

Actualiser l'estimation des seuils d'impasse P pour les grandes cultures en France : des propositions opérationnelles

P.Denoroy ⁽¹⁾, A.Mollier ⁽¹⁾, C.Jouany ⁽²⁾, C.Montagnier ⁽³⁾, P.Castillon ^{(4)†}, R.Duval ⁽⁵⁾, L.Champolivier ⁽⁶⁾, D.Hanocq ⁽⁷⁾, J.-B.Gratecap ⁽⁸⁾, F.Thiebault ⁽⁹⁾, P.Gérard ⁽¹⁰⁾, C.Dizien ⁽¹¹⁾, L.Jordan-Meille ⁽¹⁾

⁽¹⁾ UMR INRAE Bordeaux Science Agro ISPA, ⁽²⁾ UMR INRAE- INPT Toulouse AGIR, ⁽³⁾ UMR INRAE-AgroParisTech ECOSYS, ⁽⁴⁾ Arvalis, ⁽⁵⁾ ITB, ⁽⁶⁾ Terre-Inovia, ⁽⁷⁾ Chambre d'Agriculture de Bretagne, ⁽⁸⁾ Chambre d'Agriculture d'Eure et Loir, ⁽⁹⁾ CETA de Romilly, ⁽¹⁰⁾ Coopérative Vivescia, ⁽¹¹⁾ Groupe In-Vivo

Préambule

On présente ici des travaux issus de réflexions en cours dans le groupe PKMg du COMIFER pour actualiser le “raisonnement COMIFER ” actuel. Mais il ne s'agit pas d'une présentation issue de ce groupe COMIFER, elle n'engage que les signataires de cette présentation.

1) Pourquoi ces travaux ?

Le raisonnement de la fertilisation P des grandes cultures en France se fait suivant la “grille COMIFER”, issue des travaux qui ont duré au long des années 1980-90 et d'abord publiées en 1993 (COMIFER Groupe PK, 1993) puis actualisée à plusieurs reprises (COMIFER groupe PK, 1995 ; COMIFER Groupe PK, 1997 ; COMIFER Groupe PKMg, 2007, 2009). Il a également fait l'objet récemment d'un nouveau document de vulgarisation (COMIFER groupe PKMg, 2019 ; <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>).

Ces travaux, et surtout les bases expérimentales sur lesquelles ils s'appuient, datent toutefois de plus de 30 ans et depuis quelques années, le groupe PKMg travaille à leur actualisation en tenant compte des nouveaux concepts et nouvelles références apparues.

Le raisonnement se base sur l'interprétation de l'analyse de terre. En France, les méthodes d'extraction du P utilisées sont les méthodes Dyer (acide citrique), Joret-Hebert (oxalate d'ammonium) et Olsen (bicarbonate de sodium). Des trois, seule la méthode Olsen est utilisée internationalement et dispose donc de nombreuses références à l'étranger. C'est également la méthode la plus utilisée en France.

Un concept important dans le raisonnement COMIFER, partagé avec pratiquement tous les systèmes de raisonnement du P au monde, est la notion de “seuil critique” (P_{crit}) appelée en France “seuil d'impasse” (T_{imp}). Il s'agit de la valeur d'analyse de terre au-dessus de laquelle la culture ne répond pas à un apport de fertilisant ; elle autorise donc une « impasse » -abstention- de fertilisation. C'est, réciproquement, le niveau de teneur en P extractible du sol en dessous duquel le rendement commence à être affecté par la déficience en P, donc le niveau qui justifie un apport de fertilisant.



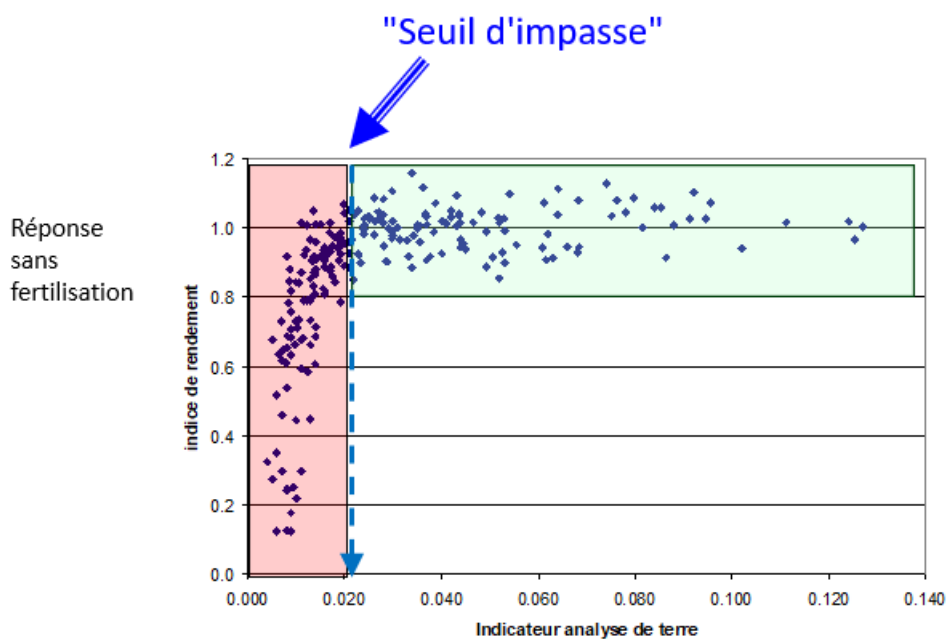


Figure 1 : La notion de « seuil critique » ou « seuil d’impasse »

Des teneurs analytiques correspondant au “seuil d’impasse” ont été proposées par le COMIFER (COMIFER, 1997) après analyse des résultats d’une centaine d’essais de terrain qui ont eu lieu dans les années 1970-1990. Ces références ont surtout été régionalisées (c’est-à-dire associés à des nomenclatures régionales des sols) par Arvalis (ITCF à l’époque) : https://www.arvalis.fr/infos-techniques/connaitre-les-teneurs-seuils-dans-sa-region-selon-son-sol/seuils_pk_regionaux_v4_1781405251401043340.pdf.

Pour une culture donnée, le seuil d’impasse dépend à la fois du type de sol, et de la classe de sensibilité de la culture à la déficience en P (dans la terminologie COMIFER « classe d’exigence »).

A la lumière des expérimentations récentes, ces concepts ne semblent pas fondamentalement remis en cause, mais plusieurs raisons amènent à envisager de revoir les valeurs de seuil proposées :

- La généralisation de l’analyse de terre “Olsen” alors que la quasi-totalité des références des années 1990 étaient établies avec des analyses “Joret-Hebert” ou “Dyer”. Il est possible d’estimer la valeur d’une analyse à partir de la valeur d’une autre, mais ce n’est précis que si on utilise une corrélation locale. Sinon, il y a une perte de précision. Cela ne remet pas en cause l’utilisation de seuil exprimés en Dyer ou Joret-Hebert si on le souhaite.
- La modalité de fixation des seuils d’impasse actuels est très sécuritaire, se basant sur le cas le plus pessimiste par grande catégorie de sol, sans tenir compte des réponses dans les autres sites. Cela conduit à des valeurs de seuil élevées (en comparaison aux seuils utilisés à l’étranger, fig. 2), ce qui ne semble pas toujours justifié :
- Un nombre important d’essais au champ plus récents, de même que la littérature scientifique internationale (Jordan-Meille *et al* 2012, Nawara *et al* 2017, Steinfurth *et al* 2022 ...) montre que ces valeurs de seuil sont souvent surévaluées par rapport aux réponses effectives des cultures.
- Le constat similaire de l’absence de perte de rendement pour des analyses de terre de valeur inférieures à ces seuils, aussi bien dans la pratique agricole que dans les essais menés depuis les années 1990, avec plusieurs conséquences négatives :
 - une certaine perte de confiance dans les références et “normes COMIFER”,

- le risque de mal évaluer des pratiques “alternatives” (AB, agroforesterie, ACS, usage de divers produits fertilisant, stimulants ou adjuvants ...) pour lesquelles on constate également des résultats non affectés par la disponibilité du P en dessous du seuil d’impasse COMIFER. Il devient nécessaire de mieux évaluer les seuils d’impasse en agriculture “conventionnelle” (qui reste la référence) pour correctement évaluer les pratiques alternatives.

- Enfin, l’hypothèse de possibles négociations pour l’encadrement de la fertilisation P au niveau européen, qui rend très souhaitable de pouvoir bien argumenter et actualiser les références préconisées en France.

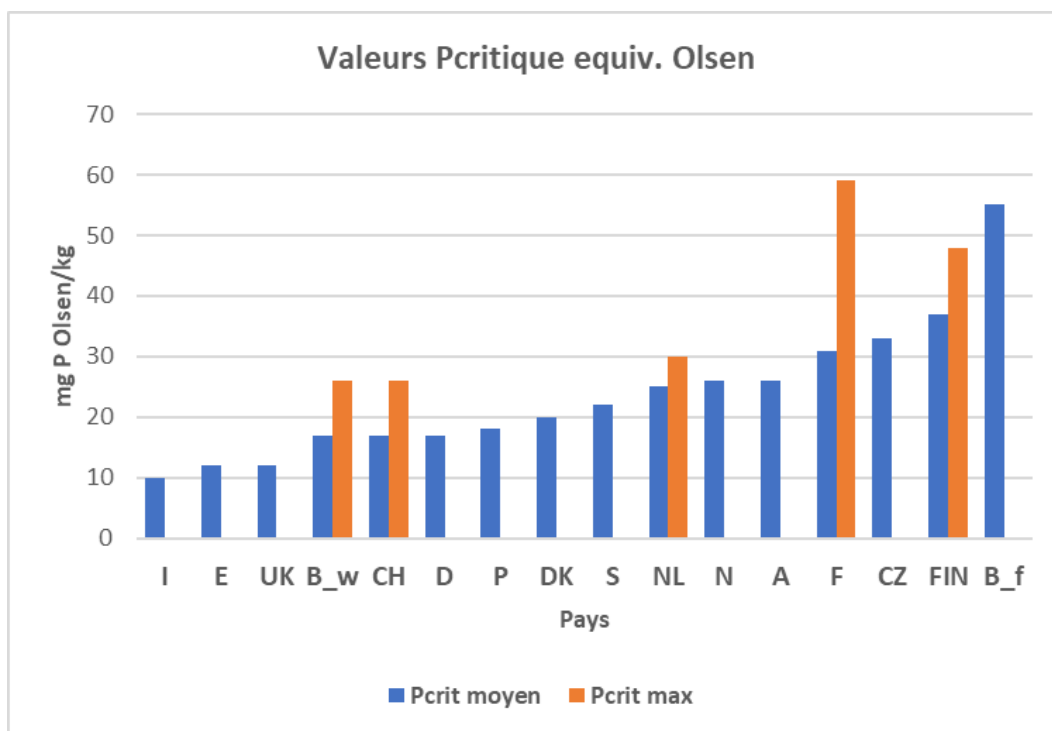


Figure 2 : Comparaison des valeurs critiques d’analyse de terre pour P entre différents pays européen. Les deux valeurs présentées pour certains pays (dont la France) indiquent la fourchette des valeurs (selon les critères sol et exigence des cultures pour la France) (d’après Steinfurth *et al* 2022)

2) Matériel et méthode :

2.1) Le mode de traitement des données pour estimer le seuil d'impasse

On se cantonne dans cette présentation, aux résultats exprimés suivant l'analyse P Olsen, sachant que les résultats obtenus ainsi peuvent être transcrits en valeur d'autres indicateurs de disponibilité en P du sol, Dyer ou Joret-Hebert.

