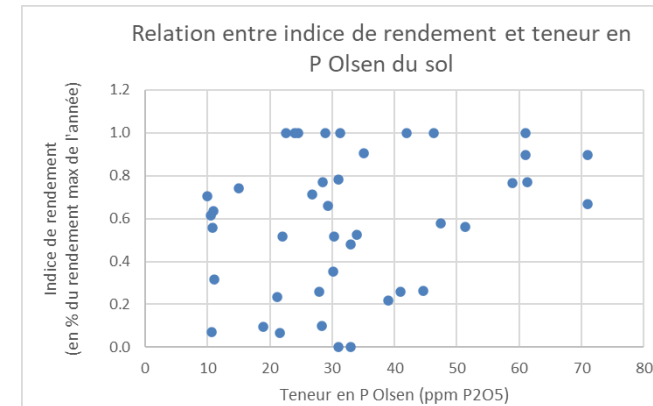
Réponse au phosphore des cultures en AB - Essai de Dunière



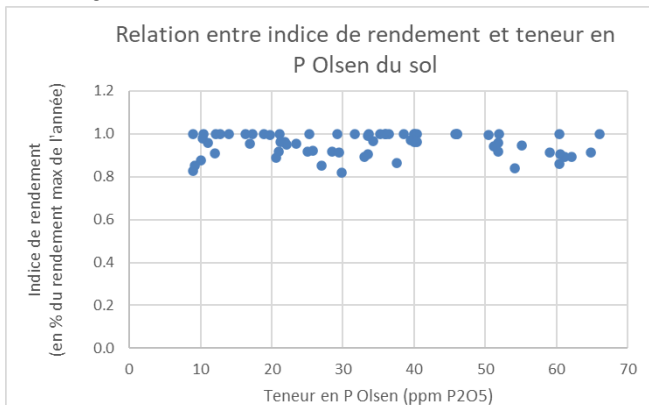
Colza, 24 valeurs, de 2006 à 2017



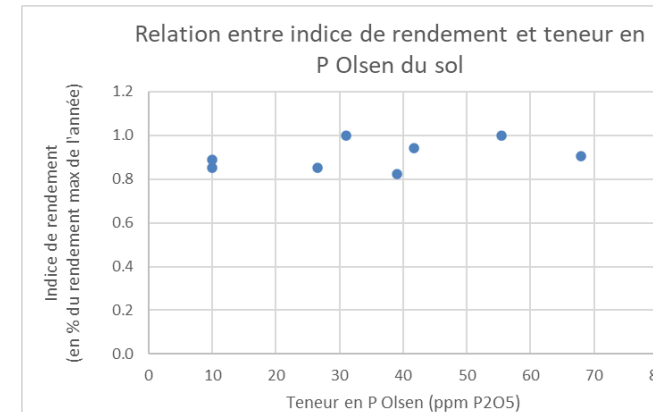
Luzerne porte graines, 42 valeurs, de 2006 à 2023



Soja, 68 valeurs, de 2006 à 2023



Tournesol, 8 valeurs, en 2013 et 2016



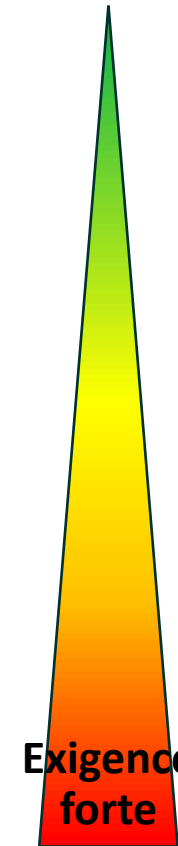
Propositions de seuils de teneurs en P pour l'AB

Seuil « critique »

Seuil « de vigilance »

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)

Exigence faible

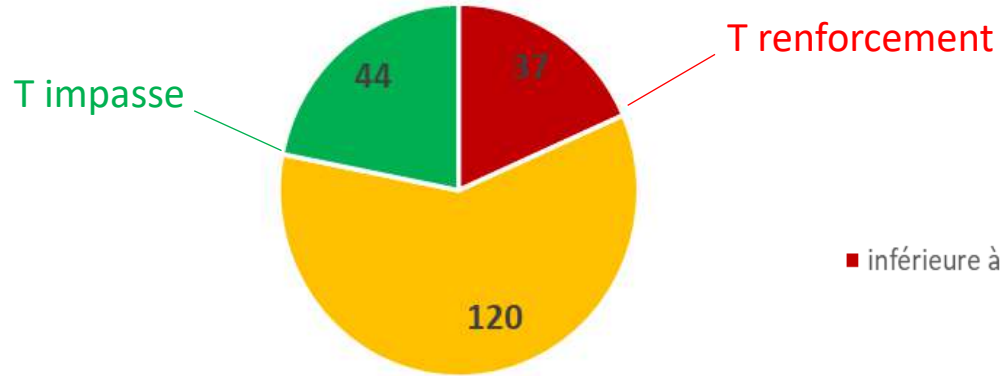


Exigence forte



Positionnement des teneurs en P_2O_5 Olsen des 201 parcelles de l'observatoire

Cultures faiblement exigeantes

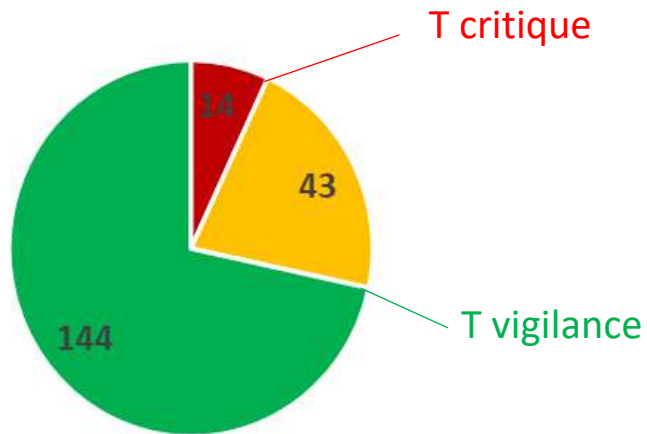


X 3.3 nb parcelles > T impasse

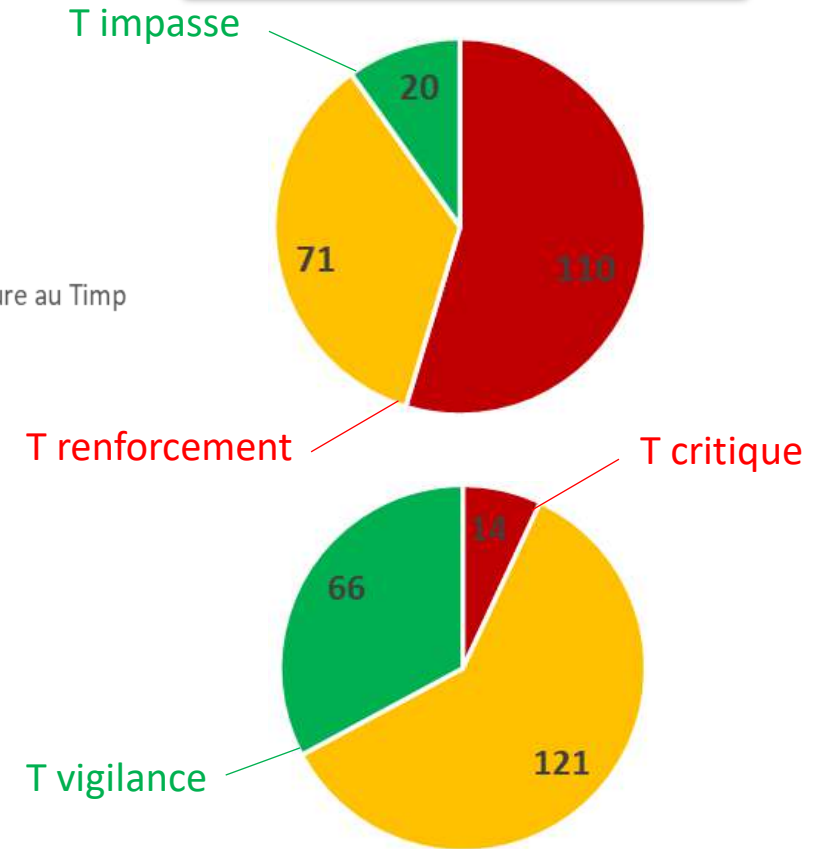
Seuils



■ inférieure à Trenf ■ comprise entre Trenf et Timp ■ supérieure au Timp



Cultures exigeantes



÷ 7.8 nb parcelles < T renforcement



L'analyse de végétaux, une alternative ?

→ Adaptation des indices de nutrition phosphatée aux grandes cultures AB

- Indicateurs de l'état de nutrition des plantes
- Reposent sur :
 - phénomène de dilution des éléments minéraux dans les végétaux
 - stabilité des rapports de concentration entre éléments



Courbe de dilution de l'azote du blé tendre

Justes et al. (1997)

consommation de luxe : l'azote s'accumule dans la plante sans gain de biomasse

N_c : Teneur critique en azote = teneur en N minimale permettant d'atteindre un niveau de biomasse donné

$$INN = \frac{\%N \text{ mesuré}}{N_c}$$

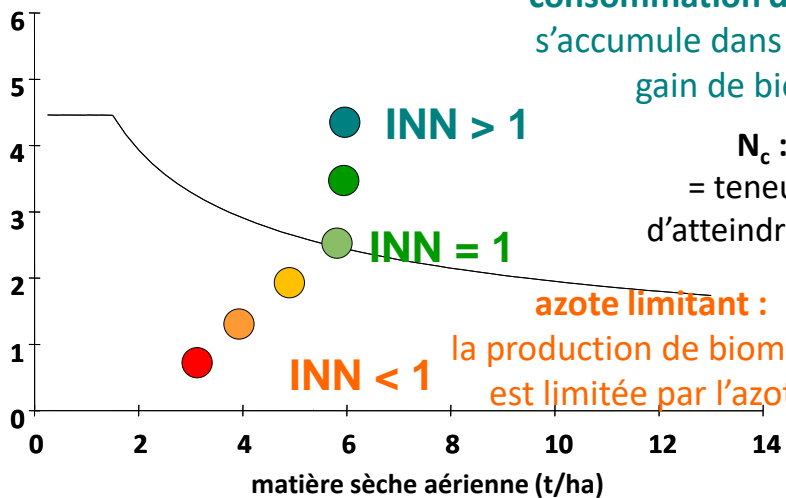
azote limitant : la production de biomasse est limitée par l'azote

● $INN > 1$

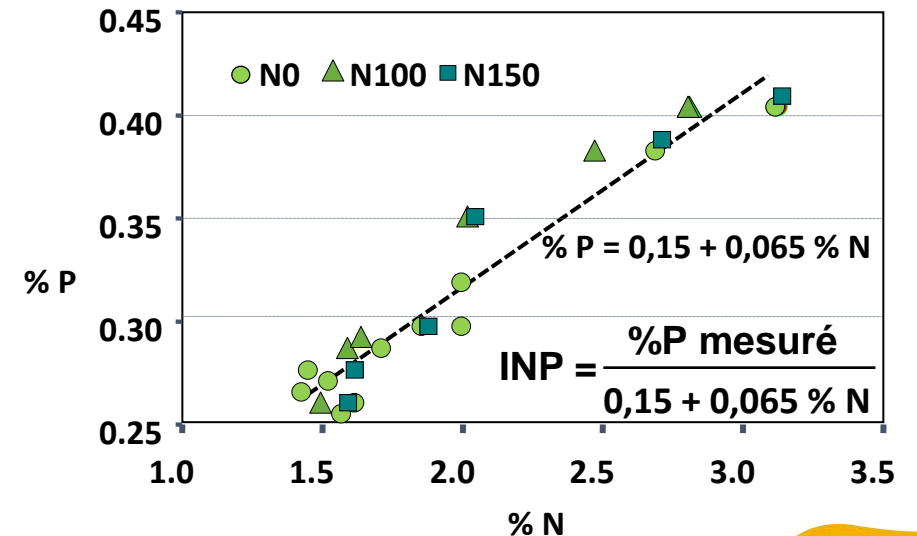
● $INN = 1$

● $INN < 1$

teneur en azote (%N)



Relation entre les teneurs en N et P du ray-grass anglais au printemps (SALETTE et HUCHE, INRA, 1991)



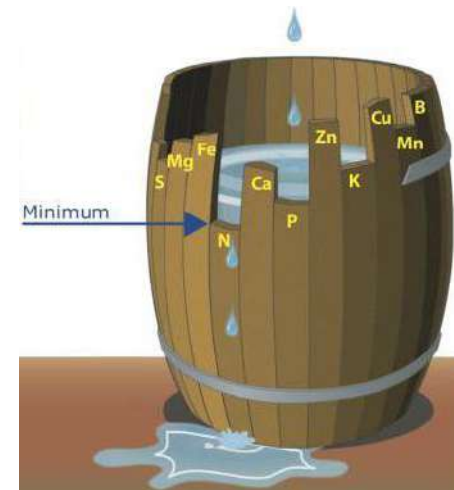
Intérêt des indices de nutrition

➤ Permettent d'établir un diagnostic de nutrition

- INN : largement utilisé dans les outils de pilotage de la fertilisation en agriculture conventionnelle, notamment sur céréales à paille
- INP, INK voire INS : principalement utilisés dans le raisonnement de la fertilisation PK (et S ?) des prairies permanentes

➤ Possible intérêt de l'INP pour l'AB :

- Nombreuses co-limitations possibles en AB : en cas de faible disponibilité en N (ou autre élément), une faible disponibilité en P dans le sol n'est pas forcément limitante pour la plante
- Indicateur « plante » tient compte du P qu'elle a absorbé : complémentaire d'un indicateur du P assimilable du sol tel que le P Olsen qui repose sur une extraction à l'aide d'un réactif chimique ?



