

Effet des engrais organo-minéraux inoculés (EOMI) sur la croissance des plants de maïs-grain, les rendements, les prélèvements des éléments nutritifs et la qualité des grains

*P.-P. CLAUDE¹ et M. GIROUX²

RÉSUMÉ - P.-P. Claude et M. Giroux, *Effet des engrais organo-minéraux inoculés (EOMI) sur la croissance des plants de maïs-grain, les rendements, les prélèvements des éléments nutritifs et la qualité des grains.* *Agrosol.* 17 (1) : 51-64. Le démarrage de la culture du maïs-grain au Québec profite généralement de l'apport d'engrais phosphatés à proximité des semences, même en sols relativement bien pourvus en phosphore. Cependant, cet apport contribue au bilan du P des champs de maïs-grain, laissant moins de place aux épandages d'engrais de ferme. Il peut être avantageux de chercher à réduire les apports de P et de N dans les parcelles en augmentant l'efficacité fertilisante des engrais de démarrage. L'utilisation d'engrais organo-minéraux inoculés (EOMI) avec des bactéries favorisant la croissance des plantes (BFPC) et disposés à proximité des semences comme engrais de démarrage a été étudiée sur deux types de sols au Québec : un podzol et un gleysol. Les EOMI ont permis d'augmenter la croissance des jeunes plants (34 jrs) tout autant que le MAP (phosphate d'ammonium monobasique) apporté à une dose 2,5 fois plus élevée en phosphore. Cet effet est aussi perceptible, bien que moins prononcé, au niveau de la hauteur des plants (49 et 54 jrs) et de l'indice chlorophyllien (71 jrs). L'effet du MAP et des EOMI sur les teneurs en P des feuilles de l'épi (71 jours) est comparable, malgré des apports de P moins élevés. Les EOMI ont été plus efficaces sur le gleysol, plus riche en phosphates calco-magnésiens, que sur le podzol, plus riche en phosphates alumino-ferriques. Des augmentations significatives des rendements en grains et des prélèvements en phosphore avec les EOMI reliées à la bactériation des EOM (engrais organo-minéraux non-bactérisés) ont été mesurées sur le gleysol mais non sur le podzol. Les enjeux agro-environnementaux de ces nouveaux engrais organo-minéraux sont discutés.

Mots clés : engrais organo-minéraux, engrais de démarrage, BFPC, bactériation des engrais organo-minéraux, fertilisation phosphatée du maïs.

ABSTRACT - P.-P. Claude et M. Giroux, *Effects of inoculated organo-mineral fertilizers on corn growth, yields, nutrient uptakes and grain quality.* *Agrosol.* 17 (1) : 51-64. The use of banded starter fertilizers for corn in Quebec is generally recommended even in relatively high soil P. However, the use of starter fertilizers further increases soil phosphorus content thus reducing the possibility for environmentally secure manure applications. Increase P efficiency of starter fertilizers is thus a useful for the reduction P and N-fertilizer application. The agronomic use of granulated organo-mineral fertilizers (OMF) containing plant growth promoting bacteria (PGPB) and banded at seeding as would be standard starter fertilizers was tested for use in grain-corn production on two soil type (podzol and gleysol) in Quebec. In comparison to the non-fertilized and non-inoculated controls, the OMF-PGPB fertilizer attributable increased seedling development and dry-matter accumulation 34 days after seeding are comparable to those observed with MAP (mono-ammonium phosphate) containing two to three times more available phosphorus. This relative efficiency of the OMF-PGPB fertilizer was still somewhat detectable 49 and 54 days after seeding on plant height, and 71 days after seeding on chlorophyll indices and P status in ear leaves 71 days after seeding. OMF-PGPB is more effective on the gleysol, somewhat richer in calcium and magnesium phosphates, than on podzol, rich in alumino-feric P. In fact, grain yield increases attributable to OMF-PGPB were detected on the gleysol only. The agro-environmental implications of these new biofertilizers are discussed.

Keywords : organo-mineral fertilizers, starter-fertilizer, PGPR, bacterization of organo-mineral fertilizers, corn P fertilization.

1. POLYOR inc., App. 93, Bâtiment D, 32, avenue Jean-Baptiste Lamarck, 31130 Balma (Toulouse) France.

*Auteur pour la correspondance : téléphone : 33(0) 5 61 24 89 47, télécopieur : 33(0) 6 12 35 91 41, courriel : polyor.claude@laposte.net

2. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), 2700 rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8, Canada

Introduction

En régions tempérées froides, comme le Québec, une température du sol trop basse, inférieure à 15 °C au moment des semis, peut nuire au développement des jeunes plants de maïs. La localisation des engrais de démarrage contenant de l'azote et du phosphore est reconnue comme une mesure efficace pour stimuler leur croissance. Même dans les zones tempérées plus chaudes, les semis hâtifs, effectués parfois en avril, peuvent eux aussi profiter de cette localisation des engrais. Ceci est d'autant plus vrai pour le maïs-grain cultivé en semis direct parce que les résidus de culture retardent le réchauffement du sol (Neihues *et al.* 2004, Kaiser *et al.* 2005). Aujourd'hui, le démarrage des cultures de maïs-grain (*Zea mays* L.) nécessite au Québec l'application en bandes de 25 à 50 kg de P₂O₅ granulaire à proximité des semences avec un complément de 20 à 50 kg d'azote afin d'assurer une bonne disponibilité en éléments nutritifs aux plantules (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2004). La fumure de démarrage contribue de façon importante au bilan du P de la parcelle et rend souvent difficile l'atteinte du dépôt maximal de P sur les parcelles exigé par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP), lorsque des engrais de ferme sont utilisés en plus.

L'utilisation de matières fertilisantes moins riches en P, mais tout aussi efficaces pour le démarrage des cultures, pourrait contribuer à réduire le bilan d'apport du P, laissant plus de place pour les épandages d'engrais de ferme. Les engrais organo-minéraux (EOM) granulés (Provencher 2003, Khiari et Parent 2003, Khiari *et al.* 2000) permettent une réduction des apports de P avec une amélioration de sa disponibilité. Selon Parent (2003), l'interaction entre les ligands organiques des EOM et les sites de fixation des orthophosphates dans le sol permet de réduire la fixation du phosphore et d'augmenter sa disponibilité pour les plantes. Pour l'essentiel, ces sites de fixation sont des hydroxydes de fer et d'aluminium libres ainsi que du calcium et du magnésium sur les sites d'échanges. En se liant à ces sites

de fixation, ces ligands augmentent indirectement la disponibilité et donc l'assimilation des phosphates par la plante. La mise sur le marché des engrais EOM comme engrais de démarrage connaît au Québec un certain succès (Dupuis 2004).

La bio-fertilisation par inoculation de bactéries favorisant la croissance des plantes (BFCP) est déjà bien connue pour les cultures *Leguminosea* et a fait l'objet d'un important développement bio-industriel (Bashan 1998), ce qui n'est pas le cas pour les cultures non-*Leguminosea* (Antoun *et al.* 1998). L'efficacité agronomique des BFCP destinées aux cultures non-*Leguminosea* est limitée entre autres par la quantité d'exsudats racinaires qui leur sont disponibles (Lynch et Whipps 1990, Alden *et al.* 2001) et par leur niveau de « compétence édaphique » et d'adaptation à la vie dans les sols (Van Veen *et al.* 1997). En présence de grandes quantités de résidus de culture, cette limitation peut être partiellement contournée si les BFCP sont appliquées directement par pulvérisation sur ces résidus qui servent de substrats carbonés et énergétiques (Claude et Fillion 2004, Claude 2001). En absence de résidus de culture, le problème demeure entier et l'efficacité agronomique des BFCP pour les cultures non-*Leguminosea* est assez limitée (Freitas *et al.* 1997). De plus, ceux-ci sont aujourd'hui surtout utilisés dans des systèmes de culture moins intensifs que ceux que l'on retrouve dans la vallée du Saint-Laurent (Kumar et Naurla 1999, Canbolat *et al.* 2005).

Or, il est maintenant possible de combiner BFCP et EOM. La bactériation des EOM à l'aide d'inocula BFCP peut en principe augmenter l'efficacité fertilisante de ces engrais en stimulant la bio-disponibilité de ces éléments nutritifs. Cependant, les réactions acide-base et les phénomènes d'osmolyse à proximité des granules attribuables aux sels de N et de P contenus dans les EOM peuvent nuire à la viabilité de BFCP introduites (Nautiyal *et al.* 2000). Pourtant, l'incorporation de BFCP à des engrais organo-minéraux (EOM) granulés permettrait d'une part de conférer une triple action organique, minérale et bactérienne aux engrais de démarrage, et d'autre part, de faciliter le conditionnement et le transfert des BFCP vers les zones racinaires des

cultures non-*Leguminosea*. Cette utilisation des EOM comme expédients pour inoculer BFCP permettrait de réduire sensiblement la quantité de phosphore apporté au démarrage de la culture, notamment par voie d'une solubilisation des composés phosphatés *calco-magnésiens* normalement peu solubles. Cette action de dissolution des composés phosphatés récalcitrants, dite « MPS » (*mineral phosphate solubilization*) est bien documentée (Kim *et al.* 2003, Kumar et Narula 1999, Rodriquez et Fraga 1999, Arshad et Frankenberg 1998, Chabot *et al.* 1993, 1998; Kim *et al.* 1997), mais n'a jamais été utilisée conjointement avec les EOM destinés aux démarrages des grandes cultures.

Le but de cette étude est de mesurer sur le maïs-grain les effets de prototypes d'engrais de démarrage à base d'EOM enrichi de BFCP particulièrement rustiques et bien adaptées à la vie dans les sols par rapport à un démarreur conventionnel à base de MAP (phosphate d'ammonium mono-basique) et de nitrate d'ammonium, plus riche en azote et en phosphore.

Méthodologie

L'étude sur la comparaison des engrais de démarrage bactérisés (EOMI) avec une fumure minérale de référence s'est déroulée en cabinets de croissance et au champ. Elle a porté sur deux types de sol; le premier est un podzol de la série Batiscan et le second, un gleysol de la série Le Bras (tableau 1). Deux prototypes d'EOMI, fabriqués par Polyor inc. (Montréal, Québec) à partir de mélanges dont la composition est décrite au tableau 2 ont été comparés en cabinets de croissance à une fumure minérale de démarrage composée de phosphate d'ammonium mono-basique (MAP, 12-51-0) et d'un complément de 20 kg N/ha provenant du nitrate d'ammonium calcique (34-0-0) dans les deux types de sol. Le MAP constitue la fraction minérale de ces engrais organo-minéraux, alors que des solides de lisiers de porcs constituent la base organique pour le mélange 1 et des boues de papetières pour le mélange 2. Les prototypes d'EOMI ont aussi été testés avec et sans complément de nitrate d'ammonium (20 kg-N/ha) pour en évaluer l'éventuelle

bactéricidité. La description des six (6) modalités de fertilisation de démarrage, dont quatre ont fait l'objet d'essais en cabinets de croissance et six au champ, est présentée au tableau 3.

