



Détermination du phosphore biodisponible dans les sols ferrallitiques de Guadeloupe

Franck Solvar, Lucienne Desfontaines & Jorge Sierra

Contact : franck.solvar@inrae.fr

Unité Agrosystèmes Tropicaux
INRAE Antilles-Guyane

Avril 2021



Sommaire

Résumé..... 3

1. Introduction..... 4

2. Les méthodes testées pour évaluer le P biodisponible 5

3. Expérimentation en serre..... 6

4. Critères de sélection d'une méthode évaluant le P biodisponible 7

5. Résultats obtenus..... 7

 5.1. Croissance de la plante et absorption de P..... 7

 5.2. Test des méthodes évaluant la biodisponibilité de P..... 8

 5.3. Une contrainte des sols acides : la fixation de P 9

 5.4. Calibration de la méthode sélectionnée et conseil de fertilisation 10

6. Conclusions..... 10

Photo page de couverture : feuillage de goyavier déficient en phosphore. Crédit debroussaillez.fr

Résumé

Contexte

Le phosphore (P) est un nutriment majeur pour la plante, mais il présente une grande réactivité dans les sols, en particulier dans les sols acides. Cette caractéristique détermine une forte fixation du P appliqué, ce qui le rend non disponible pour les racines, et qui représente une contrainte importante pour l'obtention d'un bon indicateur de la fertilité phosphorée.

Objectif

Dans cette étude nous avons testé cinq méthodes de détermination du P biodisponible dans un sol ferrallitique du nord de la Basse-Terre. Le but était de calibrer une méthode qui puisse être utilisée par la suite dans le diagnostic agronomique.

Résultats

La méthode de Mehlich 3 a été celle qui a montré la meilleure performance globale en termes de corrélation entre les teneurs de P biodisponible mesurées et la production de biomasse de la plante (maïs tropical), et de précision de la détermination (p.ex. faible variabilité entre répétitions). Les résultats ont confirmé la grande capacité des sols ferrallitiques à fixer le P : deux mois après l'application de l'engrais phosphoré, 68% du P appliqué se trouvent dans le sol sous des formes chimiques qui peuvent ne pas être utilisables pour la plante durant le cycle cultural. Sur la base de nos résultats, nous avons élaboré un schéma de fertilisation phosphorée dans les sols ferrallitiques qui tient compte des teneurs en P biodisponible déterminées par la méthode de Mehlich 3.

1. Introduction

L'azote, le potassium et le phosphore (P) font partie des nutriments dits majeurs dont la plante a besoin en grande quantité lors de sa croissance et, de ce fait, ce sont les éléments les plus susceptibles de se trouver en déficit dans les sols. C'est particulièrement le cas du P parce que, quelle que soit la richesse de P total d'un sol, le P utilisable par la plante (P soluble, Fig. 1) représente une infime fraction de ce total (p.ex. moins de 0.01%). D'ailleurs, le P soluble est extrêmement réactif et est soumis à de nombreux processus physico-chimiques (adsorption, désorption, précipitation, solubilisation) et biologiques (minéralisation, immobilisation, décomposition des résidus des plantes) qui affectent sa teneur dans le sol (Fig. 1). Ainsi, une fourniture correcte de P à la plante exige le renouvellement permanent du P soluble suite à l'absorption racinaire (p.ex. la plante absorbe par jour une quantité de P équivalente à 30-40 fois la teneur en P soluble mesurée à un moment donné). De plus, les processus physico-chimiques d'adsorption/désorption et de précipitation/solubilisation sont exacerbés dans les sols ferrallitiques à cause des forts effets de l'acidité et des teneurs élevées en aluminium et en fer, ce qui rend plus problématique la détermination de la dynamique du P soluble.