Détermination de teneurs critiques en phosphore pour deux légumineuses : la luzerne et le soja



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

PhosphoBio



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)



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

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
P4 : 75 kg P_2O_5 /ha/an, 52.6 ppm P_2O_5 Olsen

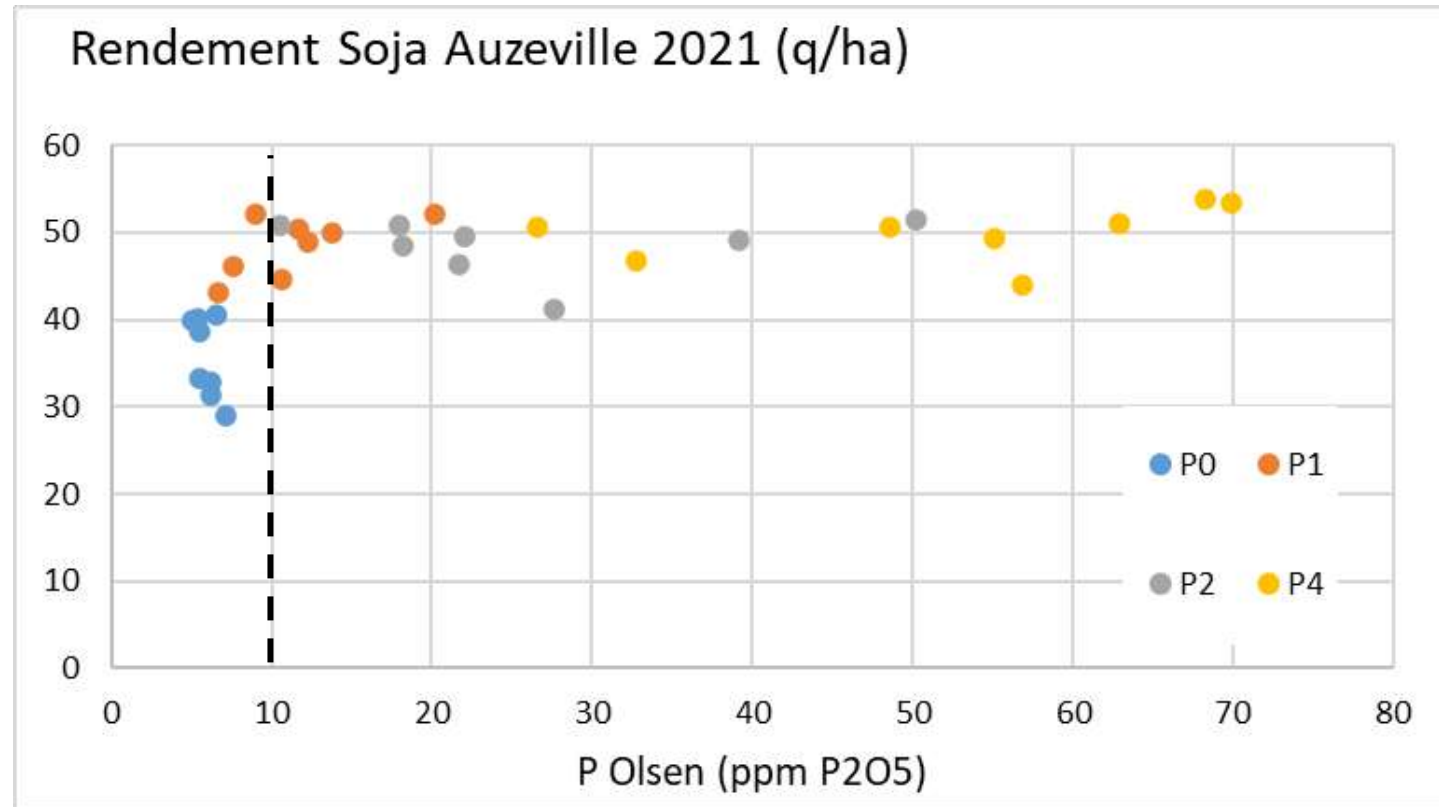


Mesures et analyses

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



Réponse au phosphore du sol (P Olsen) du soja



P Olsen < 10 ppm de P₂O₅ :

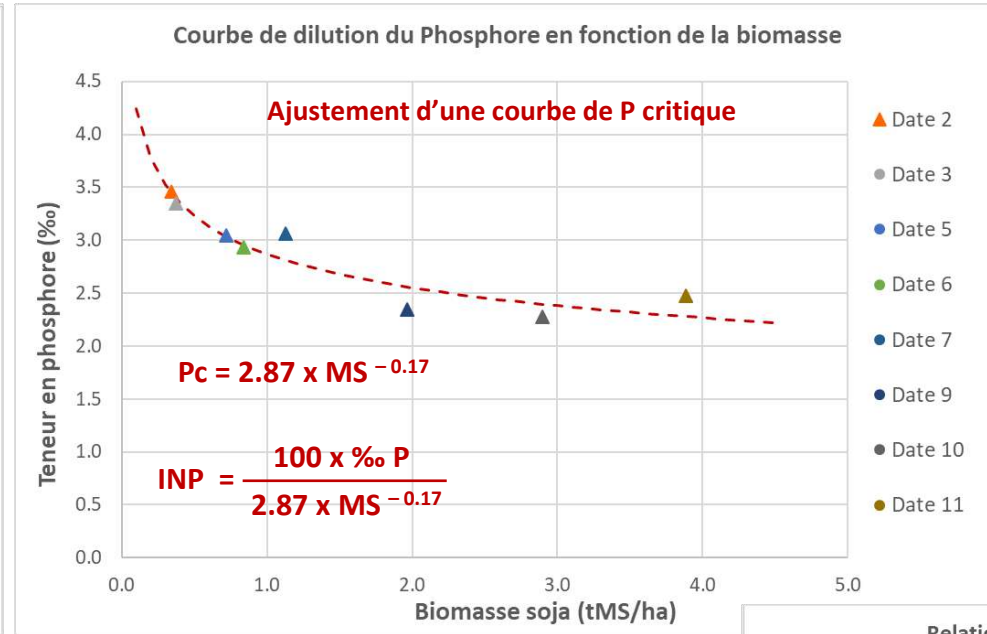
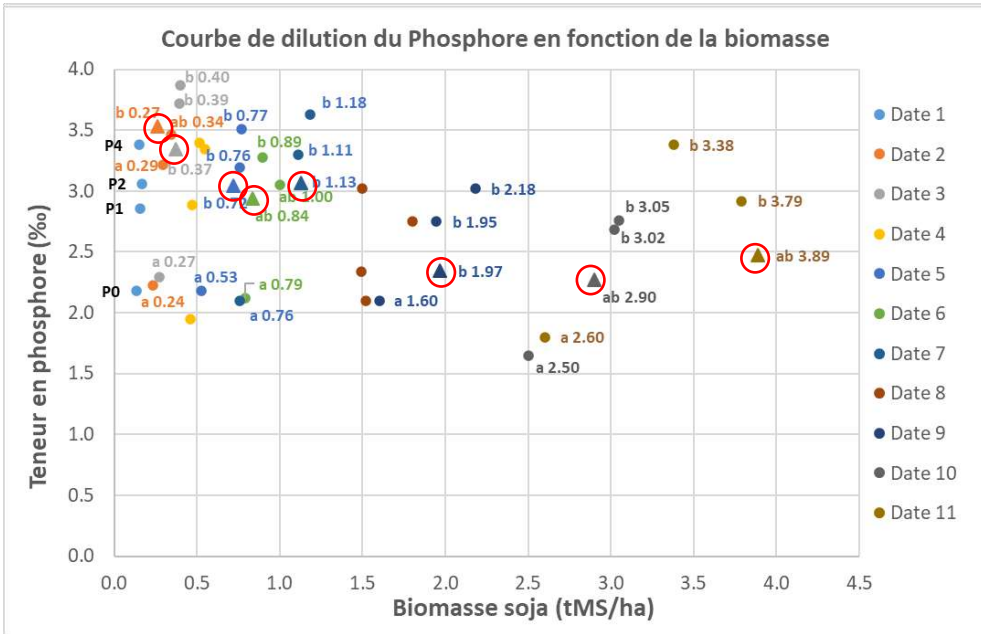
Perte de rendement
moyenne : 28%
(entre 3 et 46%,
11 valeurs)

P Olsen ≥ 10 ppm de P₂O₅ :

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

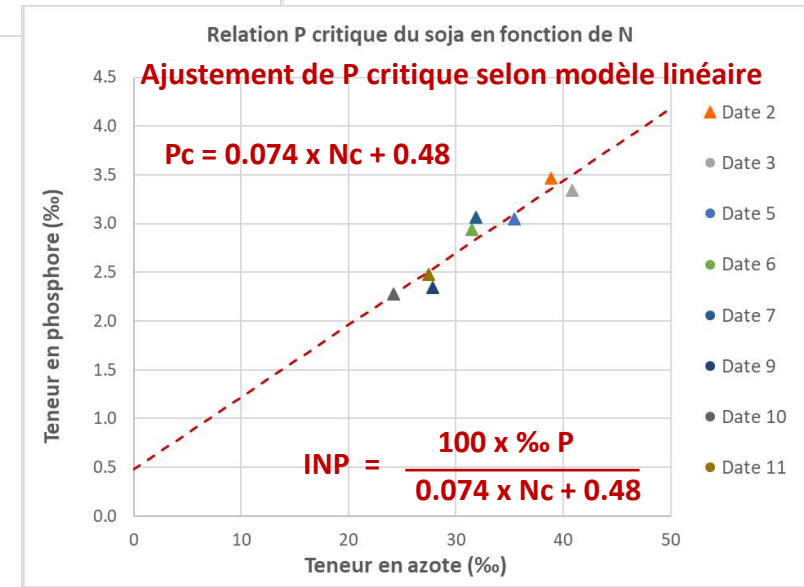


Teneurs critiques en phosphore pour le soja



Des lettres différentes correspondent à des groupes de biomasses statistiquement différentes

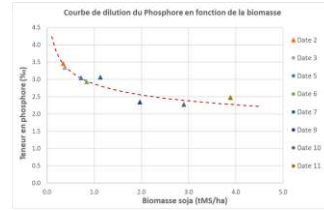
Relation teneur critique en P en fonction de la teneur en azote associée



Identification de seuils d'INP limitant le rendement

Relation entre indice de rendement et INP
(équation teneur P et biomasse)

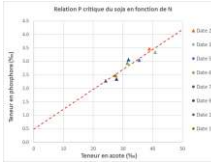
➤ Ajustement selon modèle linéaire plateau



Travail similaire pour les 11 dates de mesure de biomasse

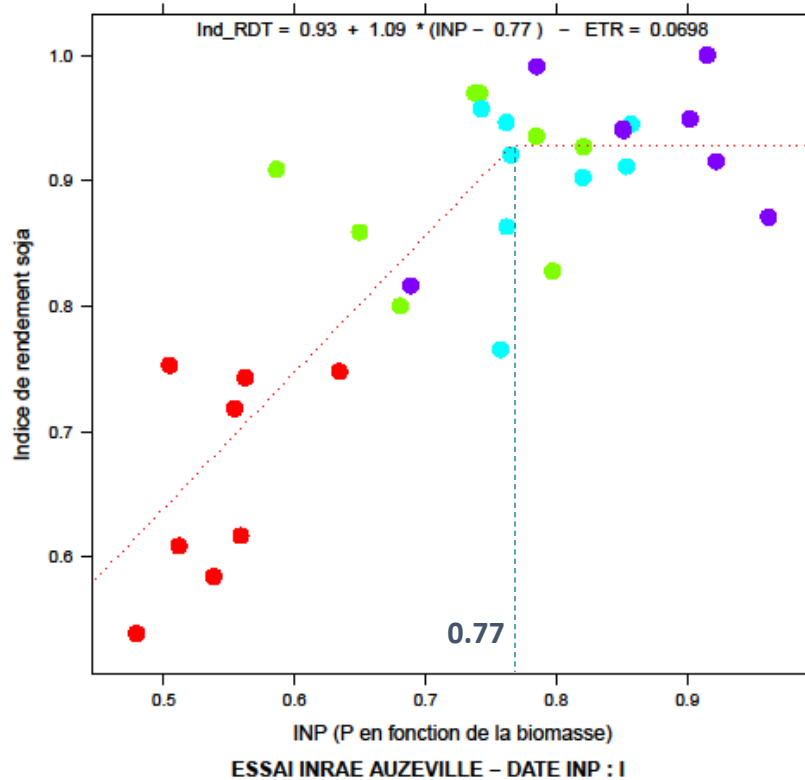


Travail similaire pour l'INP obtenu à partir de la teneur en N



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

P0 P1 P2 P4



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

DATE	Seuil INP
I (V2)	0.77
II (V2-V3)	1.17
III (V3-V4)	Pas d'ajustement
IV (V4-V6)	0.77
V (V4-V6)	1.27
VI (V6-V8)	Pas d'ajustement
VII (V6-V9)	
VIII (V7-V9)	Pas d'ajustement
IX (V8-V11)	
X (R1-R3)	0.84
XI (R4-R5)	1.01

