

UTILISATION DU PHOSPHORE DANS LES ENGRAIS DE DÉMARRAGE

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC
DIRECTION DES POLITIQUES DU SECTEUR AGRICOLE

Emilie Gagnon, agronome, M.Sc.,
et
Richard Beaulieu, agronome, M.Sc.

Service de l'assainissement agricole
et des activités de compostage (SAAAC)
18 juin 2002

RÉSUMÉ

Devant l'émergence de nombreux problèmes de dégradation de la qualité de l'eau en milieu agricole liés à l'utilisation intensive de matières fertilisantes et devant la sévérité grandissante des normes en matière de fertilisation, plusieurs intervenants se questionnent sur la nécessité d'utiliser un engrais phosphaté lors des semis de maïs. En fait de nombreux facteurs influencent l'efficacité des engrais de démarrage notamment, la température du sol, le drainage, le contenu en phosphore du sol, l'apport d'amendements organiques, le travail du sol et les différents hybrides utilisés. Comme tous ces facteurs interagissent les uns avec les autres, ceci complexifie la décision d'utiliser, ou non, du phosphore dans l'engrais de démarrage. L'objectif de cette revue de littérature est ainsi de présenter et d'expliquer ces facteurs dans un contexte d'agriculture durable et dans un souci de préserver la qualité de l'eau afin de prendre une décision éclairée quant à l'utilisation du phosphore dans les engrais de démarrage.

MOTS CLÉS : engrais de démarrage, engrais phosphatés, maïs, température du sol, travail du sol, amendements organiques, contenu en phosphore du sol, hybrides.

ABSTRACT : UTILIZATION OF PHOSPHORUS IN STARTER FERTILIZERS

In the face of emerging water quality degradation problems in agricultural areas linked to the intensive use of fertilizing residuals, and the increasing strictness of standards as regards fertilization, many people are questioning the need for phosphorus fertilizers at corn seedling. Many factors influence the efficiency of starter fertilizers including, soil temperature, drainage, soil phosphorus level, the use of organic amendments, soil tillage, and the different hybrids used. As all these factors interact with each other, the decision of whether or not to use phosphorus in starter fertilizers is complicated. The goal of this literature review is to present and explain these factors in the context of sustainable agriculture and maintaining water quality, in order to be able to make enlightened decisions regarding the use of phosphorus in starter fertilizers.

KEY WORDS : starter, phosphorus fertilizer, corn, soil temperature, soil tillage, organic amendment, soil phosphorus content, and hybrid.

UTILISATION DU PHOSPHORE DANS LES ENGRAIS DE DÉMARRAGE

INTRODUCTION

Au Québec, l'intensification des grandes cultures combinée à l'accroissement des cheptels au cours des 30 dernières années a entraîné l'intensification de l'utilisation d'éléments nutritifs afin d'augmenter les rendements et la qualité des récoltes. Les pratiques de fertilisation se sont traduites par une majoration de la teneur en phosphore du sol des superficies réceptrices. Ce phénomène a été mis en évidence dans l'inventaire de dégradation des sols agricole du Québec (Tabi et al., 1990). Compte tenu des liens existants entre la teneur et la saturation en phosphore des sols et la qualité de l'eau de surface en milieu agricole (Sharpley et al., 1994), il devient de plus en plus justifié de s'assurer de la nécessité d'utiliser judicieusement des engrais phosphatés devant l'augmentation des superficies en maïs.

Dans un contexte où les quantités de déjections animales épandues annuellement sont importantes, deux questions sont souvent soulevées concernant l'application de phosphore minéral (engrais de démarrage) en bandes au semis dans le maïs-grain au Québec. 1) Doit-on recourir à cette approche lorsque les sols sont « riches » en phosphore ? 2) Doit-on utiliser cette approche lorsqu'il y a déjà eu un apport d'engrais de ferme comblant l'ensemble des besoins en phosphore de la saison, sans égard à la richesse en phosphore du sol ? (CPVQ, 2000). Cette revue de littérature permettra dans un premier temps, d'élaborer sur le mode d'action des engrais phosphatés dans le sol. Dans un deuxième temps, elle permettra de faire la lumière sur les multiples facteurs influençant la réponse des cultures aux engrais de démarrage.

MODE D'ACTION DES ENGRAIS PHOSPHATÉS DANS LE SOL

Tout d'abord, lorsqu'on applique des engrais minéraux phosphatés dans le sol, ceux-ci se solubilisent. Cette première réaction rend ce phosphore très réactif avec le sol. Après la mise en solution des engrais phosphatés, les phénomènes d'absorption, de fixation et de précipitation surviennent. Les principaux facteurs responsables de l'absorption et de la fixation à court terme sont les oxydes d'aluminium et de fer libres, ainsi que le calcium et le magnésium sous forme échangeables ou sous forme de carbonate. Étant de charge négative, les argiles et la matière organique ne contribuent pas directement à la fixation du phosphore. Comme les cations Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont absorbés à leur surface, ces derniers peuvent contribuer à la rétention des phosphates par le sol (Giroux et al., 1996). À plus long terme, la précipitation du phosphore et sa cristallisation sous des formes minéralogiques peu solubles (varicite, strengite et apatite) viennent compléter la rétroversion des phosphates (Sample et al., 1980).

