

Colloque  
**PhosphoBio**  
21 novembre 2024,  
BORDEAUX



# Adaptation des indices de nutrition à l'AB

Grégory VERICEL



Alain MOLLIER





# Indices de nutrition : de quoi s'agit-il ?

- 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

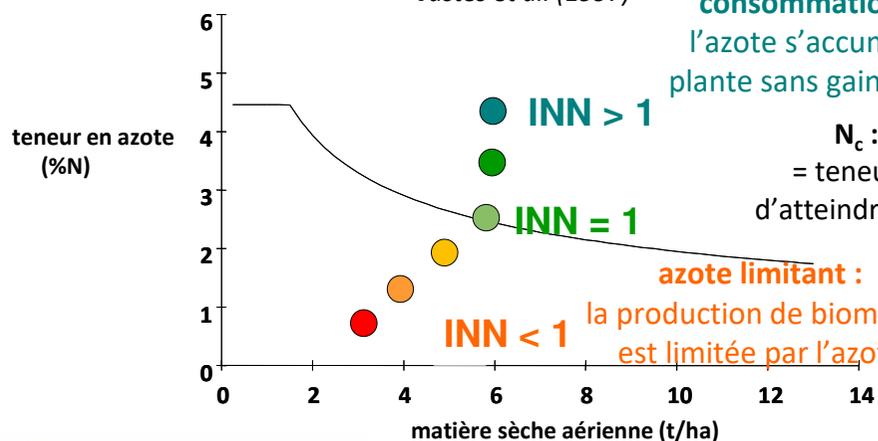
$$INN = \frac{\%N \text{ mesuré}}{N_c}$$

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

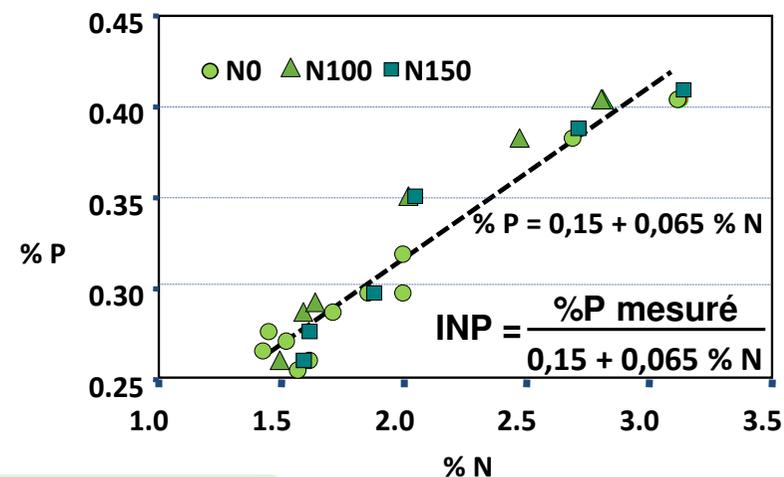
$INN < 1$

$INN = 1$

$INN > 1$



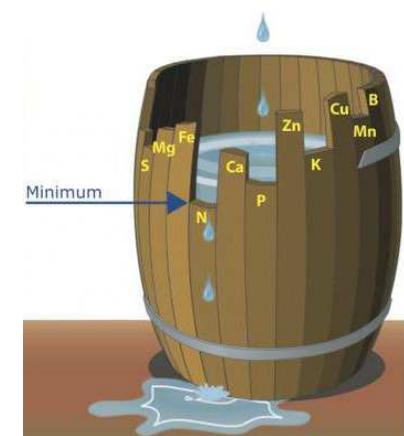
Relation entre les teneurs en N et P du ray-grass anglais au printemps  
(SALETTE et HUCHE, INRA, 1991)





# 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 phytodisponible : plus pertinent qu'un indicateur du P assimilable du sol tel que le P Olsen qui repose sur une extraction à l'aide d'un réactif chimique ?