Quand les données expérimentales initiales étaient exprimées en P_Dyer ou P_Joret-Hebert, les calculs ont été faits avec ces unités d'analyse puis les résultats exprimés en P_Dyer ou P_Joret-Hebert ont été transcrits en P_Olsen en suivant les règles proposées par Schwartz et Julien (Schwartz et Julien, 2009). Ces règles utilisent des classes de pH et CEC du sol pour définir une valeur de rapport entre les valeurs de deux analyses. Quand une des informations « pH » ou « CEC » est manquante pour le site considéré, on se place dans la classe moyenne pour ce paramètre.

Une procédure de détermination de seuil d'impasse utilise des données de rendement d'une part et d'analyse de terre d'autre part quantifiant la disponibilité en P du sol (méthode d'analyse P Olsen ou Dyer ou Joret-Hebert), pour estimer la valeur d'analyse de terre à partir de laquelle le rendement n'évolue plus.

La procédure choisie ici pour la détermination du seuil d'impasse s'appuie sur un travail méthodologique préalable (Jordan-Meille *et al* 2023, Jordan-Meille *et al* 2024), basé sur l'analyse des estimations de seuil obtenues selon quatre des méthodes internationales les plus courantes, appliquées à six essais de longue durée afin de disposer de répétitions des estimations dans le même site pour en évaluer la variabilité, ainsi que la robustesse de chaque méthode.

Ce travail nous conduit à retenir le modèle "linéaire plateau", (équation 1, fig. 3) surtout du fait de sa robustesse.

$$\begin{aligned} \text{Si Valeur_P} < T_{\text{imp}}, & \quad \text{alors} \quad R = a + b \cdot (\text{Valeur_P}), \\ & \quad \text{sinon} \quad R = a + b \cdot T_{\text{imp}} \end{aligned} \quad \text{Equation 1}$$

avec Valeur_P = valeur d'analyse de terre ; T_{imp} = valeur de seuil d'impasse , R = rendement ou indice de rendement, a et b paramètres estimés par procédure d'ajustement non linéaire. L'indice de rendement est calculé relativement au rendement potentiel de l'année.

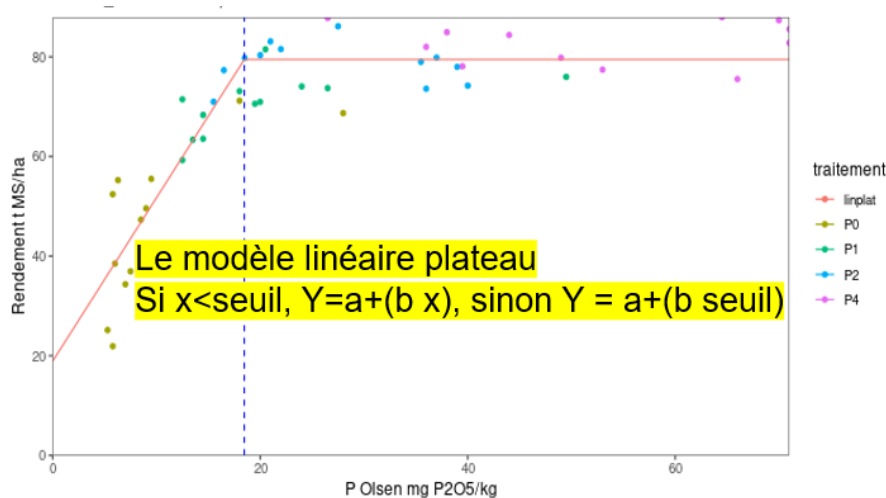


Figure 3 : le modèle linéaire-plateau. Ici, l'abscisse est une valeur d'analyse de terre Olsen et l'ordonnée est un rendement.

Avec ce modèle statistique, le seuil d'impasse correspond à la valeur d'analyse de terre marquant la rupture de pente entre d'une part, la relation linéaire observée entre le rendement et l'analyse, et d'autre part, le plateau.

L'ajustement du modèle aux données expérimentales fournit 3 paramètres : "a", valeur du rendement (ou son indice) pour une valeur nulle d'analyse de terre, "b" pente de la réponse du rendement à la variation de valeur d'analyse de terre, et " T_{imp} ", valeur du seuil d'impasse. La valeur du plateau de réponse est : " $a + b * T_{imp}$ ".

Les avantages du modèle « linéaire-plateau » sont (Jordan-Meille *et al*, 2023 et Jordan-Meille *et al*, 2024) :

- (1) aussi précis (en termes de racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM, -RMSE en anglais-) que les modèles concurrents,
- (2) plus robuste (moins d'échec à l'ajustement, moins d'ajustements aberrants),
- (3) simple pour expliquer et estimer le seuil ainsi que son intervalle de confiance,
- (4) déjà largement utilisé.

Afin de ne faire aucune hypothèse quant à des regroupements pertinents des données par groupe de culture ou par site (type de sol), le seuil T_{imp} est estimé pour chaque espèce cultivée et dans chaque site disponible.

Le nombre de données annuelles disponibles est souvent trop faible pour obtenir une estimation annuelle du seuil, ceci en particulier dans les essais de longue durée anciens pour lesquels on ne dispose pas des données à échelle de la répétition de chaque traitement. Aussi on utilise dans tous les cas les données exprimées en indice de rendement (IR), en regroupant, par espèce cultivée, toutes les années disponibles pour un site. Utiliser les IR change très peu l'estimation du T_{imp} par rapport à la procédure alternative qui serait d'ajuster le modèle chaque année puis faire la moyenne des T_{imp} annuels (Jordan *et al* 2024).

L'ajustement du modèle aux données se fait par procédure de régression non linéaire sous le logiciel statistique R, ce qui peut échouer même après tentative de modification des paramètres initiaux. Ces cas d'échec sont répertoriés.

La procédure d'ajustement du modèle aux données peut conduire à des résultats aberrants si la variation aléatoire (incontrôlée) des valeurs de rendement se trouve interprétée comme une réponse biologique (en croissance voire en décroissance). Pour éviter cela, on impose pour valider un résultat, que la valeur de l'indice de rendement pour une valeur d'analyse de terre nulle, c'est à dire la valeur du paramètre "a" du modèle, soit inférieure à 0.9.

2.2) Le référentiel expérimental

On a mobilisé l'ensemble des résultats d'essais français identifiés actuellement :

2.2.1) Les résultats des essais qui ont servi dans les années 1990 au calage des seuils actuels :

On les appelle "essais historiques" ("EH") (COMIFER Groupe PK, 1993). On a utilisé le fichier interne COMIFER compilé par P. Castillon dans les années 2002-2004, donc élargi à des données expérimentales postérieures à 1990. Des informations sur certains de ces essais sont également données dans le numéro spécial « fertilisation phosphore et potasse » du journal Perspectives Agricoles n°127 (juillet-août 1988). Dans ces essais, on a des traitements répétés chaque année sur les mêmes parcelles (habituellement, 4 répétitions) : un témoin « P0 » sans fertilisation P, un traitement « P1 » avec un apport annuel de P de l'ordre de l'exportation par les récoltes, un traitement « P2 » double de « P1 », parfois un traitement « P3 » avec un apport en P encore supérieur.

On ne dispose cependant que des valeurs moyennes annuelles de rendement par traitement, donc 3 voire 4 valeurs annuelles, correspondants aux traitements P0, P1, P2, parfois P3. Les analyses de terre ne sont disponibles que pour certaines années. Par conséquent, on n'a pas assez de points expérimentaux (3 ou 4) pour ajuster le modèle annuellement. Les rendements sont donc convertis en indices (IR) calculés

annuellement sur la base du rendement du traitement P2 (sinon le traitement le plus fertilisé, comme par exemple pour le site de Presly).

La liste des 104 essais historiques cités dans la publication de 1995 (COMIFER groupe PK, 1995) a été actualisée en enlevant de cette liste les essais de longue durée continués après 1995 (voir ci-dessous au paragraphe 2.2.2 : sites de Miermaigne, Auzeville, Carcarès SteCroix -Tartas, Saint-Félix), et en ajoutant quelques essais qui ont existé entre 1995 et 2010.

Parmi les essais initiaux et ceux rajoutés par P. Castillon par la suite pour former ce référentiel COMIFER, on pouvait avoir plusieurs essais sur un même site : essais doublés en parallèle ou variants quant au type de fertilisant utilisé. Dans ce cas, toutes les données d'un même site ont été regroupées pour améliorer la qualité de l'ajustement du modèle de réponse de l'IR à la disponibilité en P du sol en augmentant le nombre de points expérimentaux disponibles. On a ainsi regroupé en un seul jeu de données les deux essais de Chalons/Marne, les deux de La Chapelle la Reine, les trois de Herbisse, les trois de Guichainville, les trois de La Vieille Lyre, les deux de Pougny, les deux de Tennie, les trois d'Yvetot, les deux de Kirsch, les deux de Luttange, les deux de Satolas.