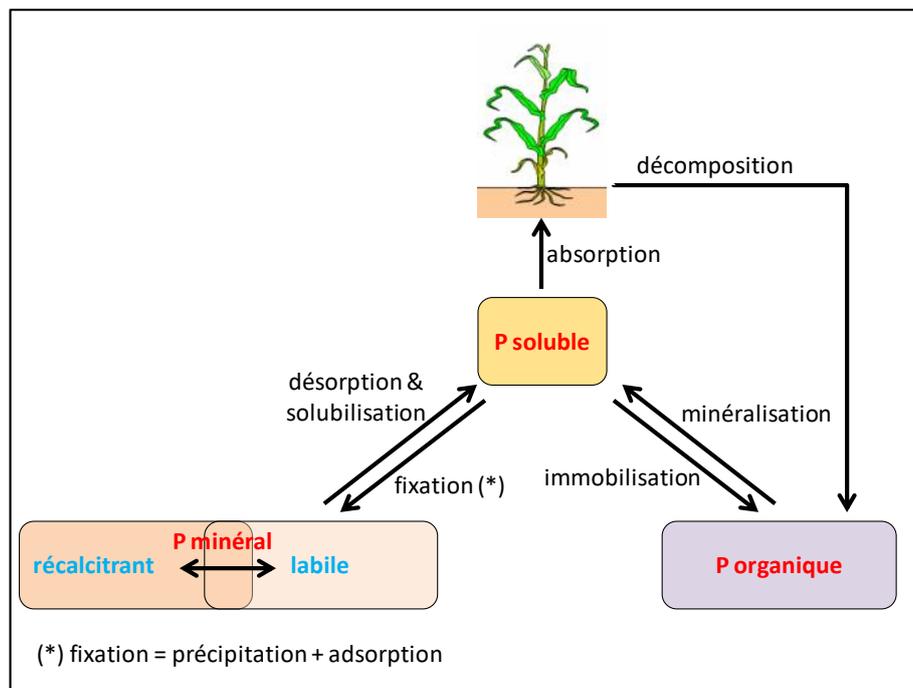


Fig. 1 : Relations entre les fractions de P dans le sol.

Dans ce contexte, le diagnostic de la fertilité phosphorée des sols, les sols ferrallitiques en particulier, ne peut pas être basé sur la mesure du P soluble, et nécessite la quantification des fractions qui participent à son renouvellement quotidien. Ces fractions, dites labiles¹ (Fig. 1), assurent la biodisponibilité du P mais sont très diverses d'un point de vue chimique, et varient avec le type et la gestion du sol (p.ex. fertilisation, amendements organiques, présence de pailles, chaulage, etc.). Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs méthodes de quantification de ces fractions ont été proposées dans la littérature

¹ Le renouvellement quotidien du P soluble est assuré majoritairement par la fraction minérale du P. La contribution de la minéralisation du P organique, plus lente, est seulement considérée dans les études de moyen terme.

agronomique. Ces méthodes s'appuient sur des extractions chimiques en laboratoire qui tiennent compte de la solubilité du P dans des conditions physico-chimiques spécifiques, lesquelles essaient de simuler celles du sol. Comme ces dernières sont elles-mêmes très variables, la plupart des méthodes ne sont comparables ni pour un sol donné ni entre des sols différents, et doivent par conséquent être calibrées et testées pour chaque situation.

L'objectif de cette étude a été d'évaluer l'intérêt de cinq méthodes proposées dans la littérature afin d'estimer la fraction du P contribuant au renouvellement du P soluble. Les teneurs en P biodisponible ainsi déterminées dans un sol ferrallitique ont été comparées avec la réponse du maïs en termes de croissance et d'absorption de P. Le but était de proposer une méthode fiable et calibrée pour son utilisation dans le diagnostic de la fertilité phosphorée des sols ferrallitiques du nord de la Basse-Terre.

2. Les méthodes testées pour évaluer le P biodisponible

Nous décrivons ici brièvement les méthodes testées sans détailler les procédures de détermination utilisées².

Méthode d'Olsen (1954) : initialement mise au point pour les sols calcaires, elle a été appliquée par la suite à une gamme de sols plus vaste. L'extraction est peu agressive et elle solubilise moins les phosphates de rapport calcium/P élevé, ce qui ne représente pas une contrainte dans les sols ferrallitiques.

Méthode de Dyer (1984) : utilisée dans les sols acides ou neutres, elle est relativement agressive et donne en général les résultats les plus élevés pour un même échantillon de sol. Le fait que la méthode soit agressive lui confère une faible incertitude, ce qui explique son usage courant dans les sols agricoles.