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

## 1 Recensement des données de la bibliographie

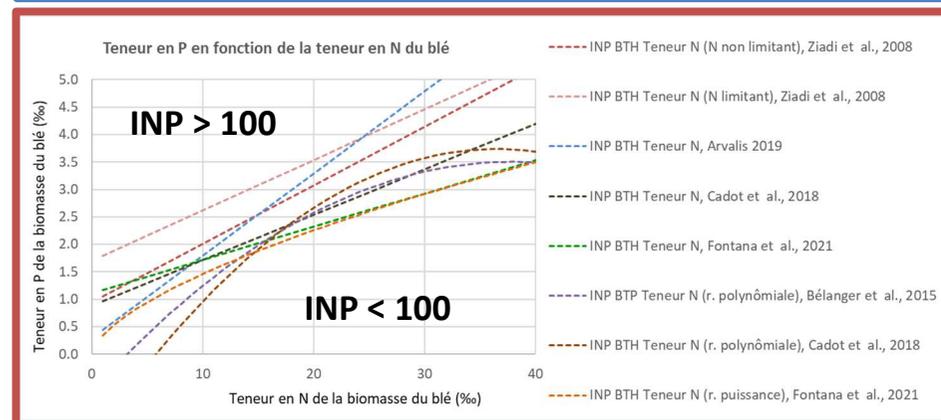
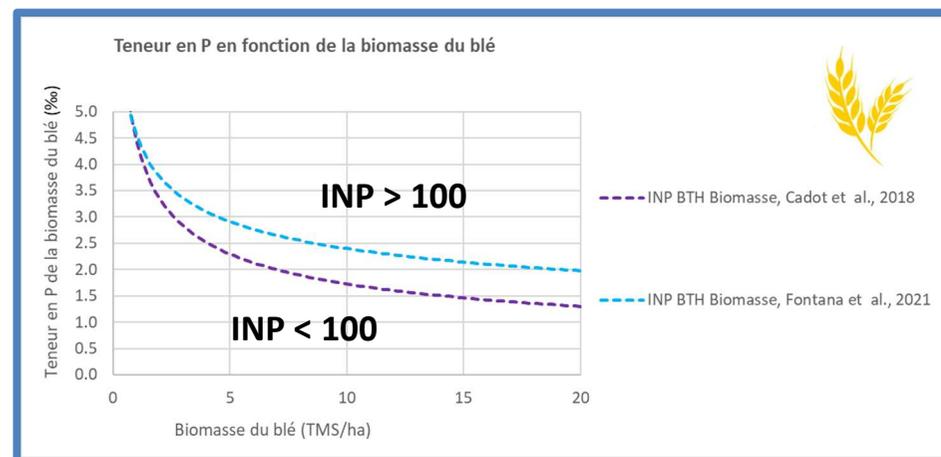
### 10 relations définissant la teneur en P critique du blé tendre

Référence biblio	Origine	Type de relation	Modèle	a	b	c
Cadot et al. 2018	Suisse	Courbe dilution biomasse	$P_c = a \times \text{Biomasse}^b$	4.44	-0.41	/
Fontana et al. 2021	Suisse	Courbe dilution biomasse	$P_c = a \times \text{Biomasse}^b$	4.56	-0.279	/
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	/

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

\* Blé tendre de printemps

+ 9 relations équivalentes sur maïs grain



Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?  
BORDEAUX, 21 novembre 2024

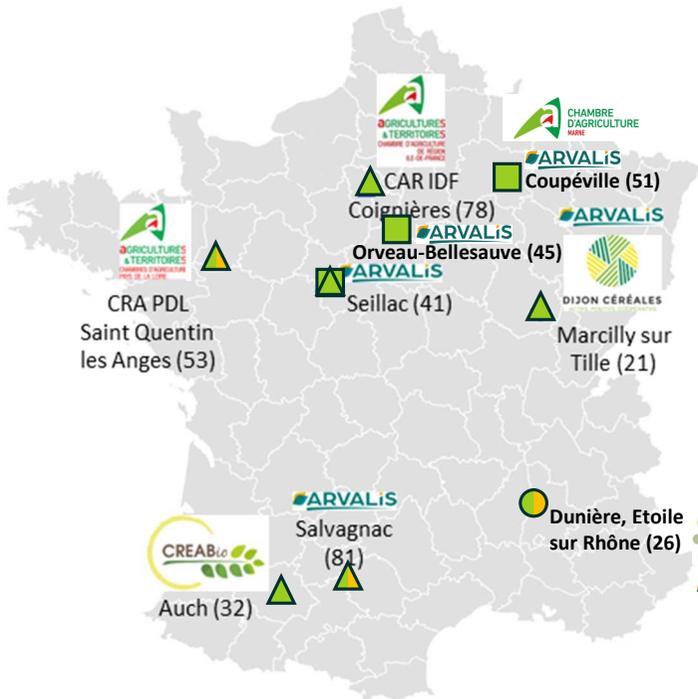


# Adaptation d'indices de nutrition phosphatée à l'AB

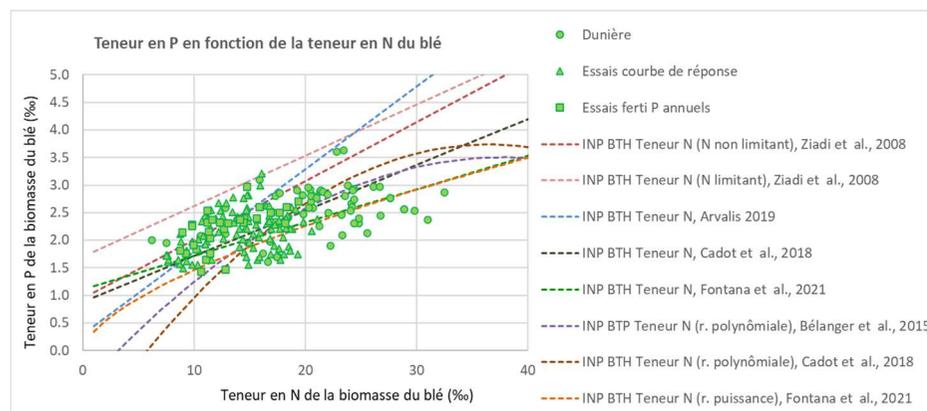
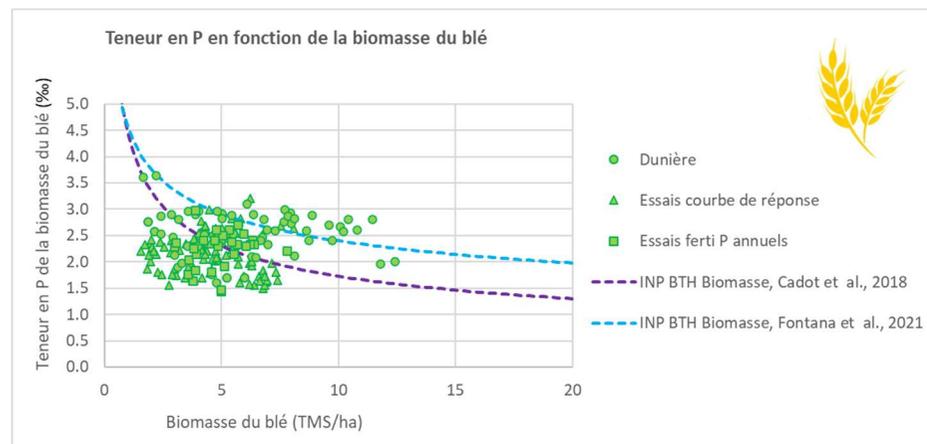
## 2 Comparaison de données de teneur en P mesurées en AB avec les teneurs critiques en P de la littérature

