

## *Présentation des posters de l'îlot 2*


# Evolution des méthodes, pratiques et bilans de fertilisation

Nombre de posters : 9



# *Vision générale de la fertilisation*





## Evolution des bilans régionaux de fertilisation P, K et Mg en France de 1988 à 2022

Léo BELLENGER

### Contexte et Objectif

Après plus de 30 dernières années, les rendements agricoles continuent en France de progresser. Cette croissance est associée à une réduction de 50% à 70% des intrants agricoles. Cette réduction est associée à la diminution des engrais azotés et phosphorés (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et à la stabilisation des engrais potassiques (K<sub>2</sub>O) et magnésiens (MgO). Cette réduction est associée à la diminution des engrais azotés et phosphorés (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et à la stabilisation des engrais potassiques (K<sub>2</sub>O) et magnésiens (MgO).

**Objectif :** Il est nécessaire d'évaluer un impact « plus ou moins favorable » des politiques de réduction des engrais azotés et phosphorés sur les rendements et les profits des agriculteurs pour une agriculture durable.

### Méthodologie

Pour réaliser cette évaluation, un potentiel basé sur l'agriculture et de la gestion des engrais en France (AGRI) a été développé. Ce modèle a été appliqué à l'ensemble des régions de la France métropolitaine en 1988 et en 2022. Cette méthode est basée sur des rendements de culture annuels et sur des données de culture annuelles.

- Visualiser les flux annuels d'intrants azotés, phosphorés et potassiques et les flux annuels de produits végétaux.
- Comparatif des données régionales.

Le modèle de bilan de fertilisation agricole de la France est basé sur les données de culture annuelles et les données de culture annuelles.

### Résultats : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

#### Apports

Les apports en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ont diminué de ~60% entre 1988 et 2022.

- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> d'origine animale : ~40%
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> d'origine minérale : ~60%
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> des autres apports organiques : ~10% depuis 2000.

#### Exportations

Les exportations en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ont baissé de ~50% entre 1988 et 2022.

- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> exporté par les cultures : ~40%
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> exporté par les pailles : ~60%

#### Soles

France : 1988 (+100 kg/ha), 2000 (+70 kg/ha), 2012 (+50 kg/ha), 2022 (+40 kg/ha).

- Le solde en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a évolué entre 1988 et 2022 dans les régions françaises (passant de 100 kg/ha à 40 kg/ha au niveau national).
- Entre 2000 et 2022, le solde en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> est resté stable au niveau national, mais avec des différences d'évolution au sein des régions.
- Les régions présentent une **diminution du solde en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**, ce qui est principalement dû à une **réduction des apports minéraux**.
- Les régions présentent une **augmentation du solde en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>**, ce qui est principalement dû à une **réduction des exportations** par les cultures et par les pailles, plus la stabilisation agricole de la région.

### Résultats : K<sub>2</sub>O

#### Apports

Les apports en K<sub>2</sub>O ont diminué de ~50% entre 1988 et 2022.

- K<sub>2</sub>O d'origine animale : ~50%
- K<sub>2</sub>O d'origine minérale : ~50%
- K<sub>2</sub>O des autres apports organiques : ~10% depuis 2000.

#### Exportations

Les exportations en K<sub>2</sub>O ont baissé de ~50% entre 1988 et 2022.

- K<sub>2</sub>O exporté par les cultures : ~50%
- K<sub>2</sub>O exporté par les pailles : ~50%

#### Soles

France : 1988 (+100 kg/ha), 2000 (+70 kg/ha), 2012 (+50 kg/ha), 2022 (+40 kg/ha).

- Le solde en K<sub>2</sub>O a évolué entre 1988 et 2022 dans les régions françaises (passant de 100 kg/ha à 40 kg/ha au niveau national).
- Entre 2000 et 2022, le solde en K<sub>2</sub>O est resté stable au niveau national, mais avec des différences d'évolution au sein des régions.
- Les régions présentent une **diminution du solde en K<sub>2</sub>O**, ce qui est principalement dû à une **réduction des apports minéraux**.
- Les régions présentent une **augmentation du solde en K<sub>2</sub>O**, ce qui est principalement dû à une **réduction des exportations** par les cultures et par les pailles.

### Résultats : MgO

#### Apports

Les apports en MgO ont diminué de ~50% entre 1988 et 2022.

- MgO d'origine animale : ~40%
- MgO d'origine minérale : ~60%
- MgO des autres apports organiques : ~10% depuis 2000.

#### Exportations

Les exportations en MgO ont baissé de ~50% entre 1988 et 2022.

- MgO exporté par les cultures : ~40%
- MgO exporté par les pailles : ~60%

#### Soles

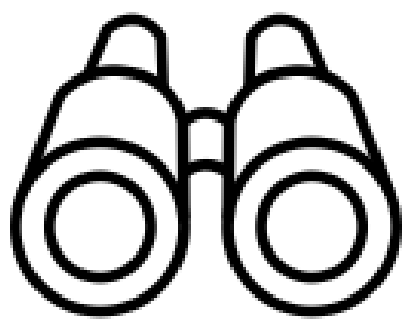
France : 2000 (+100 kg/ha), 2012 (+70 kg/ha), 2022 (+50 kg/ha).

- Le solde en MgO a évolué entre 2000 et 2022 dans les régions françaises (passant de 100 kg/ha à 50 kg/ha au niveau national).
- Le principal facteur responsable de cette diminution est la **réduction des apports minéraux**.
- Les régions présentent une **augmentation du solde en MgO**, ce qui est principalement dû à une **réduction des exportations** par les cultures et par les pailles.

### Conclusions

- Les apports azotés et organiques ont été et sont toujours en diminution sur la période 1988-2022. Cependant, ils ont été compensés par la hausse des intrants chimiques et des engrais.
- Les exportations en P et K ont baissé, ainsi que les rendements en P et K par hectare, ainsi que les rendements en P et K par hectare. Cette baisse a entraîné une diminution de la production, qui peut être attribuée en partie à la diminution des intrants azotés et organiques, ainsi qu'à la diminution des rendements en P et K par hectare.
- Le solde en P est resté positif, le solde en K est resté négatif, ce qui indique que les apports en P et K ont diminué plus vite que les rendements.
- Le solde en P est resté positif, le solde en K est resté négatif, ce qui indique que les apports en P et K ont diminué plus vite que les rendements.
- Le solde en P est resté positif, le solde en K est resté négatif, ce qui indique que les apports en P et K ont diminué plus vite que les rendements.
- Le solde en P est resté positif, le solde en K est resté négatif, ce qui indique que les apports en P et K ont diminué plus vite que les rendements.