Méthode de Joret-Hébert (1955) : cette méthode est considérée comme satisfaisante en sols calcaires à légèrement acides. Elle donne des résultats inférieurs à ceux obtenus avec la méthode de Dyer, mais en conservant une faible incertitude.

Méthode de Mehlich 3 (1984) : elle a été proposée comme méthode d'extraction pour plusieurs éléments nutritifs du sol, et est actuellement très utilisée dans les sols minéraux et organiques. Cette méthode robuste qui fonctionne aussi bien dans les sols acides, neutres et légèrement alcalins, sert à la détermination des oligo-éléments tels que l'aluminium, le cuivre, le zinc, le manganèse et le fer, très présents dans les sols ferrallitiques.

Méthode de Truog (1930) : cette méthode a été initialement testée et calibrée dans les sols sous prairie de Nouvelle-Zélande, et est actuellement très utilisée dans la recherche agronomique. Elle peut avoir certaines limitations liées à l'extraction d'une partie du P minéral récalcitrant (Fig. 1), ce qui risque de biaiser l'évaluation du P biodisponible.

² Nous proposons aux lecteurs intéressés par ces procédures de contacter Mme Lucienne Desfontaines, lucienne.desfontaines@inrae.fr, responsable du Laboratoire d'Analyses de l'Unité Agrosystèmes Tropicaux où les analyses de P biodisponible ont été réalisées.

3. Expérimentation en serre

Les teneurs en P biodisponible déterminées avec les méthodes décrites ci-dessus ont été comparées avec la biomasse et l'absorption de P des plantes de maïs cultivées en serre sur un sol ferrallitique (pH 5.0) du Domaine Duclos de l'INRAE (Fig. 2). Ce sol avait montré une forte carence en P biodisponible lors des expérimentations précédentes. La variété de maïs utilisée a été *spectral*, créée à l'INRAE en Guadeloupe dans les années 1990. Cette variété est tolérante à l'acidité et très sensible à la fertilité phosphorée, ce qui permet d'obtenir des réponses claires à la variation de la biodisponibilité du P.



Fig. 2 : Expérimentation en serre.

L'expérimentation a été réalisée en pots contenant l'équivalent de 5 kg de sol séché à l'air et tamisé à 5 mm. Afin d'obtenir des niveaux différents de biodisponibilité de P, nous avons utilisé 9 doses de P sous la forme de superphosphate triple : 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 et 160 kg P/ha. La dose exprimée en kg/ha a été calculée en tenant compte de la masse de sol contenue dans les pots. Pour chaque dose de P nous avons appliqué trois traitements sol/plante :

- * Traitement T1, sol nu pour la détermination du P biodisponible juste après l'application de l'engrais (p.ex. 24 heures après la fertilisation) ;
- * Traitement T2, sol nu pour la détermination du P biodisponible 2 mois après l'application de l'engrais ;
- * Traitement T3, sol + plante (1 plante/pot) pour la détermination de la biomasse végétale (partie aérienne et racines), de la biomasse phosphorée (partie aérienne et racines) et de la biodisponibilité de P dans le sol, 2 mois après l'application de l'engrais.

Les résultats obtenus en T1 ont été utilisés pour tester les méthodes et calibrer la méthode sélectionnée sur la base de la réponse de la plante observée en T3. Les résultats obtenus en T2 ont été utilisés afin d'estimer la fixation du P apporté pendant les deux mois de l'expérimentation (Fig. 1). T3 a été aussi utilisé pour déterminer le bilan de P à la fin de l'expérimentation.