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)

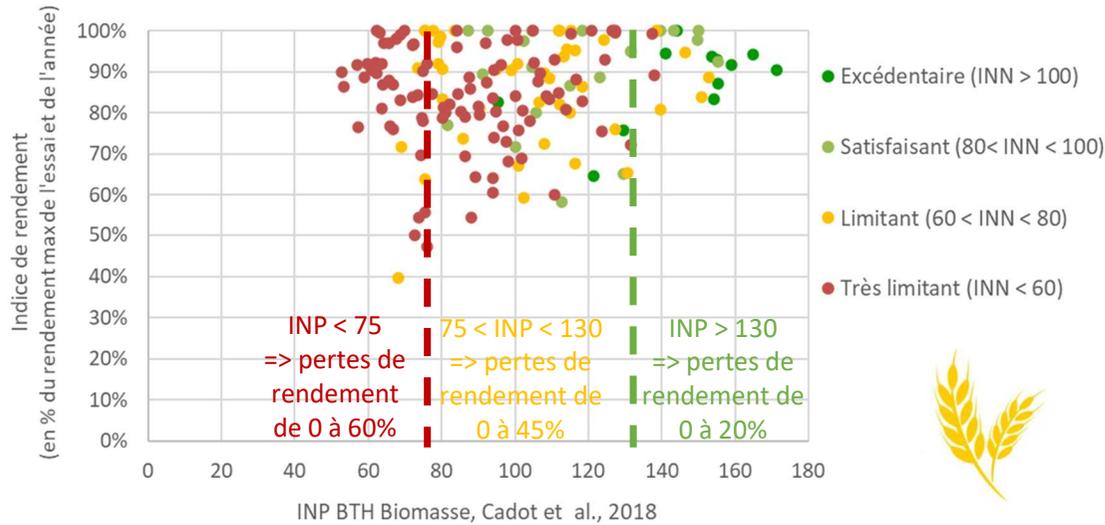


- Essai bisannuel courbe de réponse au P
- Essai longue durée P
- Essai annuel fertilisation P
- Essai blé tendre
- Essai avec blé tendre et maïs grain



# Identification de seuils d'INP limitant le rendement

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

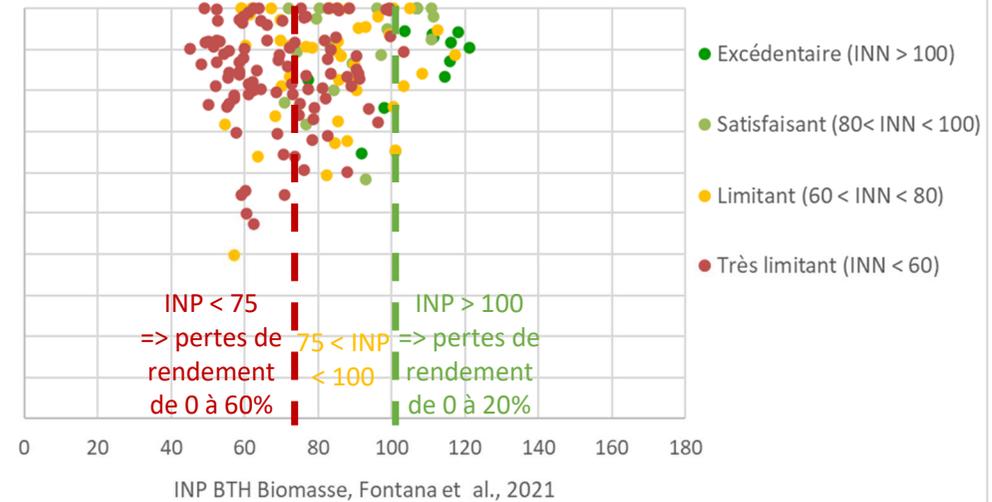
Bons diagnostics : 30%

Diagnostics « acceptables » : 84%

Mauvais diagnostics : 16%

Relation retenue

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



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%

172 données de biomasse et indice de rendement en AB

Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?  
BORDEAUX, 21 novembre 2024