Vision générale de la fertilisation



Auteur : Léo Bellenger  
Poster n°17



## Observatoire PhosphoBio : état des lieux de la fertilité en phosphore des sols de parcelles conduites en Agriculture Biologique

G. VERCEL<sup>(1)</sup>, A. ARTAUD<sup>(2)</sup>, P. BARBER<sup>(3)</sup>, E. BUREL<sup>(4)</sup>, J. DEMAY<sup>(5)</sup>, M. DUQUESNOY<sup>(6)</sup>, C. GLACHAN<sup>(7)</sup>,  
A. MOLLIER<sup>(8)</sup>, E.-A. SANNER<sup>(9)</sup>, M. VALLE<sup>(10)</sup>, M. MAIGNAN<sup>(11)</sup>  
<sup>(1)</sup> ARVALIS, <sup>(2)</sup> Chambre régionale d'Agriculture des Pays de la Loire, <sup>(3)</sup> Bordeaux Sciences Agro, <sup>(4)</sup> CREABIO, <sup>(5)</sup> INRAE SAS, <sup>(6)</sup> INRAE SAS, <sup>(7)</sup> Chambre d'Agriculture de Région Île de France, <sup>(8)</sup> AUREA AgroSciences



### CONTEXTE

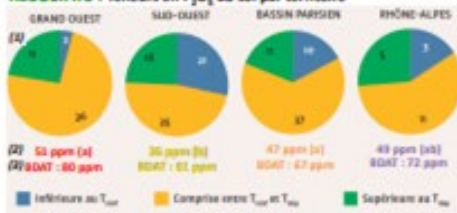
- Maintien d'une disponibilité suffisante en phosphore (P) pour les cultures : enjeu crucial en Agriculture Biologique (AB)
- Disponibilité limitée des engrais phosphatés utilisables en AB (faible efficacité de phosphates naturels, exclusion des effluents issus d'élevage industriel) : la gestion du Phosphore plus d'anticipation en AB qu'en agriculture conventionnelle (AC) **→ intérêt pour un état des lieux de la fertilité P des sols en AB**

### MATERIELS ET METHODES : CREATION D'UN OBSERVATOIRE POUR SUIVRE LA FERTILITE P DES SOLS EN AB

- ➔ Construction en 2021 d'un observatoire de 201 parcelles de grandes cultures (172) et de prairies permanentes (29) chez 157 agriculteurs bio
- ➔ Campagne d'analyse de terre sur toutes les parcelles (AUREA, hiver 2021/2022)
- ➔ Enquêtes sur les pratiques culturales auprès de 153 agriculteurs, portant sur 183 parcelles (projets étudiants Bordeaux Sciences Agro et ISARA, 2021/2022 et 2022/2023)
- ➔ Calcul de bilans fertilisation – exportations de P sur la période 2017 à 2021 sur 179 parcelles
- Bilan = quantités de fertilisants épandus x % P – Grains exportés x % P + Pailles exportées x % P pailles
- Hypothèse simplificatrice : Bilan au pHurage = 0



### RESULTATS : Teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> du sol par territoire



(1) Nombre de parcelles de l'observatoire par territoire dont la teneur en P est inférieure à T<sub>ref</sub>, comprise entre T<sub>ref</sub> et T<sub>sup</sub> et supérieure à T<sub>sup</sub> pour une culture à faible exigence en P.  
(2) Moyennes par territoire des teneurs en P (ppm de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) des parcelles de l'observatoire et (3) de la BDAT sur la période 2010-2014  
lettres entre parenthèses : groupes statistiques homogènes, test de comparaison de moyennes de Tukey, significativité à 5%

### Autres résultats sur les teneurs en P du sol

Teneurs en P du sol ne sont pas corrélées à l'ancienneté de conversion en AB, à la présence d'élevage sur l'exploitation, à l'occupation du sol (grandes cultures / prairies permanentes), à la présence de couverts végétaux ou à la teneur en MO du sol

### Bilans Fertilisation – Exportations de P

Gamme de valeurs calculées sur l'observatoire : de - 347 à + 501 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha en 5 ans  
Moyenne : + 36 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha en grandes cultures et + 22 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha en prairies permanentes

### Bilans de P à la parcelle corrélés positivement à la fréquence d'apports de fertilisants et négativement à la fréquence de légumineuses

Pas d'impact de l'ancienneté de conversion en AB, du territoire, de la présence ou non d'élevage sur l'exploitation et du mode d'occupation du sol de la parcelle  
Les bilans légèrement plus élevés en moyenne dans les départements à dominante polyculture-élevage que dans les départements de grandes cultures

### CONCLUSION

En AB, teneurs en P du sol globalement plus faibles qu'en conventionnel (comparaison à la BDAT) et majoritairement inférieures au seuil imposé 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 rythmes où la nutrition N des cultures dépend fortement des légumineuses : risque de carence en P plus important

Travaux conduits dans le cadre du projet CASDAR Phosphore

« Le Phosphore comme élément clé de la fertilité des sols en Agriculture Biologique : conception d'outils de diagnostic et évaluation de leviers d'action pour fertiliser et le gérer durablement »

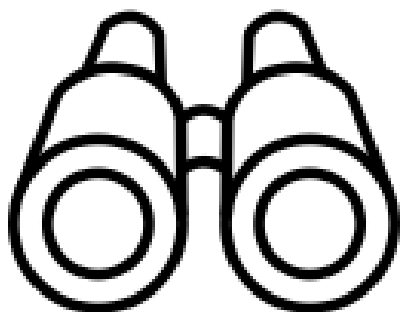


Autres partenaires associés au projet :