Chacun des 27 traitements (9 doses x 3 traitements sol/plante) a eu 2 répétitions (p.ex. 54 pots au total au début de l'expérimentation). Tous les pots ont reçu l'équivalent de 150 kg N/ha (urée) et 150 kg K/ha (sulfate de potassium) au début de l'expérimentation, afin d'éviter les limitations provoquées par d'autres nutriments que le P. Les pots ont été arrosés

tous les 2-3 jours pendant l'expérimentation afin d'assurer une teneur en eau équivalente à 80% de la capacité au champ du sol. La quantité d'eau d'arrosage a été calculée sur la base de la perte de poids enregistrée sur une dizaine de pots. Les 5 méthodes d'extraction du P biodisponible ont été appliquées au sol des 54 pots, lequel a été homogénéisé avant les analyses. La biomasse de la plante entière (en matière sèche) a été déterminée après séchage à 70°C pendant 72 heures. Le P de la plante a été mesuré après broyage à <0.2 mm par digestion à l'eau régale et dosage par colorimétrie. La biomasse phosphorée de la plante a été calculée à partir de sa biomasse sèche et de sa teneur en P.

4. Critères de sélection d'une méthode évaluant le P biodisponible

Cette sélection a été réalisée sur la base des résultats obtenus dans les traitements T1 et T3, et a reposé sur quatre critères :

- 1) Une bonne corrélation entre la teneur en P biodisponible mesurée en T1 et la dose d'apport de P. Cette condition implique en particulier une tendance croissante et régulière des teneurs en P biodisponible mesurées en réponse à l'augmentation de l'apport de P, ce qui sert à vérifier la pertinence de la méthode.
- 2) Au delà de cette bonne corrélation, l'amplitude des teneurs mesurées en T1 doit être du même ordre de grandeur que celle du P apportée, ce qui réduit le risque d'irrégularités dans la relation P biodisponible vs P apporté, en diminuant ainsi le degré d'incertitude.
- 3) Une faible variabilité entre les mesures réalisées pour un même échantillon de sol en T1 (répétitions), ce qui sert à vérifier la précision de la méthode.
- 4) Le respect des deux premiers critères devrait conduire à obtenir une bonne corrélation entre les mesures de P biodisponible en T1 et la réponse de la plante à l'apport de P, ce qui permettrait d'établir un système de diagnostic de la fertilité phosphorée. Néanmoins, cette corrélation doit être vérifiée lors de l'expérimentation en serre (T3) car la plante peut ne pas réagir à l'apport de P si d'autres facteurs limitent sa réponse (p.ex. teneur initiale en P biodisponible dépassant le besoin de la plante, carence d'autres nutriments, faible potentiel génétique de réponse, etc.).

Les trois premiers critères sont analysés dans la section 5.2., le quatrième critère est discuté dans la section 5.4.

5. Résultats obtenus

5.1. Croissance de la plante et absorption de P

La variation de la biomasse de la plante en fonction de la dose P a montré une tendance classique de décroissance de la réponse avec l'augmentation de la dose apportée (Fig. 3), mais sans atteindre un plateau qui aurait mis en évidence une limitation associée à un autre facteur que le P biodisponible. Entre 0 et 160 kg P/ha, l'augmentation de la biomasse sèche a été de 9 fois et de 14 fois pour la biomasse phosphorée. En moyenne la biomasse phosphorée de la plante à la fin de l'expérimentation a représenté 22% du P

appliqué. Cette valeur ne doit pas être considérée comme un indicateur de l'efficacité de l'engrais car la plante a été récoltée avant maturité.

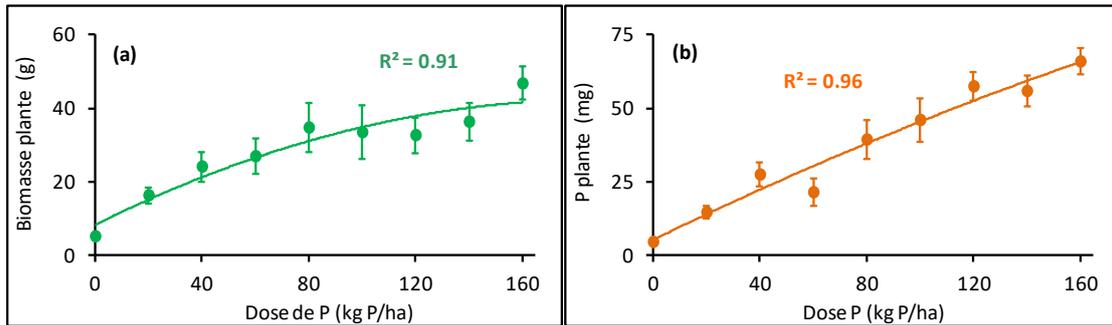


Fig. 3 : Résultats de l'expérimentation en serre : (a) biomasse totale de la plante, (b) biomasse phosphorée.