# Comparaison des diagnostics mobilisant l'analyse de terre à ceux mobilisant l'analyse de plantes

Indice de rendement	Analyse de terre		
	Très limitant ( $P_2O_5$ Olsen $\leq$ 15 ppm)	Limitant ( $15 < P_2O_5$ Olsen $<$ 25 ppm)	Non limitant ( $P_2O_5$ Olsen $\geq$ 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



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

Indice de rendement	INP Cadot et al., 2018 (Biomasse)		
	Très limitant (INP $\leq$ 0.75)	Limitant (0.75 $<$ INP $<$ 1.3)	Non limitant (INP $\geq$ 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 ( $P_2O_5$ Olsen $<$ 25 ppm et INP $\leq$ 0.75)	Limitant ( $P_2O_5$ Olsen $<$ 25 ppm et INP $>$ 0.75)	Non limitant ( $P_2O_5$ Olsen $\geq$ 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

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



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

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	Pc = f(biomasse)	Cadot et al. 2018 $Pc = 4.44 \times \text{Biomasse}^{-0.41}$	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	Pc = f(teneur N)	Cadot et al. 2018 $Pc = 0.083 \times \text{tN} + 0.88$	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	Pc = f(biomasse)	Gagnon et al. 2020 $Pc = 3.98 \times \text{Biomasse}^{-0.28}$	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	Pc = f(teneur N)	Cadot et al. 2018 $Pc = 0.083 \times \text{tN} + 0.39$	20% (entre 0 et 39%, 7 valeurs)	100	12% (entre 0 et 46%, 46 valeurs)	140	9% (entre 0 et 47%, 13 valeurs)

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 ?

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

## 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



### 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<sup>er</sup> cycle de coupe

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)

ARVALIS

Luzerne 2023, La Veuve (51)

INRAE

Soja 2021, Auzeville (31)



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

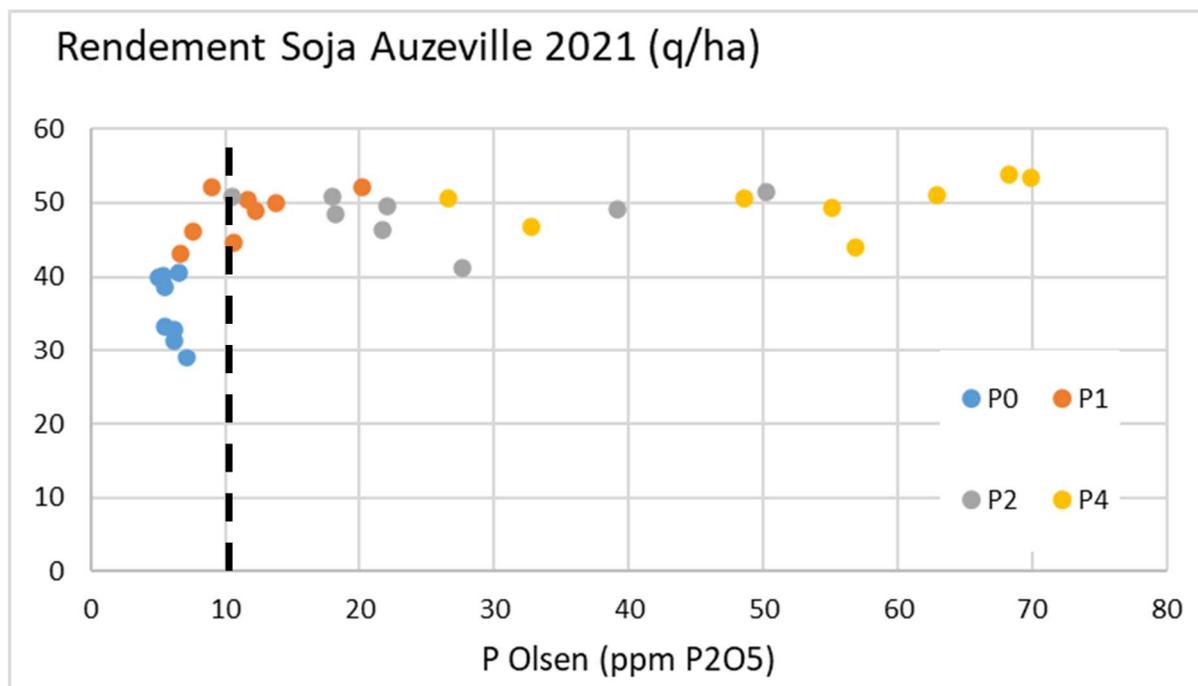
- Analyse du P Olsen du sol sur chaque microparcelle en 2021
- Biomasse + teneur NP à **11 dates**
- Rendement

Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?