Seuil moyen : 0.98

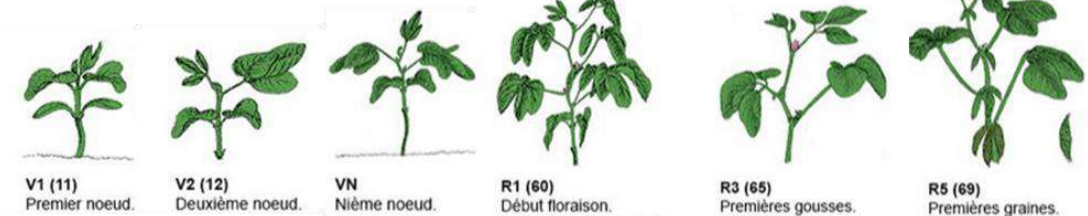
Seuil critique : 80 Seuil de vigilance : 120

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

DATE	Seuil INP
I	0.84
II	0.92
III	0.98
IV	Pas d'ajustement
V	0.93
VI	0.99
VII	Pas d'ajustement
VIII	
IX	
X	1.04
XI	0.96

Seuil moyen : 0.95

Seuil critique : 90 Seuil de vigilance : 100



Proposition de seuils d'INP pour le soja



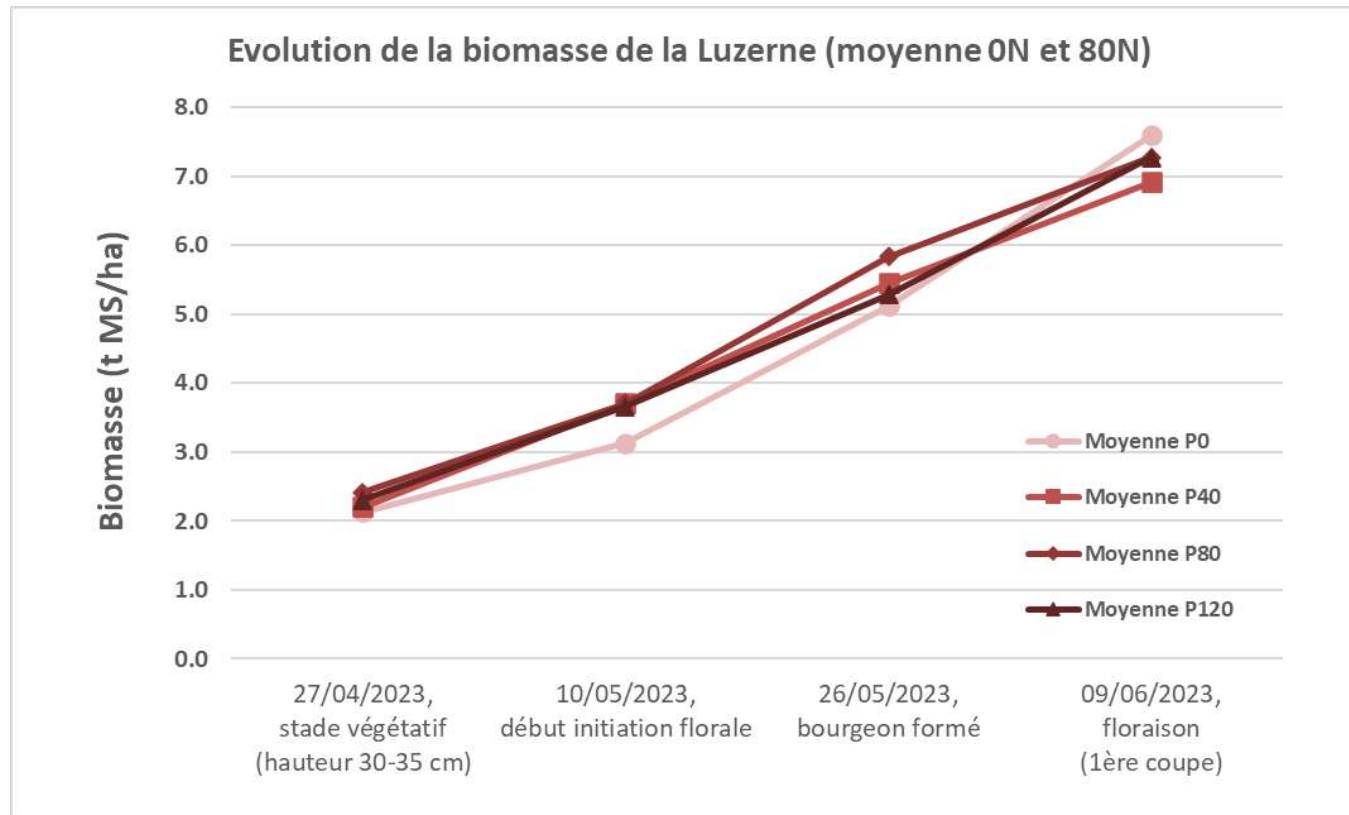
Culture	Type d'équation	Equation Pc	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est très faible	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

Diagnostic reposant sur analyse de terre semble un peu plus robuste que celui reposant sur les INP (plus de bons diagnostics)
Equations basées sur la teneur en azote semblent plus robustes (plus de bons diagnostics) et sont plus faciles à mettre en œuvre (pas de mesure de biomasse) => à privilégier ?



Réponse au phosphore de la luzerne



Même approche que sur soja mais résultats peu fiables du fait d'une faible réponse au P de l'essai

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



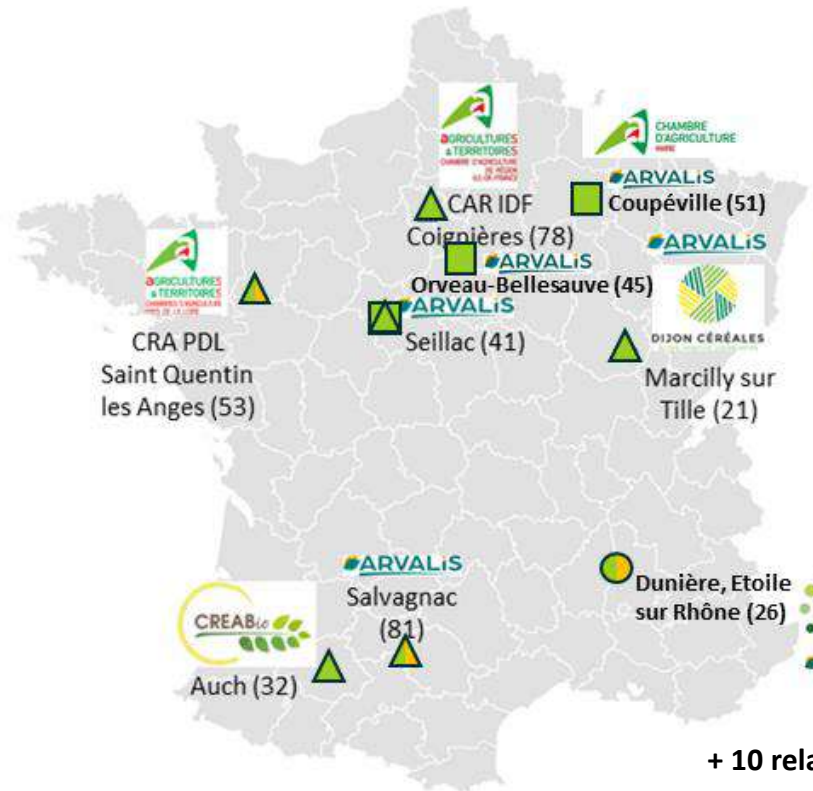
INP : des nombreuses données sur maïs et blé mais peu valorisées dans des outils de conseil

Comparaison de données de teneur en P mesurées en AB avec les teneurs critiques en P de la littérature



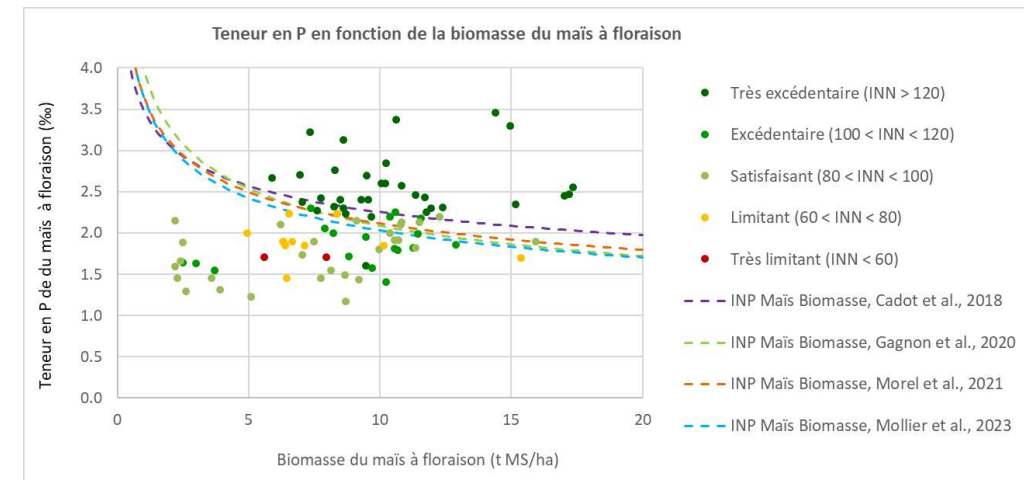
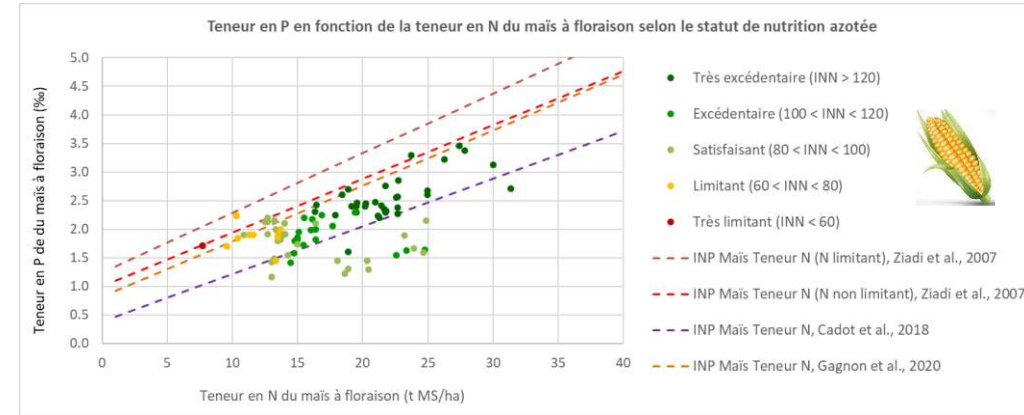
Essais retenus avec données permettant de calculer :

- 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)