Les deux prototypes EOMI testés sont des EOM auxquels 5×10^4 BFCP par gramme ont été incorporées, soit 5×10^7 cellules par kg, ou encore 4×10^{12} cellules par hectare (pour une dose/ha de 80 kg d'engrais de démarrage); ce dosage bactérien est comparable à celui rapporté par Claude et Fillion (2004) pour la bactérisation des résidus de culture au sol destinés à la bio-fertilisation des blés d'hiver en France. Les cellules souches des BFCP ont été isolées de gleysol (Saint-Lambert, Qc – tableau 1) et de podzol (Deschambault, Qc – tableau 1) par Polyor inc. (Montréal, Québec) selon la procédure développée par Claude (2001) et sélectionnées en fonction de leur pouvoir MPS, selon Kumar et Narula (1999). Elles sont capables de résister à une pression osmotique attribuable aux sels de phosphate d'ammonium présents dans la formulation des EOMI.

Nous avons émis quatre hypothèses de travail :

- **Ho1** : les engrais de démarrage sont plus efficaces dans les sols les moins saturés en P déterminés selon le rapport P/Al. Plus précisément, le sol podzologique qui est de loin le plus saturé en P par rapport au sol gleysologique devrait montrer moins d'effets à l'apport de phosphore;
- **Ho2** : l'efficacité relative des EOMI par rapport au traitement EOM non bactérisés, sera plus détectable sur le sol gleysologique plus riche en phosphates *calco-magnésiens* que sur le sol podzologique plus riche en phosphates *aluminoferriques*. Selon les données du tableau 1, la quantité de calcium et de magnésium par rapport à celle du phosphore sur sol gleysologique est dix fois celle mesurée sur sol podzologique;
- **Ho3** : les EOMI constitués d'un mélange organique dont le rapport C/N est faible seront plus efficaces que ceux constitués d'un mélange au rapport C/N plus élevé. Selon les données du tableau 2,

Tableau 1. Caractérisation physico-chimique des podzols sableux et gleysol limoneux.

| Caractéristique | Gleysol | Podzol | Gleysol/Podzol |
|-----------------|-------------------|------------------|----------------|
| Série | LeBras | Batiscan | na |
| Texture | Loam limoneux | Loam sableux | na |
| Localité | Saint-Lambert, Qc | Deschambault, Qc | na |
| % sable | 17 | 56 | 0,30 |
| % slimon | 63 | 34 | 1,85 |
| % d'argile | 20 | 10 | 2,00 |
| pH eau | 5,79 | 5,95 | 0,97 |
| % M. O. | 2,61 | 3,26 | 0,80 |
| % N total | 0,174 | 0,07 | 2,49 |
| CEC | 15,6 | 14,1 | 1,11 |
| Mehlich-3 | mg/kg | mg/kg | G/P |
| P | 36 | 229 | 0,16 |
| K | 87 | 81 | 1,07 |
| Ca | 957 | 630 | 1,52 |
| Mg | 106 | 29 | 3,66 |
| Al | 972 | 1588 | 0,61 |
| Fe | 169 | 78 | 2,17 |
| Ca + Mg/P | 29,2 | 2,9 | 10,2 |
| Al + Fe/P | 31,4 | 7,3 | 4,31 |

le rapport C/N des biosolides du mélange 1 est de 13, soit trois fois moins élevé que celui des biosolides du mélange 2 qui est de 40. Or, l'activité des BFCP contenues dans les EOMI constitués à partir du mélange 2 risque de causer une immobilisation de l'azote et du phosphore, étant donné que les EOMI seront disposés très près des racines;

- **Ho4** : l'apport d'un complément de nitrate d'ammonium avec les démarreurs EOMI sera contre-productif agronomiquement étant donné la bactéricidité de ce complément. Plus précisément, la bactéricidité du complément de nitrate d'ammonium appliqué à raison d'environ 20 kg N/ha, à proximité des EOMI aura un effet négatif sur le fonctionnement des BFCP; ce complément ne pourra interagir avec les BFCP et les effets des modalités EOM+ N et EOMI+ N seront très similaires.

Tableau 2. Composition des mélanges organo-minéraux (avant extrusion).

| Paramètre physico-chimique | Mélange | |
|----------------------------|----------------------|-------|
| | 1 | 2 |
| | sur la base de la MS | |
| % de biosolides (BS) | 56,2 | 56,2 |
| C/N | 13 | 40 |
| % inocula AZM | 9,6 | 9,6 |
| % MAP | 24,1 | 24,1 |
| % liant | 10,0 | 10,0 |
| % matière organique (MO) | 48,0 | 58,2 |
| ... dont % provenant du BS | 69 | 74 |
| % N dans BS | 3,55 | 1,14 |
| % P dans BS | 3,85 | 1,79 |
| % K dans BS | 0,50 | 1,43 |
| % N du mélange | 4,41 | 3,05 |
| % P du mélange | 6,98 | 5,82 |
| % K du mélange | 0,28 | 0,80 |
| % N du mélange /N -MAP | 44,1 | 30,5 |
| % P du mélange/P -MAP | 34,9 | 29,1 |
| % N provenant du MAP | 54,7 | 79,1 |
| % P provenant du MAP | 69,0 | 82,7 |
| g MO/g N provenant du MAP | 19,93 | 24,13 |
| g MO/g P provenant du MAP | 9,97 | 12,07 |
| g MO/g N -total | 10,90 | 19,08 |
| g MO/g P -total | 6,88 | 9,98 |

Tableau 3. Apport des éléments nutritifs par les six modalités de traitement appliqués en cabinets de croissance et au champ.

| Modalité | Description | En cabinets | Au champ | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
|-----------|---|-------------|----------|-------|-------------------------------|------------------|
| | | | | kg/ha | | |
| 1. Témoin | Sans apport de P | X | X | 0 | 0 | 0 |
| 2. MAP+ | MAP avec NH ₄ NO ₃ | X | X | 29 | 40 | 0 |
| 3. EOM | EOM | X | X | 3,8 | 15 | 0,3 |
| 4. EOMI | EOM avec BFCP | X | X | 3,8 | 15 | 0,3 |
| 5. EOM+ | EOM avec NH ₄ NO ₃ | | X | 24 | 15 | 0,3 |
| 6. EOMI+ | EOM avec BFCP + NH ₄ NO ₃ | | X | 24 | 15 | 0,3 |

Essais en cabinets de croissance (janvier 2005)

Nous avons utilisé quatre dispositifs expérimentaux en carré latin (4 modalités de fertilisation x 4 répétitions), soit un pour chacun des sols et des mélanges suivants :

- (i) Sol A (gleysolique), Mélange 1
- (ii) Sol S (podzolique), Mélange 1
- (iii) Sol A (gleysolique), Mélange 2
- (iv) Sol S (Podzolique), Mélange 2

Pour chaque dispositif, les quatre modalités de fertilisation sont :

- (i) Témoin non-fertilisé et non-bactérisé
- (ii) Témoin fertilisé avec MAP mais non-bactérisé
- (iii) EOM – Mélange 1 ou 2 (selon le dispositif) mais non-bactérisé
- (iv) EOMI – Mélange 1 ou 2 (selon le dispositif) bactérisé (5×10^7 BFCP par gramme)

L'hybride K108LL de maïs-grain (*Zea mays* L.) de la compagnie Pride, avec un taux de germination d'environ 97 %, a été utilisé. Nous avons placé 1000 g de sol dans un pot de 2 litres et déposé l'équivalent d'une dose hectare de 100 kg/ha de MAP en bandes.

Nous avons placé par-dessus l'engrais 333 g de ce même sol et déposé 3 graines 5 cm à côté et 5 cm au-dessus de la bande d'engrais et finalement, une autre couche de 333 g de ce même sol ainsi que 50 g de quartz (pour éviter le développement d'algues en surface) ont été placés par-dessus les graines. Pour les traitements EOM et EOMI, nous avons utilisé exactement les mêmes quantités d'azote et de phosphore, équivalant à au plus 40 % de celles du MAP (tableau 3).

Les quatre dispositifs contenant les seize (16) pots de 2 litres sont placés dans des cabinets de croissance (Convion™) pour une période de trois semaines, et arrosés suffisamment pour assurer l'absence de stress hydrique. La température est fixée, par palier de 4 heures, entre 18 et 24 °C sur une période de 16 heures de luminosité; l'intensité augmente de 26 000 lux à 36 000 lux pour décroître de nouveau vers la fin du cycle. L'humidité relative est fixée

à 75 %. Une fois que les plantules ont atteint 25 cm de hauteur, les deux plantules surnuméraires sont prélevées, séchées et pesées; elles serviront aux calculs des rendements en matière sèche des parties aériennes (MSPA). Lorsque la troisième plantule a atteint 30 cm, elle est aussi récoltée, séchée et pesée. Les deux déterminations de MSPA sont par la suite combinées pour le calcul final de la MSPA produite par plant. Les teneurs en N, P, K, Ca et Mg des MSPA ont été déterminées et le calcul du prélèvement des éléments nutritifs a été effectué.

L'analyse de variance (StatBoxPro™, GrimmerSoft SA, Paris) a permis de déterminer la contribution des modalités des traitements témoins, MAP, EOM et EOMI. Le niveau de probabilité de F et les plus petites différences significatives (ppds) au seuil $p = 0,05$ ont été calculés, et, le cas échéant, les moyennes de chaque traitement sont comparées selon la méthode de Newman-Keuls.

Essais agronomiques au champ (été 2005)

Les parcelles expérimentales de maïs-grain ont été implantées sur deux types de sols (tableau 1) des stations expérimentales de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) situées à Deschambault (2500 utm) et Saint-Lambert de Lévis (2300 utm), près de Québec. Les sols ont été labourés à l'automne et travaillés avec un vibroculteur au printemps. Les semis de maïs ont été effectués le 19 mai à Deschambault et le 25 mai à Saint-Lambert. Un dispositif en blocs aléatoires complets avec trois répétitions et six traitements a été utilisé au champ. L'hybride K108LL (2400 utm) de la compagnie Pride et l'hybride 39W55 (2100 utm) de la compagnie Pioneer ont été utilisés respectivement à Deschambault et à Saint-Lambert. Les parcelles font 3 mètres (pour 4 rangs de maïs) sur 10 mètres de longueur.

Étant donné la granulométrie plus grossière des prototypes d'engrais organo-minéraux utilisés et leur résistance mécanique plus fragile que celle des engrais minéraux, les divers engrais ont été appliqués manuellement afin d'assurer une meilleure précision et éviter la ségrégation des engrais. Ils ont

été préalablement mélangés à 500 g de matière minérale inerte (grit 10-mesh) afin de faciliter les épandages. Ils ont été placés en bandes dans un sillon de 8 cm de profondeur sur la longueur des rangs qui ont été remplis par la suite avec le sol en place. Les parcelles témoins sans démarreur n'ont reçu aucune matière fertilisante au démarrage. Le maïs-grain a été semé directement 4 à 5 cm au-dessus de cette bande fertilisée à un espacement de 75 cm entre les rangs et de 15 cm sur le rang correspondant à 88,000 grains/ha. Le nombre de plants à la récolte a été de 73,000 plants/ha dans les deux sites. En plus des apports d'engrais apportés au démarrage selon les six différentes modalités (tableau 3), tous les traitements ont reçu une fertilisation azotée complémentaire en bandes à 20 cm de chaque côté du rang en post-levée au stade 4-6 feuilles à la dose de 150 kg N/ha sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0). L'application a eu lieu le 30 juin au site de Deschambault, et le 6 juillet au site de Saint-Lambert.