Certains essais se sont avérés inutilisables car sans suivi d'analyse de terre : 64-Villieu, 67-Tauxigny, 72-Ribouisse, 87-Toury, 88-Pocancy1, 89-Pocancy2, 90-Pocancy3,

Quand cela n'est pas précisé, on fait l'hypothèse que les cultures de blé, orge, blé dur, colza... sont de type « hiver ». L'escourgeon est regroupé avec l'orge d'hiver. Si la variante « fourrage » n'est pas précisée, un maïs est supposé être un maïs-grain.

2.2.2) Les essais P de longue durée (“ELD”) qui ont été initiés ou ont continué après les années 1990,

Il s'agit des essais dans les sites de Grignon-Folleville (département 78), Toulouse-Auzeville (31), Pierroton (33), Carcarès Sainte-Croix (40), Saint-Félix (17), Miermaigne (28), Kerguehenec (56), Feuges (10). Dans ces essais, les traitements « dose de P » sont répétés chaque année, avec au moins 4 répétitions (blocs). Il y a toujours un témoin P0 sans apport de P. Les données disponibles sont à échelle de la parcelle individuelle, donc généralement 4 répétitions par traitement et par an. Par souci de cohérence dans le traitement des données entre les diverses sources, on utilise également les indices de rendement (IR) pour ajuster la réponse de l'IR à la valeur d'analyse de terre.

Les IR sont calculés sur la base du plateau moyen aux modèles linéaire-plateau et quadratique-plateau ajustés annuellement (suivant procédure de l'article Jordan-Meille *et al* 2024, les deux plateaux ajustés n'étant généralement pas différents de plus d'un ou deux pour cent).

2.2.3) Des essais multi annuels (EM)

Il s'agit en particulier ceux mis en place par InVivo et l'Unifa dans les années 2000 et présentés aux Rencontres COMIFER-Gemas 2015 (Aumond and Gérard, 2015). On a ici les valeurs moyennes annuelles de rendement et analyse de terre par traitement, donc 3 voire 4 valeurs annuelles. Comme pour les « essais historiques », les données de rendement sont regroupées par espèces et exprimées en indice, calculé sur la base du rendement du traitement le plus fertilisé à moins qu'un ajustement annuel soit possible auquel cas on utilise le plateau d'ajustement annuel pour le calcul d'IR.

2.2.4) Les essais annuels mis en place dans le cadre du projet CASDAR-RIP (RIP)

Ces essais datent des années 2007 à 2010 et ont été installés annuellement dans le cadre du projet « Raisonnement Innovant de la fertilisation Phosphatée » (RIP). Les données sont disponibles à la parcelle élémentaire. Il y a parfois des répétitions de traitement, surtout pour le témoin sans P, mais surtout un grand nombre de traitements (= dose d'engrais) sans répétition. Les essais étant annuels, on ajuste d'abord le modèle LP sur les rendements bruts, puis par cohérence avec les autres essais et pour vérifier les conditions de validité des résultats, on calcule les indices IR sur la base du plateau d'ajustement.



2.2.5) Conditions de mise en œuvre

Pour toutes ces catégories d'essais, si les rendements sont connus annuellement, les analyses de terre ne sont pas disponibles pour tous les ans. En cas d'absence d'analyse de terre, une valeur annuelle est interpolée linéairement en fonction du temps. Si la première (ou respectivement la dernière) année de culture ne dispose pas d'analyse, ce qui ne permet pas l'interpolation, on utilise la valeur de la première analyse pour 4 ans maximum avant la date de première analyse ou à l'inverse, la valeur de la dernière analyse pour 4 ans maximum après la date de dernière analyse, partant de l'hypothèse que la valeur d'analyse de terre n'évolue que très lentement.

A noter que les cas des blé premier ou second si succession blé/blé, ne sont pas distingués (contrairement au cas de la « grille Comifer » actuelle). Il s'avère que les IR des P0 ne sont plus bas pour les seconds blés que pour les 1^{ers} blés, que dans un peu plus de la moitié des cas (35/57). Et quand on peut tester la différence entre un seuil de premier ou second blé, elle n'apparaît pas significative. Donc on admet que les blés répondent de la même façon à la disponibilité en P du sol, qu'ils soient premiers ou seconds. Regrouper tous les blés pour un site permet de disposer de davantage de points de mesure pour cette culture qui sert de base de comparaison entre toutes les autres.

2.3) Traitement des résultats et tentatives de typologie des cas

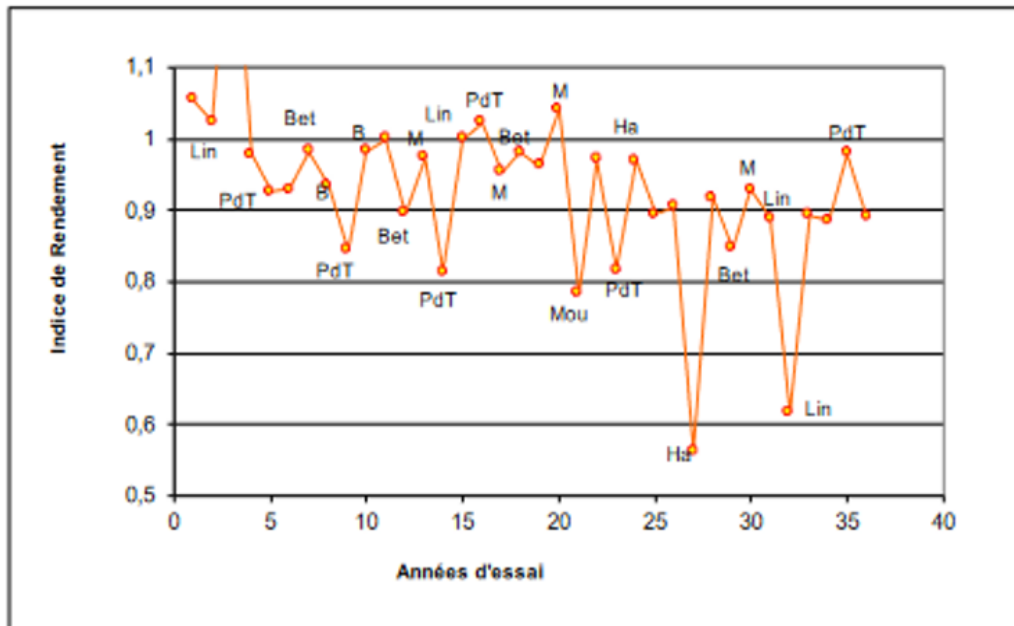
2.3.1) Nécessité de synthèse des résultats et de typologie

De nombreuses références montrent que, pour une méthode d'analyse de terre choisie, la valeur du seuil d'impasse peut varier fortement entre sites pour la même culture, ce qui fait supposer un "effet-sol", ou suivant l'espèce considérée dans un même site.

Ceci pose la question de l'exploitation des cas traités ici pour obtenir des références généralisables à des situations autres que ces essais, pour l'interprétation des analyses de terre et la formulation d'un diagnostic

Par ailleurs, ce qui motive un classement des cultures entre elles est le constat fréquent qu'en situation de déficience en P, le rendement de certaines cultures se trouve davantage affecté que celui d'autres cultures.

Par exemple, la figure 4 montre comment, dans l'essai de longue durée de Versailles, l'indice de rendement (IR) du traitement P0 (aucun apport de P) est souvent fortement affecté pour la pomme de terre (PdT) et nettement moins pour le blé (B) ou le maïs (M), en sus d'une tendance à la diminution de l'IR avec le temps, liée à l'épuisement du P le plus disponible.



Essai P Versailles; traitement P0

Figure 4 : Evolution temporelle de l'indice de rendement du traitement P0. En sus d'une tendance à la diminution de l'indice de rendement IR avec le temps, on constate que l'IR de certaines cultures (pomme de terre -PdT, lin, haricot -Ha, moutarde-Mou-) est plus diminué que celui du blé (B) ou du maïs (M).

Déjà, dans la grille COMIFER de 1993, les seuils T_{imp} dépendent de la "classe d'exigence" de la culture considérée (il y a trois « classes d'exigence »), et du sol considéré. Dans la base de données P. Castillon la typologie des sols est la suivante : argilo-calcaire, argilo calcaire superficiel, craie, limon, limon argileux calcique, limon superficiel ou caillouteux, limon \pm argileux, lourd argileux, sable. Mais dans les tables de valeur T_{imp} ITCF-Arvalis, la typologie des sols suit une nomenclature de sols régionale, utilisant souvent des dénominations vernaculaires.

2.3.2) Révision de la typologie des cultures

Cette question rejoint la notion de "classes d'exigence" de la grille COMIFER : il faut classer les cultures les unes par rapport aux autres pour estimer s'il y a lieu de les distinguer ou distinguer des groupes de cultures quant au seuil d'impasse P. Dans notre travail, il n'est fait aucun regroupement *a priori* des cultures en classes.

Toutes les cultures ne sont pas présentes dans tous les sites, mais il faut pouvoir les comparer les unes aux autres. Pour cela, on prend comme étalon de comparaison le blé tendre d'hiver dont on sait *a priori* que c'est la culture la plus fréquente dans les essais. A défaut, ou si le blé n'est pas présent, on pourrait prendre le maïs-grain qui est réputé être de sensibilité similaire à celle du blé quant à la déficience en P (COMIFER 1993).

Le constat de différences de sensibilité à la déficience en P entre cultures ne dit pas si cette différence est due à un seuil de réponse plus élevé (ce qui justifierait directement des T_{imp} différents), relativement à l'analyse de terre, ou bien si elle est due à une réponse plus forte, même à partir d'un seuil similaire (fig. 5). Les deux mécanismes ne s'excluent pas mutuellement, leur cumul est possible.