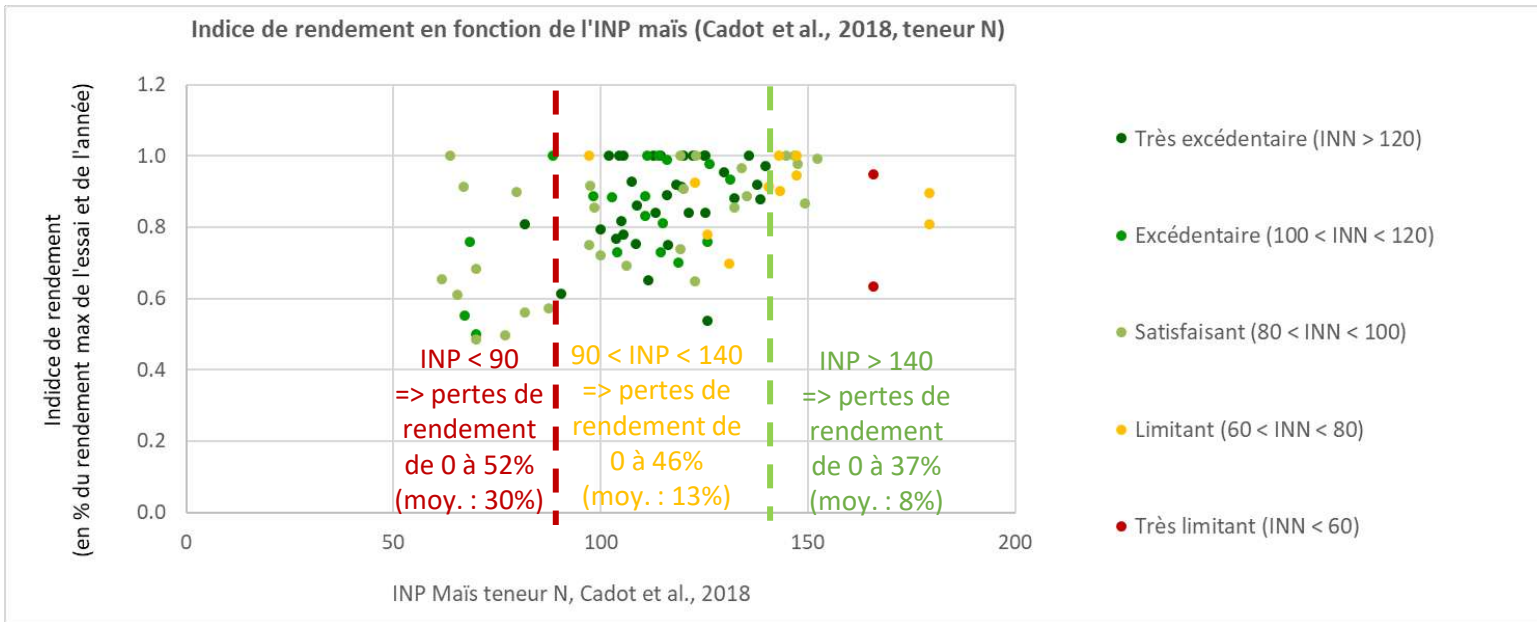
- △ Essai bisannuel courbe de réponse au P
- Essai longue durée P
- Essai annuel fertilisation P
- ▲ Essai blé tendre
- ▲ Essai avec blé tendre et maïs grain

+ 10 relations équivalentes sur blé tendre



Identification de seuils d'INP limitant le rendement

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



Indice de rendement	INP Cadot et al., 2018 (Teneur N)		
	Très limitant (INP ≤ 0.9)	Limitant (0.9 < INP < 1.4)	Non limitant (INP ≥ 1.4)
Très limitant (IR < 0.6)	6	1	0
Limitant (0.6 < IR < 0.8)	4	18	1
Peu limitant (IR > 0.8)	5	44	11

Bons diagnostics : 39%

Diagnostics « acceptables » : 94%

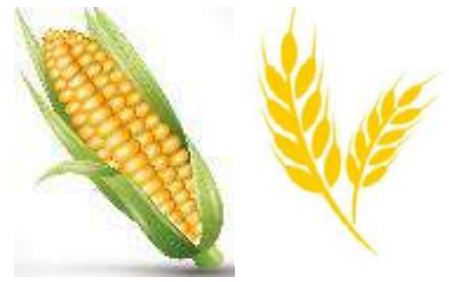
Mauvais diagnostics : 6%

90 données de biomasse et indice de rendement



Proposition de seuils d'interprétation de l'INP pour le maïs et pour le blé

Même démarche répétée sur maïs grain avec relations permettant de calculer P critique en fonction de la biomasse puis sur blé tendre

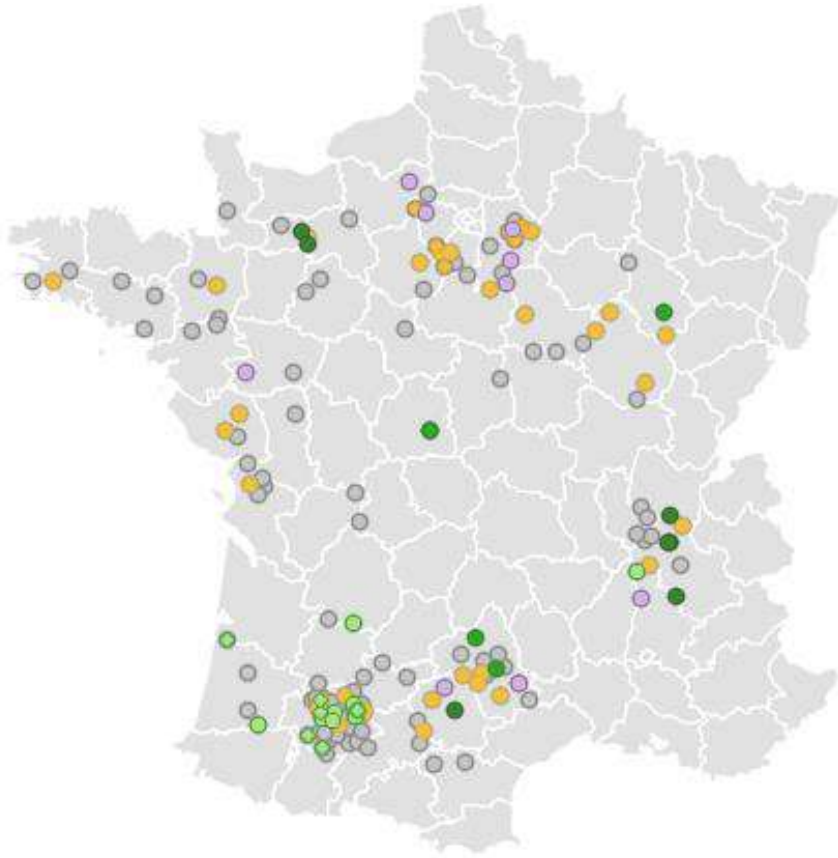


Culture	Type d'équation	Equation Pc retenue	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil INP en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé	Pertes de rendement liées au P estimées à :	Seuil INP au-dessus duquel le risque de perte de rendement lié à une carence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

Equations basées sur la teneur en azote semblent plus robustes (plus de bons diagnostics) et sont plus faciles à mettre en œuvre (pas de mesure de biomasse) => à privilégier ?



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



- **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 temporaires et permanentes** : 20 parcelles vers épisaison des graminées

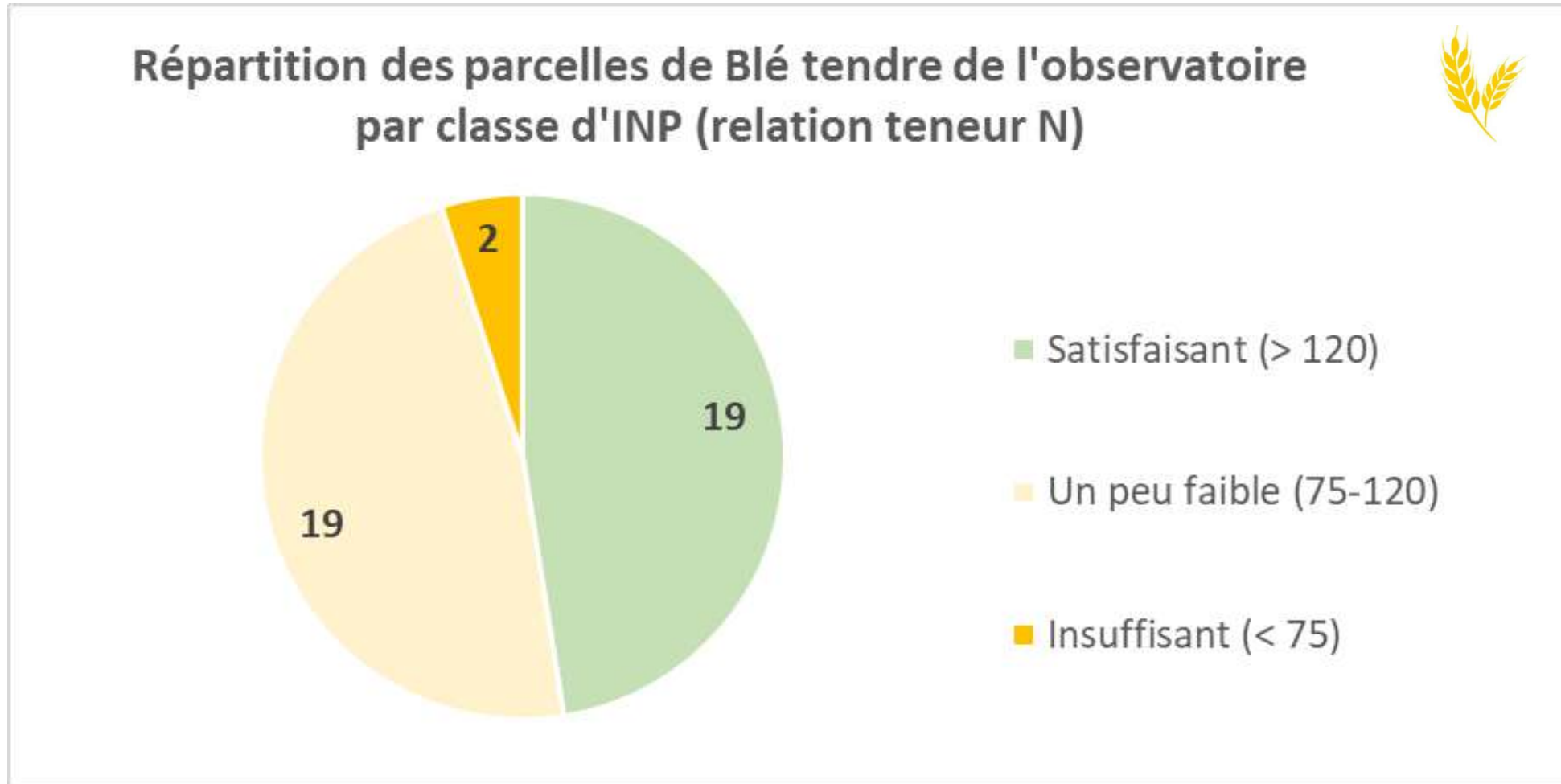
- **Mesures de biomasse + analyses de végétaux :**
 - **Analyse plante entière => indices de nutrition**
 - **Analyse foliaire** (2^{ème} et 3^{ème} feuilles sous l'épi)

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



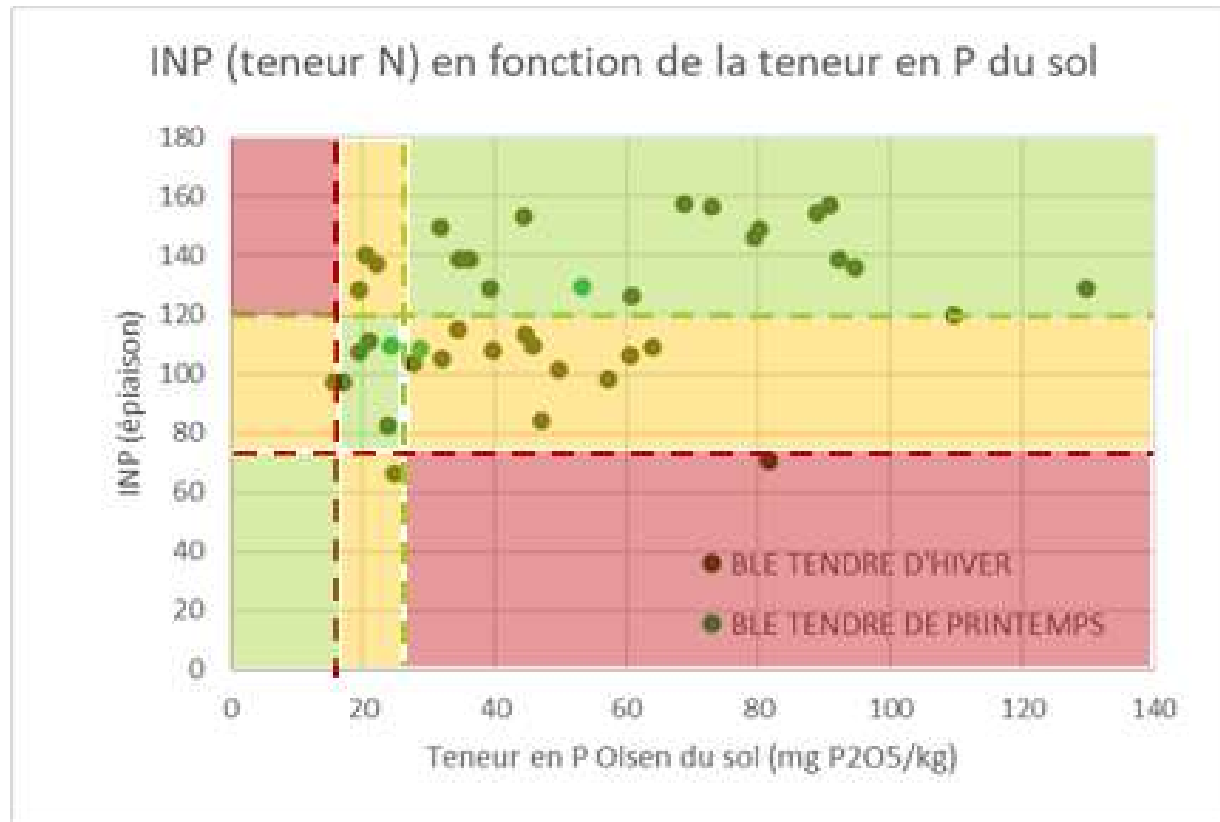
Diagnostic de nutrition P de quelques parcelles de l'observatoire