Le coefficient de variation moyen a été de 18% pour la biomasse sèche et de 16% pour la biomasse phosphorée. Ces valeurs sont dans la gamme de celles retrouvées dans ce type d'expérimentation, et assurent une relativement faible incertitude lors de la démarche de calibration.

5.2. Test des méthodes évaluant la biodisponibilité de P

Les valeurs de P dans le sol obtenues en utilisant les méthodes de Dyer et de Joret-Hébert ont été très faibles (<3 ppm) pour tous les traitements testés, sans aucune tendance particulière en fonction des doses de P apporté. Dans une expérimentation parallèle réalisée sur un vertisol, nous avons obtenu des valeurs 4-5 fois supérieures en utilisant ces méthodes. Ce constat nous amène à penser que les faibles valeurs observées pour le sol ferrallitique ne sont pas liées aux procédures utilisées, mais reflètent le manque d'adéquation de ces méthodes aux conditions des sols acides. Nous avons en conséquence écarté ces deux méthodes dans le reste de notre évaluation.

Des trois méthodes finalement évaluées, Mehlich 3 a été celle qui a mieux rempli le premier critère de sélection concernant la bonne corrélation entre les mesures de P biodisponible et la dose de P apporté (p.ex. $R^2 = 0.92$; Fig. 4c). La faible corrélation obtenue avec Truog reflète la grande irrégularité des teneurs en P biodisponible en fonction de la dose (Fig. 4b). Il est possible que cette irrégularité soit liée à la présence dans le sol de microsites très acides où la méthode extrait une partie du P récalcitrant. Cette hypothèse pourrait expliquer le fait que Truog a été la méthode présentant les valeurs les plus élevées. Par exemple, la moyenne de P biodisponible pour toutes les doses a été de 35 ppm pour Truog (Fig. 4b), 11 ppm pour Mehlich 3 (Fig. 4c) et 4 ppm pour Olsen (Fig. 4a). Si notre hypothèse est vraie, cela voudrait dire que Truog extrait une partie du P qui n'est pas effectivement disponible pour la plante.

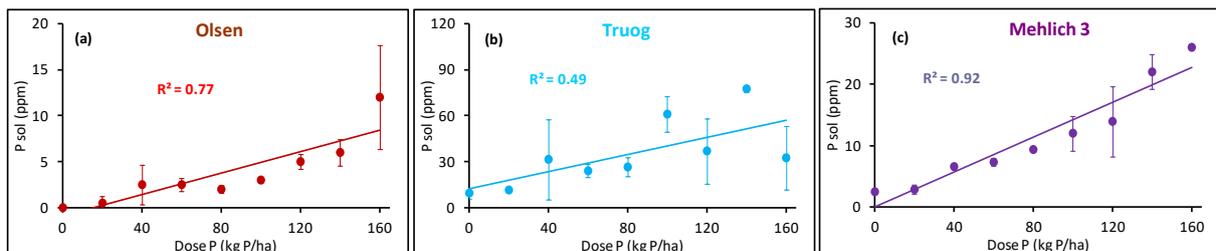


Fig. 4 : Résultats de P biodisponible (P sol) obtenus dans le traitement T1 (sol nu, début d'expérimentation) en utilisant les méthodes (a) Olsen, (b) Truog et (c) Mehlich 3.

La méthode de Mehlich 3 a été aussi celle qui a mieux rempli le deuxième critère de sélection concernant l'amplitude des valeurs observées par rapport à celle de la dose apportée. Par exemple, le rapport entre les valeurs de P biodisponible obtenues pour la dose de 160 kg P/ha (26.0 ppm) et de 20 kg P/ha (2.8 ppm) a été de 9.3 (26.0/2.8) (Fig. 4c), contre 8 pour la dose elle-même (160/20). Le rapport a été de 24 pour Olsen et de 3 pour Truog, mais l'irrégularité des valeurs obtenues à la dose maximale a probablement biaisé ces rapports (Fig. 4a et 4b).