Sur une distance d'un mètre (non récoltée à l'automne), huit (8) plants ont été prélevés à l'avant des 2 rangs du centre de chaque parcelle 34 jours après le semis pour déterminer leurs teneurs en matière sèche de la partie aérienne (MSPA) et leurs teneurs en N, P, K, Ca et Mg. La hauteur des plants a par la suite été déterminée à 49 et 54 jours post-semis (jps) pour les sites de Saint-Lambert et Deschambault, respectivement. Enfin, les feuilles situées immédiatement sous les épis ont été prélevées sur 15 plants dans les rangs du centre de chaque parcelle aux deux sites 71 jours post-semis à l'apparition des soies. Ces feuilles ont fait l'objet d'analyses des éléments nutritifs. L'indice chlorophyllien a été déterminé à l'aide d'un chlorophylle-mètre de la compagnie Minolta modèle SPAD-502. Les prélèvements des éléments ont été déterminés en multipliant la masse sèche des plantules par leur teneur en éléments nutritifs. Les analyses de variance (Anova) et les calculs des plus petites différences significatives (ppds) ont aussi été effectués sur ces valeurs afin d'établir le niveau de probabilité correspondant aux effets mesurés pour les six modalités de traitement.

Les deux rangs du centre ont été récoltés sur 9 mètres au moyen d'une moissonneuse-batteuse Wintersteiger, conçue pour les parcelles expérimentales. Les récoltes ont été effectuées le 11 octobre au site de Deschambault et le 25 octobre au site de Saint-Lambert. Les rendements ont été rapportés par hectare sur une base de 15 % d'humidité. L'humidité des grains à la récolte a été déterminée après séchage des grains à 70 °C pendant 4 jours. Le poids à l'hectolitre a été déterminé sur un échantillon de 500 g selon la procédure établie par la Commission canadienne des grains (2001). L'analyse chimique des grains a également été effectuée et les prélèvements des éléments nutritifs par l'hectare ont été calculés.

L'analyse de variance (Anova) a permis de déterminer la contribution des modalités des traitements témoins, MAP, EOM et EOMI. Le niveau de probabilité de F, les plus petites différences significatives (ppds) au seuil $p = 0,05$ ont été calculés, et, le cas échéant, les moyennes de chaque traitement sont comparées selon la méthode de Newman-Keuls.

Résultats

Les résultats des analyses de variance pour l'ensemble des données, en cabinets de croissance et au champ, sont synthétisés aux tableaux 4, 5 et 6. Dans l'ensemble, ces analyses ont montré des effets plus importants pour les données concernant les plantules au démarrage (*i.e.* en cabinets de croissance (21 jours post-semis) et au champ 34 jours post semis) qu'à la récolte. Ils sont également plus importants sur le gleysol plus pauvre en P que sur le podzol, plus riche en P.

Essais en cabinets de croissance

La production de matière sèche de la partie aérienne (MSPA) par le maïs fertilisé avec EOMI – Mélange 1 sur le gleysol, plus pauvre en P, est sensiblement la même que celle obtenue avec le MAP, fertilisé avec 2 à 3 fois plus de N et de P (tableau 7). La production de MSPA obtenue à l'aide des EOM non-bactérisés était moindre que celle des EOMI bactérisés et supérieure à celle du témoin non-fertilisé. Le mélange 2 avec un biosolide au rapport C/N de 40 s'est montré

Tableau 4. Analyse de variance pour les essais en cabinets de croissance sur les plants de maïs.

| Paramètre | Type de sol | Mélange EOMI | CV (%) | P > F | ppds (mg) |
|----------------|-------------|--------------|--------|----------|-----------|
| MSPA par plant | Podzol | 1 | 18 | 0,000002 | 108 |
| | Gleysol | 1 | 5 | 0,0022 | 28 |
| MSPA par plant | Podzol | 2 | 10 | 0,001 | 66 |
| | Gleysol | 2 | 6,4 | 0,0015 | 34 |
| Prélèvement N | Podzol | 1 | 38 | 0,004 | 4,22 |
| | Gleysol | 1 | 10 | 0,0001 | 1,77 |
| Prélèvement P | Podzol | 1 | 44 | 0,001 | 0,469 |
| | Gleysol | 1 | 8 | 0,0001 | 0,127 |
| Prélèvement K | Podzol | 1 | 38 | 0,0065 | na |
| | Gleysol | 1 | 11 | 0,0008 | 2,17 |
| Prélèvement Ca | Podzol | 1 | 26 | 0,001 | 0,398 |
| | Gleysol | 1 | 14 | 0,0003 | 0,372 |
| Prélèvement Mg | Podzol | 1 | 32 | 0,002 | 0,312 |
| | Gleysol | 1 | 12 | 0,0008 | 0,152 |

Tableau 5. Analyse de variance pour les essais au champ sur les plants de maïs.

| Paramètre | Unités | Type de sol | Date (jps) | CV (%) | P > F | ppds |
|---------------------|--------|-------------|------------|--------|--------|------|
| MSPA par plant | mg | Podzol | 34 | 23 | 0,067 | na |
| | mg | Gleysol | 34 | 17 | 0,002 | 302 |
| Prélèvement N | mg | Podzol | 34 | 24 | 0,0005 | 7,67 |
| | mg | Gleysol | 34 | 18 | 0,0003 | 12,3 |
| Prélèvement P | mg | Podzol | 34 | 40 | 0,13 | na |
| | mg | Gleysol | 34 | 23 | 0,0004 | 1,17 |
| Prélèvement K | mg | Podzol | 34 | 25 | 0,29 | na |
| | mg | Gleysol | 34 | 18 | 0,004 | 12,1 |
| Prélèvement Ca | mg | Podzol | 34 | 21 | 0,23 | na |
| | mg | Gleysol | 34 | 21 | 0,004 | 1,72 |
| Prélèvement Mg | mg | Podzol | 34 | 22 | 0,051 | na |
| | mg | Gleysol | 34 | 36 | 0,040 | 2,25 |
| Prélèvement P/N | na | Podzol | 34 | 24 | 0,88 | na |
| | na | Gleysol | 34 | 7,0 | 0,13 | na |
| Prélèvement P/K | na | Podzol | 34 | 20 | 0,051 | na |
| | na | Gleysol | 34 | 22 | 0,33 | na |
| Prélèvement P/Ca | na | Podzol | 34 | 26 | 0,16 | na |
| | na | Gleysol | 34 | 23 | 0,004 | 0,17 |
| Prélèvement P/Mg | na | Podzol | 34 | 28 | 0,29 | na |
| | na | Gleysol | 34 | 18 | 0,53 | na |
| Hauteur | cm | Podzol | 49 | 6,3 | 0,015 | 12,1 |
| | cm | Gleysol | 54 | 5,5 | 0,0008 | 8,5 |
| Teneur N | % | Podzol | 71 | 2,7 | 0,87 | na |
| | % | Gleysol | 71 | 4,5 | 0,15 | na |
| Teneur P | mg/kg | Podzol | 71 | 7,0 | 0,95 | na |
| | mg/kg | Gleysol | 71 | 4,2 | 0,20 | na |
| Teneur K | mg/kg | Podzol | 71 | 3,5 | 0,40 | na |
| | mg/kg | Gleysol | 71 | 11 | 0,48 | na |
| Teneur Ca | mg/kg | Podzol | 71 | 7,1 | 0,33 | na |
| | mg/kg | Gleysol | 71 | 7,8 | 0,03 | 747 |
| Teneur Mg | mg/kg | Podzol | 71 | 2,9 | 0,048 | 76 |
| | mg/kg | Gleysol | 71 | 10 | 0,05 | 628 |
| Indice chlorophylle | na | Podzol | 71 | 2,0 | 0,0048 | 2,29 |
| | na | Gleysol | 71 | 2,1 | 0,0011 | 2,11 |

moins efficace que le mélange 1 avec un biosolide au rapport C/N de 13, laissant supposer que l'immobilisation de N et P pourrait contrer les effets de la bactérisation

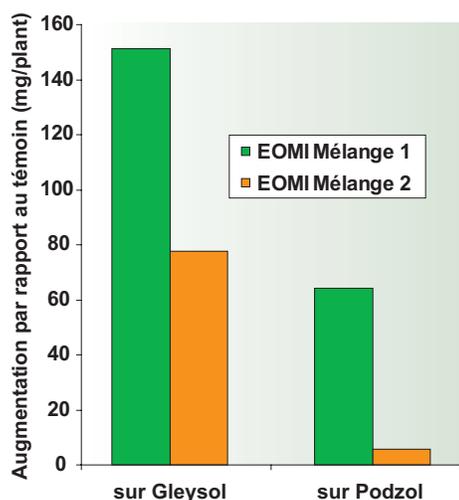
si le rapport C/N des EOMI est trop élevé. Sur le podzol, plus riche en P, l'efficacité relative plus élevée de l'EOMI du mélange 1 n'est plus détectable. Dans l'ensemble,

Tableau 6. Analyse de variance pour les essais au champ sur les grains de maïs.

| Paramètre | Unités | Type de sol | CV (%) | P > F (%) | ppds (mg) |
|------------------|-------------|-------------|--------|-----------|-----------|
| Poids spécifique | kg/hL | Podzol | 1,1 | 0,22 | na |
| | kg/hL | Gleysol | 1,1 | 0,58 | na |
| Humidité | % | Podzol | 2,7 | 0,27 | na |
| | % | Gleysol | 5,4 | 0,025 | na |
| Rendement | kg grain/ha | Podzol | 10 | 0,99 | na |
| | kg grain/ha | Gleysol | 6,2 | 0,087 | na |
| Prélèvement N | kg/ha | Podzol | 9,6 | 0,98 | na |
| | kg/ha | Gleysol | 9,3 | 0,12 | na |
| Prélèvement P | kg/ha | Podzol | 14 | 0,17 | na |
| | kg/ha | Gleysol | 14 | 0,22 | na |
| Prélèvement K | kg/ha | Podzol | 14 | 0,25 | na |
| | kg/ha | Gleysol | 11 | 0,27 | na |
| Prélèvement Ca | kg/ha | Podzol | 18 | 0,31 | na |
| | kg/ha | Gleysol | 33 | 0,43 | na |
| Prélèvement Mg | kg/ha | Podzol | 14 | 0,11 | na |
| | kg/ha | Gleysol | 13 | 0,32 | na |
| Prélèvement P/N | na | Podzol | 11 | 0,074 | na |
| | na | Gleysol | 9,3 | 0,67 | na |
| Prélèvement P/K | na | Podzol | 3,3 | 0,51 | na |
| | na | Gleysol | 5,3 | 0,28 | na |
| Prélèvement P/Ca | na | Podzol | 21 | 0,44 | na |
| | na | Gleysol | 33 | 0,54 | na |
| Prélèvement P/Mg | na | Podzol | 4,0 | 0,37 | na |
| | na | Gleysol | 2,7 | 0,095 | na |

Tableau 7. Matière sèche des parties aériennes (MSPA) des plants de maïs en cabinets de croissance selon la modalité de démarrage essayée et le type de mélange.

| Modalité | Mélange 1 | | Mélange 2 | |
|----------|-------------------|--------|-----------|--------|
| | Gleysol | Podzol | Gleysol | Podzol |
| | mg MSPA par plant | | | |
| Témoïn | 124 C | 138 B | 146 B | 142 C |
| MAP | 260 A | 340 AB | 234 A | 357 A |
| EOM | 209 B | 220 AB | 254 A | 285 B |
| EOMI | 258 A | 209 B | 213 A | 174 C |

**Figure 1. Augmentations de la MSPA en cabinets de croissance par rapport aux témoins non-fertilisés attribuables aux EOMI.**

l'efficacité relative des EOMI du mélange 1 est supérieure à celle de EOMI du mélange 2, plus particulièrement sur le gleysol (figure 1). L'effet des traitements sur les prélèvements en N, P, K, Ca et Mg des plants de maïs est également différent selon les types de sol (tableau 8).