16<sup>e</sup> RENCONTRES Comifer-Gemas 2023 - 21-23 novembre 2023 - Tours

Vision générale de la fertilisation

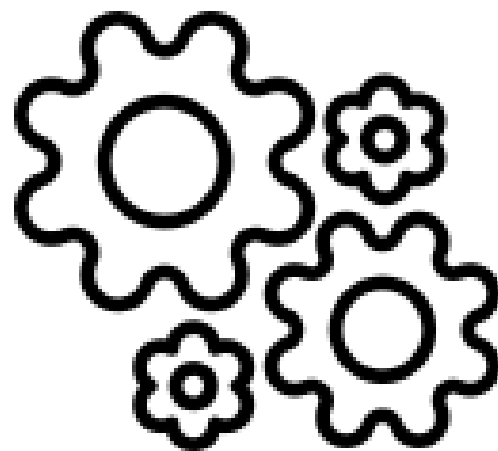


Auteur : Grégory Vercel  
Poster n° 16



# Compréhension des mécanismes de la dynamique des éléments dans le sol

Fertilité du sol

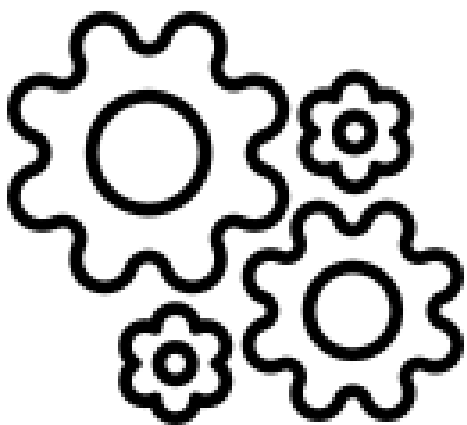


Seuil de P et  
amélioration des  
rendements

Différentes méthodes de  
calcul/pilotage



# Mécanismes de dynamiques des éléments dans le sol



## L'agriculture de précision : un atout pour rendre les sols plus résilients face au changement climatique



TERRENA  
Laurent VARVOUX  
Service Agronomie - Angers  
laurent.v@terrena.fr

### Contexte

Les rendements du blé stagnent voire baissent depuis 30 ans en France, en raison de plusieurs facteurs : changement climatique, diminution des apports de fertilisants PK, tassement des sols, modification des rotations.... Pour tenter de faire le lien entre la stagnation des rendements et la fertilité des sols, voici les réponses entendues auprès des agriculteurs de la grande région Ouest de la France (Pays de Loire, Poitou Charentes, Centre, Sud Bretagne, sud Normandie...):

- Les rendements en blé stagnent ou baissent depuis 30 ans
- La grande majorité des parcelles est hétérogène au niveau type de sol (en intra parcellaire)
- Ce sont dans les parcelles (ou dans les zones de parcelles) à meilleur potentiel (sol plus profond) que le phénomène (baisse de rendement) est plus marqué

### Etude sur les exploitations en agriculture de précision



Les étapes de la prestation

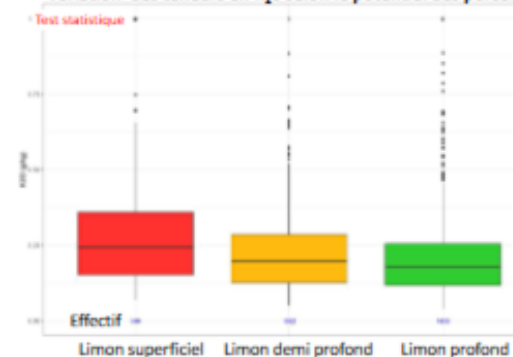
Partant de ce constat nous avons voulu étudier le lien entre la fertilité chimique des sols (teneurs en Phosphore, Potassium, Magnésium et pH) et le potentiel du sol (profondeur). Pour cela nous avons utilisé les données d'une centaine d'exploitations pratiquant l'agriculture de précision à partir du zonage des sols en intra parcellaire (méthode Fertilio e-RM expliquée ci-contre).



### De plus faibles teneurs PK en sols profonds

Ensuite pour le type de sol dominant de l'Ouest de la France, « le sol limoneux fragile sensible au compactage », nous avons croisé les teneurs de l'analyse chimique (pH eau, Phosphore Olsen, Potassium K<sub>2</sub>O, Magnésium MgO) avec le potentiel des sols découpé en 3 classes (superficiel, demi-profond, profond). Nous n'avons pas observé d'écart statistique de pH eau et de teneurs en Magnésie (MgO) entre les zones de potentiel différent. En revanche, nous avons constaté une tendance significative de baisse des teneurs en Phosphore et Potassium dans les zones à potentiel plus élevé (sol profond).

Variation des teneurs en K<sub>2</sub>O selon le potentiel des parcelles



### Discussion

Nous observons que les zones de sol à potentiel plus élevé (plus profond) ont en moyenne des teneurs plus faibles en Phosphore et Potassium. Une des explications possibles vient du fait que pendant des années, le niveau de fertilisation a été le même sur l'ensemble d'une parcelle donnée, mais le niveau d'exportation en éléments fertilisants était plus élevé dans les zones à plus fort potentiel (réserve utile en eau plus élevée), d'où une diminution progressive des teneurs dans les bonnes zones, phénomène amplifié par la diminution des apports en Phosphore et Potassium observée depuis 30 ans.

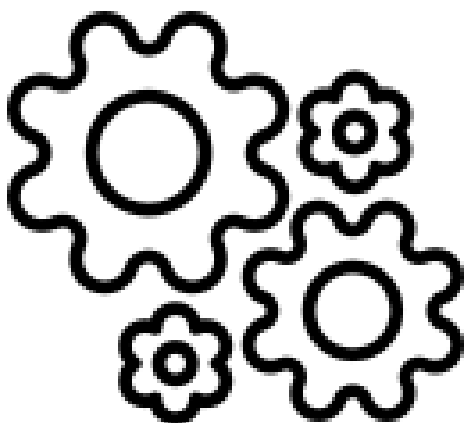
Ceci milite pour favoriser le développement de la modulation des intrants (fertilisants...) en intra parcellaire en fonction du type de sol et du potentiel de rendement.