Pour aborder cette question en comparant chaque culture « x » au blé, pour chaque site, on calcule le seuil relatif de « x » et la pente relative de réponse du rendement à la valeur de l'analyse de terre, de la façon suivante :

- seuil relatif au blé : $xrT_{imp_b} = T_{imp_x} / T_{imp_blé}$
- pente (paramètre « b » du modèle) de réponse relative au blé : $xrb_b = b_x / b_blé$

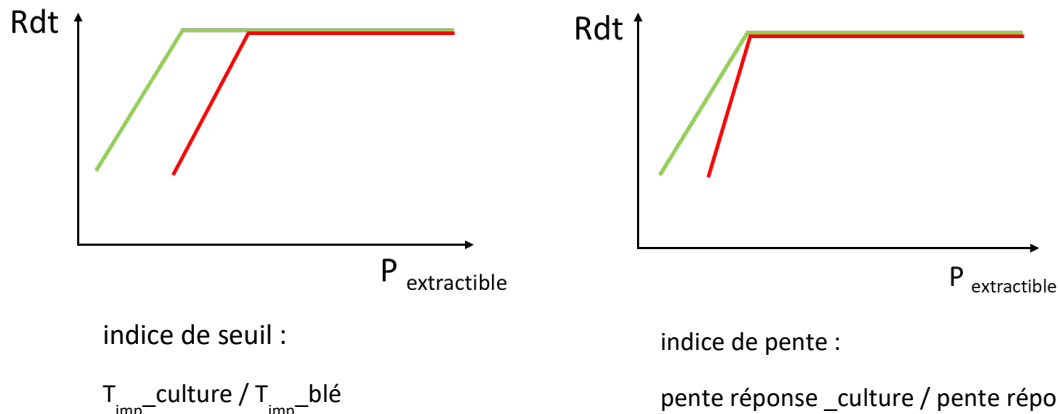


Figure 5 : deux hypothèses possibles pour expliquer la différence de réponse de l'indice de rendement entre deux cultures dans le même site et à même niveau de déficience en P : (a) soit les seuils de réponse sont différents (schéma de gauche), (b) soit les pentes de réponse sont différentes (schéma de droite).

2.3.3) Typologie des sols

Pour s'extraire de l'interaction possible de la culture avec le sol dans la détermination du T_{imp} , on a recherché à classer les sols en groupes homogènes. Il faut pour cela disposer d'assez de résultats dans assez de catégories de sol, pour la même culture (afin de se prévenir d'un risque de confusion d'effet). Ce travail n'a donc pu être fait que pour les cultures les plus fréquentes : blé tendre, maïs, orge, ...

Pour travailler sur une base de données de portée nationale, on part de la typologie des sols de la base de données P. Castillon : argilo-calcaire, argilo calcaire superficiel, craie, limon, limon argileux calcique, limon superficiel ou caillouteux, limon \pm argileux, lourd argileux, sable.

Cette information sur le "type de sol" n'est disponible initialement que pour les essais EH « historiques ». Pour les autres essais, on essaie de se caler sur cette typologie, en utilisant le type de sol donné par les responsables des essais, ou à défaut les données disponibles, essentiellement granulométrie et teneur en $CaCO_3$, voire les types de sol proposés par la carte de sols de Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) pour la région de l'essai.

A défaut d'autre information, en se basant sur le triangle de granulométrie GEPPA (Richer de Forges *et al* 2008, <https://stratohorizon.wordpress.com/2015/04/28/31/>), on considère :

sable : classes granulométriques SS, S

craie : $CaCO_3 > 20 \%$

argilo-calcaire : $CaCO_3 > 5 \%$ et classes granulométriques A, AS, LAS, Als ; argilo-calcaire superficiel : si indiqué que le sol est superficiel

limon : classes granulométriques LL, L, Ls, Lsa, LSA, SAL et teneur en $CaCO_3 < 5 \%$; limon superficiel ou caillouteux : si mention de ces caractéristiques

limon \pm argileux : classes granulométriques La, LA, Al, AL, LAS, et teneur en $CaCO_3 < 5 \%$

limon argileux calcique : classes granulométriques comme limon \pm argileux et teneur en $CaCO_3$ entre 5 et 20 %

lourd argileux : classes granulométriques AA, A, As, Al, Als



Pour chaque culture, on fait une analyse de variance sur les valeurs de T_{imp} avec les sols comme classes (typologie sol : fichier des essais historiques de P. Castillon, cf. ci-dessus) ; les sols sont comparés deux à deux. Comme les distributions des valeurs de T_{imp} ne respectent pas toujours les conditions pour une ANOVA, la p-value (d'autant plus élevée que les distributions de valeur des T_{imp} sont proches) est seulement utilisée comme indicateur de proximité entre deux types de sols.

3) Résultats

3.1) Comparaison des T_{imp} obtenus par ajustement au modèle linéaire-plateau, aux T_{imp} références actuelles

3.1.1) les échecs d'ajustement

Les échecs à l'ajustement sont fréquents dans les « essais historiques », ce qui tendrait à montrer que beaucoup n'ont pas atteint un niveau de disponibilité du P du sol assez bas pour induire une réponse des cultures. Ce taux d'échec est également élevé dans les essais RIP, montrant que bien qu'implantés dans des parcelles sélectionnées comme « pauvres en P », la déficience n'y était pas suffisante pour occasionner une réponse nette.

Certains essais historiques n'ont pas d'analyse de terre permettant de réaliser l'ajustement de modèles (sites de Tauxigny n°67, Zueras-Ribouisse n°72, Toury n°87, Pocancy 1-2-3 n°88, 89, 90, et la plupart des essais InVivo).

3.1.2) Informations disponibles après ajustements

Distribution des résultats (ajustements site* culture) utilisables, relatifs à 241 cas site*culture :

- par type de terre : 27 en « argilo-calcaire »
- 40 en « argilo calcaire superficiel »
- 43 en « craie »
- 76 en « limon »
- 9 en « limon argileux calcique »
- 2 en « limon superficiel ou caillouteux »
- 16 en « limon+-argileux »
- 20 en «sol lourd argileux »
- 6 en « sable »

- par culture : (par ordre alphabétique) : 3 cas avoine, 15 betterave sucrière, 1 betterave porte-graine, 10 blé dur (hiver a priori), 52 blé tendre hiver, 2 blé tendre printemps, 30 colza hiver, 2 colza printemps, 1 féverole, 1 haricot, 1 lin, 5 luzerne, 1 luzerne-dactyle, 36 maïs grain, 5 maïs fourrage, 1 moutarde, 36 orge hiver (dont escourgeon), 8 orge printemps, 8 pois, 2 pomme de terre, 1 prairie permanente, 1 ray-grass, 2 soja, 2 sorgho grain, 9 tournesol.

Les cultures les plus fréquentes sont donc : blé tendre hiver (52), maïs grain (36), orge hiver (36), colza hiver (30), betterave sucrière (15). Ensuite on trouve le blé dur (10), tournesol (9), orge printemps (8) et le pois (8).



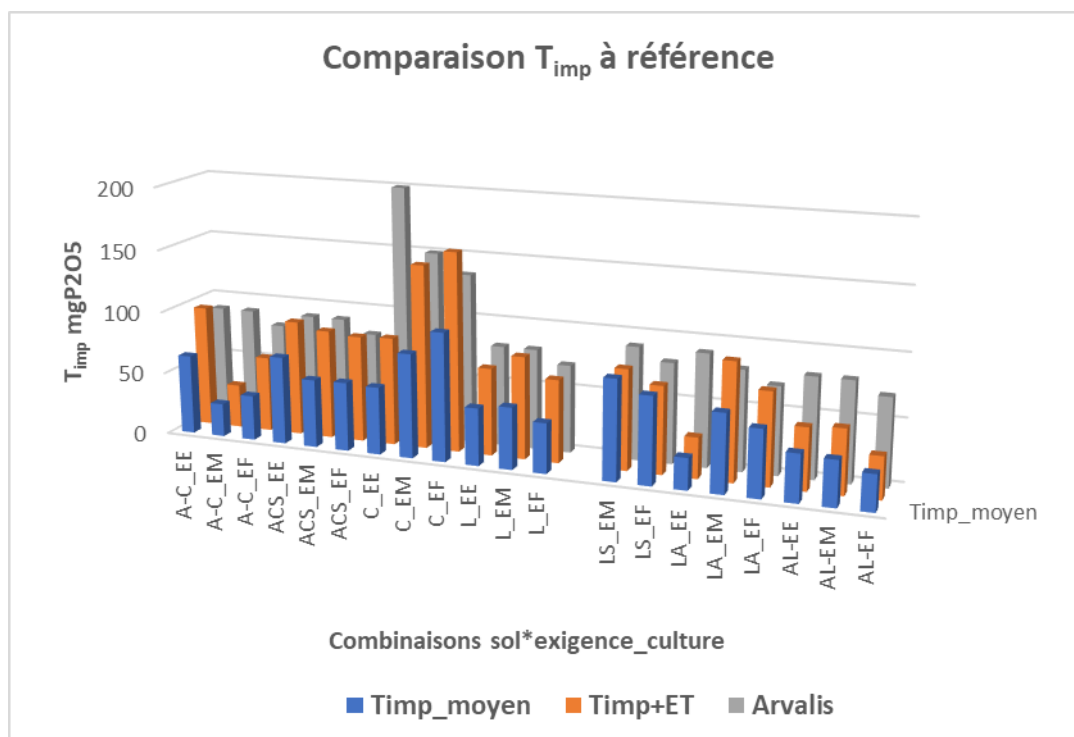


Figure 6 : Représentation de T_{imp} moyen, T_{imp} moyen + ET (écart-type) T_{imp} , et seuil Arvalis pour chaque catégorie de sol et classification des cultures. Sigles des sols : A-C = argilo-calcaire, ACS = argilo-calcaire superficiel, C = craie, L = limon, LS = limon superficiel ou caillouteux, LA= limon argileux, AL = argile lourde. Sigles des classes d'exigence des cultures : EE = exigence élevée, EM = exigence moyenne, EF = exigence faible.

A partir de ces informations (tableau 1 & figure 6), on constate :

- les différences entre médiane et moyenne peuvent parfois être fortes, ce qui indiquerait une distribution non normale des valeurs de T_{imp} et parfois l'influence de valeur particulièrement élevées de T_{imp} (cas ou moyenne \gg médiane),
- de façon générale, des valeurs moyennes de T_{imp} beaucoup plus faibles que les seuils actuels de la grille COMIFER qui sont entre 70 et 210 mg P₂O₅/kg terre,
- la variabilité (cf. écart-type) des T_{imp} est forte à l'intérieur de tous les cas croisant « exigence_culture » et « type sol ». Se contenter d'un T_{imp} moyen induit donc un risque non négligeable de se retrouver en déficience,
- un classement des valeurs de T_{imp} qui ne suit pas toujours celui des exigences des cultures. Cela semblerait remettre en cause le classement actuel des cultures en classes d'exigence,
- quand des valeurs moyennes sont élevées, elles s'avèrent liées à quelques essais anciens. Cela pourrait être lié à l'évolution de la génétique vers des variétés moins exigeantes maintenant qu'autrefois ? Faut-il alors exclure des essais anciens et lesquels ?
- le cas « limon argileux calcaïque » est singulier, avec des valeurs de T_{imp} particulièrement élevées. Il s'avère que ce cas est très peu représenté, essentiellement par des essais anciens à Clermont-Ferrand.