INP obtenus à partir de la teneur en azote



Comparaison des outils de diagnostic sur les parcelles de l'observatoire

Blé tendre



Diagnostiques concordants : 22/40

Diagnostiques plutôt cohérents : 17/40

Diagnostiques discordants : 1/40

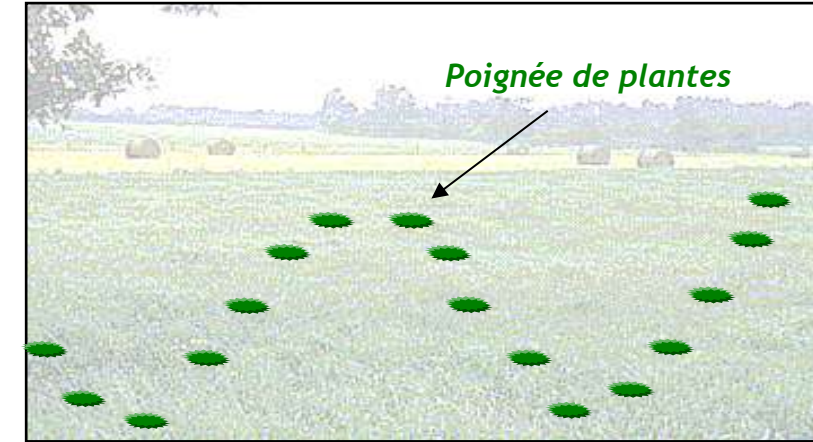


Indices de nutrition phosphatée : mode d'emploi échantillonnage

Quand ?

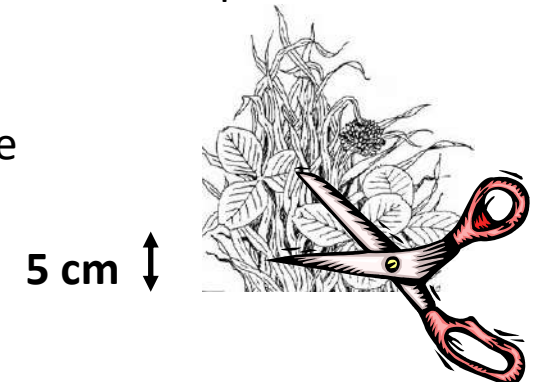
Culture	Stade minimal de prélèvement	Stade maximal de prélèvement	Biomasse minimale de la culture lors du prélèvement
Prairie*	-	Floraison	2 t de MS/ha
Blé tendre	3 talles visibles (Z23)	Mi-épiaison (Z55)	1.5 t de MS/ha
Maïs	8 feuilles (Z17)	Début floraison (Z61)	1.5 t de MS/ha
Soja	2 nœuds (V2)	Début floraison (R1)	0.5 t de MS/ha

* Prairie : références Comifer



Comment ?

- 20 poignées de plantes (10 à 20 plantes pour le maïs) Tous les 10 à 20 pas sur 2 diagonales de la parcelle
- Couper parties aériennes à la cisaille à 4-5 cm au-dessus du sol
- Mélanger (pour le maïs, couper ou broyer grossièrement avant) => 500 g pour analyse
- Envoi immédiat au laboratoire sans nécessité de passage à l'étuve

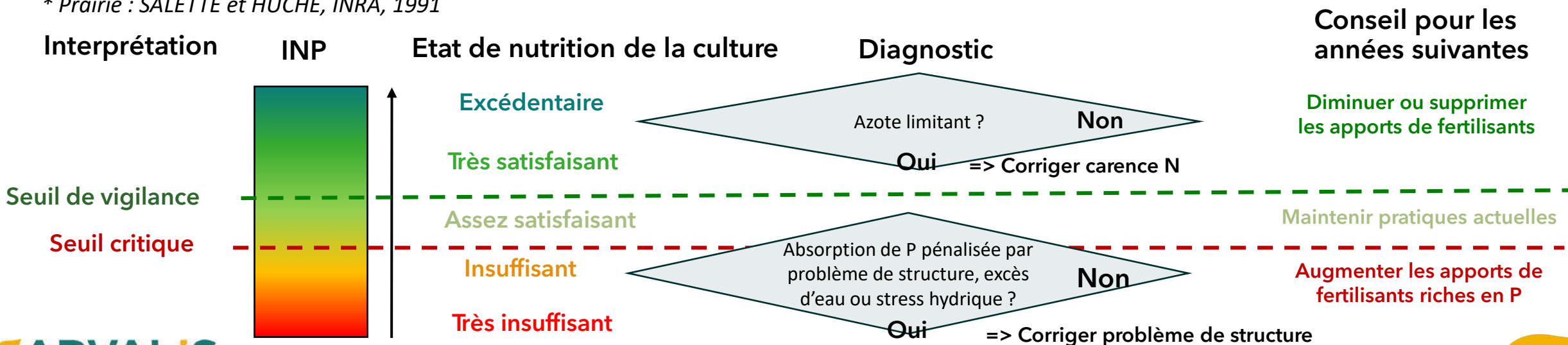


Indices de nutrition phosphatée : mode d'emploi interprétation

Calcul

Culture	Calcul INP	Seuil « critique » en dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé	Seuil « de vigilance » au-dessous duquel le risque de perte de rendement lié à une carence en P est élevé
Prairie*	$\%P \text{ analyse} / (0,15 + 0,065 \%N \text{ analyse}) \times 100$	80	100
Blé tendre	$\%P \text{ analyse} / (0,088 + 0,083 \%N \text{ analyse}) \times 100$	75	120
Maïs	$\%P \text{ analyse} / (0,039 + 0,083 \%N \text{ analyse}) \times 100$	100	140
Soja	$\%P \text{ analyse} / (0,048 + 0,074 \%N \text{ analyse}) \times 100$	90	100

* Prairie : SALETTE et HUCHE, INRA, 1991

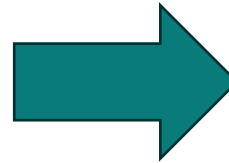


Des pistes d'amélioration du diagnostic de disponibilité en P du sol et de nutrition phosphatée des plantes

- Des références pour interpréter les teneurs en P Olsen du sol adaptées à l'AB :
 - qui semblent mieux refléter les observations terrain
 - mais obtenues dans une gamme de situations pédoclimatiques limitée
- L'indice de nutrition phosphatée, un outil complémentaire de l'analyse de terre, notamment en cas de co-limitations par différents éléments nutritifs ?
 - Pour le blé, le maïs et le soja, les INP calculés à partir d'équations basées sur la teneur en azote semblent donner des résultats plus satisfaisants que ceux reposant sur une mesure de biomasse et sont plus faciles à mettre en œuvre.
 - Quelques précautions à prendre pour la mise en œuvre des INP : stade maximal de mesure, conditions de prélèvement (éviter situations de stress hydrique ou excès d'eau)
 - Robustesse de cet outil à tester dans une large gamme de situations

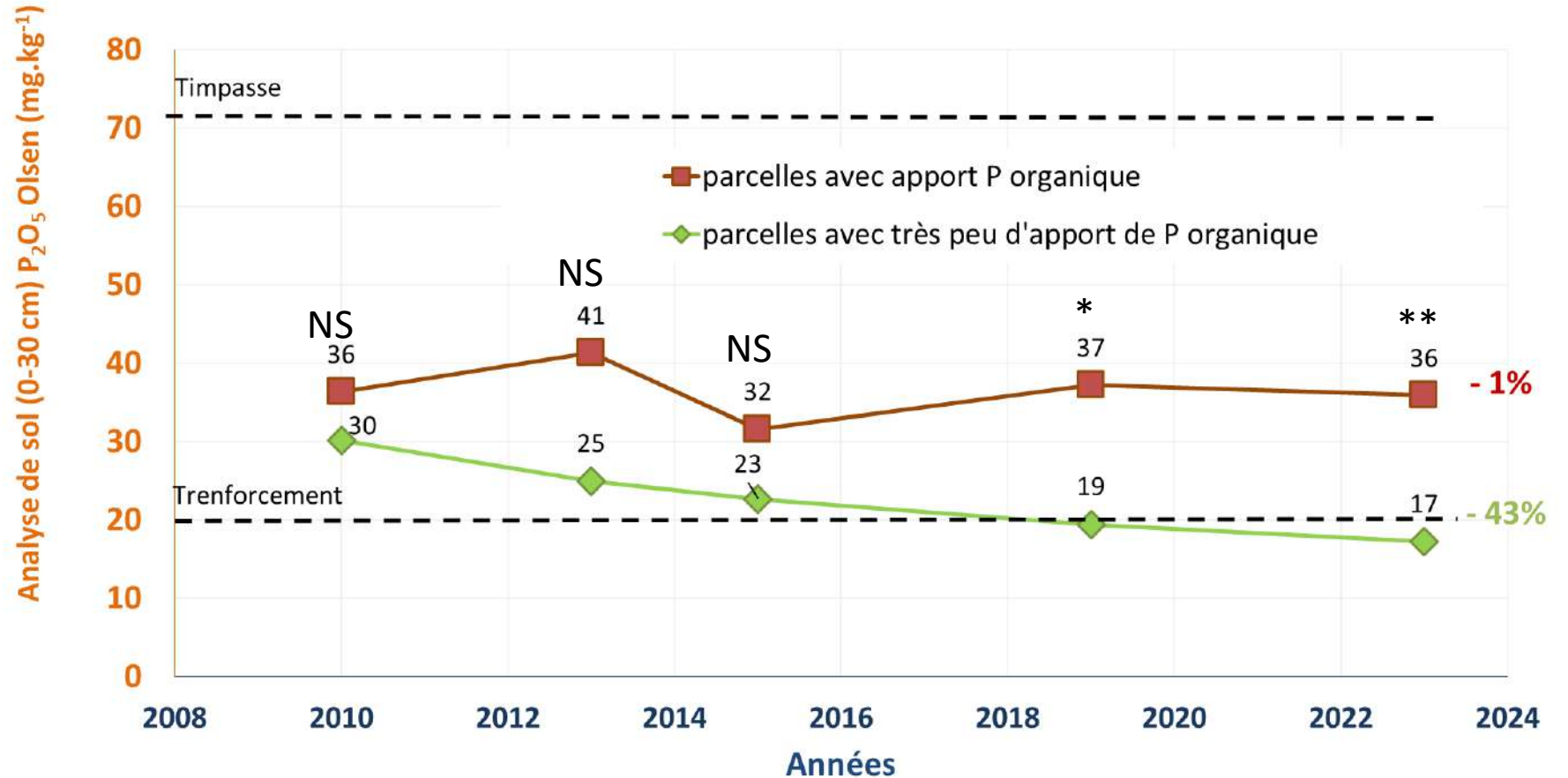
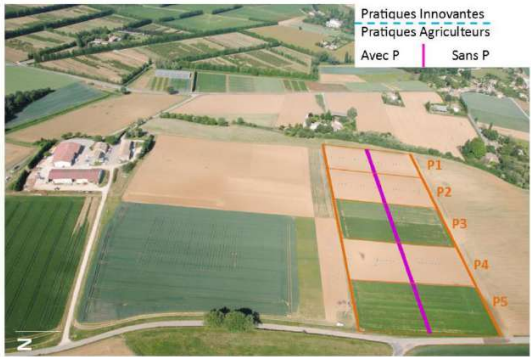


Comment prévoir l'évolution de la fertilité phosphatée des sols en fonction des pratiques ?