L'efficacité relative des EOMI semble décroître à mesure que les conditions ne sont plus favorables au bon fonctionnement des BFCP. Par exemple, l'absence d'une abondance de phosphates calco-magnésiens sur podzol défavorise l'activité MPS des souches BFCP (tableau 7). De même, la présence de matières organiques à C/N élevé dans les EOMI constitués de biosolides de papetiers (mélange 2) provoque vraisemblablement une immobilisation

Tableau 8. Prélèvement N, P, K, Ca et Mg des plants de maïs en cabinets de croissance.

| | mg par plant | | | |
|-----------------------|--------------|----|--------|---|
| | Gleysol | | Podzol | |
| Prélèvement N | | | | |
| Témoïn | 3,59 | C | 2,10 | B |
| MAP | 13,68 | A | 12,93 | A |
| EOM (mélange 1) | 10,46 | B | 5,71 | B |
| EOMI (mélange 1) | 12,33 | A | 4,77 | B |
| Effet BFCP | 1,18 | | 0,84 | |
| Prélèvement P | | | | |
| Témoïn | 0,230 | D | 0,249 | B |
| MAP | 1,983 | A | 1,263 | A |
| EOM (mélange 1) | 1,172 | C | 0,494 | B |
| EOMI (mélange 1) | 1,379 | B | 0,474 | B |
| Effet BFCP | 1,18 | | 0,96 | |
| Prélèvement K | | | | |
| Témoïn | 6,40 | C | 6,24 | |
| MAP | 13,35 | AB | 16,22 | |
| EOM (mélange 1) | 11,31 | B | 10,10 | |
| EOMI (mélange 1) | 14,28 | A | 9,78 | |
| Effet BFCP | 1,26 | | 0,97 | |
| Prélèvement Ca | | | | |
| Témoïn | 0,911 | B | 0,456 | B |
| MAP | 1,800 | A | 1,372 | A |
| EOM (mélange 1) | 1,613 | A | 0,939 | B |
| EOMI (mélange 1) | 1,931 | A | 0,789 | B |
| Effet BFCP | 1,20 | | 0,84 | |
| Prélèvement Mg | | | | |
| Témoïn | 0,378 | B | 0,329 | B |
| MAP | 0,838 | A | 0,902 | A |
| EOM (mélange 1) | 0,767 | A | 0,543 | B |
| EOMI (mélange 1) | 0,929 | A | 0,470 | B |
| Effet BFCP | 1,21 | | 0,87 | |

de l'azote et du phosphore à proximité des racines contribuant ainsi à une contre-productivité des EOMI (tableau 7). En ce sens, les résultats démontrent que les EOMI du mélange 2 sur podzol sont contre-productifs parce qu'ils ne stimulent pas l'action de solubilisation du P (MPS) des BFCP et créent une immobilisation de N et P à proximité des racines (figure 1).

Le prototype EOMI constitué à partir du mélange 1, un peu moins riche en matière organique et dont le rapport C/N est plus faible (tableau 2), est plus efficace. Ce prototype est plus efficace sur le gleysol que sur le podzol. Les essais au champ porteront donc sur l'efficacité des l'EOM du mélange 1 avec et sans bactérisation.

Essais agronomiques au champ

Croissance et composition des plants de maïs

L'analyse de variance montre que les BFCP placées à proximité des racines au sein des granules d'EOMI ont eu un effet sur la matière sèche des parties aériennes (MSPA) et les prélèvements en N, P, K, Ca

Tableau 9. Matière sèche des parties aériennes (MSPA), et prélèvements en éléments N, P, K, Ca et Mg des plantules de maïs-grain 34 jours post-semis selon les sols et les traitements au démarrage.

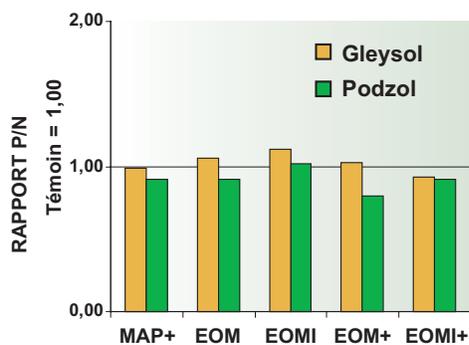
| | | mg/plant (34 jours) | |
|--------------------------|---------|---------------------|------|
| Traitements ¹ | Gleysol | Podzol | |
| MSPA | | | |
| Témoin | 342 | C | 413 |
| MAP+ | 1358 | A | 850 |
| EOM (mélange 1) | 992 | AB | 675 |
| EOMI (mélange 1) | 1392 | A | 651 |
| EOM+ (mélange 1) | 1100 | AB | 719 |
| EOMI+ (mélange 1) | 738 | B | 825 |
| Prélèvement N | | | |
| Témoin | 12,6 | C | 10,6 |
| MAP+ | 51,9 | A | 33,8 |
| EOM (mélange 1) | 36,6 | AB | 19,5 |
| EOMI (mélange 1) | 51,7 | A | 18,3 |
| EOM+ (mélange 1) | 40,5 | AB | 23,6 |
| EOMI+ (mélange 1) | 26,8 | B | 28,8 |
| Prélèvement P | | | |
| Témoin | 0,91 | C | 1,61 |
| MAP+ | 3,73 | A | 4,66 |
| EOM (mélange 1) | 2,80 | AB | 2,69 |
| EOMI (mélange 1) | 4,20 | A | 2,83 |
| EOM+ (mélange 1) | 3,00 | AB | 2,87 |
| EOMI+ (mélange 1) | 1,80 | BC | 3,98 |
| Prélèvement K | | | |
| Témoin | 13,3 | C | 16,0 |
| MAP+ | 48,7 | A | 27,9 |
| EOM (mélange 1) | 39,0 | A | 23,3 |
| EOMI (mélange 1) | 50,1 | A | 24,4 |
| EOM+ (mélange 1) | 41,5 | A | 23,6 |
| EOMI+ (mélange 1) | 26,3 | B | 25,5 |
| Prélèvement Ca | | | |
| Témoin | 1,91 | B | 1,07 |
| MAP+ | 5,94 | A | 1,77 |
| EOM (mélange 1) | 4,78 | A | 1,53 |
| EOMI (mélange 1) | 5,83 | A | 1,45 |
| EOM+ (mélange 1) | 4,89 | A | 1,52 |
| EOMI+ (mélange 1) | 3,66 | A | 1,64 |
| Prélèvement Mg | | | |
| Témoin | 1,17 | B | 0,94 |
| MAP+ | 4,58 | A | 1,89 |
| EOM (mélange 1) | 3,78 | A | 1,87 |
| EOMI (mélange 1) | 4,81 | A | 1,50 |
| EOM+ (mélange 1) | 3,74 | A | 1,84 |
| EOMI+ (mélange 1) | 2,56 | A | 1,85 |

Note 1. Voir le tableau 3 pour définitions et compositions des traitements.

et Mg à 34 jours post-semis sur le sol gleysolique, mais peu ou pas d'effet sur le sol podzologique (tableau 9). Le calcul des rapports élémentaires P/N, P/K, P/Ca et P/Mg permet de démontrer qu'à ce stade

c'est le prélèvement du phosphore qui bénéficie le plus de l'action *in situ* desdites BFCP (figure 2). Sur gleysol, l'efficacité des EOMI bactériésés est supérieure à celle des EOM (non-bactériésés), à celle du

Rapports élémentaires par rapport au témoin



Rapports élémentaires par rapport au MAP

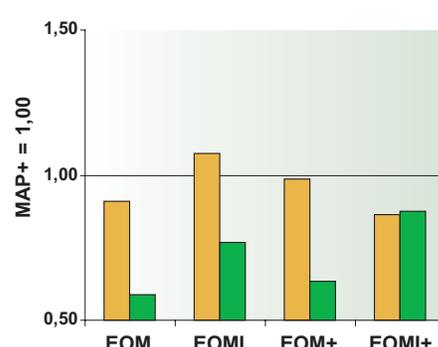
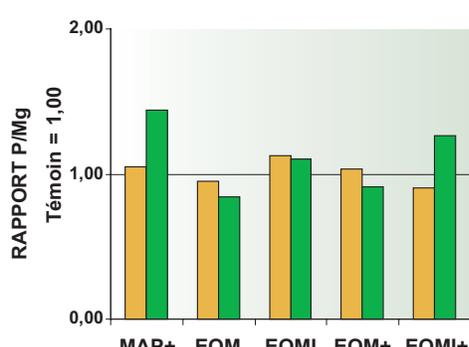
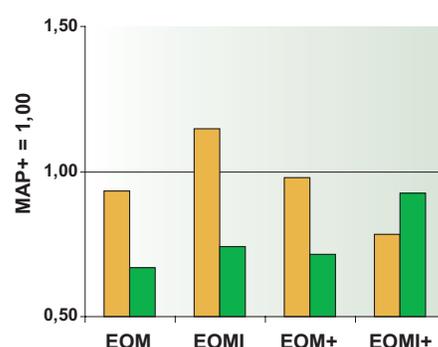
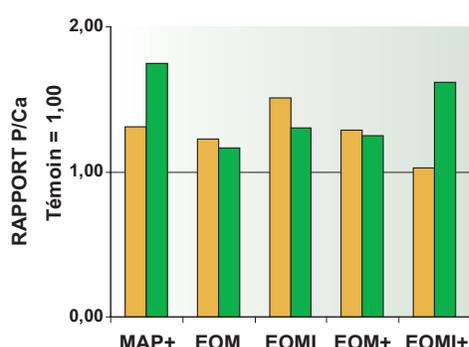
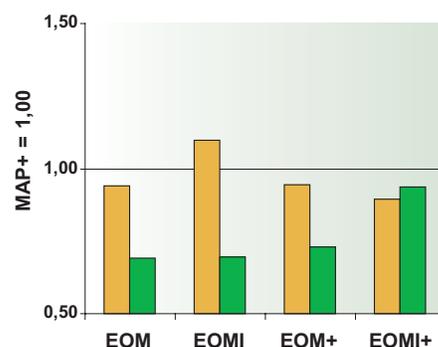
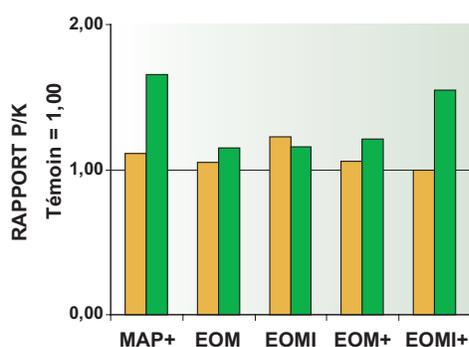
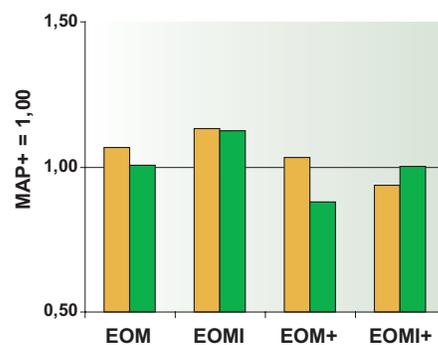