Mais comparer les T_{imp} moyen avec les seuils de référence actuels ne tient pas compte du fait que ces seuils de référence ont été fixés avec une marge de sécurité afin de limiter le risque de perte de rendement. Cela pose la question : « quelle «marge de sécurité» au-dessus du T_{imp} moyen est-elle légitime ?

Si on considère « T_{imp} moyen + 1 écart-type » pour tenir compte de la variabilité (et sans vouloir à ce stade y associer de signification statistique), on constate :

- * tendance à des valeurs similaires entre «Arvalis» et «nouveau calcul» pour les «argilo-calcaire superficiels» et «limon», voire «limons argileux» et «limon superficiel ou caillouteux » («similaire» = ± 10 ppm P_2O_5),
- * des différences erratique dans le cas de la craie suivant la classe d'exigence de la culture, « T_{imp} moyen + 1 écart-type » est supérieur ou inférieur au seuil Arvalis,
- * de fortes différences surtout pour sols argilo-calcaire et sols lourds argileux : « T_{imp} moyen + 1 écart-type » nettement inférieur au seuil Arvalis.

Les différences entre «seuil Arvalis» et «nouveau calcul» ne sont pas toujours homogènes suivant la classe d'exigence des cultures. Il convient donc de retourner à cette typologie.

3.2) Typologie des cultures : Étude de la réalité et de l'origine de l' « exigence des cultures »

La notion d'exigence des cultures est basée sur le constat qu'à même niveau de déficience en P, certaines cultures perdent relativement davantage de rendement que d'autres. La référence choisie est la culture la plus courante : blé tendre, à laquelle on compare les autres cultures.

Le blé est considéré faiblement exigeant (classe EF). Aux origines de la «grille COMIFER», on considère les cultures dont le comportement se démarque nettement du blé, comme «fortement exigeantes» et celles pour lesquelles les références manquent comme « moyennement exigeantes».

Tableau 2 : répartition des cultures en classes d'exigence (source : Comifer 1995)

Exigence élevée	Betterave à sucre, colza, luzerne, pomme de terre
Exigence moyenne	Blé dur, maïs fourrage, orge, pois, ray-grass, sorgho, blé de blé
Exigence faible	Avoine, blé tendre, maïs grain, soja, tournesol

Il y a potentiellement 25 cultures à comparer au blé tendre quand c'est possible car il n'y a pas toujours de blé tendre sur le même site, ce qui peut rendre la comparaison impossible.

Pour répondre à cette question, utilise les indicateurs définis au paragraphe 2.3.2 :

xrT_{imp_b} est le rapport du T_{imp} de la culture «x» au T_{imp} du blé dans le même site. Un xrT_{imp_b} supérieur (respectivement, inférieur) à 1 indique que la valeur du seuil de la culture x est plus élevée (resp. moins élevée) que celle du seuil du blé.

xrb_b est le rapport de la pente de réponse (« paramètre « b » du modèle de réponse) de la culture x à cette pente pour le blé dans le même site. Un xrb_b supérieur (resp. inférieur) à 1 indique que la réponse de la culture x à la déficience en P est plus forte (resp. moins forte) que la réponse du blé.

Les moyennes et écart-type de ces indices, par culture, sont dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs moyennes et écart-type des indices de réponse des cultures par rapport au blé tendre : xrTimp_b et xrb_b. Classes d'exigence des cultures : EE = exigence élevée, EM = exigence moyenne, EF = exigence faible ; na » = information non disponible.

Culture	Exig Comifer 95	xrTimp_b moyen	xrTimp_b écart-type	xrb_b moyenne	xrb_b écart-type	Nb cas réel
Betterave sucre	EE	1.0421	0.2595	2.3987	1.4559	11
Bett.porte graine	EE	NA		NA		1
Colza	EE	1.0693	0.3204	3.9564	6.9717	20
Colza printemps	EE	1.3900	0.4876	0.6968	0.7651	2
Luzerne	EE	1.2293	0.3854	3.2456	4.0701	5
Luzerne-dactyle	EE	2.011	na	0.48	na	1
Pomme de terre	EE	1.0.36	na	4.877	na	1
Blé dur	EM	0.8474	0.2693	4.0288	3.2355	6
Blé de blé	EM	0.9225	0.1548	4.4702	4.8427	3
Féverole	EM	1.227	na	0.466	na	1
Haricot	EM	na	na	na	na	0
Lin	EM	na	na	na	na	0
Maïs fourrage	EM	0.9822	0.0629	1.1722	0.8432	2
Moutarde	EM	na	na	na	na	0
Orge (hiver)	EM	1.0577	0.3003	1.8179	1.8511	28
Orge printemps	EM	0.8721	0.3254	2.0698	2.3296	7
Pois	EM	1.1460	0.1709	1.1719	0.5919	6
Sorgho grain	EM	1.1096	0.2783	0.5644	0.1493	2
Avoine	EF	0.9746	0.4081	4.4326	6.0462	3
Blé tendre printemps	EF	1.1337	0.2962	0.6367	0.6518	2
Maïs grain	EF	1.0184	0.2711	1.3510	1.0578	16
Prairie permanente	EF	na	na	na	na	0
Ray-grass	EF	na	na	na	na	0
Soja	EF	1.3887	0.1311	0.5042	0.3893	2
Tournesol	EF	1.0278	0.2618	1.8603	2.8000	6

Une représentation synthétique de ces résultats moyens est un graphique dont les deux axes sont respectivement le xrTimp_b en abscisse et le xrb_b en ordonnée. Pour ne pas trop surcharger et parce que les résultats pour des cultures très peu courantes seraient plus douteux, on n'a représenté que les cultures ayant au moins 5 occurrences dans notre jeu de données. La figure 7a représente toutes les données : figure 2.

On constate que l'”exigence” apparait plus souvent (7 fois / 9) et davantage (= les ordres de grandeur sont beaucoup plus élevés) une affaire de “pente de réponse plus forte” que de “seuil de réponse plus élevé”.

Toutefois, la variabilité de xrT_{imp_b} et xrb_b , pour une même culture, est élevée : le coefficient de variation est couramment 25-30 % pour xrT_{imp_b} ... voire 100-200 % pour xrb_b .

Le classement des cultures par Comifer 1995 ne correspond pas toujours bien à la réalité. Nécessité de le revoir ? De réduire le nombre de classes d'exigence ?

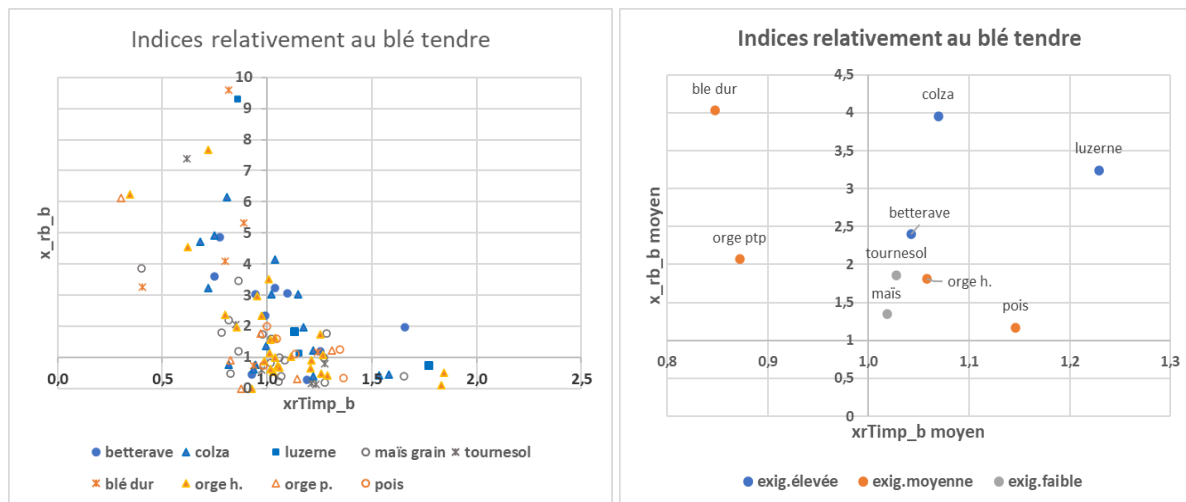


Figure 7 : représentation des caractéristiques de chaque culture relativement au blé tendre : pour chaque cas traité un point a pour abscisse la valeur de l'indice xrT_{imp_b} et pour ordonnée la valeur de l'indice xrb_b .

Figure 7a (à gauche) : tous les cas traités ; figure 7b (à droite) : points moyens par culture.

Au vu de ces résultats, la notion d' « exigence » doit-elle être conservée ? sans doute oui,

- d'une part parce qu'elle est largement partagée internationalement (même si les classements sont très différents d'un pays à l'autre), et apparemment bien assimilée en France,
- d'autre part parce qu'elle recouvre quand même une réalité de sensibilité à la déficience.

Sur le plan pratique, elle peut se traduire

- par des conseils de mise en œuvre de la fertilisation : éviter les impasse surtout sur ces cultures,
- par des seuils T_{imp} fixés arbitrairement sensiblement plus élevés même si cela est exagéré par rapport aux résultats expérimentaux.

Toutefois, la hiérarchie des cultures apparait différente de celle proposée par le Comifer en 1995.

On peut proposer de limiter le nombre de classes d'exigence à deux, la plus élevée regroupant les cultures pour lesquelles " xrT_{imp_b} moyen est > 1.1 " ou " $xrb_b > 1.5$ ".