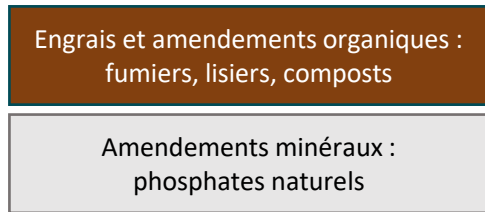
Evolution des teneurs du sol en P Olsen de 2010 à 2023

Evolution de la teneur en P Olsen du dispositif AB longue durée de Dunière
(rotation soja / maïs / luzerne / colza / blé)



Calcul de bilans de phosphore à la parcelle

Fertilisation :



Exportations :

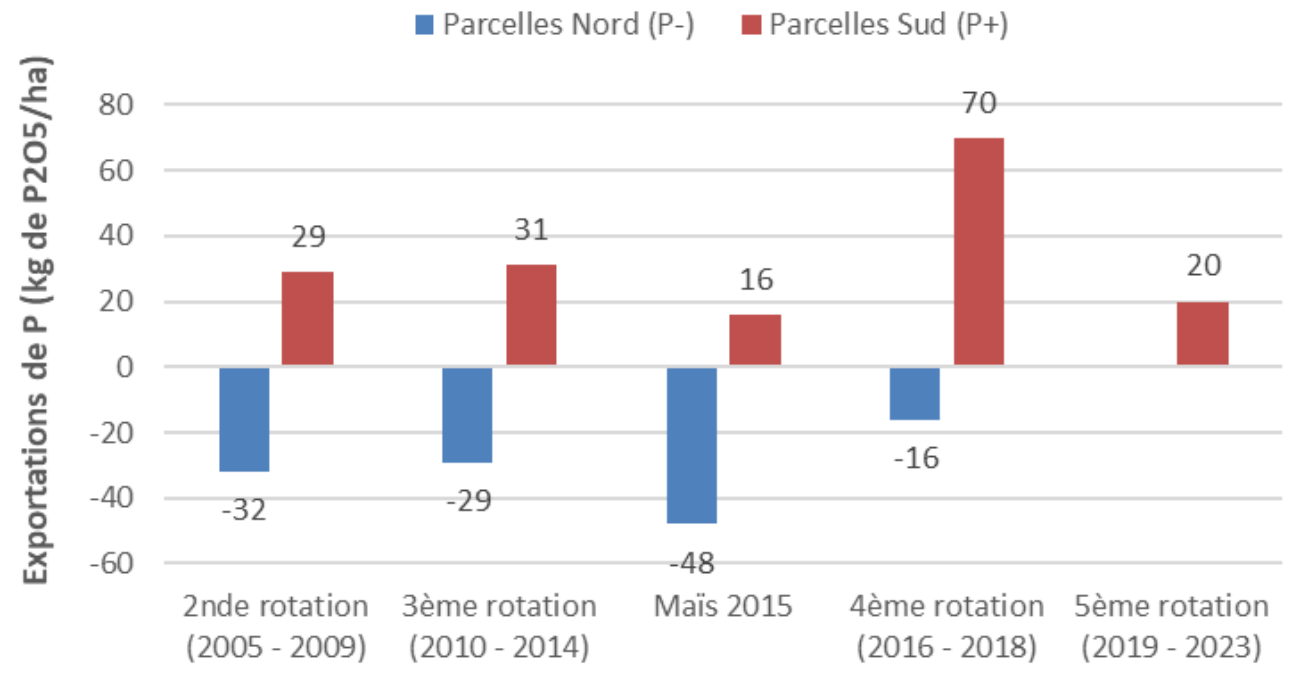


= Dose apportée x teneur en P_2O_5 x $K_{eq}P$

= RDT grains x teneur en P_2O_5 des grains
+ RDT pailles exportées x teneurs en P_2O_5 pailles exportées

$K_{eq}P$: Application d'un coefficient d'équivalence au phosphore des engrais ($K_{eq}P$) pour tenir compte de la faible solubilité du P de certains produits

Bilans moyens à la rotation apports - exportations de P



Le coefficient Keq utilisé

Type d'engrais	Coefficient d'équivalence phosphore (KeqP)
Ecumes de sucrerie ¹	1
Lisier de porcs et digestats de méthanisation d'origine agricole ²	0.95
Fientes de volailles ² et guano ³	0.85
Fumier de bovins ²	0.75
Compost de déchets verts et fraction fermentescible d'ordures ménagères ²	0.55
Engrais à base de mélange de fientes de volailles ou de guano et de farine de viande ³	0.475
Hydroxyapatite (forme de phosphore présente dans les phosphates naturels et dans les farines d'os) ²	0.22*
Farine de viande, de poisson, de sang ou d'os, plumes hydrolysées, soies de porc, phosphates naturels ³	0.1

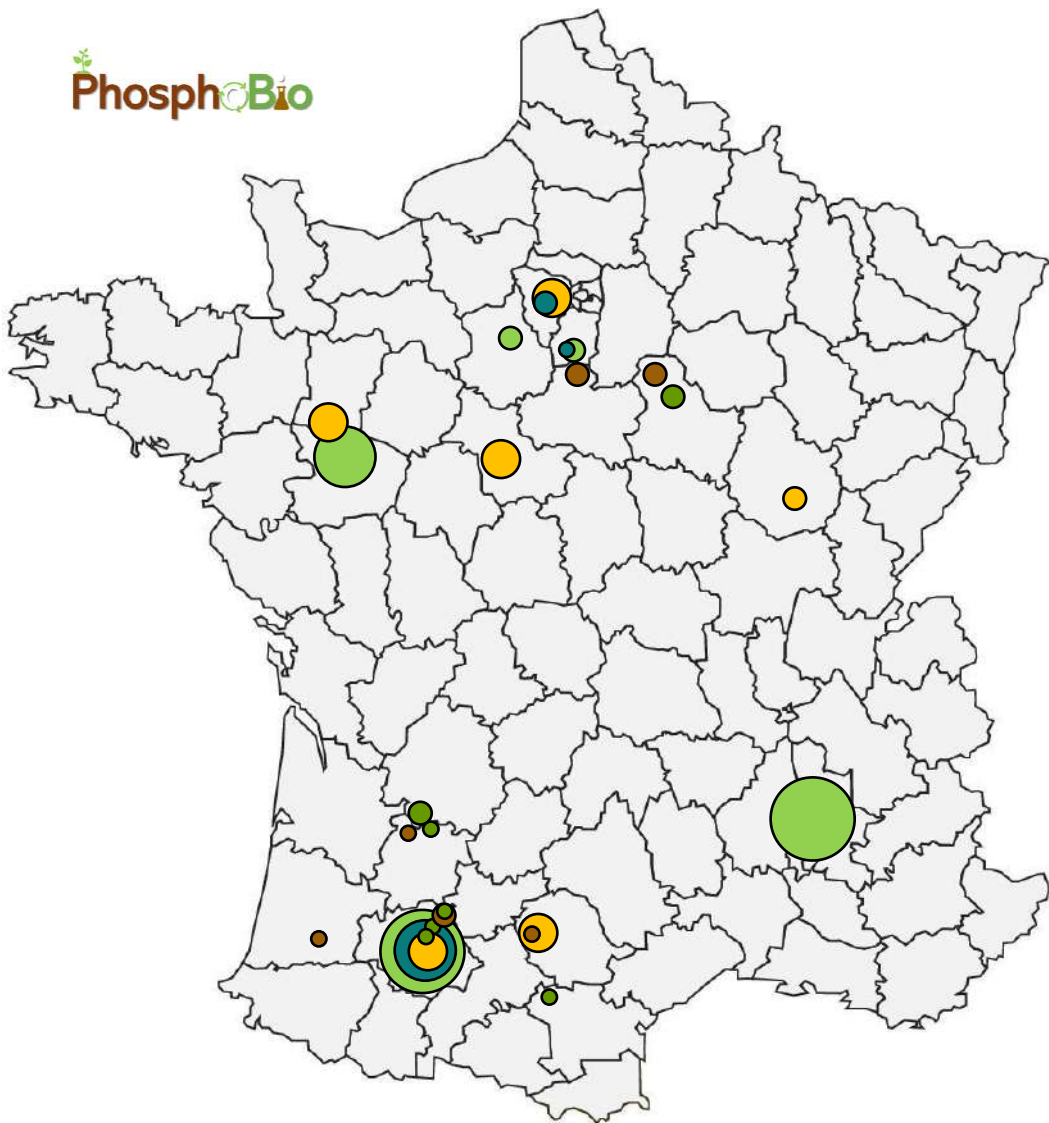
Sources : ¹ Arvalis, ² Christian Morel, INRAE, 2017, ³ valeurs proposées dans le cadre du projet PhosphoBio

* Cette valeur a été établie pour un sol à pH de 6.5. En sol alcalin, la solubilité des phosphates de calcium diminue et, par conséquent, le KeqP des phosphates naturels et des farines d'os dans ces situations serait plus faible d'où la valeur de 0.1 proposée à la ligne suivante.



Collecte de données de teneurs en P des grains et pailles

PhosphoBio



Construction d'une base de données d'analyses de teneurs en P des grains et pailles issues de parcelles et d'essais conduits en AB :

- 844 données de teneurs en P des grains et 825 données de teneurs en P des pailles collectées de 2003 à 2023 sur 27 essais
- Autres informations compilées (si disponibles) : culture, précédent, régime de fertilisation, type de sol, pH, teneurs en MO, P_2O_5 Olsen, K_2O et $CaCO_3$, rendement grain et paille de la culture

- Essai longue durée
- Essai bisannuel courbe de réponse au P
- Essai annuel fertilisation P
- Essai annuel couverts végétaux
- Essai annuel cultures associées

- plus de 400 données
- 10 données ou moins



Elaboration de références de teneur en P des grains et des pailles pour l'AB

Culture	P ₂ O ₅ dans les grains (kg/q)		
	PhosphoBio, 2024	Nb valeurs	Comifer, 2009
Blé dur	0.79	3	0.85
Blé tendre	0.71	361	0.65
Féverole	1.17	72	1.2
Lentille	1.01	9	0.9
Lin oléagineux	1.67	19	1.35
Maïs grain	0.56	134	0.6
Orge	0.75	53	0.65
Pois	0.88	19	0.8
Pois chiche	0.93	6	0.7
Sarrasin	0.61	6	-
Seigle	0.64	11	0.65
Soja	1.11	86	1
Sorgho	0.47	3	0.7
Tournesol	1.00	43	1.2
Triticale	0.67	3	0.65
Luzerne porte-graines	1.26	16	-

Culture	P ₂ O ₅ dans les pailles (kg/t)		
	PhosphoBio, 2024	Nb valeurs	Comifer, 2009
Blé tendre	1.8	323	1.7
Orge	2.3	42	1
Pois	2.0	11	2.1
Seigle	2.2	8	3.0
Triticale	1.2	3	2.0
Luzerne porte-graines	9.0	48	-

Culture	P ₂ O ₅ dans les parties aériennes (kg/t de MS)		
	PhosphoBio, 2024	Nb valeurs	Comifer, 2009
Maïs fourrage	4.8	68	4.2

Teneurs en P des grains et des pailles en AB assez proches des teneurs de référence en conventionnel

Effet dilution par le rendement des cultures semble supérieur à l'effet teneur en P du sol

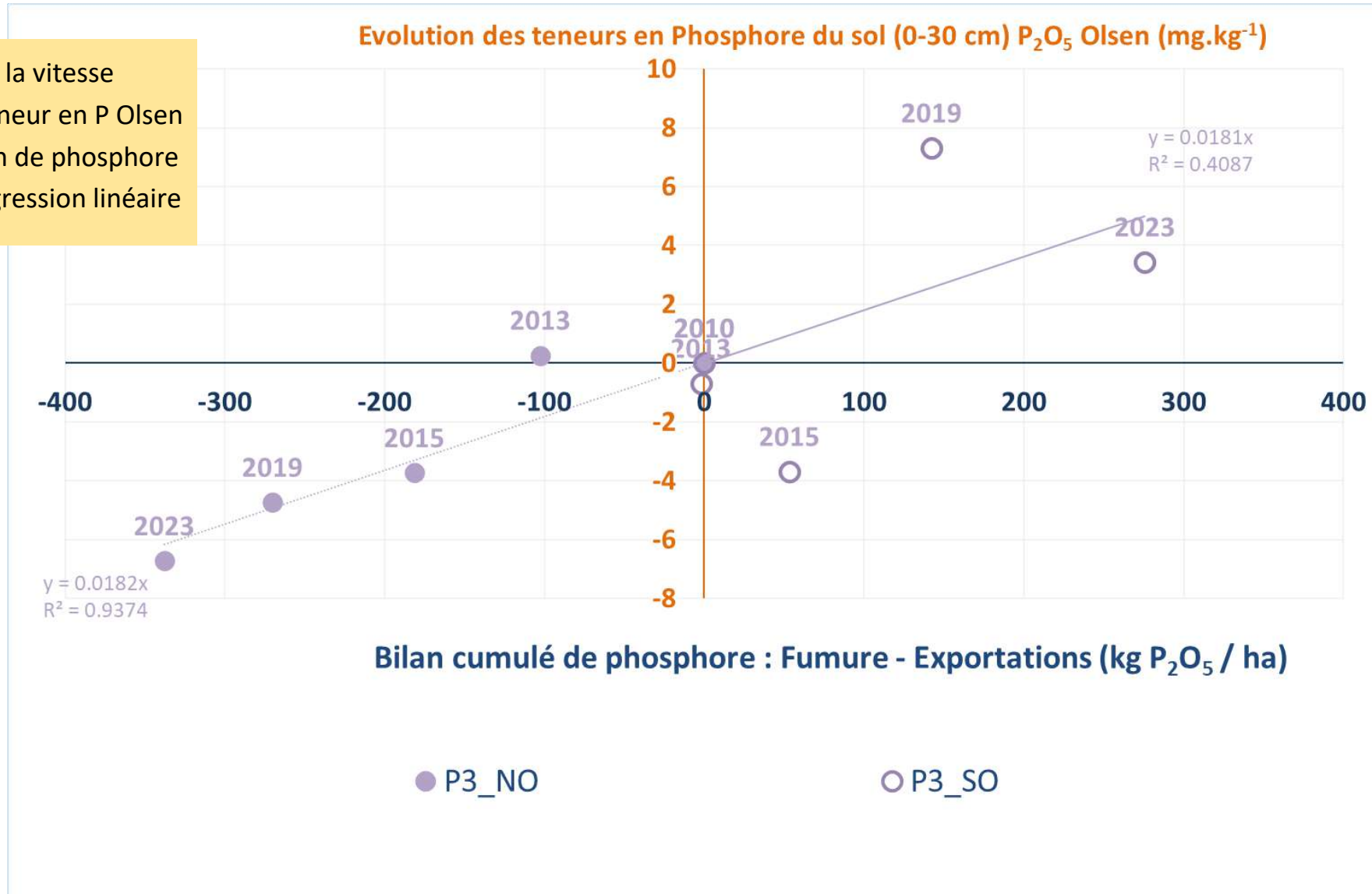
=> Intérêt d'un référentiel adapté à l'AB (ou aux systèmes bas-intrants où les rendements sont souvent plus faibles qu'en conventionnel)

Peut-on prédire l'évolution des teneurs ?