Figure 2. Analyse comparative des rapports élémentaires P/N, P/K, P/Ca et P/Mg des plantules de maïs-grain 34 jours post-semis selon les diverses modalités de démarrage sur deux types de sols.

témoin sans engrais et comparable à celle du MAP. Sur le podzol le traitement EOMI est moins efficace que le MAP et semblable à l'EOM non bactérié. L'apport d'un complément de 20 kg N/ha (20 UN) sous forme de nitrate d'ammonium calcique aux EOMI (*i.e.* EOMI+) est contreproductif sur le sol gleysolique mais sans conséquence sur le sol podzolique (tableau 9). Tel qu'attendu, le démarreur MAP est plus efficace sur le gleysol moins saturé en P. Sur sol gleysolique, la bactériation avec ou sans complément d'azote a permis d'atteindre des rendements en MSPA comparables à ceux obtenus avec le MAP+ 20 UN. L'utilisation des EOMI serait surtout avantageuse sur le sol gleysolique modérément pourvu en P.

Pour illustrer l'impact des BFCP que contiennent les EOMI sur la solubilisation des phosphates calco-magnésiens, et donc de leur prélèvement par la plante, nous avons calculé les rapports entre les prélèvements P/N, P/K, P/Ca et P/Mg (figure 2). Sur le gleysol, lesdits rapports associés aux traitements EOMI sont tous supérieurs à ceux du MAP et à tout autre traitement, ce qui n'est pas le cas sur le podzol. Sur le gleysol, les BFCP que contiennent les EOMI semblent favoriser préférentiellement le prélèvement du phosphore. Il est vraisemblable d'attribuer ce prélèvement préférentiel du P à la solubilisation des phosphates calco-magnésiens, voire par un effet de ralentissement du taux de fixation du P soluble.

Bien que moins sensible, l'effet des BFCP sur la hauteur des plants à 49 et 54 jours post-semis (selon le site) semble aussi se vérifier (figure 3). L'effet des BFCP est moins appréciable sur la hauteur des plants que sur la MSPA et/ou les prélèvements élémentaires; l'effet des BFCP peut donc être perçu *a priori* comme plus rhizogène, *i.e.* favorisant surtout le prélèvement par la racine du phosphore (*cf.* rapport P/N, P/K, P/Ca et P/Mg) que phytogène, *i.e.* favorisant surtout la fixation du carbone et la croissance végétative.

L'effet des BFCP est perceptible 71 jours post-semis, notamment sur les teneurs des plants en N, P, K, Ca et Mg, ainsi que sur l'indice chlorophyllien (*ic*) des feuilles de l'épi (tableau 10). Il s'avère que la teneur en éléments nutritifs de cette feuille est un

bon indicateur de la quantité d'éléments nutritifs aptes à être transportés vers les grains. L'action attribuable aux BFCP permet aux plants sur parcelles avec EOMI, notamment en ce qui concerne les prélèvements du Ca et du Mg, de surpasser les plants fertilisés aux MAP (figure 4). Cependant, sur sols podzoliques l'efficacité des BFCP sur les teneurs en éléments

nutritifs des feuilles des épis est à toutes fins pratiques nulle (figure 4).

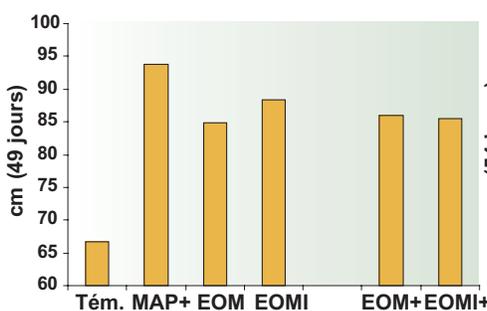
Les indices chlorophylliens sur gleysol sont comparables pour tous les engrais de démarrage et sont supérieurs à ceux du témoin sans démarreur (figure 5). Sur sols podzoliques, l'effet des EOMI sur les indices chlorophylliens se compare à celui

Tableau 10. Indices chlorophylliens (*ic*), et teneurs élémentaires (*tN*, *tP*, *tK*, *tCa* et *tMg*) des feuilles des épis de maïs-grain 71 jours post-semis selon les modalités de démarrage sur deux types de sols.

| a) Gleysol | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| | <i>ic</i> | <i>tN</i> | <i>tP</i> | <i>tK</i> | <i>tCa</i> | <i>tMg</i> |
| Saint-Lambert | | % | mg/kg | | | |
| Témoin | 52,4 | 3,231 | 2728 | 20379 | 4495 | 3472 |
| MAP + | 57,3 | 3,117 | 2856 | 21346 | 5113 | 3301 |
| EOM | 57,3 | 3,406 | 2848 | 18431 | 5390 | 3070 |
| EOMI | 57,7 | 3,418 | 2915 | 19698 | 5561 | 3020 |
| EOM + | 57,5 | 3,181 | 2824 | 19359 | 5129 | 3449 |
| EOMI + | 58,2 | 3,348 | 3008 | 17872 | 5896 | 4029 |
| Moyenne | 56,7 | 3,284 | 2863 | 19514 | 5264 | 3390 |
| CV (%) | 2,1 | 4,5 | 4,2 | 11 | 7,8 | 10 |
| pC (%) | 0,11 | 15 | 20 | 48 | 3,0 | 5,0 |
| ppds | 2,11 | na | na | na | 747 | 628 |
| % ppds/MYN | 3,7 | na | na | na | 14,2 | 18,5 |

| b) Podzol | | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| | <i>ic</i> | <i>tN</i> | <i>tP</i> | <i>tK</i> | <i>tCa</i> | <i>tMg</i> |
| Deschambault | % abs | % | mg/kg | | | |
| Témoin | 59,7 | 3,132 | 2694 | 19362 | 6811 | 1497 |
| MAP + | 64,2 | 3,076 | 2738 | 19246 | 7713 | 1491 |
| EOM | 62,3 | 3,126 | 2773 | 18263 | 7536 | 1511 |
| EOMI | 63,8 | 3,100 | 2831 | 19307 | 7011 | 1397 |
| EOM + | 64,9 | 3,157 | 2700 | 18960 | 7018 | 1431 |
| EOMI + | 64,3 | 3,096 | 2758 | 19198 | 7237 | 1449 |
| Moyenne | 63,2 | 3,115 | 2749 | 19056 | 7221 | 1463 |
| CV (%) | 2,0 | 2,7 | 7,0 | 3,5 | 7,1 | 2,9 |
| pC (%) | 0,48 | 87 | 95 | 40 | 33 | 4,8 |
| ppds | 2,29 | na | na | na | na | 76 |
| % ppds/MYN | 3,6 | na | na | na | na | 5,2 |

a) Gleysol



b) Podzol

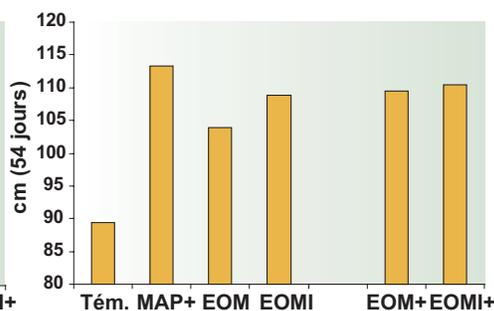


Figure 3. Hauteur (cm) des plantules au démarrage 49 (gleysol) et 54 (podzol) jours post-semis.

N. B. : P > F = 0,0008 (gleysol) et 0,015 (podzol); les moyennes associées aux mêmes lettres ne diffèrent pas significativement.

des autres traitements mais est plus élevé que celui du témoin sans démarreur.

Rendements et prélèvements en éléments nutritifs des grains à la récolte

Les analyses de variance pour les rendements provenant du site de Saint-Lambert montrent un effet des modalités de fertilisation au niveau de probabilité $P > F = 8,7\%$ (tableaux 6 et 11). Le meilleur rendement est obtenu avec l'engrais EOMI sans complément de nitrate d'ammonium. À noter que l'apport du complément nitrate d'ammonium apporté avec les EOM n'est pas plus efficace que leur bactériation BFCP. Les analyses de variance pour les rendements provenant du site de Deschambault

(podzol) ne montrent pas d'effet significatif des modalités de fertilisation ni de différence par rapport au démarreur sans engrais (tableaux 6 et 11). Les rendements en grains sur le site de Deschambault (podzol) sont plutôt élevés (12-13 Mg/ha) pour cette parcelle. Les rendements sur le site de Saint-Lambert (gleysol) sont plus modestes (8-9 Mg/ha), ce qui est malgré tout élevé pour ce site qui ne compte que 2300 utm. Cependant, les effets des démarreurs y sont beaucoup plus prononcés. Le fait le plus notable est l'efficacité comparable des EOMI bactérisés, sans complément de N à celle du MAP, pourtant beaucoup plus riche en azote et en phosphore (tableau 3). Les effets positifs des EOMI sur les prélèvements en N, P et K (figure 7), bien

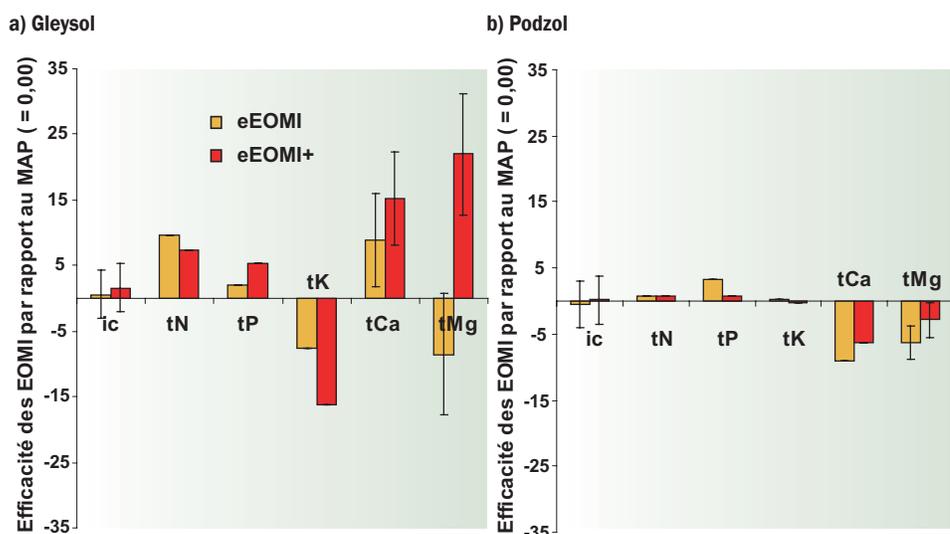


Figure 4. Efficacité relative des BFCP (i.e. % d'augmentation par rapport au témoin EOM non-bactérisé) à augmenter l'indice chlorophyllien et les teneurs en N, P, Ca et Mg des feuilles de l'épi pour les deux prototypes (i.e. avec (+) et sans complément de nitrate d'ammonium) sur gleysol (a) et podzol (b).