Finalement, la variabilité observée pour un même échantillon de sol a été plus faible dans le cas de Mehlich 3, ce qui reflète une plus grande précision de la détermination. En effet, la moyenne du coefficient de variation pour toutes les doses testées a été de 20% pour Mehlich 3, 30% pour Olsen et 34% pour Truog.

En conséquence, Mehlich 3 a été la méthode montrant la meilleure performance globale. Dans le reste de ce rapport nous utiliserons les résultats obtenus avec cette méthode afin d'estimer la fixation de P (section 5.3.) et de réaliser la calibration sol/plante (section 5.4.).

5.3. Une contrainte des sols acides : la fixation de P

La Fig. 5a montre la relation entre les mesures de P biodisponible réalisées en T1 et T2. Si aucun processus du sol n'avait affecté le P biodisponible mesuré en début d'expérimentation (T1), les points devraient s'aligner sur la droite 1:1 de la Fig. 5a, car l'absorption végétale était absente en T1 et T2. Le fait que la relation T1 vs T2 se trouve au-dessous de cette droite implique que les mécanismes de fixation (p.ex. adsorption et précipitation, voir Fig. 1) ont agi sur le P biodisponible mesuré en T1. Ce mécanisme peut être mieux évalué avec le bilan réalisé à la fin de l'expérimentation (Fig. 5b). Ainsi, en moyenne, 68% du P appliqué se trouvent dans le sol sous des formes inconnues à la fin de l'expérimentation, et seulement 9% se trouvent sous des formes mesurées par la méthode de Mehlich 3. Comme indiqué plus haut, 22% du P appliqué se trouve dans la biomasse de la plante.

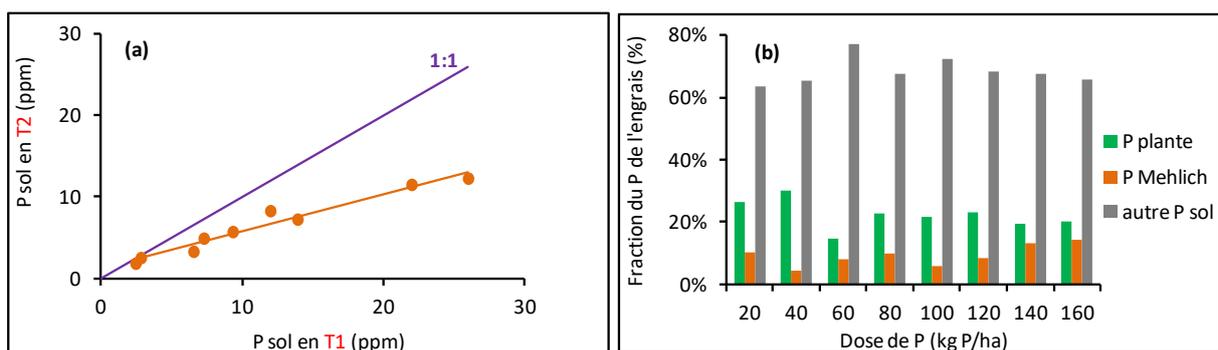


Fig. 5 : (a) Relation entre le P biodisponible (Mehlich) déterminé en T1 (sol nu juste après l'application de l'engrais) et en T2 (sol nu 2 mois après l'application de l'engrais), (b) bilan de P à la fin de l'expérimentation. En (b), "autre P sol" indique le P qui reste dans le sol et qui est sous des formes inconnues.

Ces résultats confirment la forte capacité fixatrice de P des sols ferrallitiques. En réalité, nous ne savons pas quelle proportion de ces 68% de P est devenu récalcitrant (Fig. 1), donc non utilisable par la plante, et quelle fraction est labile mais non mesurée par la méthode de Mehlich 3. De plus, des échanges entre ces deux fractions (voir Fig. 1) peuvent exister en fonction des conditions du sol, même si dans le long terme la tendance est à la

transformation du P appliqué en P minéral récalcitrant. En tout état de cause, le sol ferrallitique fonctionne comme un compétiteur de la plante pour le P utilisable, même à des doses élevées (Fig. 5b).