Estimation de la vitesse d'évolution de la teneur en P Olsen en fonction du bilan de phosphore à la parcelle par régression linéaire

Diminution de la teneur en P_2O_5 Olsen du sol de 1.8 ppm pour un bilan déficitaire de 100 kg de P_2O_5 /ha

Augmentation de la teneur en P_2O_5 Olsen du sol de 1.8 ppm pour un bilan excédentaire de 100 kg de P_2O_5 /ha

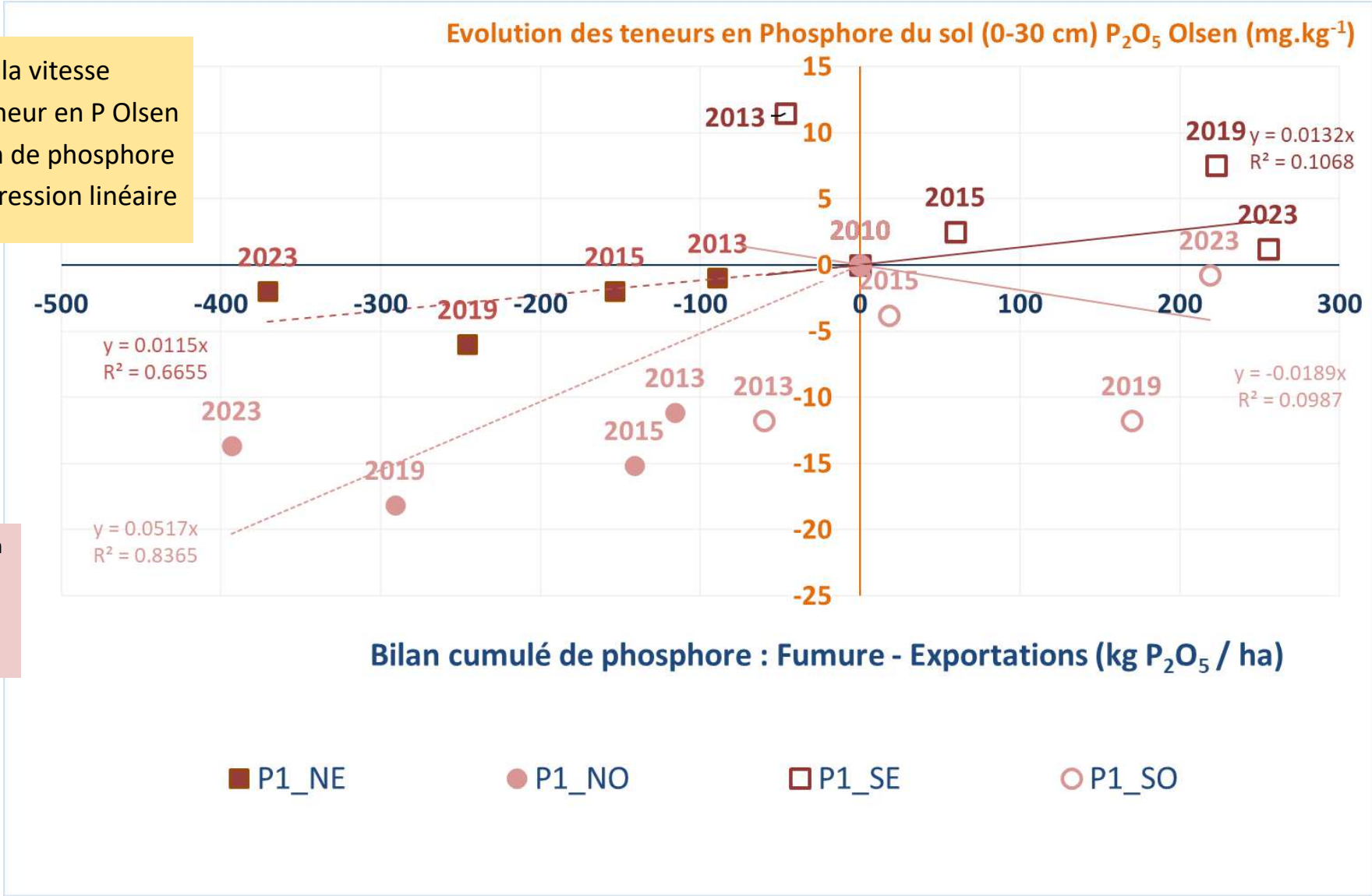


Peut-on prédire l'évolution des teneurs ?

Estimation de la vitesse d'évolution de la teneur en P Olsen en fonction du bilan de phosphore à la parcelle par régression linéaire

Diminution de la teneur en P₂O₅ Olsen du sol de 1.2 à 5.2 ppm pour un bilan déficitaire de 100 kg de P₂O₅/ha

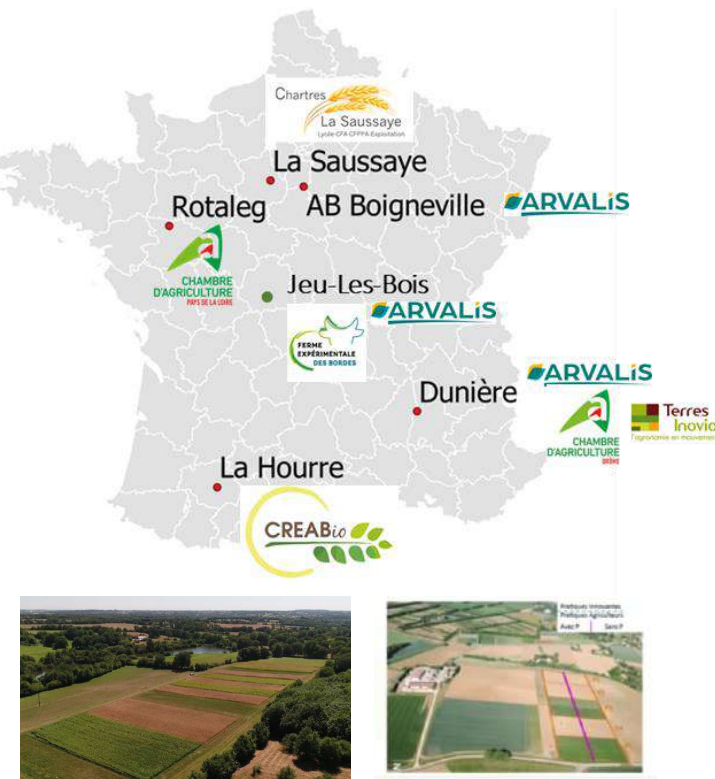
Variation de la teneur en P₂O₅ Olsen du sol pouvant aller d'une augmentation de 1.1 ppm à une diminution de 1.0 ppm pour un bilan excédentaire de 100 kg de P₂O₅/ha



Bilans P calculés sur 6 sites expérimentaux

→ 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



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	Limono-sableux 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	
Rotaleg	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

* *Système polyculture -élevage*

P- : aucun apport de P, P+ : apports de P < exports, P++ : apports de P ≥ exports



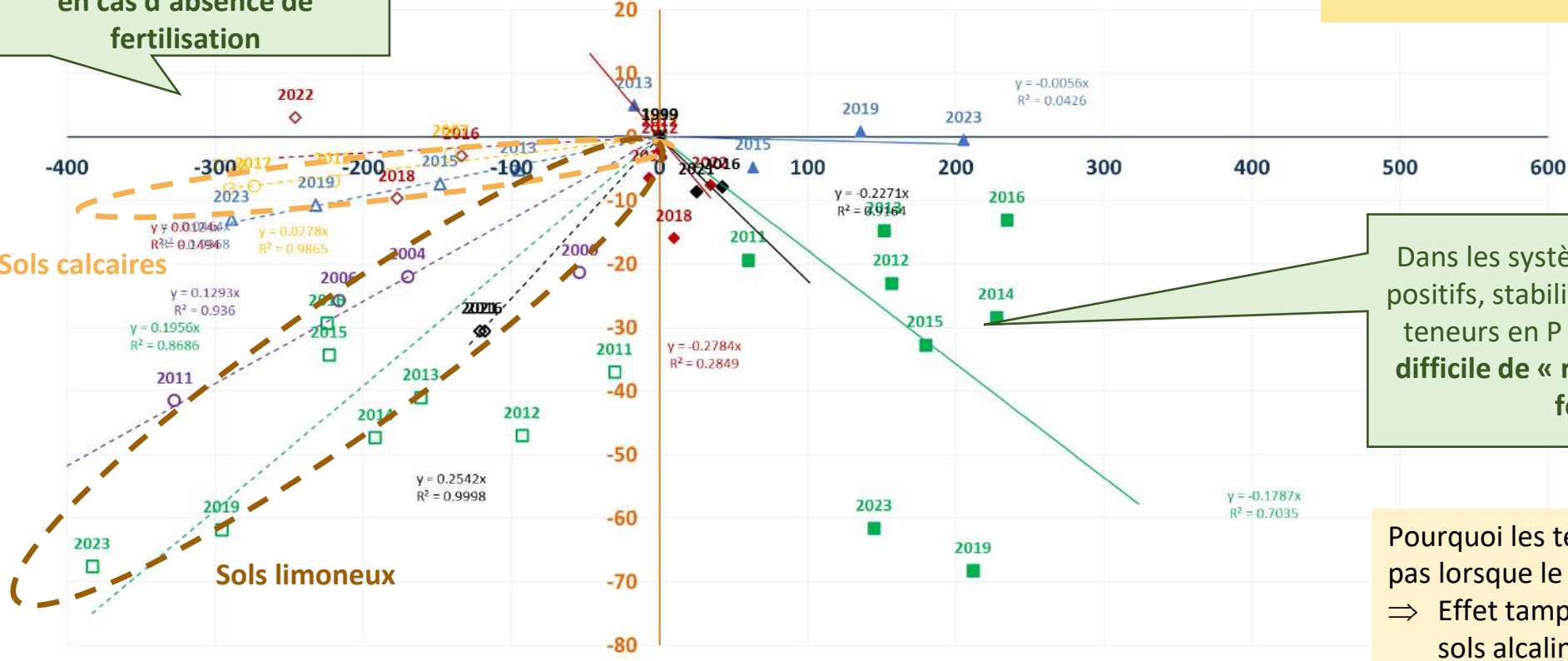
Mise en relation des bilans fertilisation - exportation de P avec l'évolution de la teneur en P du sol

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**

Diminution de la teneur en P₂O₅ Olsen du sol de 1.2 à 25 ppm pour un bilan déficitaire de 100 kg de P₂O₅/ha

➤ Calculs réalisés pour chaque parcelle de chaque essai (ici, ce sont les moyennes par système de culture qui sont présentées)

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



Diminution de la teneur en P₂O₅ Olsen du sol pouvant aller de 0.6 ppm à une diminution de 18 ppm pour un bilan excédentaire de 100 kg de P₂O₅/ha

Dans les systèmes dont les bilans de P sont positifs, stabilité voire même diminution des teneurs en P (parfois une 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
- ◆ Jeu-Les-Bois P++
- ◇ Jeu-Les-Bois P+
- ▲ 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



Bilans P - conclusions

- Dans les systèmes où il n'y a pas eu de fertilisation, il y a baisse importante des teneurs en P avec des disparités de vitesse selon les sites
- Dans les systèmes où le bilan en P est positif, la teneur en P du sol est stable voire en diminution, malgré les apports
- Il est difficile à ce jour d'explicitier ces différences seulement en fonction d'un paramètre du sol (multifactoriel : type de sol, type de produits organiques, ...)