BORDEAUX, 21 novembre 2024



# Réponse au phosphore du sol (P Olsen) du soja



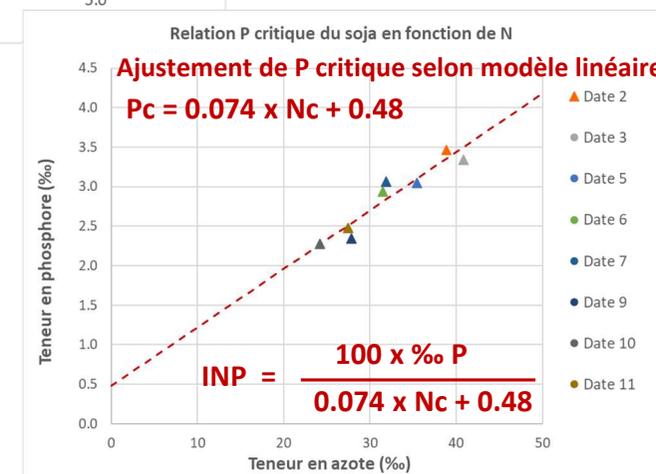
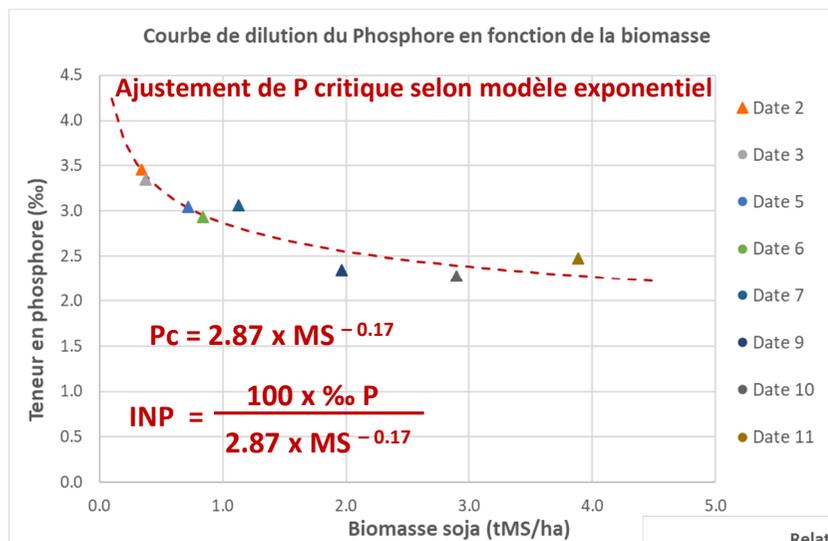
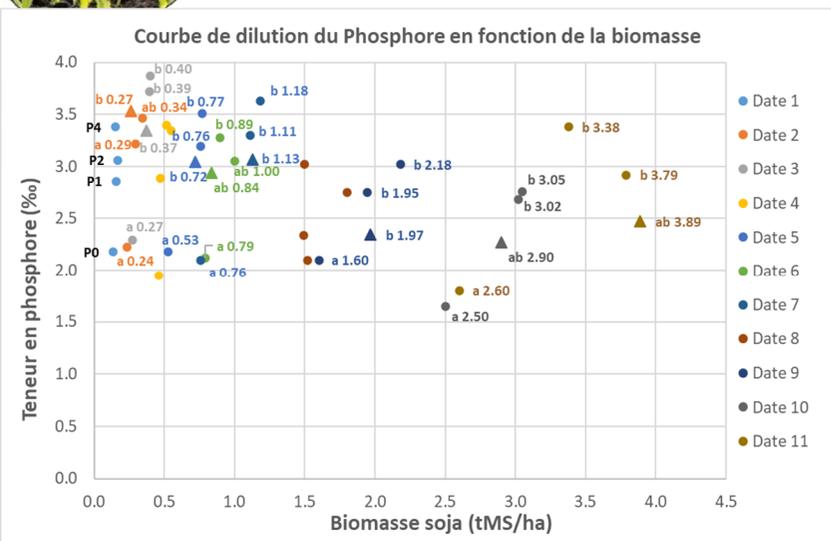
**P Olsen < 10 ppm de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :**

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

**P Olsen ≥ 10 ppm de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> :**

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  
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

Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?  
BORDEAUX, 21 novembre 2024



# Identification de seuils d'INP limitant le rendement

Indice de rendement	Analyse de terre	
	Limitant (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen ≤ 10 ppm)	Non limitant (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Olsen ≥ 10 ppm)
Limitant (IR < 0.8)	9	2
Peu limitant (IR > 0.8)	1	20



Bons diagnostics : 91%  
Mauvais diagnostics : 9%

Indice de rendement	INP (Biomasse)		
	Très limitant (INP ≤ 0.8)	Limitant (0.8 < INP < 1.2)	Non limitant (INP ≥ 1.2)
Très limitant (IR < 0.6)	15	6	1
Limitant (0.6 < IR < 0.8)	32	48	8
Peu limitant (IR > 0.8)	39	106	97



Bons diagnostics : 45%  
Diagnostics « acceptables » : 89%  
Mauvais diagnostics : 11%

Indice de rendement	INP (Teneur N)		
	Très limitant (INP ≤ 0.9)	Limitant (0.9 < INP < 1)	Non limitant (INP ≥ 1)
Très limitant (IR < 0.6)	6	7	9
Limitant (0.6 < IR < 0.8)	8	11	69
Peu limitant (IR > 0.8)	1	2	239



Bons diagnostics : 73%  
Diagnostics « acceptables » : 97%  
Mauvais diagnostics : 3%

32 données pour l'analyse de terre, 352 données avec biomasse, teneur en N et indice de rendement.  
Attention ! Evaluation réalisée sur le jeu de données ayant permis de construire le référentiel !