N.B. : Les traits verticaux inscrits sur les histogrammes représentent, le cas échéant, le pourcentage des plus petites différences significatives (ppds) par rapport à la valeur moyenne du paramètre en question.

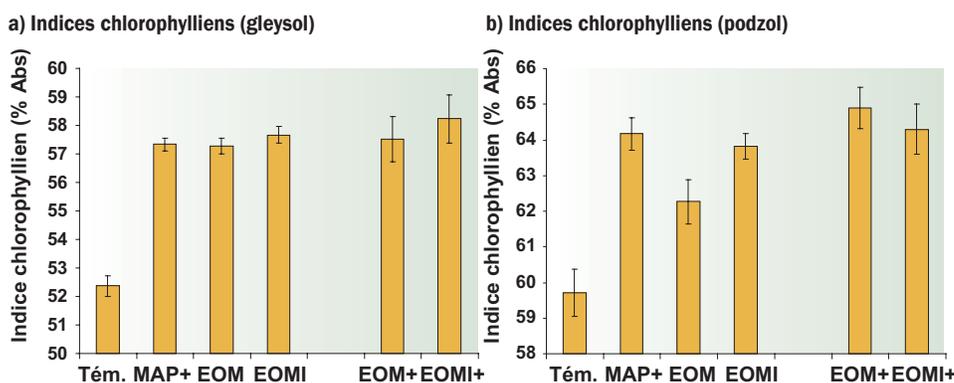


Figure 5. Indices chlorophylliens des feuilles de l'épi à 71 jours post-semis sur gleysol (a) et podzol (b). N. B. : Les traits verticaux inscrits dans les histogrammes représentent les écart-types ajustés.

Tableau 11. Poids spécifique, humidité à la récolte et rendement (ajusté 15 % humidité) en grains du maïs sur sols gleysolique et podzologique.

| | Gleysol | | Podzol |
|--------------------|----------------------|------|--------|
| Poids Spec. | kg/hL | | |
| Témoin | 66,94 | | 66,64 |
| MAP + | 67,85 | | 67,88 |
| EOM | 67,04 | | 67,59 |
| EOMI | 67,06 | | 67,46 |
| EOM + | 67,64 | | 67,27 |
| EOMI + | 67,13 | | 67,39 |
| Humidité | % | | |
| Témoin | 34,39 | A | 30,08 |
| MAP + | 28,17 | B | 28,53 |
| EOM | 31,20 | AB | 29,29 |
| EOMI | 30,29 | AB | 29,59 |
| EOM + | 31,23 | AB | 28,87 |
| EOMI + | 30,71 | AB | 28,52 |
| Rendement | t/ha (15 % humidité) | | |
| Témoin | 7,52 | 0,32 | 13,86 |
| MAP + | 8,43 | 0,68 | 13,78 |
| EOM | 7,66 | 0,48 | 13,58 |
| EOMI | 8,75 | 0,30 | 13,86 |
| EOM + | 8,24 | 0,56 | 13,46 |
| EOMI + | 8,37 | 0,29 | 13,56 |

N.B. : Les moyennes accompagnées des mêmes lettres ne sont pas significativement différentes; pour les probabilités critiques entre 5 et 10 %, les moyennes sont accompagnées des écarts-types ajustés (cf. figure 6).

qu'encore plus marqués que sur les rendements (figure 6), notamment sur podzol (figure 7-b), restent malgré tout non significatifs.

Un bémol cependant, les augmentations des poids spécifiques et les diminutions de l'humidité à la récolte observées sur les parcelles EOMI et EOMI+ sont un peu moins prononcées que sur les parcelles MAP+ (tableau 11). Ces effets sur la qualité des grains à la récolte, même s'ils ne sont pas significatifs à $P > F$ de 10 % et plus, méritent une attention car un accroissement du poids à l'hectolitre et une réduction de l'humidité des grains, même minimes, peuvent avoir une incidence économique.

Enfin, nous n'avons pas remarqué d'anomalies majeures en ce qui concerne la valeur nutritive des grains à la récolte. Pour ce qui concerne leurs teneurs en azote, le CRAAQ (2003) propose 1,65 % comme valeur de référence; certaines parcelles avec des teneurs d'environ 1,5 % d'azote sont un peu faibles mais pas anormales. Pour ce qui est du phosphore, le CRAAQ (2003) propose

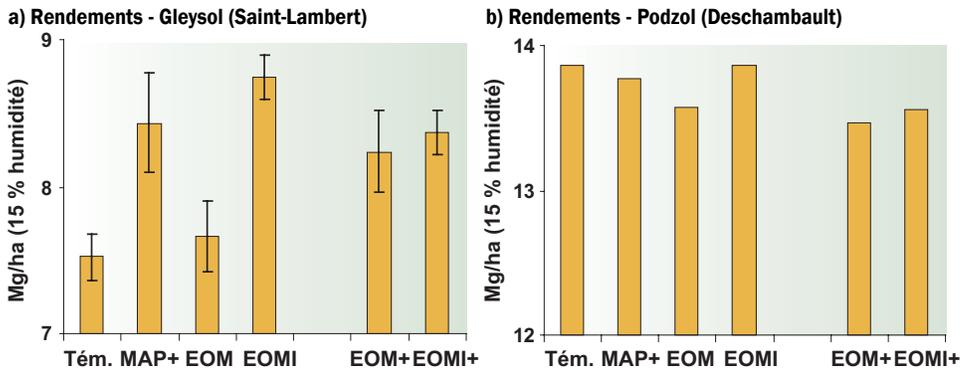


Figure 6. Représentation graphique des rendements en grains sur gleysol (a) et podzol (b) selon les modalités de démarrage du maïs. N. B. : Les écarts types ajustés, advenant une $P > F$ entre 5 et 10 %, sont inscrites verticalement sur les histogrammes.

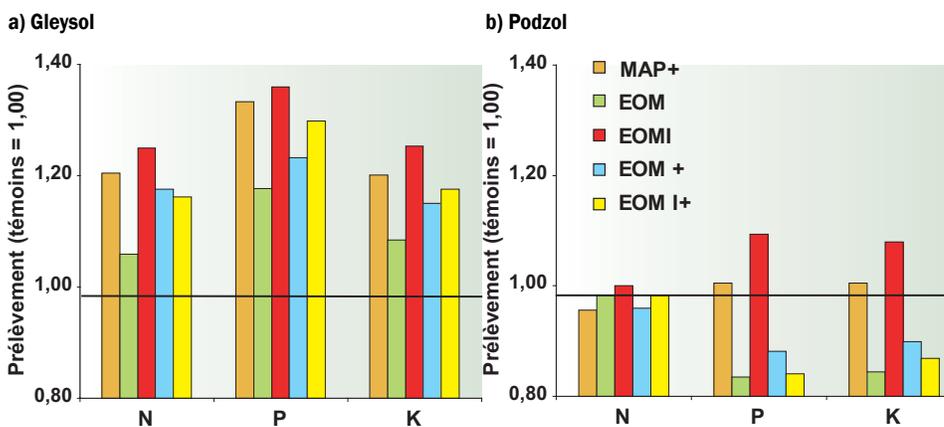


Figure 7. Prélèvements N, P et K selon chacune des cinq modalités de démarrage rapportées aux témoins non-traités (= 1,00) sur sols gleysoliques (a) et podzoliques (b).

une valeur de référence de 3190 mg/kg; la majorité des teneurs en P sont entre 2000 et 3000, ce qui est un peu faible; les très hauts rendements ont sans doute produit un effet de dilution important sur les concentrations de P des grains. Pour le potassium, le CRAAQ (2003) propose une valeur de référence de 4080 mg/kg; les résultats sont plus faibles que la valeur de référence, ce qui est sans doute encore une fois attribuable aux rendements élevés et les effets de « dilution » qu'ils induisent. De même pour les teneurs en Ca et Mg; les résultats sont légèrement inférieurs aux valeurs de référence CRAAQ (2003) de 200 mg Ca/kg et 1200 mg Mg/kg, respectivement, bien que pas anormaux.

On ne peut toutefois démontrer que les EOMI soient significativement plus efficaces que le MAP à favoriser le prélèvement préférentiel du phosphore; l'effet observé en ce sens 34 jours post-semis (figure 2) est vraisemblablement atténué une fois venu le

moment de la récolte. Nous pouvons illustrer cette dégradation de l'effet démarreur avec le temps en comparant les corrélations entre les prélèvements du P, du Ca ou du Mg à 34 jps et à la récolte (figure 8), et cela sur les deux types de sols. À 34 jps, et aussi au stade de la feuille épi (données non rapportées ici), ces corrélations sont nettement plus prononcées sur gleysol que sur podzol; une fois les rendements établis, les deux corrélations se confondent, ou presque.

Discussion

Nous avons tenté de démontrer que des EOMI au rapport C/N faible sont, sur sols gleysoliques moyennement saturés en P, des engrais de démarrage tout aussi efficaces que ceux fabriqués avec du MAP et du nitrate d'ammonium appliqués à des doses de N et P 2 à 3 fois plus élevées que celles des EOMI. Dans l'ensemble, les

résultats au champ permettent de confirmer nos résultats préliminaires issus de nos essais phytogènes en cabinets de croissance. Les effets BFCP des EOMI sur la biomasse des plants et les prélèvements en éléments nutritifs sont très perceptibles en cabinets de croissance 21 jours post-semis (jps). Il se manifeste également au champ à 34 jps et de façon plus modérée à 71 jps sur la concentration de la feuille de l'épi et, enfin, semble avoir un effet comparable à celui du MAP sur les rendements. Dans l'ensemble, sur le gleysol, en principe favorable à la mise en évidence de l'effet des EOMI, ceux-ci sont aussi, voire plus efficaces que le MAP, ce qui n'est plus le cas sur le podzol. L'utilisation d'un complément de nitrate d'ammonium au démarrage ne semble pas être recommandable avec les EOMI; ce complément pourra cependant être apporté plus tard, en post-lévé.

En tant qu'engrais de démarrage, les EOMI sont tout aussi efficaces sur le sol gleysolique que le démarreur avec MAP et complément d'azote, pourtant beaucoup plus riche en N et P. Dans l'ensemble, la substitution du MAP (avec complément de nitrate d'ammonium) par l'EOMI (sans ledit complément) sur le sol gleysolique, permet d'économiser 25 unités de P_2O_5 et 20 unités de N.