La gestion du Phosphore : un réel enjeu pour l'AB

- Des teneurs en P Olsen du sol globalement plus faibles en AB qu'en conventionnel
- Une situation un peu moins préoccupante qu'on pouvait le penser au regard des teneurs seuils « revisités » (seulement 7% des parcelles de l'observatoire en situation de teneur « critique »)
- Certaines situations appellent à une plus grande vigilance : sols argilo-calcaires du Sud-Ouest, systèmes de culture « autonomes » avec peu d'apport de fertilisants et une forte proportion de légumineuses
- Nécessité d'anticipation compte tenu du coût élevé et de la disponibilité limitée des fertilisants utilisables en AB et du pouvoir tampon du sol



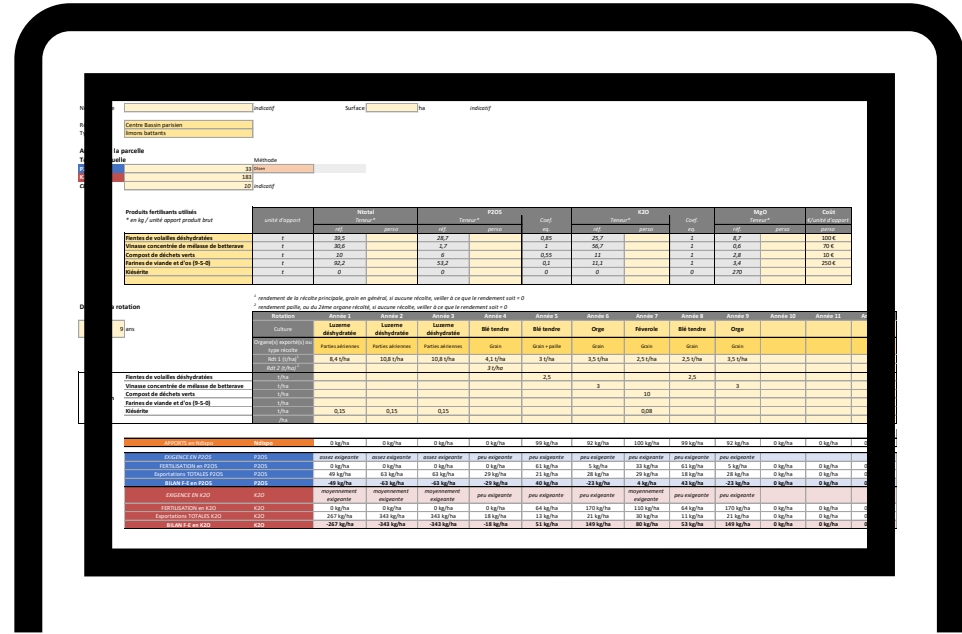
Quels messages retenir et quelles sorties opérationnelles ?

- Analyse de terre et indices de nutrition : deux outils opérationnels en AB pour le diagnostic
- Perte de fertilité certaine en absence d'apports de fertilisants
- Difficulté pour faire progresser les teneurs en P Olsen du sol lorsque des niveaux faibles ont été atteints pour des raisons économiques et en raison des interactions complexes entre le P des fertilisants et le sol
- Anticipation nécessaire pour éviter les situations à risque

=> **Proposition de deux outils pour les conseillers et agriculteurs**



Calculette « PhosphoBio » (calculette de gestion du phosphore en agriculture biologique)



à destination des agriculteurs et de leurs conseillers

En cours de finalisation,
mise en ligne prévue pour printemps 2025

Calculette PhosphoBio

Pourquoi une calculette de gestion du P adaptée à l'AB ?

- Produits fertilisants P utilisables en AB
 - Produits complets NPK → P disponible (Apportés pour gérer N en priorité donc généralement sur certaines cultures)
 - Produits uniquement P ou riches en P → P très peu soluble (Chers !)

Nécessite une approche globale NPK et une gestion à la rotation. Peu utiles.

+ des références adaptées à l'AB, issues des différentes actions du projet PhosphoBio

Démarche

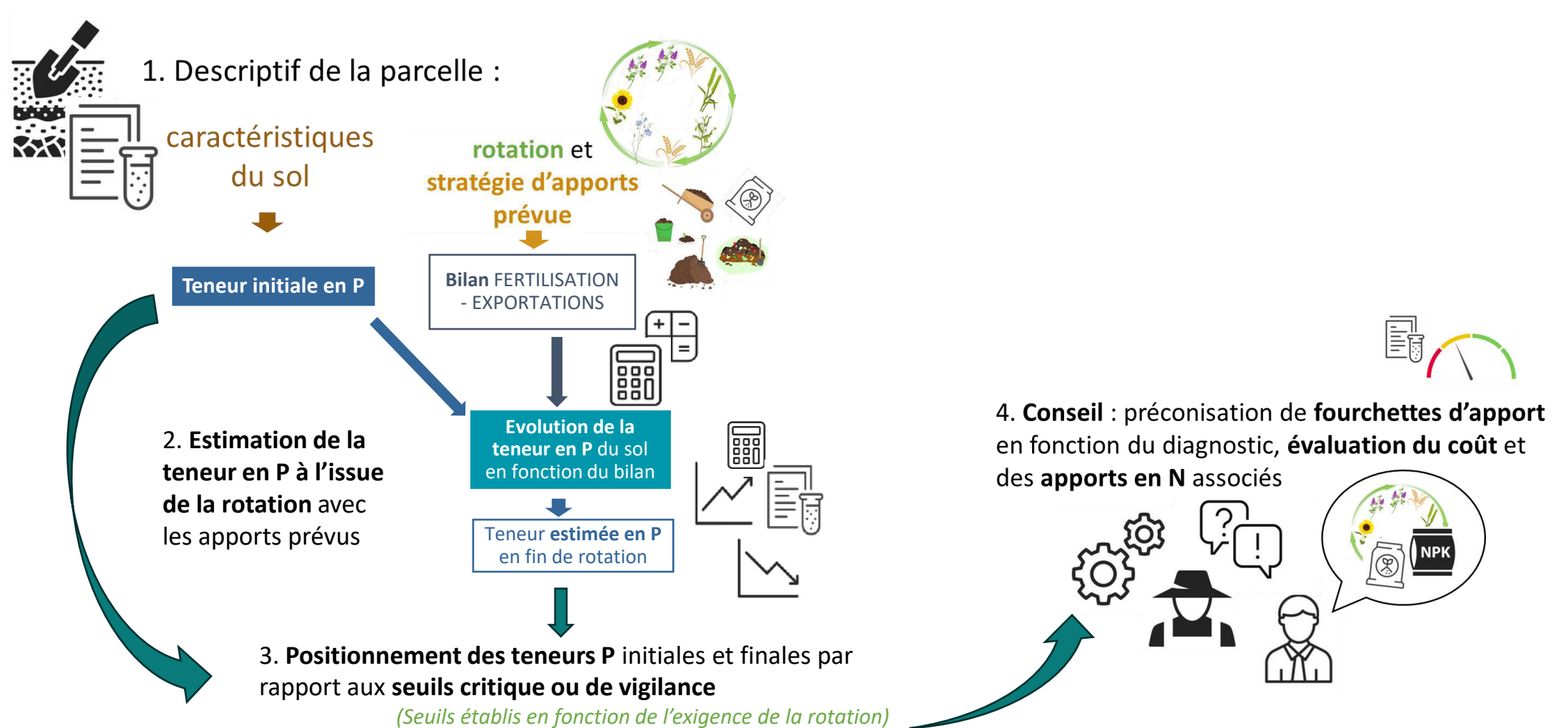
- Descriptif de la parcelle :
 - caractéristiques du sol
 - rotation et politique d'apports prévus
 - Teneur initiale en P
 - Bilan FERTILISATION - EXPORTATIONS
 - Evolution de la teneur en P du sol en fonction du bilan
 - Teneur extrinsèque en P au fin de rotation
- Estimation de la teneur en P à l'issue de la rotation avec les apports prévus
- Positionnement des teneurs P initiales et finales par rapport aux seuils critique ou de vigilance (Seuils établis en fonction de l'exigence de la rotation)
 - Risque de perte de rendement liée à une carence en P
 - Teneur en P
 - Seuil critique: P205 (Diapn) 15 ppm
 - Seuil de vigilance: 20 ou 50 ppm au début de la rotation
 - RISQUE MODERE
 - CRITIQUE
 - CONFORT
 - A faire en fonction du positionnement de la teneur P initiale
 - Remonter la teneur en risque modéré
 - Maintenir la teneur
 - Baisse de la teneur possible suivant le nombre de rotations avant de passer en risque modéré
 - Apports en P préconisés supérieurs aux exportations
 - équivalents à aux exportations inférieurs
 - inférieurs aux exportations, voire impasse
- Conseil : préconisation de fourchettes d'apport en fonction du diagnostic, évaluation du coût et des apports en N associés

PhosphoBio



Calcuette « PhosphoBio »

(calculatrice de gestion du phosphore en agriculture biologique)



Merci pour votre attention !

Merci à l'ensemble des équipes réalisatrices des expérimentations et aux partenaires du projet :



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

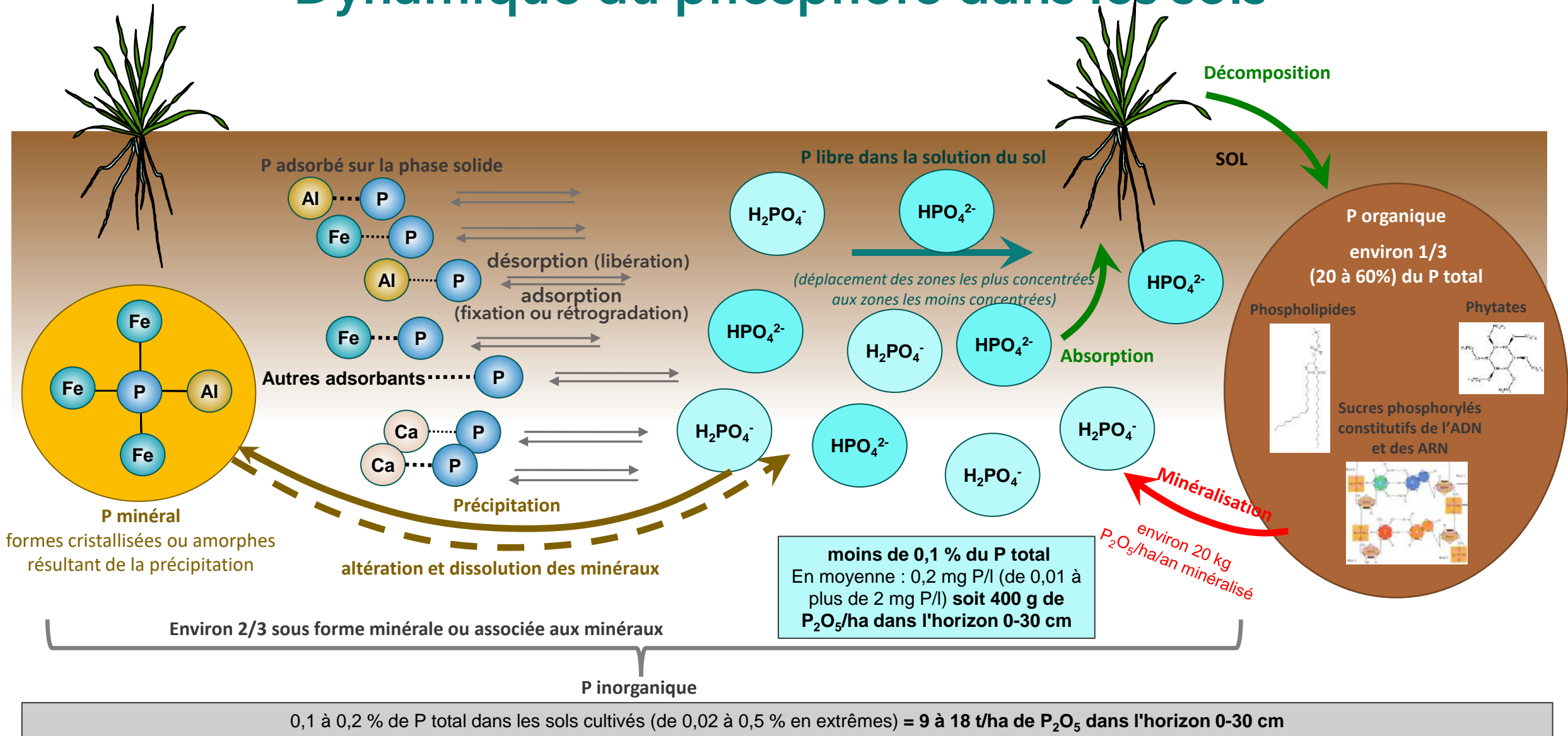
Liberté
Égalité
Fraternité



Contact : g.vericel@arvalis.fr



Dynamique du phosphore dans les sols



Méthodes de mesure du phosphore du sol