Sachant qu'un sol fertile produit plus, il stocke donc plus de carbone, pollue moins... L'agriculture de précision, en favorisant la connaissance des sols, est une vraie opportunité pour pratiquer une Agriculture à Impacts Positifs, et améliorer ainsi la résilience des sols face au changement climatique. La bonne dose au bon moment mais au bon endroit !

Auteur : Laurent  
Varvoux  
Poster n°11



# Mécanismes de dynamiques des éléments dans le sol



## AMPLITUDE DE LA DOSE OPTIMALE D'AZOTE AU SEIN D'UNE PARCELLE CONSÉQUENCES SUR LA MODULATION INTRA-PARCELLAIRE

BRUEL V<sup>1</sup>, BERTIN E<sup>1</sup>, DARBIN E<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>INRAE, UR1213, F-63122, CLERMONT-FERRAND, FRANCE

**Objectif : mieux comprendre les relations entre Potentiels de Sol, Climat et Prix de Marché dans la détermination de la Dose Optimale d'Azote, afin d'améliorer la modulation intra-parcellaire**

### DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

<b>Double facteur</b> - Réserve utile : 1 essai par zone de RU - Dose d'azote : de 5 à 7 doses/essai élémentaire	<b>27</b> Dispositifs expérimentaux	<b>2</b> Essais /parcelle	<b>3</b> Répétitions/ Essai élémentaire	<b>7</b> Campagnes (2015 à 2023)	<b>4</b> Grandes Régions
--	-------------------------------------	---------------------------	---	----------------------------------	--------------------------

**TRAITEMENT DE DONNÉES**  
Standardisation ; Modélisation des courbes de réponses (Régression polynomiale ou 1<sup>er</sup> ordre), Analyse multifactorielle (ACP, ACM), Analyse statistique (ANOVA, Chi2)

### L'HYPOTHÈSE DE DÉPART

Les écarts de dose au sein d'une même parcelle sont liés aux variabilités de :  
- potentialité de sol et chose de rendements attendus  
- caractéristiques en azote de sol  
- Fertilité de l'azote apporté

**DOSE OPTIMALE CALCULÉE EN FONCTION DU RATIO PRIX DE L'AZOTE / PRIX DE VENTE DU BLÉ**  
Valeur moyenne constatée sur les 7 campagnes : 0,052

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

**3 types de dispositifs selon les courbes de réponse par niveau de RU**

**Type A** : à celle des sols à faible RU

**Type B** : à celle des sols à forte RU

**Type C** : à celle des sols à faible RU

**Les types de courbes de réponse (Fig. 1, 2 et 3) sont expliqués par :**

**- Le contexte climatique**

Sur les 7 campagnes, le ratio prix unité d'azote (€/kg) / prix du quintal (q) de blé varie de 0,012 (A) à 0,052 (C) et 0,024 (B) entraînant une variation de la dose optimale pour chaque essai.

Typologie	0,012	0,032	0,052
A	21%	27%	27%
B	42%	47%	38%
C	35%	26%	35%

**- Le contexte économique**

Les prix sont variés la dose optimale d'azote, issue de sol pour les sols à fortes ou faibles RU (Fig. 4).

### CONCLUSIONS

Les écarts de rendements entre les zones à faible et forte RU peuvent atteindre 40 q au sein d'une même parcelle, toutes choses étant égales par ailleurs. La dose optimale d'azote varie entre les zones de potentiel jusqu'à 130 u (amplitude moyenne constatée sur les 27 dispositifs : 44 uN)

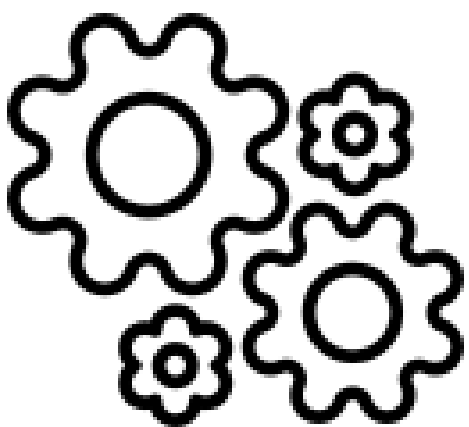
La détermination de la dose optimale par zone doit non seulement intégrer les données agronomiques (niveau de RU, différenciation des objectifs de rendement, variabilité de la fourniture en azote des sols, ...) mais aussi prendre en compte la pluviométrie de printemps (prévisions) et les prix de marché.

« 16<sup>e</sup> Rencontres Comifer-Gemas : 21-22 novembre 2023 – Tours »

Auteur : Valentin Bruel  
Poster n°12



# Mécanismes de dynamiques des éléments dans le sol



## INTERACTIONS ENTRE FERTILITÉ PHOSPHATÉE ET AZOTÉE POUR LA CULTURE DE MAÏS

Daniel HANOCQ, Laure BEFF, Yvon LAMBERT, Thierry MORVAN

CHAMBRE D'AGRICULTURE BRETAGNE

**Un peu d'histoire**

Les sols bretons sont naturellement carencés en phosphore. Depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, des apports considérables ont été réalisés, d'abord essentiellement par des scories puis par des déjections animales. La fertilité phosphatée des sols du massif armoricain a ainsi été nettement améliorée.

Dans ce contexte d'enrichissement de sols à très fort pouvoir fixateur en phosphore, les chambres d'agriculture de Bretagne ont cherché à adapter une stratégie de fertilisation et mis en place une expérimentation de longue durée sur la station expérimentale de Kerguéhennec à Bignan (56).

9 traitements en composition

	PO	P1	P2
K0	K0P0	K0P1	K0P2
K1	K1P0	K1P1	K1P2
K2	K2P0	K2P1	K2P2

PO et K0 : Impasse depuis 1985  
 P1 et P2 : 50 et 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>  
 K1 et K2 : 100 et 200 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>

Dispositif : ensa cross, 4 répétitions  
 Cultures : Blé, Maïs, Orge, Pois.