Ce qui donne :

- Exigence faible : blé tendre, maïs ; on peut sans doute y ajouter sorgho grain, voire maïs fourrage,
- Exigence forte : orge (hiver & printemps), tournesol, blé dur, betterave, colza, pois, luzerne. Ce à quoi on peut sans doute ajouter : colza printemps, luzerne-dactyle, pomme de terre, féverole, soja.

L'exigence semble parfois être différente entre les conditions de sol, par exemple pour la betterave qui semble davantage affectée en sol de craie qu'en sol de limon ; le sujet reste à creuser plus avant. Mais il

semble malgré tout compliqué d'en venir à différencier les exigences par type de sol ou définir des classes d'exigence à l'intérieur des types de sol.

3.3) Etude de la pertinence de la typologie des sols COMIFER 95

3.3.1) Comparaison des types de sol sur la base des T_{imp} ajustés

Dans la recherche d'une typologie des cas plus efficaces pour mieux distinguer les situations nécessitant un paramétrage propre (dont un T_{imp} propre), on doit également chercher si une autre typologie des sols serait meilleure. Pour cela, on compare entre types de sols « Comifer », la gamme des seuils T_{imp} obtenus pour les principales cultures disponibles, afin de voir si ces seuils sont différents ou non par type de terre. S'ils sont peu différents, il pourrait être pertinent de regrouper les types de sol pour en réduire le nombre et par conséquent avoir davantage de cas expérimentaux par type, ce qui devrait améliorer la pertinence des seuils.

A noter que cette typologie Comifer des sols est essentiellement granulométrique, et n'a pas été clairement définie et formalisée. On ne peut donc pas être certain qu'elle ait été utilisée de façon comparable entre les diverses sources de données.

Les valeurs moyennes (et écart-type) des seuils par culture et type de sol « Comifer 95 » sont dans le tableau 4.

Tableau 4 : moyenne et écart-type des valeurs de T_{imp} ajustées en mg P_2O_5 /kg sol par type de sol (selon nomenclature Comifer-P. Castillon), et pour les principales cultures disponibles.

Culture	Type Sol	T_{imp} moyen	T_{imp} E-T	nb cas
Betterave sucre	argilo calcaire	71.2	Na	1
	craie	60.3	36.3	9
	limon	51.0	32.4	3
	limon argileux calcique	34.05	Na	1
	limon+-argileux	18.6	Na	1
	argilo calcaire	70.2	33.7	5
Colza	argilo calcaire superficiel	69.8	23.2	9
	craie	39.2	22.4	2
	limon argileux calcique	57.08	Na	1
	limon	37.1	17.8	8
	limon+-argileux	28.5	6.4	2
	lourd argileux	39.6	14.9	3
Blé tendre	argilo calcaire	45.6	27.4	6
	argilo calcaire superficiel	49.3	24.5	9
	craie	79.9	42.6	12
	limon	34.9	16.5	12
	limon argileux calcique	133.9	161.9	3
	limon+-argileux	52.0	24.3	5
	lourd argileux	30.7	5.0	5
	argilo calcaire	22.9	7.0	2
	argilo calcaire superficiel	17.8	8.0	2
	craie	177.6	35.8	3
	limon	49.2	31.1	17
	limon argileux calcique	304.1	Na	1
Mais grain	limon superficiel ou caillouteux	69.6	Na	1
	limon+-argileux	55.2	17.4	4
	sable	67.6	32.9	6
	argilo calcaire	29.6	8.3	3
	argilo calcaire superficiel	63.2	31.3	7
Orge	craie	88.2	69.4	10
	limon	44.7	22.2	10
	limon argileux calcique	282.3	Na	1
	limon+-argileux	51.0	43.3	2
	lourd argileux	44.8	2.6	3
	argilo calcaire	21.2	Na	1
Tournesol	argilo calcaire superficiel	80.1	28.3	5
	craie	146.0	Na	1
	limon	16.2	1.5	2

Le type « limon argileux calcique » présente des résultats douteux car montrant des valeurs de T_{imp} extrêmement élevées basées sur peu de valeurs mesurées et une forte influence du cas « Clermont-Ferrand » qui présente les seuils très élevés. Il n'est donc pas traité par la suite.

Dans les cas (culture x sol) où on constate une forte variabilité des T_{imp} (cf. écart-type des seuils pouvant être supérieur à la moitié de la moyenne), cela est souvent dû à une valeur de seuil très élevée, liée à un essai ancien.

On a, pour une culture, un certain classement des types de sol pour T_{imp} , mais il n'est pas très stable ni toujours très marqué. Dans les grandes tendances : le seuil « craie » est généralement plus élevé (parfois beaucoup) que le seuil « limon », ou le seuil « argilo calcaire superficiel » plus élevé que le seuil « argilo calcaire » (logique dans l'hypothèse d'une limitation hydrique). Cela apparaît nettement avec tournesol, blé dur Alors que les sols « lourd-argileux » présentent des seuils relativement bas.

Pour d'autres catégories, le nombre limité de cas expérimentaux ne permet pas de conclusions fiables.

Toutefois, la forte variabilité des seuils à l'intérieur de nombreuses catégories de sol (pour une culture fixée) interroge quant à la nécessité de différencier autant de sol.

A l'inverse, on pourrait aussi vouloir subdiviser les catégories pour réduire le coefficient de variation associé à chacune, mais on se trouve alors avec trop peu de cas disponibles pour permettre une estimation robuste de T_{imp} ce qui va à l'encontre de la recherche de valeurs généralisables.

Pour estimer s'il est nécessaire d'avoir une typologie aussi détaillée des sols, on fait une ANOVA entre les sols les plus représentés (au moins 3 essais) par culture pour estimer si ces catégories se justifient. On peut ainsi traiter :

- Betterave : craie, limon
- Colza : argilo calcaire, argilo calcaire superficiel, limon, lourd argileux
- Blé tendre : argilo calcaire, argilo calcaire superficiel, craie, limon, limon argileux, lourd argileux
- Maïs grain : craie, limon, limon argileux, sable
- Orge : argilo calcaire superficiel, craie, limon,

Les principaux résultats :

- pour la betterave, il n'apparaît pas de différence de réponse entre craie et limon : fortes variabilités similaires entre les deux types de sol ; il faudrait alors chercher un autre paramètre explicatif à cette variabilité et plus discriminants que le « type » de sol,
- pour le blé tendre : pas de différence entre ArgCal et ArgCalcSuperf ($p_{value}=0.8$) ou entre limon et argile lourde ($p=0.58$) ; faible différence entre limon et limon argileux ($p=0.11$) ou entre limon et ArgCalcSuperf ($p=0.12$) ou entre limon et ArgCalc ($p=0.31$). Mais différence presque significative ($p=0.07$) entre ArgCalcSuperf et craie ou entre argile lourde et craie ($p=0.056$) ; nette différence entre limon et craie ($p = 0.002$),
- pour le colza : pas de différence entre ArgCal et ArgCalcSuperf ($p=0.98$) ou limon et argile lourde ($p=0.83$) ; différence faible entre craie et ArgCalcSuperf ($p=0.125$) ; différence significative entre limon et argilo-calcaire ($p=0.038$) ou ArgCalcSuperf ($p=0.006$) ou entre limon et craie ($p=0.021$),
- pour le maïs grain : pas de différence entre limon et limon argileux ($p=0.72$) ou entre sable et limon ($p=0.23$) ; différence assez nette entre limon et ArgCal+ArgCalcSuperf ($p=0.0875$) ; différences significatives entre sable et ArgCal+ArgCalcSuperf ($p=0.024$) ou entre craie et ArgCal+ArgCalcSuperf ($p=0.0003$), ou entre limon et craie ($p=0.000004$),
- pour l'orge : pas de différences entre limon et argile lourde ($p=0.99$) ou entre argile lourde et craie ($p=0.32$) ; différence faible entre ArgCal et ArgCalcSuperf ($p=0.11$) ou entre craie et limon ($p=0.078$) ;

On constate donc que les différences entre types de terres ne sont pas bien homogènes d'une culture à l'autre. Exemple : faible différence des seuils « limon » vs « craie » pour la betterave, alors qu'elle est plus forte pour blé, maïs ou orge. Il semble cependant difficile de vouloir définir des typologies de terres différentes entre les cultures. Ces hétérogénéités peuvent aussi être dues à des échantillons de taille parfois très différente.

Malgré tout, ce constat pose la question de l'interaction entre les deux variables « culture » et « sol », ce qui ferait qu'il faudrait adapter le seuil non seulement au type de sol mais aussi à la culture, mais pas comme actuellement via une classe d'exigence indépendante du sol.

3.3.2) Proposition d'une typologie simplifiée des sols

Pour synthétiser les comparaisons entre sols quant aux T_{imp} calculés, on reporte dans le tableau 5 les p_value moyennes des cultures testées dans les comparaisons 2 à 2 des sols. On constate ainsi que ces moyennes peuvent être élevées (proches de 1) ce qui signifie peu de différences entre les T_{imp} , des sols se comportant de façon similaire pour les cultures testées. A l'inverse, certains types de sols différencient, montrant des p_value faibles. On peut envisager de regrouper les types de sols se présentant comme similaires.