Il est possible d'associer la plus grande efficacité des EOMI sur gleysol, et accessoirement des BFCP qu'ils contiennent, à une meilleure corrélation entre le prélèvement du P et celle du Ca et de Mg à 34 jps. Ce manque de corrélation sur le podzol est vraisemblablement dû au fait que les phosphates disponibles à la plante sur podzol ne proviennent pas pour l'essentiel de la dissolution de composés calco-magnésiens, mais de composés alumino-ferriques (voir tableau 1). Étant donné le mode d'action des BFCP sur la solubilisation de l'hydroxyapatite et d'autres phosphates calciques, la plus grande disponibilité des phosphates calco-magnésiens sur gleysol avantage les BFCP et facilite la mise en évidence de leurs effets phytogènes. Cependant, cette plus grande corrélation P/Ca et P/Mg au niveau des plants sur gleysol n'est plus vraiment distinctive au moment de la récolte, ce qui porte à croire que l'effet démarrage est à ce stade atténué au point d'être bien moins repérable qu'en début de culture.

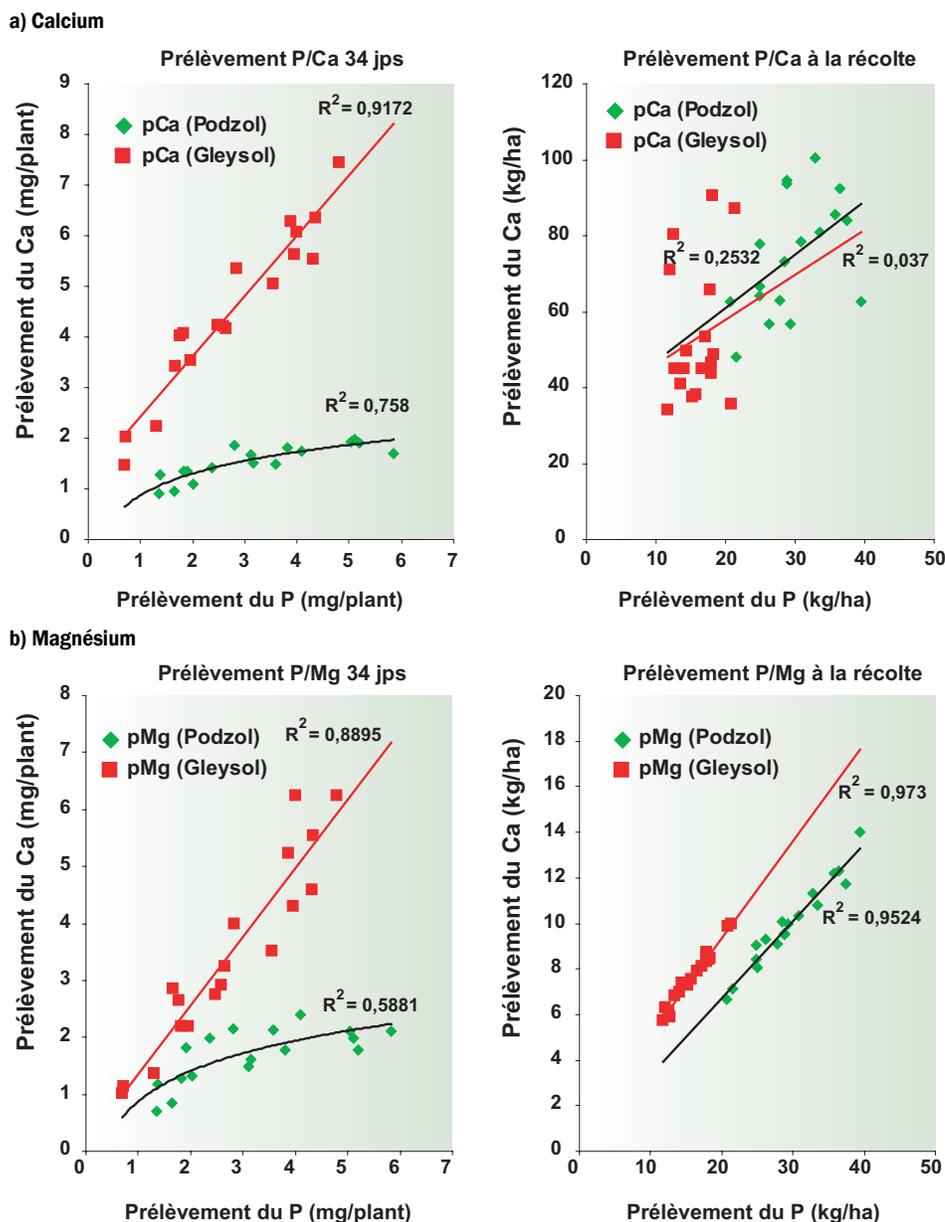


Figure 8. Corrélation entre le prélèvement du phosphore et du calcium (a) ou du magnésium (b) sur gleysol et podzol à 34 jps et à la récolte.

Pour s'assurer du bon fonctionnement des BFCP à proximité des racines, il faut éviter l'immobilisation de l'azote et du phosphore. La proportion de carbone des engrais et le rapport C/N de la matière organique utilisée pour fabriquer les EOMI ne doivent pas être excessifs, *i.e.* un rapport C/N inférieur à 40, voire 25 serait avantageux. Faute de quoi, les BFCP pourraient profiter de la présence d'un substrat carboné en abondance pour récupérer l'azote et le phosphore autrement assimilables par les racines. Les biosolides du mélange 2 sont particulièrement nuisibles en ce sens, puisque leurs fortes teneurs en carbone,

doublées de faibles teneurs en azote total, nous obligent à incorporer plus d'azote et de phosphore provenant du MAP que pour les biosolides du mélange 1. En conséquence, pour une teneur plus faible en N total des EOMI du mélange 2, nous avons une proportion de matières organiques plus importante (tableau 2). Du fait que l'azote total soit constitué à 80 % d'N soluble provenant du MAP, cet azote est très susceptible à une immobilisation par les BFCP. En ce sens, les biosolides du mélange 1 sont plus appropriés pour la constitution d'EOMI.

L'efficacité agronomique des inocula BFCP dépend de leur action sur le fonctionnement des racines, leur diazotrophie et leur capacité à immobiliser et éventuellement re-larguer l'azote et le phosphore qu'elles auront captés à proximité des racines. Leur mode d'action est donc multiple. Cette multiplicité explique en partie pourquoi leurs effets, bien que globalement positifs, soient plus variables, et donc parfois difficilement détectables à des seuils de probabilité critiques de $p < 5\%$. C'est pourquoi des niveaux de probabilité critiques plus élevés de 10 % plutôt que 5 % sont considérés dans ce genre d'étude (Zhang *et al.* 2002). Voir en ce sens nos données à la figure 6 et au tableau 11.

Par rapport aux données de Freitas *et al.* (1997) concernant l'utilisation de BFCP de type *Bacillus* spp., les BFCP utilisées ici sont tout aussi efficaces que les démarreurs MAP à une hauteur de 40 unités de P par hectare. Freitas *et al.* (1997), dans le cadre d'une expérimentation en serre, observèrent des effets phytogènes par rapport aux témoins sans P, et non par rapport aux traitements avec l'équivalent de 25, voire 45 unités de P par hectare. En ce sens, les prototypes EOMI testés ici sont avantageux puisque 25 unités de P_2O_5 sont économisées au démarrage avec des rendements en grains comparables à ceux des démarreurs minéraux conventionnels.

Enfin, pour ce qui concerne le poids spécifique (poids à hectolitre) des grains, il est légèrement plus faible avec l'utilisation des EOMI comparativement au MAP alors que l'humidité des grains est légèrement plus élevée.

Conclusion

Nos quatre hypothèses de travail ont donc été vérifiées :

- **Ho1** : l'effet du MAP est plus détectable, notamment sur les rendements en grains, sur gleysol (%P/Al = 3,74) que sur podzol (%P/Al = 14,4);

- **Ho2** : l'effet des EOMI par rapport à celui des témoins EOM non bactérisés est plus appréciable sur gleysol que sur podzol;
- **Ho3** : l'efficacité des EOMI constitués de biosolides au rapport C/N plus faible (environ 13 - mélange 1) est plus efficace que ceux constitués de biosolides au rapport C/N plus élevé (environ 40 - mélange 2) du fait qu'ils ne contribuent vraisemblablement pas à la sur-immobilisation de l'azote à proximité des racines;
- **Ho4** : l'apport d'un complément de nitrate d'ammonium avec les EOMI constitués à partir du mélange 1, complément potentiellement bactéricide au BFCP que contiennent les EOMI, est inutile, voire contre-productif.

Les résultats montrent que la bactérisation des EOM peut être utilisée efficacement comme engrais de démarrage permettant de réduire les apports de P dans le sol gleysolique.

Sur gleysol, un effet de la bactérisation des EOM sur la croissance des plants et une plus grande efficacité du phosphore ont été mesurés avec l'engrais EOMI constitué du mélange 1 à faible rapport C/N. Ceci est vraisemblablement attribuable à la solubilisation accrue des phosphates calco-magnésiens par les BFCP et d'un faible degré d'immobilisation de l'azote et du phosphore à proximité des racines. Le mélange 2 à rapport C/N plus élevé n'a pas produit les mêmes effets à cause sans doute d'une immobilisation de N et P à proximité des racines. Sur podzol, une plus grande efficacité des EOMI n'a pu être démontrée, d'abord parce que leur saturation en P est plus élevée mais aussi parce qu'ils sont constitués de phosphates alumino-ferriques récalcitrant à l'action des BFCP. L'effet bactéricide causé par le complément de 20 kg-N de nitrate d'ammonium appliqué en bandes avec les EOMI peut être résolu, le cas échéant, en déplaçant l'apport de cet azote au stade 4-6 feuilles.

L'essai sur les deux types de sols contrastés a démontré que la bactérisation des EOM est possible et surtout, tel qu'attendu, efficace

sur gleysol. Il est alors possible d'augmenter l'efficacité du P à un niveau plus élevé que celui du MAP par la bactérisation des EOM permettant ainsi une réduction des doses de P dans les engrais organo-minéraux de démarrage. Ce fut le cas sur le gleysol de teneur moyenne en P et plus riche en composés phosphatés calco-magnésiens, mais pas sur podzol, sol plus riche en phosphates alumino-ferriques.

Pour les essais agronomiques au champ, nous avons utilisé un complément de nitrate d'ammonium. Ce complément d'azote est normalement requis avec les démarreurs minéraux afin d'équilibrer les apports de N et de P. Or, nos essais agronomiques indiquent que la présence d'un complément d'azote minéral pouvait affecter la survie des BFCP, et l'efficacité des EOMI. Sur le sol gleysolique, l'apport combiné du complément de 20 kg N/ha aux EOMI annule tout simplement l'effet BFCP observé avec les EOMI seuls sans complément azoté. En tant qu'engrais de démarrage, les EOMI sont tout aussi efficaces, sur sols gleysoliques du moins, que le MAP pourtant 2,5 fois plus riche en N et P et ayant ici bénéficié d'un apport complémentaire de 20 unités de nitrate d'ammonium. Dans l'ensemble, la substitution du MAP (avec complément de nitrate d'ammonium) par l'EOMI (sans complément N) sur sols gleysoliques permet d'économiser 25 unités de P_2O_5 et/ou un vingtaine d'unités d'azote, soit une valeur de remplacement de 30 à 45 \$/ha.