# 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)	<b>80</b>	10% (entre 0 et 46%, 204 valeurs)	<b>120</b>	9% (entre 0 et 23%, 50 valeurs)
	Pc = f(teneur N)	$Pc = 0.074 \times tN + 0.48$	26% (entre 1 et 46%, 118 valeurs)	<b>90</b>	11% (entre 1 et 38%, 54 valeurs)	<b>100</b>	9% (entre 0 et 28%, 180 valeurs)
	Analyse de terre			28% (entre 3 et 46%, 11 valeurs)	<b>10 ppm de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Olsen</b>	9% (entre 0 et 23%, 21 valeurs)	<b>Non défini</b>

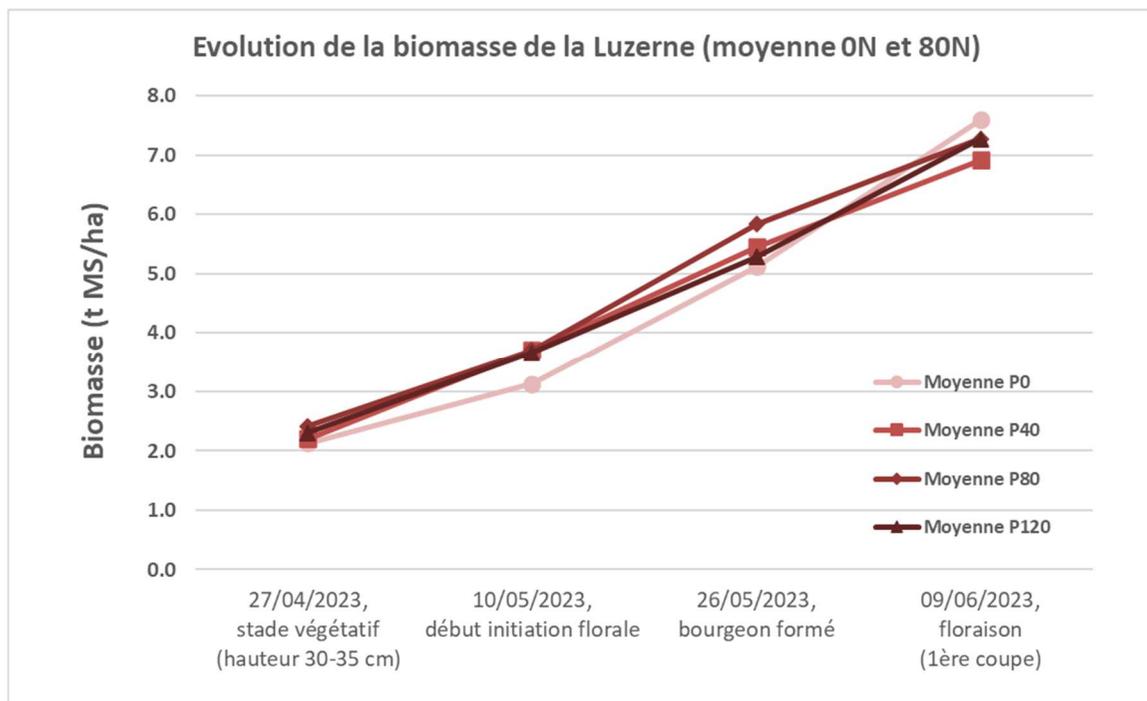
*Pc et tN en g/kg, Biomasse en t de MS/ha*

**Diagnostic reposant sur analyse de terre semble plus pertinent 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 ?**

Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?  
BORDEAUX, 21 novembre 2024

# Réponse au phosphore de la luzerne



**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)**

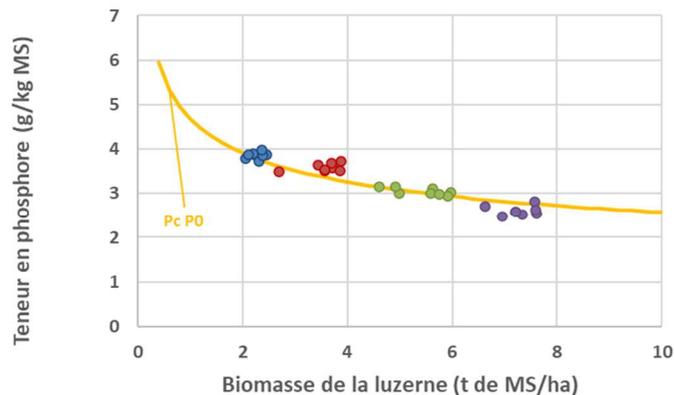
# Teneurs critiques en phosphore pour la luzerne

**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)



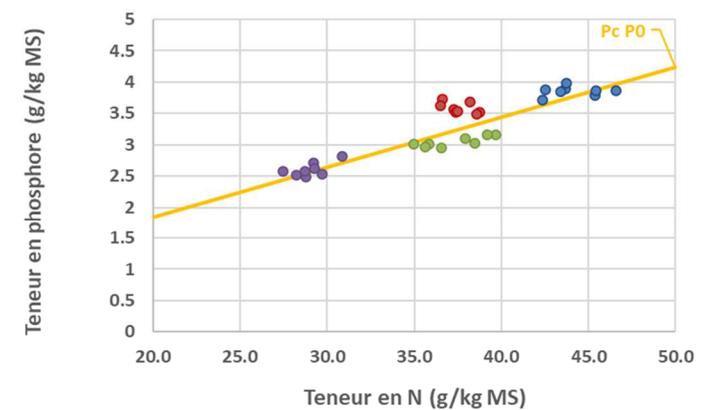
Dilution du Phosphore en fonction de la biomasse