Tableau 5 : résumé des p_value des comparaisons 2 à 2 des types de sol sur la base des T_{imp}

	Arg.Calc .Sup.	Craie	Limon	limon+ argileux	argile lourde	sable
Arg.Calc.	0,63	0,14	0,21	0,69	0,25	
Arg.Calc.Sup.		0,23	0,1	0,84	0,19	
Craie			0,2	0,1	0,19	0,002
Limon				0,42	0,8	0,23
limon+argileux					0,09	0,51

Dans l'optique de simplifier le système de raisonnement plutôt que le complexifier, car on ne dispose quand même que d'un nombre limité de données expérimentales, on peut donc proposer :

- fusionner les catégories de sols limon / limon argileux / argiles lourdes qui apparaissent souvent bien similaires,
- fusionner les catégories argilo-calcaire et argilo-calcaire superficiel qui sont souvent peu différenciées,

On conserverait donc 4 catégories de sols (figure 8) :

- limons et argiles
- argilo-calcaire
- craie
- sable

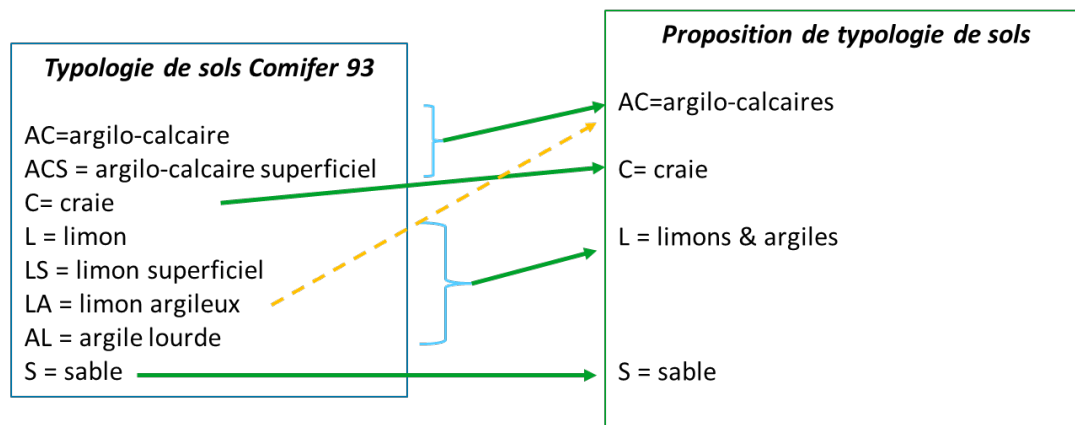


Figure 8 : proposition d'évolution des typologies des sols

Dans le cas « sable » on a une forte « variabilité interne des seuils » qu'il faudrait mieux maîtriser. Dans ce sol où les pertes par lixiviation peuvent être importantes, on devrait envisager de piloter la fertilisation en tenant davantage compte du risque environnemental.

La typologie des sols « Comifer95 » présente donc une certaine pertinence, mais la variabilité interne des seuils estimés dans une même catégorie culture*sol estimés pose la question du besoin de la préciser avec d'autres paramètres plus objectivement mesurables, quantifiables.

3.3.3) Exploration d'indicateurs complémentaires pour une typologie des sols

On souhaite estimer si la variabilité des T_{imp} pour un type de sol donné peut s'expliquer par un d'autres paramètres-sol disponibles.

On ne dispose que d'information disparates sur les sols entre les divers essais traités. Le sujet n'a donc été qu'effleuré en utilisant les données disponibles et par type de sol, peu nombreuses et loin de couvrir tous les essais.

Les indicateurs analytiques « granulométrie » (taux d'argile, limon, sable), pH, CEC, C_organique, ne révèlent aucune corrélation avec la valeur de T_{imp} .

Par contre, parmi les sols « de craie », le taux de $CaCO_3$ se corrèle avec T_{imp} à l'exception des « craies » du Centre Ouest (Deux-Sèvres, Charentes) : figure 9a.

De même, pour les sols « limons » et « argile », les taux de fer et aluminium « libres » extractibles par les méthodes Tamm ou Mehra-Jackson se corrént assez bien avec T_{imp} (figure 9b).

Ces analyses (surtout celles de Fe et Al) ne sont pas courantes en routine, mais elles sont utilisées en pédologie et par conséquent pour la cartographie des sols (cf. RMQS : Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, par exemple). Si les observations faites ici sont plus largement confirmées, on pourrait envisager d'estimer les T_{imp} à partir des types de sol tels que définis pour la cartographie pédologique.

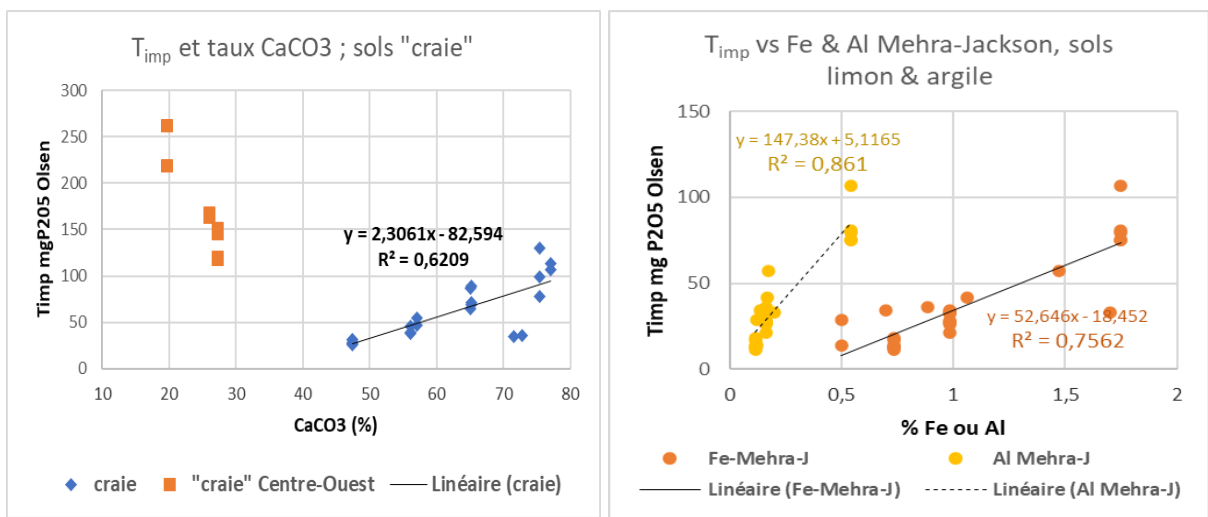


Figure 9 : Corrélation entre les T_{imp} ajustés et des indicateurs analytiques du sol : (1) dans le cas des sols « de craie » CaCO₃ (sauf pour des sols du Centre-Ouest) ; (2) dans le cas des sols limoneux ou argileux, le fer ou l'aluminium « libres » (méthode d'analyse Mehra-Jackson)

3.4) Proposition et test de nouvelles typologies des cultures et sols comme cadre de raisonnement

Les résultats présentés dans les paragraphes précédents permettent de proposer une simplification du système de raisonnement actuel en diminuant à la fois le nombre de classes d'exigence des cultures, réduit de 3 à 2, et le nombre de types de sols, limité à 4.

Il reste en suspens le cas des « limon argileux calcique », très peu représentés dans les essais et pouvant probablement être rattaché aux « limon et argiles ». En particulier, les résultats de l'essai « Clermont-Ferrand a1 » sont probablement à exclure car présentant des résultats extrêmes.

Typologie des cultures proposée :

- Exigence faible (EF) ou « sensibilité faible » (SF) : blé tendre, maïs, maïs fourrage, sorgho grain, auxquels on ajoute avoine, prairie permanente, ray-grass,
- Exigence élevée (EE) ou « sensibilité élevée » (SE) : orge (hiver & printemps), tournesol, blé dur, betterave, colza, pois, luzerne, colza printemps, luzerne-dactyle, pomme de terre, féverole, soja auxquels on ajoute haricot, luzerne-dactyle, moutarde,

Typologie des sols proposée :

- limons et argiles
- argilo-calcaire
- craie
- sable

Les résultats d'ajustement individuel par « site*culture » sont donc réorganisés suivant ces nouvelles typologies. Cela permet de recalculer des indicateurs statistiques pour chaque nouvelle catégorie : T_{imp} moyen, médiane, écart-type, quantiles. Comme la distribution des valeurs de T_{imp} n'est pas gaussienne dans tous les cas, l'interprétation de ces indicateurs n'est pas simple. Dans le tableau 6, on y ajoute la médiane et les percentiles 80 et 90. A titre de comparaison, une approximation des seuils actuels est présentée, basée sur les seuils proposés par Arvalis pour les types de sols régionaux.

Tableau 6 : Divers indicateurs de la distribution des valeurs de T_{imp} dans le cadre de nouvelles typologies des cultures et sols

Type sol revu	Sensibilité culture	Nombre de données	Médiane	Moyenne	Ecart-type ET	Moyenne + ET	Quantile 80 %	Quantile 90 %	Approx seuil actuel
Argilo-calcaire	SE	43	51.6	55.8	29.9	85.7	86.8	98.7	90
Argilo-calcaire	SF	24	35.3	41.8	26.9	68.7	61	67	80
Craie	SE	28	50.8	71.7	53	124.7	113.9	121	180
Craie	SF	15	122.8	99.4	57	156.4	151	165	135
Limon-argile	SE	60	66.6	43.6	24.9	68.5	58	81	80
Limon-argile	SF	60	75	44	25.5	69.5	63	77.8	70
Sable	SF	6	69	67.6	32.9	100.5	90	104	80

Sensibilité culture à déficience P : SE = sensibilité élevée ; SF = sensibilité faible ; unité des T_{imp} : mg P_2O_5 Olsen / kg sol sec

A titre de comparaison : pour les essais de longue durée anglais : $T_{imp} = 36$ mg P_2O_5 pour Rothamsted (limon) et $T_{imp} = 22$ mg P_2O_5 pour Saxmundham (argile)

On constate :

- le classement des cultures « Sensibilité élevée » (SE) ou « sensibilité faible » (SF) n'est pas encore bien satisfaisant quant à discriminer les situations puisque ne correspond pas toujours à l'ordre des valeurs de T_{imp} . Pour « limon-argile » la « sensibilité » des cultures apparaît peu discriminante.
- médiane et moyenne peuvent être assez éloignées et ne se classent pas toujours de la même façon, ce qui exprime d'une distribution dissymétrique des résultats (ce qui pourrait correspondre à une typologie non satisfaisante des sols)
- les T_{imp} moyens sont plus bas que les valeurs habituellement utilisées pour le seuil d'impasse, ce qui est logique car ces dernières sont définies pour une forte « marge de sécurité ». Or T_{imp} moyen + écart-type ou quantiles 80 % ou 90 %, qui correspondent à une marge de sécurité similaire à celle des seuils actuels, en sont assez proches.
- le cas « sable » montre une forte dispersion : grande sensibilité de T_{imp} au taux de limon ou argile (non détaillé ici).

Dans les types de sol essentiellement « granulométriques » proposés avec les « essais historiques », on constate une forte hétérogénéité des P_{crit} (même pour une culture fixée) ce qui indiquerait que d'autres paramètres que la granulométrie sont déterminants de l'alimentation en P des cultures.