Teneur initiale du sol : 430 mg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Dyer, 80 mg kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Olsen et 330 mg kg<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O échangeable.

**L'impasse continue conduit à des baisses de rendement**

Avec des dynamiques différentes selon les cultures, les impasses répétées en phosphore conduisent à des baisses de rendement dépassant 10% de la moyenne des modalités non limitante en P au bout d'une dizaine d'années alors même que la teneur du sol reste élevée (Hanocq, 2017).

**Une forte carence en azote défavorise la modalité non limitante en phosphore**

Pour les besoins d'une autre expérimentation l'essai a été conduit sans apport d'azote sur 3 cultures de maïs. Les rendements ont rapidement baissé, en particulier la 3<sup>ème</sup> année d'impasse de fertilisation azotée.

Dans ces conditions, les conséquences de la carence azotée sont aggravées dans les modalités non limitantes en P.

Il semble donc qu'en favorisant le développement de la biomasse en début de cycle, une forte disponibilité en phosphore accroisse les besoins ultérieurs du maïs en azote.

**Une fertilité phosphatée réduite diminue la capacité du maïs à valoriser l'azote disponible**

Dans le cadre de la validation de la méthode Sol-AID, un réseau de courbes de réponse à l'azote a été mis en place sur 24 sites bretons de culture de maïs en 2017 et 2018. Parmi ces sites, nous avons fait 2 groupes selon leur fertilité phosphatée : un groupe « P+ » dont la teneur en P est non limitante (14 parcelles, 18 essais) et un groupe « P- » pour les parcelles dont la teneur en P est potentiellement limitante pour un maïs (8 parcelles, 15 essais).

Moyenne des courbes de réponse du rendement et de l'absorption d'azote à des doses croissantes d'azote apporté selon le niveau de fertilité phosphatée du sol. Réseau Sol-AID 2017-2018.

Coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CUE)

Moyenne des coefficients apparents d'utilisation de l'azote du maïs selon le niveau de fertilité phosphatée du sol. Réseau Sol-AID 2017-2018.

Les parcelles de fertilité phosphatée réduite (P-) ont produit un rendement à l'optimum d'azote de 15% inférieur par rapport au groupe P+.

Pour une même dose d'azote, la quantité d'azote absorbé est réduite de 20 à 25 kg N ha<sup>-1</sup> et le CAU de 20 à 25 %.

**Synthèse**

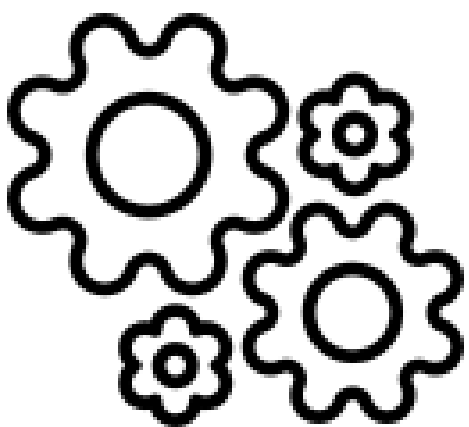
- Dans un contexte de carence azotée avec des disponibilités croissantes en phosphore, une offre forte en P augmente les besoins d'azote et accroît les baisses de rendement liés à la carence azotée.
- Dans un contexte de carence phosphatée avec des disponibilités croissantes en azote, la carence phosphatée dégrade les rendements et réduit fortement l'absorption d'azote ainsi que l'efficacité de l'azote apporté.

Auteur : Daniel Hanocq  
Poster n°15





# Mécanismes de dynamiques des éléments dans le sol



## POUR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA NUTRITION DES PLANTES EN AGRICULTURE DE CONSERVATION DES SOLS

AGATHE LEMOINE, VIRGINIE REDU, JULES MÊLÉ - CHAMBRES D'AGRICULTURE PAYS DE LA LOIRE  
MATHIEU LOREN - ÉCOLE SUPÉRIEURE DES AGRICULTURES ANGIERS

### LE PROJET NUTRIPAC

**Objectifs :**

- Identifier d'éventuelles conditions de milieu propres à l'ACS
- Évaluer des pratiques spécifiques pour améliorer la nutrition des plantes
- Mieux accompagner les agriculteurs en ACS dans leurs règles de décision

**Projet NutripAC**  
« Nutrition des plantes en Agriculture de Conservation »  
3 ans : 2021 → 2024

**Objectifs du projet :**

- Identifier d'éventuelles conditions de milieu propres à l'ACS
- Évaluer des pratiques spécifiques pour améliorer la nutrition des plantes
- Mieux accompagner les agriculteurs en ACS dans leurs règles de décision

Culture : Blé tendre d'hiver

### OBSERVATOIRE DE PRATIQUES (2021 → 2024)

**Objectifs :**

- Identifier les pratiques innovantes de nutrition du blé tendre d'hiver testées par les agriculteurs ligériens en ACS
- Émettre des hypothèses quant aux conditions de milieu propres à l'ACS

**Observatoire des pratiques :**

- Pratiques innovantes de nutrition
- Pratiques innovantes de gestion des résidus
- Pratiques innovantes de gestion de l'eau
- Pratiques innovantes de gestion des engrais
- Pratiques innovantes de gestion des produits phytosanitaires
- Pratiques innovantes de gestion des produits vétérinaires
- Pratiques innovantes de gestion des produits vétérinaires
- Pratiques innovantes de gestion des produits vétérinaires

**28 parcelles (2022 à 2023)**  
**39 pratiques testées**

En 2023, résultats obtenus sans fertiliser (NPK) : 33 au démarrage, 6 en végétation

**Dispositif en bandes :**

- Comparaison intra-parcellaire : une pratique et sa bande témoin
- Comparaison inter-parcellaire non réalisable en raison de contextes parcelles différents

DVI : Index de nutrition azotée

### LES PLATEFORMES EXPÉRIMENTALES (2022 → 2024)

**Objectifs :**

- Évaluer des hypothèses de l'observatoire dans un contexte expérimental
- Évaluer quelques stratégies innovantes de gestion de la nutrition du blé
- Évaluer le rôle d'un couvert permanent de légumineuses dans la nutrition du blé

**3 plateformes pour 3 systèmes représentatifs en Pays de la Loire :**

- ACS conventionnel** : Impacts de l'apport d'un engrais localisé au semis en SD par rapport à un travail du sol superficiel ?
- Polyculture-élevage** : Fertilité entretenue par les effluents d'élevage, semis direct
- Agriculture Biologique** : Impacts de l'apport d'oligo-éléments en foliaire sur la nutrition de la plante ?