Les BFCP, isolées selon leur activité MPS sont très efficaces sur le sol gleysolique, riche en phosphates calco-magnésiens, et beaucoup moins sur le sol podzolique, moins riche en phosphates alumino-ferriques.

Il est aussi important de noter que le haut niveau de saturation en P du sol podzolique, conjointement à une plus faible teneur en P calco-magnésien, peut expliquer la relative inefficacité des EOMI et du MAP sur la croissance, les prélèvements du P, les rendements et/ou la qualité du maïs-grain. Les conseils d'utilisation des EOMI et du MAP pourront donc être comparables, ce qui devrait contribuer à faciliter l'acceptation éventuelle des EOMI comme substitut. Selon nos résultats, les traitements organo-

minéraux, avec et sans bactérisation, sont capables de réduire le degré d'humidité des grains à la récolte par rapport aux témoins sans démarreur, mais un peu moins efficacement que le MAP. De même, pour ce qui concerne l'augmentation du poids spécifique, l'augmentation attribuable aux traitements organo-minéraux est vraisemblablement un peu moins importante que celle attribuable au MAP mais plus élevée que le témoin sans engrais de démarrage.

La corrélation entre les augmentations de la biomasse des plantules en début de culture (*i.e.* l'effet démarrage) et l'augmentation des rendements en grains en fin de culture sont généralement reconnues comme assez faibles (Bednarz et al. 2000, Kaiser et al. 2005, Niehues et al. 2004). Pourtant, sur le gleysol, l'augmentation des rendements en grains est ici de l'ordre de 20 % (*i.e.* 9 Mg/ha avec EOMI ou MAP et 7,5 Mg/ha sur parcelles sans démarreur). Cela démontre l'utilité appréciable des démarreurs MAP ou EOMI dans la production intensive de maïs-grain au Québec où la température du sol au printemps est parfois assez fraîche (< 15 °C).

Remerciements

Nous tenons à remercier M. Marc R. Laverdière, directeur scientifique de l'IRDA pour son accueil et son support, ainsi que MM. Richard Hogue et Fernand Pagé, chercheurs à l'IRDA pour l'accueil dans leur laboratoire et leurs précieux conseils. Il faut aussi souligner la bonne collaboration de M^{me} Édith Plante du laboratoire de microbiologie des sols de l'IRDA. Enfin, merci à M. Jean Vigneux de GSI Environnement pour l'envoi d'échantillons de biosolides de lisiers de porcs compostés ayant servi lors de la fabrication des EOM.

Références

- Alden, L., R. Demoling et E. Baath. 2001. Rapid method of determining factors limiting bacteria growth in soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 67 : 1830-1838.
- Alkanani, T. et A.F. MacKenzie. 1996. Épandage d'urée et de lignosulfite en bandes et récupération de 15N dans la culture du maïs (*Zea mays* L.). *Can. J. Soil Sci.* 76 : 365-371.
- Antoun, H., C. J. Beauchamp, N. Goussard, R. Chabot et R. Lalonde. 1998. Potential of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium* species as plant growth promoting rhizobacteria on non-legumes : effect on radishes (*Raphanus sativus* L.). *Plant and Soil.* 204 : 57-67.
- Arshad, M. et W.T. Frankenberg, Jr. 1998. Plant growth-regulating substance in the rhizosphere : microbial production and functions. *Adv. Agron.* 62 : 45-151.
- Bashan, Y. 1998. Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnol. Adv.* 16 : 729-770.
- Beauchemin, S. et R.R. Simard. 1999. Degré de saturation en P du sol : revue de quelques indices et de leur utilité pour la gestion du P au Québec, Canada. *Can. J. Soil. Sci.* 79 : 615-625.
- Bednarz, C.W., G.H. Harris et W.D. Shurley. 2000. Agronomic and economic analyses of cotton starter fertilizers. *Agron. J.* 92:766-771.
- Bermudez, M. et A. P. Mallarino. Yield and early growth responses to starter fertilizer in No-Till corn assessed with precision agriculture technologies. *Agron. J.* 94 : 1024-1033.
- Canbolat, M.Y., S. Bilen, R. Çakmakçi, F. Sahin et A. Aydm. 2005. Effect of plant growth-promoting bacteria and soil compaction on barley seedling growth, nutrient uptake, soil properties and rhizosphere microflora. *Biol. Fert. Soils* (juillet 2005).
- Chabot, R. C.J. Beauchamp, J.W. Kloepper et H. Antoun. 1998. Effect of phosphorus on root colonization and growth promotion of maize by bioluminescent mutants of phosphate solubilizing *Rhizobium leguminosarum biovar phaseoli*. *Soil Biol. Biochem.* 30 : 1615-1618.
- Chabot, R.; H. Antoun et M.P. Cescas. 1993. Stimulation de la croissance du maïs et de la laitue romaine par des microorganismes dissolvant le phosphore inorganique. *Can. J. Microbiol.* 39 : 341-347.
- Claude, P-P. 2001. Nouvelles biomasses bactériennes, leur protocole d'obtention, et leur utilisation pour la bactérisation de sols et de résidus de cultures. Brevet français FR 2 833 016.
- Claude, P-P. 1997. Valorisation des résidus de cultures et biofertilisation : importance et rôle de la persistance active des souches bactériennes réintroduites. D.R.U. (Diplôme de recherche universitaire), Laboratoire d'ingénierie agronomique, INPT – École nationale supérieure d'agronomie de Toulouse (Ensat), (Toulouse, France, Nov. 1997).
- Claude, P-P et L. Fillion. 2004. Effet de l'apport d'un inoculum bactérien aux résidus de culture de maïs-grain au sol sur le rendement et la qualité de blés d'hiver panifiables en France. *Agrosol* 15 (1) : 23-29.
- Commission canadienne des grains. (2001). Guide officiel du classement des grains. Gouvernement du Canada. Section 17 pp.1-12.
- CPVQ (Conseil des productions végétales du Québec). 1988. Céréales de printemps : culture. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).
- CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec). 2003. Guide de référence en fertilisation (1er édition). CRAAQ.
- Dupuis, P. 2004. Hyper P hyper intéressant. *Le Coopérateur Agricole* (Avril 2004) Vol. 33 (4).
- Freitas, J.R., M.R. Banerjee et J.J. Germida. 1997. Phosphate solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of canola (*Brassica napus* L.). *Biol. Fert. Soils* 24 : 358-364.
- Giroux, M. 2002. Évolution des teneurs en phosphore dans les sols selon la fertilisation, la richesse en P et le type de sol. Colloque sur le phosphore – Une gestion éclairée. OAQ et APAQ, Drummondville, Qc, 6 novembre 2002.
- Jingguo, W. and L.R. Bakken. 1997. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil : effect of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues. *Soil Biol. Biochem.* 29(2) : 153-162.
- Kaiser, D.E., A.P. Mallarino and M. Bermudez. 2005. Corn grain yield, growth and early nutrient uptake as affected by broadcast and in-furrow starter fertilization. *Agron. J.* 97 : 620-626.
- Khiari, L. et L.É. Parent. 2003. Les engrais organo-minéraux à valeur ajoutée, pour une meilleure fertilisation intégrée des agrosystèmes. Colloque de l'Association québécoise des spécialistes en sciences des sols (AQSSS), 17ième congrès, Université de Sherbrooke, Qc, 9-11 juin 2003.
- Khiari, L., L.É. Parent, A. Pellerin, A.R.A. Alimi, C. Tremblay, R.R. Simard et J. Fortin. 2000. An agri-environmental phosphorus saturation index for acid coarse-textured soils. *J. Environ. Qual.* 29 : 1561-1567.
- Kim, C.H., S.H. Han, K.Y. Kim, B.H. Cho, Y.H. Kim, B.S. Koo et Y.C. Kim. 2003. Cloning and expression of pyrroloquinoline quinone (PQQ) genes from a phosphate solubilizing bacterium *Enterobacter intermedium*. *Curr. Microbiol.* 47 : 457-461.
- Kim, K.Y., G.A. Macdonald et D. Jordan. 1997. Solubilization of hydroxyapatite by *Enterobacter agglomerans* and cloned *Escherichia coli* in culture medium. *Biol. Fert. Soil.* 24(4) : 347-352.

- Kumar, V. et N. Narula. 1999. Solubilization of inorganic phosphates and growth emergence of wheat as affected by *Azotobacter chroococcum* mutants. *Biol. Fertil. Soils.* 28 : 301-305.
- Lloveras, J., A. Lopez, J. Ferran, S. Espachs et J. Solsona. 2001. Bread-making and soil nitrate as affected by nitrogen fertilization in irrigated Mediterranean conditions. *Agron. J.* 93 : 1183-1190.
- Lynch, J.M. et J.M. Whipps. 1990. Substrate flow in the rhizosphere. *Plant and Soil* 129 : 1-10.
- MAPAQ (2003). Effets des apports d'engrais minéraux phosphatés dans les démarreurs à maïs-grain en complément des apports phosphore provenant des engrais de ferme selon la saturation en phosphore des sols. Texte et coordination, Jean Cantin, agronome, MAPAQ, Centre de services de Saint-Bruno – Document disponible sur le site Agri-Réseau : [www.agrireseau.qc.ca/Grandescultures/ \(maïs/régie/fertilisation\)](http://www.agrireseau.qc.ca/Grandescultures/(maïs/régie/fertilisation)).
- Nautiyal, C.S., S. Bhadauria, P. Kumar, H. Lal., R. Mondal et D. Verma. (2000). Stress induced phosphate solubilization in bacteria isolated from alkaline soils. *FEMS Microbiol. Lett.* 182 : 291-296.
- Niehues, B.j., R.W. Lamond, C.B. Godsey et C.J. Olsen. 2004. Starter nitrogen fertilizer management for continuous No-till corn production. *Agron. J.* 96 : 1412-1418.
- Parent, L.É. 2003. Les engrais organo-minéraux comme solution commerciale aux surplus de biomasses. Colloque en agroenvironnement de l'IRDA, Drummondville, jeudi le 13 novembre 2003.
- Provencher, M. 2003. Évaluation spatiale de l'efficacité agronomique du Lior dans la pomme de terre. Thèse M.Sc., Université Laval, Faculté de l'agriculture et de l'alimentation, Québec, Qc.
- Rodriguez, H. et R. Fraga. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnol. Adv.* 17 : 319-39.
- Nautiyal, C. S., S. Bhadauria, P. Kumar, H. Lal, R. Mondal et D. Verma. 2000. Stress induced phosphate solubilization in bacteria isolated from alkaline soils. *FEMS Microbiology Lett.* 182 : 291-296.
- Van Veen, J.A., L.S. Van Overbeek et J.D. Van Elsas. 1997. Fate and activity of microorganisms introduced into soils. *Microbiol. Molec. Biol. Rev. (MMBR)* 61 : 121-135.
- Zhang, H. F. D'Aoust, T.C. Charles, B.T. Driscoll, B. Prithiviraj et D.L. Smith. 2002. Bradyrhizobium japonicum mutants allowing improved soybean yield in short season areas with cool spring temperatures. *Crop Sci.* 42:1186-1190.