Faut-il préférer une typologie « selon les types vernaculaires » (cf. Arvalis) qui pourrait résoudre cette question en intégrant des paramètres pédologiques autre (ex. : Terre de Groies vs terre d'Aubue en Charente, qui sont sinon toutes deux en argilo-calcaire). Problème concret : on ne dispose pas de cette information et on n'est pas en mesure de retrouver précisément les parcelles où ont eu lieu les essais, pour les requalifier.

4) Discussion

Au terme de cette remise à plat de l'estimation de la valeur des « seuil d'impasse », on aboutit à une grille de raisonnement plus simple (moins de cas « culture » et « sol ») que la version actuelle, mais elle n'est pas satisfaisante car la variabilité des valeurs de T_{imp} dans ce cadre reste aussi élevée qu'avec la typologie (sol * culture) actuelle.

On a donc une forte incertitude sur la valeur pertinente de T_{imp} et cela peut conduire à prendre une marge de sécurité (par exemple, un percentile élevé de la distribution) aboutissant à une valeur élevée de T_{imp} « de référence », largement surestimée pour la grande majorité des cas. Cela a le défaut de crédibiliser abusivement des raisonnements ou outils/produits qui se prétendent plus performants que les pratiques Comifer puisque «non limitantes sous le seuil COMIFER».

De plus, le choix du critère déterminant cette « marge » reste largement arbitraire et donc source de contestation, rendant difficile le consensus.

Il faut noter que le référentiel expérimental traité ici comprend une large proportion d'essais déjà traités en 1993-1995, leur influence reste donc prépondérante, malgré le fait que les essais plus récents, aux résultats plus clairs et nets, conduisent à des estimations de T_{imp} plus basses.

Dans la synthèse des seuils obtenus à échelle de chaque essai, on n'a jusqu'ici introduit aucune pondération pour tenir compte de la qualité des essais (fiabilité & netteté des résultats). On constate que les essais donnent des résultats d'autant plus clairs et utilisables, qu'ils ont duré longtemps. Cela confirme l'intérêt des essais de longue durée pour aborder les questions de biodisponibilité du phosphore.

Pour progresser dans le sens d'un référentiel de T_{imp} plus précis et moins sujets à discussion, il faut réduire la variabilité des T_{imp} à l'intérieur de la typologie des cas « culture * sol », donc surtout améliorer cette dernière.

Dans ce sens plusieurs options peuvent être testées :

- la définition des types de sol : elle doit être plus clairement explicitée sur la base de critères objectifs et autant que possible quantitatifs. Tester l'intérêt d'y ajouter des indicateurs comme ceux abordée au paragraphe 3.3.3. Viser à se rapprocher de types pédologiques cartographiés, qui permettraient d'estimer une valeur de T_{imp} à partir d'une localisation.
- la conversion de valeurs d'une analyse en une autre (JH vers Olsen, etc....) est une source d'incertitude expliquant peut-être certaines valeurs très élevées de P Olsen. Pour éviter ce problème, on pourrait ne le faire que quand on dispose d'une relation forte spécifique au site. Ou bien ne traiter d'un type d'analyse de terre que les cas où l'analyse est effectivement disponible.
- concernant la réponse des cultures à la valeur de l'analyse de terre, elle semble relever autant sinon plus d'un « effet pente » que d'un « effet-seuil ». Toutefois, les deux variables sont liées dans l'ajustement des réponses. Mais beaucoup d'ajustements sont :
 - o incertains : la pente est faible, donc la réponse incertaine. On pourrait poser des conditions plus fortes pour valider la réponse, ex. : valeur du « a » du modèle de réponse (valeur d'IR pour $P_{Olsen} = 0$) inférieur à 0.8 ou 0.5... au lieu de 0.9 actuellement (qui est une exigence qualitative faible),

- basés sur très peu de points, ce qui pose question quant à la fiabilité. On pourrait imposer un pourcentage minimum ou plutôt un nombre plus élevé de points de chaque côté du seuil estimé. Actuellement, il suffit souvent d'un point « répondant » pour valider une réponse. On peut aussi, lors de la synthèse des résultats d'essais pour une catégorie de cas (sol*culture) donner un poids différent aux valeurs des seuils suivant le nombre de points expérimentaux utilisés,
 - on peut aussi tenir compte des essais sans réponse (actuellement inutilisés) pour imposer que le T_{imp} d'un cas soit inférieur aux plus basses valeurs de P_{Olsen} sans réponse.
- la sensibilité relative des cultures semble parfois varier suivant le type de sol. Envisager une typologie des cas tenant compte d'une possible interaction sol*culture : la sensibilité des cultures dépendrait du sol,
 - il faudrait pouvoir prendre en compte d'autres variables pouvant interférer sur la mobilité du P, comme l'irrigation améliorant la disponibilité en eau. Toutefois, les informations manquent à ce sujet pour la plupart des essais,
 - dans une catégorie actuelle (sol*culture), explorer la variabilité pour rechercher des points communs entre les situations présentant des T_{imp} proches, cela pourrait suggérer des pistes pour revoir la typologie.

Dans tout ce qui précède, on a envisagé la fixation de T_{imp} de référence uniquement sur le critère agronomique de non-limitation du rendement. On pourrait davantage prendre en compte la volonté de réduire les risques de pertes de P vers l'environnement, facteur potentiel d'eutrophisation des eaux de surface. Ainsi, Pizzeghello & al (2016), estime la teneur à risque des sols à 20 mg P Olsen / kg soit 45 mg P_2O_5 ce qui est confirmé par des travaux de Dupas et autres estimant la teneur à risque à 45-50 mg P_2O_5 Olsen pour des sols bretons en fond de vallée (et d'autres références citées par Pizzeghello). Toutefois, ce seuil « environnemental » devrait être estimé pour chaque condition locale, tenant compte du pouvoir tampon du sol vis-à-vis des ions phosphate, et des autres facteurs de risque : connectivité vers les cours d'eau, risque érosif, etc. ...

Dans une optique privilégiant la maîtrise du risque environnemental, plutôt qu'un seuil de référence garantissant l'absence de perte de rendement, on pourrait privilégier un seuil (concernant l'analyse de terre en interculture) à partir duquel un apport modéré régulier assure le rendement. On se rapproche alors de la définition du « seuil de renforcement ». Cela serait particulièrement pertinent en cas de sols très filtrants (sable, risque de lixiviation) ou très carbonatés (forte perte de disponibilité du P à court terme). Le problème reste qu'on ne dispose pratiquement pas de données propres à estimer un tel seuil à partir du référentiel expérimental disponible.

A l'inverse, dans des situations où le risque environnemental est faible (fort pouvoir tampon du sol, faible connectivité...) on peut envisager de fertiliser même avec une teneur P du sol au-dessus de T_{imp} , quand le prix de l'engrais est favorable, pour gérer des réserves de P et ajouter ainsi de la résilience technique et économique au système agricole.

Pour limiter le risque environnemental associé à la fertilisation P, il reste prioritaire de promouvoir de bonnes pratiques : (1) limitation de l'érosion (P particulière, mais c'est le moins impactant), (2) des fertilisations organiques modérées (formes plus mobiles dans le sol) et tenant compte des risques de ruissellement (3) des apports au plus près (temps, localisation...) des besoins des cultures. Ce sont les pertes de P soluble qui sont les plus problématique (impactantes) et ce sont bien elles qui sont visées par les seuils de 45-60 mg P_2O_5 Olsen / kg surtout pour les sols proches des eaux de surface (nappes connectées aux cours d'eau, ...).

références bibliographiques

- Aumond, C., Gérard, P., 2015. Un réseau d'essais pluriannuels pour évaluer l'effet d'un apport raisonné de P et de K sur grandes cultures. Actes des Rencontres COMIFER-Gemas 18-19 novembre 2015, Centre des Congrès de Lyon,, <https://comifer.asso.fr/les-presentations-orales-des-12emes-rencontres-2015/>
- COMIFER Groupe PK, 1993. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures Comifer Paris. <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>
- COMIFER groupe PK, 1995. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures. Comifer Paris. <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>
- COMIFER Groupe PK, 1997. Eléments complémentaires à la méthode de raisonnement de la fertilisation P-K permettant d'aider à sa mise en œuvre. Comifer Paris. <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>
- COMIFER Groupe PKMg, 2007. Teneur en P, K et Mg des organes végétaux récoltés pour les cultures de plein-champ et les principaux fourrages. 4 p. <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>
- COMIFER Groupe PKMg, 2009. Fertilisation PK grille de calcul de dose. 2 p. <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>
- COMIFER groupe PKMg, 2019. Fertilisation P-K-Mg. Les bases du raisonnement. 40 pp. Comifer Paris <https://comifer.asso.fr/les-brochures/>
- Jordan-Meille *et al*, 2012, An overview of fertilizer-P recommendations in Europe : soil testing, calibration and fertilizer recommendations: P fertilizer methods in Europe, *Soil Use and Management*, 28 (4), 419-435
- Jordan-Meille *et al* 2023, Quelle méthode choisir pour déterminer des seuils d'impasse en P ? Modèle statistique et mise en œuvre, poster, Actes des Rencontres COMIFER-Gemas, 21-22-23 novembre 2023, Tours, <https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2023/11/R23-POSTER-JordanMeille-SEUILS-P-IMPASSE.pdf>
- Jordan Meille *et al* 2024, Using long-term experiments to help choose the best data processing procedure for establishing P fertilisation thresholds ; *article soumis à European Journal of Agronomy*
- Nawara *et al*, 2017, A comparison of soil tests for available phosphorus in long-term field experiments in Europe : Comparing soil P tests in European long-term fields, *European Journal of Soil Science*, 68 (6), 873-885
- Pizzeghello D. *et al*, 2016, Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution in three soils after long-term mineral and manure application, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233,214-223
- Richer de Forges A. *et al*, 2008, Perdus dans le triangle des textures, *Etude et Gestion des Sols*, 15 (2), 97-111



Schvartz, C., Julien, J.-L., 2009. Peut-on établir une correspondance entre les teneurs P Olsen et Joret-Hébert ou Dyer à partir de la BDAT ? Actes des Rencontres COMIFER-Gemas « Fertilisation et analyse de terre, quoi de neuf en 2009 » 25-26 novembre 2009, Centre des Congrès de Blois,

Steinfurth *et al*, 2022, Thresholds of target phosphorus fertility classes in European fertilizer recommendations in relation to critical soil test phosphorus values derived from the analysis of 55 European long-term field experiments, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 332, 107926