Maximum 5 cm de profondeur

Travail du sol superficiel

### ACS couvert permanent de légumineuses

Système conventionnel, semis direct dans un couvert vivant

→ Impacts d'un apport précoce d'azote en sortie d'hiver ?

**Focus sur la plateforme ACS conventionnel en 2023**

Au semis, on observe des reliquats plus élevés sur les modalités TCS (travail superficiel à 5 cm) par rapport au semis direct (SD) : le travail du sol permet bien une minéralisation. Cependant, sortie hiver et avant le 1<sup>er</sup> apport d'azote, il n'y a plus de différences sur les reliquats.

**Indice de nutrition azotée**

Le graphique ci-contre illustre la dynamique de nutrition azotée (DVI) selon les modalités testées : peu de différence entre elles, seul le témoin non fertilisé se distingue. La modalité SD démarre sembler légèrement au-dessus des autres, avec qui perdure tout le long du cycle.

### ENCORE UNE ANNÉE POUR NUTRIPAC

Projet exploratoire, NutripAC souhaite apporter un éclairage sur la nutrition des plantes en ACS pour mieux accompagner les agriculteurs souhaitant adopter ces techniques. Les résultats définitifs du projet seront formulés l'année prochaine. Le sujet est complexe et les pratiques testées sur le terrain sont nombreuses, la question de l'adaptation des OAD à ses conditions se pose, il convient d'être prudent sur l'interprétation des premiers résultats obtenus, à chaque fois, dans des conditions de milieux spécifiques.

Auteur : Agathe Lemoine  
Poster n°14



# Les outils pour mieux piloter la fertilisation

Littérature sur le  
 $P$  biodisponible



Seuil de P et  
amélioration des  
rendements

Différentes méthodes de  
calcul/pilotage



# Outils de pilotage



## Quelle méthode pour calculer les seuils d'impasse en P ?

L. Jordan-Meille<sup>1</sup>, A. Mollier<sup>1</sup>, P. Pouillon<sup>2</sup>, M. Glendining<sup>3</sup>, C. Jouany<sup>3</sup>, J.-B. Gratecap<sup>1</sup>, D. Hanocq<sup>5</sup>, C. Montagnier<sup>1</sup>, P. Denoroy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMR 8134 Sol-Pl. Agri - INRAE, <sup>2</sup>Robustness Research, <sup>3</sup>UMR AGR INRAE, <sup>4</sup>CA 28, <sup>5</sup>CRA Bretagne, <sup>6</sup>UMR ECOSYS INRAE

Le raisonnement de la fertilisation P se base sur un diagnostic, comparant une valeur de  $P_{\text{disponible}}$  du sol (e.g.  $P_{\text{Olsen}}$ ) à une valeur critique, dite « seuil d'impasse » ( $P_{\text{imp}}$ ). Le calcul de  $P_{\text{imp}}$  se base sur des couples de données « Rendement -  $P_{\text{disponible}}$  », généralement issues d'essais de longue durée.

L'objectif de cette étude est de choisir une méthode de traitement des données d'essais de fertilisation pour calculer des seuils d'impasse, en s'appuyant sur des critères de robustesse et de qualité d'ajustement.

### Modèles testés (+ 50 articles)

Linéaire – Plateau

Quadratique – Plateau

Mitscherlich

Cate-Nelson

### Critères retenus pour comparer les modèles

Qualité de l'ajustement (RMSE = écart quadratique moyen)

Variabilité inter-annuelle (Coeff. Var.)

Capacité à converger dans procédure ajustement non linéaire

Risque valeurs aberrantes :  
seuil  $\notin$  domaine valeurs exp.

Si  $\leq$  de 10% de données  $\leq$  ou  $\geq$  au seuil,  
alors donnée non retenu

### Données utilisées pour les tests

	Auvergne	Grignon-Jellefille	Nord-hervee	Midi-pyrenees	Département 82	Sauveterre 82
Localisation	France (49° 31')	France (46° 24')	France (49° 34')	France (42° 38')	France (44° 04')	France (44° 04')
Dates démarrage - fin	1987 - 2012	1988 - 2012	1985 - 2012	1978 - 2012	1956 - 2012	1956 - 2012
Période utilisée	1991 - 2002	2008 - 2012	1997 - 2003	1978 - 2002	1976 - 1998	1977 - 1998
Argile (%)	20	20	20	27	20	20
pH	7,8	8,1	8,3	8,8	7 - 8	6,8 - 7,2
CEC (mmol kg <sup>-1</sup> )	13,6	21	18	22	16	20,5
CaCO <sub>3</sub> %	2	1,8	0	0	0	0,6
Type sol	Sol brun lessivé	Éboulis limoneux	Débris limoneux	Sol brun lessivé	Sol brun lessivé	Argile hydromorphe

blé dur

autres

### Résultats

Critère	Indicateur	Lin.-Plateau	Quadrat.-Plateau	Mitscherlich	Cate-Nelson
Qualité de l'ajustement	RMSE	=	=	=	non pertinent
Minimiser variabilité interannuelle	Cv	- (NS)	- (NS)	+ (NS)	+ (NS)
Minimiser valeur aberrante	> or < decils	+	-	-	+
Convergence	partage	+	-	-	+
Signification agronomique du seuil		+	+	+	-
Classement des seuils (1, faible, 4 haut)		2	4	3	1

→ La méthode Linéaire-Plateau est conseillée pour le traitement des données des essais de fertilisation pour le calcul de  $P_{\text{imp}}$  du fait de sa supériorité sur les critères de robustesse et de simplicité de calcul.