● 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 OP**

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

$$P_{critique} = f(\%N) \text{ avec } PO$$

$$Pc = 0.08 \times Nc + 0.24$$

PhosphoBio, 2024

$$P_{critique} = f(\text{Biomasse}) \text{ avec } PO$$

$$Pc = 4.68 \times MS^{-0.26}$$

Essai INP Arvalis, La Veuve (51), 2023

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

Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?  
BORDEAUX, 21 novembre 2024



# Identification de seuils d'INP limitant le rendement

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 :
Luzerne	Pc = f(biomasse)	$Pc = 4.68 \times \text{Biomasse}^{-0.26}$	28% (entre 8 et 56%, 23 valeurs)	<b>100</b>	16% (entre 0 et 32%, 42 valeurs)	<b>110</b>	7% (entre 0 et 11%, 7 valeurs)
	Pc = f(teneur N)	$Pc = 0.08 \times \text{tN} + 0.24$	19% (entre 0 et 46%, 30 valeurs)	<b>100</b>	20% (entre 0 et 56%, 35 valeurs)	<b>115</b>	12% (entre 0 et 23%, 7 valeurs)

Indice de rendement	INP (Biomasse)		
	Très limitant (INP ≤ 1)	Limitant (1 < INP < 1.1)	Non limitant (INP ≥ 1.1)
Très limitant (IR < 0.6)	5	0	0
Limitant (0.6 < IR < 0.8)	12	17	0
Peu limitant (IR > 0.8)	6	25	7

Indice de rendement	INP (Teneur N)		
	Très limitant (INP ≤ 1)	Limitant (1 < INP < 1.15)	Non limitant (INP ≥ 1.15)
Très limitant (IR < 0.6)	3	2	0
Limitant (0.6 < IR < 0.8)	12	15	2
Peu limitant (IR > 0.8)	15	18	3

Bons diagnostics : 40%  
 Diagnostics « acceptables » : 92%  
 Mauvais diagnostics : 8%



Bons diagnostics : 32%  
 Diagnostics « acceptables » : 79%  
 Mauvais diagnostics : 21%

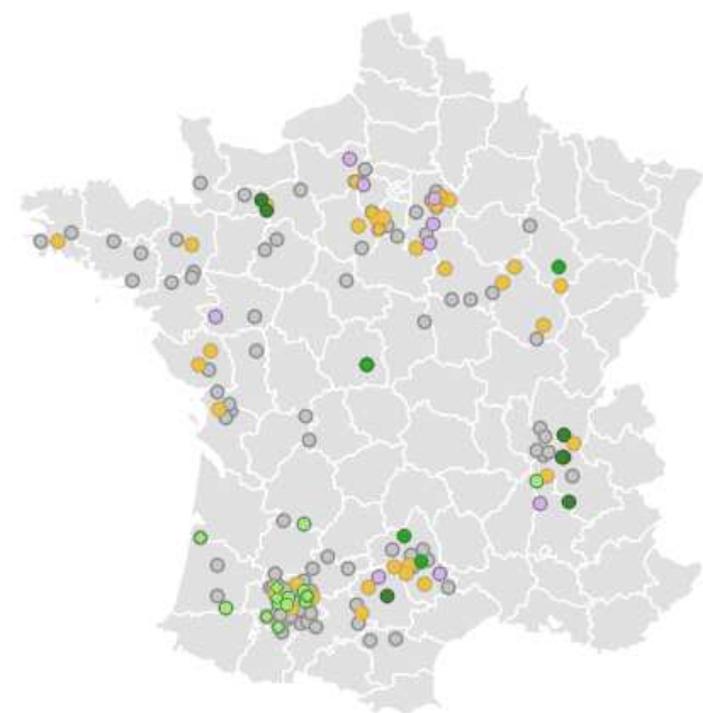
*72 données avec biomasse, teneur en N et indice de rendement.  
 Attention ! Evaluation réalisée sur le jeu de données ayant permis de construire le référentiel !*

Quelles avancées pour une gestion durable du phosphore en AB ?  
 BORDEAUX, 21 novembre 2024



# Test des indices de nutrition P sur 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 temporaires et permanentes** : 20 parcelles vers épisaison des graminées
- **Mesures de biomasse + analyses de végétaux :**
  - **Analyse plante entière => indices de nutrition**
  - **Analyse foliaire (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> feuilles sous l'épi)**



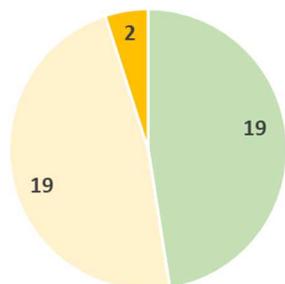
$$\text{Calcul d'indices de nutrition P : INP} = \frac{\text{Teneur en P mesurée}}{\text{Teneur en P critique}}$$



# Diagnostic de nutrition P de quelques parcelles de l'observatoire

## INP obtenus à partir de la teneur en azote

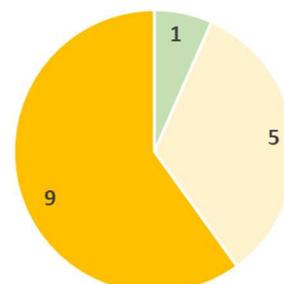
Répartition des parcelles de Blé tendre de l'observatoire par classe d'INP (relation teneur N)