5.4. Calibration de la méthode sélectionnée et conseil de fertilisation

La Fig. 6 montre qu'il y a une très bonne corrélation avec un R^2 de 0.90 entre la biomasse de la plante et le P biodisponible déterminé par la méthode de Mehlich 3 en début d'expérimentation. En conséquence, cette méthode remplit parfaitement le quatrième critère détaillé plus haut et peut être utilisé comme un indicateur de la fertilité phosphorée dans les sols ferrallitiques.

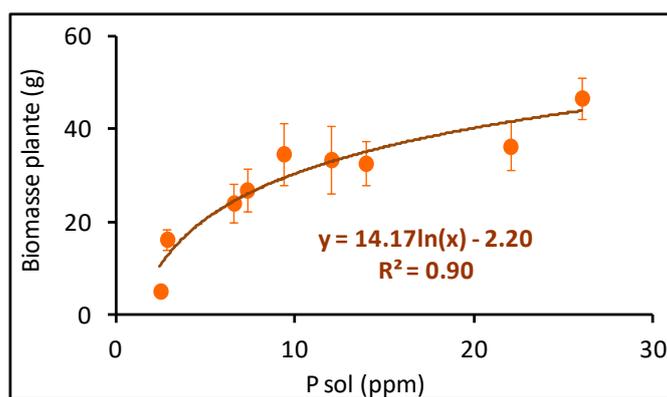


Fig. 6 : Relation entre le P biodisponible déterminé par la méthode de Mehlich 3 en T1 (sol nu, début d'expérimentation) et la biomasse de la plante à la fin de l'expérimentation.

Sur la base des doses utilisées dans notre étude et des valeurs observées de P biodisponible, nous avons construit le Tableau 1 avec des conseils de fertilisation en fonction des teneurs en P mesurées. Les doses préconisées sont données à titre indicatif et devraient être adaptées au système sol-plante spécifique. Par exemple, pour des sols moins acides que celui utilisé dans cette étude (p.ex. pH >5), la dose correspondrait aux valeurs inférieures des fourchettes indiquées dans le Tableau 1, car la capacité de fixation du sol serait moindre.

Tableau 1 : Dose de P à appliquer en fonction du P biodisponible dans le sol déterminé par la méthode de Mehlich 3.

P biodisponible (Mehlich) (ppm)	Dose de P à appliquer (kg P/ha)
<6	120-160
6-12	80-120
12-18	40-80
>18	0-40

6. Conclusions

La démarche que nous avons appliquée dans cette étude est originale en Guadeloupe. Elle a permis d'établir que la méthode de Mehlich 3 répond bien aux critères de fiabilité exigés à un indicateur de fertilité phosphorée. La procédure de calibration employée est simple, peu coûteuse et peut être utilisée dans d'autres sols de Guadeloupe ayant des

caractéristiques différentes de celles du sol ferrallitique testé ici (vertisols, andosols, nitisols).

Nos résultats ont confirmé que les sols ferrallitiques ont une grande capacité fixatrice de P ce qui rend problématique la gestion de leur fertilisation minérale. Il apparaît évident qu'une partie du P appliqué sera destinée à combler la capacité de fixation, sans connaître actuellement dans quelle mesure la fraction fixée peut être disponible pour la plante à moyen terme (p.ex. reliquat potentiellement utilisable dans le cycle de culture suivant. Une analyse du P biodisponible de la parcelle tous les deux ans devrait aider à évaluer ce reliquat et permettrait d'affiner progressivement les conseils de fertilisation.

Afin de réduire la compétition sol/plante pour le P appliqué, il convient donc de l'appliquer au plus près de la zone de développement racinaire. En effet, à la différence de l'azote et du potassium, et à cause de la faible mobilité du P soluble, ce sont les racines qui vont vers le P et non le P vers les racines. D'ailleurs, les doses à appliquer ne devraient pas dépasser largement les besoins de la plante afin de ne pas exacerber les processus de fixation, et rétro-alimenter ainsi la capacité fixatrice du sol.