Rencontre de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS : 21-22 novembre 2023 Tours

Auteur : Lionel Jordan-Meille  
Poster n°9





# Outils de pilotage



## Proposition d'un référentiel pour raisonner les apports en P et K en culture de tomate et de laitue

Rousselin A. (APREL), Védie H. (GRAB), Gaillon C. (APREL), Corneille T. (CETA de Châteaurenard), Lecompte F. (INRAE)

Le prototype issu du projet REVEL a été construit à partir de la bibliographie et de données expérimentales. Il propose une base pour raisonner les apports de P et K en laitue et tomate en sol, ce qui permet d'envisager des réductions d'apports par rapport aux engrais complets. Il a été testé sur un nombre restreint d'essais sous abris en Provence. Une validation sur un plus grand nombre de parcelles est nécessaire afin de s'assurer qu'il est applicable dans différents contextes pédo-climatiques.

**Références utilisées pour construire le prototype**

- La méthode s'appuie sur la logique des grilles du COMIFER (2009), elle tient compte de la teneur en  $P_2O_5$  Olsen ou  $K_2O$  échangeable du sol et de l'exigence des cultures
- Les valeurs seuils de concentration dans le sol ont été définies sur la base de références bibliographiques, d'Arvalis et de l'INRAE d'Avignon. La disponibilité du potassium étant très dépendante de la teneur du sol en argile, la CEC a été intégrée à l'outil pour moduler les valeurs seuils de  $K_2O$ .
- Les valeurs d'exportations en  $P_2O_5$  et  $K_2O$  ont été définies sur la base des références de l'INRAE et du Comifer.

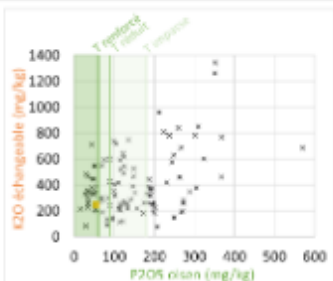


Figure : Etat des lieux des teneurs en  $P_2O_5$  Olsen et  $K_2O$  échangeable dans les sols maraichers de Provence (n=105 analyses) et positionnement des seuils du référentiel salade -  $P_2O_5$

Selon le relevé de 105 analyses de sol (Figure), le prototype préconise :

- une impasse en K dans 63% des parcelles en tomate et laitue
- une impasse en P dans 32 % des parcelles en laitue et 44% des parcelles en tomate

Exemple : Essai salade

1 – Analyse de sol bases échangeables avant la culture  
 $P_2O_5$  Olsen = 53,7 mg/kg  
 $K_2O$  échangeable = 251 mg/kg    CEC = 9,09 meq/100g

2 – Lire les apports conseillés dans les grilles

	Teneurs en $P_2O_5$ dans le sol			
	T renforcé 60 ppm	T réduit 90 ppm	T impasse 180 ppm	
Apports de $P_2O_5$	2 x Exp*	1 x Exp*	0,5 x Exp*	0


CEC (meq/100 g)	Teneurs en $K_2O$ dans le sol			
	T renforcé	T réduit	T impasse	
CEC < 8	120 ppm	160 ppm	200 ppm	
8 < CEC < 11	150 ppm	210 ppm	260 ppm	
11 < CEC < 15	180 ppm	260 ppm	330 ppm	
CEC > 15	200 ppm	300 ppm	400 ppm	

	1,5 x Exp*	1 x Exp*	0,5 x Exp*	0
Apports de $K_2O$				


3- Calculer les apports  
Rendement attendu = 52 t/ha  
Exportations = Teneur x Rendement  
Apports  $P_2O_5$  = 2 x Exportations = 72,8 u  $P_2O_5$  /ha  
Apports de  $K_2O$  = 0,5 x Exportations = 94,9 u  $K_2O$ /ha

**Résultats**  
→ Réduction des apports en P de 50 % par rapport à la fertilisation avec l'engrais complet  
→ Pas d'impact sur le rendement des 4 variétés testées

Le projet REVEL (2018-2022) a été financé avec le concours de l'Union Européenne avec le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural et de la Région SUD-PACA.



Le projet a été labellisé :



16<sup>ème</sup> Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse Comifer-Gemas : 21-22 novembre 2023 - Tours

Auteur : Aurélie  
Rousselin  
Poster n°10



Auteur : Damien Eybalin  
Poster n°13

# Outils de pilotage



**comifer** **AIRBUS** **FAKWALE**

## Evaluation d'une méthode de pilotage de la fertilisation azotée sur culture de pomme de terre

Améliorer l'efficacité de l'azote et l'agriculture de précision

BYBALIN Damien\*, DEBIN Fanny\*\*, VERICE Gildrey\*\*, MANNON Cyril\*\*, TOUPIS Jean\*, DE SOLAN Benoît\*\*, BÉLICHÈRE Kévin\*, FOURNIER Jérôme\*, COHEN Jean-Pierre\*  
\*INRAE - UR1212 - Systèmes d'élevage et UR1213 - Systèmes d'élevage pour les zones d'élevage  
\*\*INRAE - UR1212 - Systèmes d'élevage et UR1213 - Systèmes d'élevage pour les zones d'élevage

### INTRODUCTION

Les fertilisants azotés ont de grands impacts sur le rendement et la qualité. Cependant, un excès d'azote génère une plus faible efficacité d'utilisation de l'azote (UEA) et des risques accrus de pertes d'azote qui peuvent avoir un impact sur l'environnement (pollution de l'eau, de l'air et des sols, notamment les émissions de GES). La pomme de terre présente une NUE relativement faible (de l'ordre de 50 à 60 %) par rapport à d'autres cultures, en raison de son système racinaire naturellement peu profond et peu développé. Les effets, l'optimisation de l'efficacité d'utilisation de l'azote (UEA) pour la pomme de terre constitue un défi pour les producteurs de pommes de terre mais également pour la rentabilité et la compétitivité des apiculteurs. Parmi les nombreuses façons d'optimiser la fertilisation azotée, la répartition de l'application de l'azote constitue une approche adaptée pour mieux comprendre ses besoins en azote et à son usage. Après les dates de plantation, la variabilité de culture et les pratiques de gestion de la fertilisation sont des leviers clés pour faire face à l'adaptation aux changements climatiques. Plusieurs systèmes d'aide à la décision ont été développés pour optimiser les apports d'engrais azotés. Parmi ceux-ci, ceux qui utilisent des technologies de télédétection ont été devenues de plus en plus répandues et appliqués sur divers domaines, notamment pour la culture de blé, mais peu de travaux ont été réalisés pour d'autres cultures, telles que la pomme de terre.