- Satisfaisant (> 120)
- Un peu faible (75-120)
- Insuffisant (< 75)



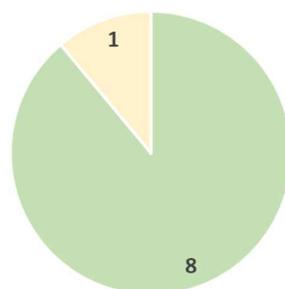
Répartition des parcelles de Soja de l'observatoire par classe d'INP (relation teneur N)



- Satisfaisant (> 100)
- Un peu faible (90-100)
- Insuffisant (< 90)



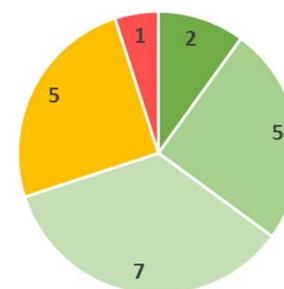
Répartition des parcelles de Luzerne de l'observatoire par classe d'INP (relation teneur N)



- Satisfaisant (> 115)
- Un peu faible (100-115)
- Insuffisant (< 100)



Répartition des parcelles de Prairies de l'observatoire par classe d'INP (relation teneur N)



- Excédentaire (> 120)
- Très satisfaisant (100-120)
- Satisfaisant (80-100)
- Insuffisant (60-80)
- Très insuffisant (< 60)





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

Blé tendre



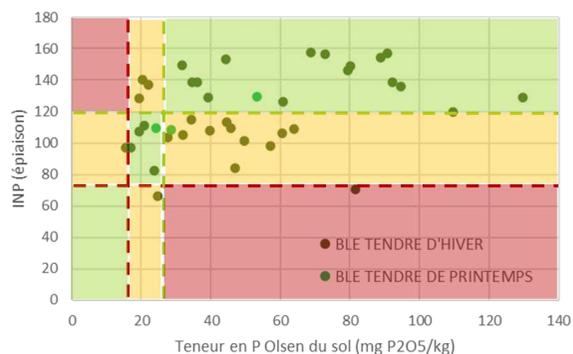
Soja



Luzerne

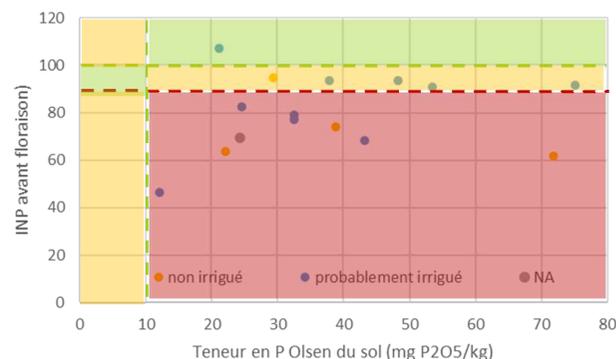


INP (teneur N) en fonction de la teneur en P du sol



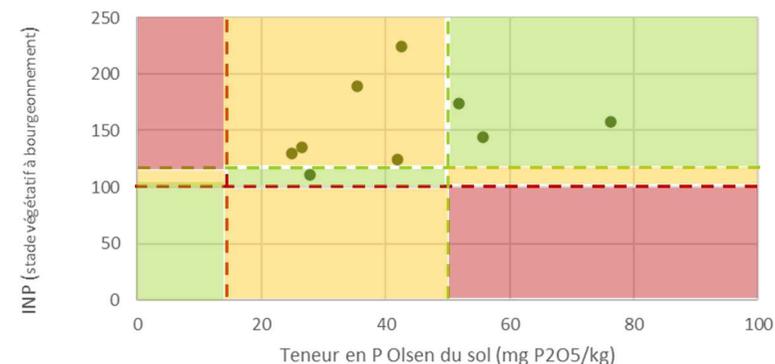
**Diagnosics concordants : 22/40**  
**Diagnosics plutôt cohérents : 17/40**  
**Diagnosics discordants : 1/40**

INP (teneur N) en fonction de la teneur en P du sol



**Diagnosics concordants : 1/15**  
**Diagnosics plutôt cohérents : 5/15**  
**Diagnosics discordants : 9/15**

INP (teneur N) en fonction de la teneur en P du sol



**Diagnosics concordants : 4/9**  
**Diagnosics plutôt cohérents : 5/9**  
**Diagnosics discordants : 0/9**



# Conclusion

- Les indices de nutrition phosphatée semblent être une alternative intéressante à l'analyse de terre pour diagnostiquer des problèmes de nutrition notamment en situations d'azote limitant
- Le diagnostic reposant sur l'analyse de terre semble toutefois plus précis que celui reposant sur les INP pour le blé, le maïs et le soja => intérêt pour consolider le diagnostic en cas de doute ?
- Pour ces 3 cultures, 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.
- A l'inverse, pour la luzerne, l'INP basé sur la mesure de biomasse semble le plus adapté.
- Les seuils d'interprétation nécessiteraient d'être testés dans un plus grand nombre de situations pour être définitivement validés (notamment soja et luzerne).
- 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)