### Objectif du projet: pouvons-nous développer un Système d'Aide à la Décision (OAD) pour la fertilisation azotée dans la culture de la pomme de terre ?

### Questions de recherche :

**Taux :** Quelle quantité d'azote totale doit être appliquée à la plantation ?  
**Rendement :** Quels sont les taux appropriés de quantités d'azote supplémentaires ?  
**Temps :** À quelles étapes du cycle de la culture l'azote supplémentaire est-il plus efficace ?  
**Diagnostic :** La culture de pommes de terre souffre-t-elle d'une carence en azote ?  
**Prévision :** Combien d'azote la culture de pommes de terre a-t-elle besoin en termes de fertilisation ?

**Action :** Construire un modèle pour intégrer l'apport azoté à la culture de pommes de terre pendant la saison de croissance et fournir des directives aux agriculteurs sur la manière de modifier leurs pratiques de fertilisation.

### Étape 1: Recueil sur le terrain à l'aide de sondes de conductivité électrique (CE) pendant 28 à 30 jours après l'émergence

### Étape 2: Interprétation de l'indicateur de l'état d'azote de la culture et des données en entrée à l'aide de modèles.

### Étape 3: Conception des règles de fertilisation pendant la culture

### METHODE Données : 3 réseaux d'essais - 120 essais de pomme de terre

1. **Données de fertilisation :** 49 essais en micro-parcelles avec des traitements d'azote croissants (0/20/40/60).
2. **Calculateur de modèle :** 50 essais en micro-parcelles avec des images de drone (2019-2021).
3. **Validation du modèle :** 80 essais sur des bandes de terrain à la ferme pour évaluer les performances du modèle, avec des images de drone et de satellite (2019-2021).

### Les réseaux d'essais couvrent les principales zones de production de pommes de terre en France.

### Traitement des mesures des capteurs et des données agronomiques

**Données agronomiques :** Densité de plants, hauteur, rendement, etc.

**Données de terrain :** Images de drone, images de satellite, etc.

**Données de laboratoire :** Analyse de sol, etc.

**Données de terrain :** Rendement (t/ha) et Rendement commercialisable (t/ha), Matière sèche (t/ha), Densité de la partie aérienne (t/ha), Absorption d'azote par la partie aérienne et par le tubercule jusqu'à la destruction de la partie aérienne (kg/ha), Taux d'azote minéral dans le sol.

**Données de terrain :** Analyse chimique de variétés et de rendements, Apportement de modèles de calcul de données à l'aide pour déterminer les règles pour chaque variété commerciale, Modèle météo après une analyse des données par zone, Apportement de modèles pour déterminer les meilleurs moments, fréquences et lieux d'application, Trois modèles combinant les indices PROSO et l'indicateur de l'état de la culture.

### Résultats et Conclusions

#### 1. LE RAPPORT ET LE TAUX : Comment d'azote doit être appliqué à la plantation ?

**PROGNOSTIC :** Le taux de la culture de pommes de terre marque-t-elle d'azote ?

**PROGNOSTIC :** De combien d'azote la culture de pommes de terre a-t-elle besoin en fertilisation ?

#### 2. TEMPS : à quelles étapes du cycle de la culture l'apport d'azote est-il le plus efficace ?

### DISCUSSION et PROCHAINES ÉTAPES

Ces modèles peuvent être intégrés dans les Systèmes d'Aide à la Décision pour la répartition de l'azote dans la culture de pommes de terre.

**Comment pouvons-nous évaluer la validité du modèle ?**

- Évaluer les degrés jours (DD) et les dates critiques à partir de la date de plantation (Barthe et al., 2023).
- Prendre en compte l'effet possible du groupe de précocité de la variété.
- Ces résultats, qui proviennent principalement d'essais réalisés dans les régions Hauts-de-France, Champagne-Ardenne et Centre, ne sont valables que dans ce contexte.
- Des références supplémentaires dans d'autres situations seraient nécessaires pour évaluer les performances des modèles de terrain de terrain.

**Comment pouvons-nous améliorer les performances du modèle ?**

- Améliorer la cohérence des données en cas d'une forte hétérogénéité des sols des parcelles.
- Explorer la possibilité d'un modèle sans données fertilisantes.
- Mettre en œuvre le modèle de conseil actualisé avec la modélisation de la croissance (modèle de biomasse).

**Comment pouvons-nous améliorer l'évaluation du modèle ?**

- Quantifier la réduction des pertes d'azote à l'aide du Système d'Aide à la Décision (OAD).
- Quantifier l'efficacité de l'utilisation de l'azote par unité d'engrais (UEA) en fonction du groupe de variétés de pommes de terre, du type d'engrais et des conditions pédo-climatiques.

**Resources méthodologiques**

**PROTODUR :** Méthode de la télédétection, types de capteurs utilisés en agriculture, comment calculer et comprendre les indices de végétation, Conception d'un outil sur le terrain pour des agriculteurs à la ferme. Bonnes pratiques pour la culture de données des capteurs (je comprends l'échantillonnage, l'interprétation, l'importance de la lumière, la géolocalisation, les sites d'application...)

**CODE :** Analyses de la recherche dirigée par les agriculteurs. Code de la recherche dirigée par les agriculteurs. Le processus : Poser des questions utiles, conceptualiser les pratiques avant de commencer : Clavier, Engrais, Arrière, Code d'un site d'essai agricole, conception de l'essai, Application des traitements, État de la culture, Utilisation efficace de la cartographie des rendements, Utilisation des données de référence agricole comme indicateur de rendement. Analyse des données de référence agricole.

**Les essais DE de 2022 en variétés de pommes de terre ont été interrompus en 2022-2023 en raison d'un manque de précipitations (moins de 100 mm).**