Il convient donc d'utiliser les engrais phosphatés en synchronisation avec les besoins des cultures puisque la disponibilité du phosphore au moment opportun peut être de courte durée. C'est dans ces circonstances que peut se justifier l'utilisation des engrais de démarrage. Ces derniers se composent d'engrais minéraux qui peuvent contenir de l'azote, du phosphore et du potassium et qui sont appliqués en bande au semis. Le but est donc de rendre disponible les éléments nutritifs nécessaires au bon développement des jeunes plants. Ils servent donc à démarrer la croissance de la culture.

Les différentes formes d'engrais phosphatés.

Pour établir les meilleures sources d'engrais phosphatés à utiliser dans les engrais de démarrage, il est nécessaire de connaître la réaction du sol (pH) et celle des engrais phosphatés. Les engrais phosphatés commerciaux peuvent contenir deux formes de phosphore (orthophosphates), soit une forme à réaction acide $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ (superphosphate triple

(TSP), phosphate mono-ammoniacal (MAP)) ou une forme à réaction basique HPO_4^{-2} (phosphate bi-ammoniacal (DAP)) (Giroux, 1991). Dans les engrais liquides de démarrage on utilise également des polyphosphates d'ammonium ou de potassium. Ils sont rapidement transformés en orthophosphates dans les sols.

Une expérience au champ a été menée sur deux sols de l'Est du Canada de pH différents (5,0 et 6,0 initialement) pour évaluer l'effet de différentes doses d'urée avec des engrais phosphatés à réaction acide appliqués en bandes sur le rendement du maïs, ainsi que sur l'efficacité d'utilisation des engrais. L'application en bandes d'urée avec du TSP ou du MAP a augmenté le phosphore du sol disponible prélevée par la culture et le rendement en grain sur les deux types de sol. Cette combinaison a aussi permis d'atténuer l'accroissement du pH comparé à une application d'urée-DAP. De plus, on a observé que le rendement en grains et l'absorption du phosphore étaient supérieurs dus à un effet résiduel des engrais phosphatés appliqués en bandes avec de l'urée épandus l'année précédente (Fan et MacKenzie, 1994).

Malgré cela, l'ajout d'urée dans l'engrais de démarrage de la culture de maïs n'est pas conseillé. En effet, le phénomène de toxicité ammoniacal a souvent été observé avec l'utilisation de l'urée. L'agronome devrait donc privilégier l'utilisation du nitrate d'ammoniaque ou du nitrate d'ammoniaque calcique avec du MAP ou du DAP. Par contre, l'étude de Fan et MacKenzie (1994) démontre que dans le cas où l'on doit employer de l'urée, il est préférable de l'utiliser avec du MAP plutôt que du DAP.

Finalement, sous nos conditions, il est généralement recommandé de respecter certaines marges de sécurité d'apport d'éléments fertilisants dans l'engrais de démarrage afin d'éviter des problèmes de salinité. En effet, pour la culture du maïs, lors de l'utilisation de nitrate d'ammonium il n'est pas recommandé de dépasser 55 kg d'azote à l'hectare ou 90 kg d'azote et potasse à l'hectare. Lors de l'utilisation d'urée, le total ne devrait pas dépasser 30 kg d'azote à l'hectare ou 60 kg d'azote et potasse à l'hectare (CRAAQ, 2002).

Le mode de placement des engrais phosphatés.

La faible efficacité des engrais phosphatés est un problème dans les cultures sur sol acide (Fan et Mackenzie, 1994). La recherche montre que l'efficacité peut être affectée par les modes d'application des engrais. Afin que l'engrais phosphaté soit efficace pour la nutrition de la plante, ce dernier se doit d'être placé dans une position lui permettant de se retrouver à proximité de la surface absorbante des racines (Garg et Welch, 1967). Durant les premiers stades de croissance du plant de maïs, la plante est en contact avec un volume limité de sol duquel elle peut absorber le phosphore. Ceci est dû à la quantité et à la dimension restreinte des racines durant les premiers stades de croissance. De plus, contrairement à l'azote, le phosphore est un élément qui diffuse peu. Ensuite, lorsque les plants croissent, la surface de contact sol-racine augmente. Ainsi, les agronomes ont souvent remarqué que les symptômes de déficience en phosphore en début de saison disparaissent au fur et à mesure que la saison progresse. Il ne fait aucun doute, pour Garg et Welch (1967), que cela est dû à l'augmentation du volume de sol duquel les plantes absorbent le phosphore grâce à leur système racinaire qui se développe. D'ailleurs, ces auteurs mentionnaient déjà à l'époque que les sols à contenu élevé en phosphore peuvent fournir suffisamment de phosphore en début de saison.

L'utilisation la plus efficace des engrais phosphatés est ainsi généralement obtenue lorsque le phosphore est placé en bande dans un petit volume de sol près de la semence (Garg et Welch, 1967). L'application à la volée, qui mélange les engrais à un plus grand volume de sol, serait donc moins efficace en début de saison. Cependant, l'efficacité sur le rendement de la fertilisation en bandes comparé aux applications à la volée, se limiterait principalement aux sols à faible fertilité. Sur les sols riches, il est souvent plus difficile de mesurer une amélioration du rendement du maïs lorsqu'on compare les deux modes de placement (Welch et al., 1966). En fait, la réponse du maïs envers le placement du phosphore et du potassium dépend fortement de la fertilité du sol. Lorsque la teneur en éléments nutritifs des sols est riche, on n'observe généralement pas d'augmentation du rendement, peu importe les méthodes de placement utilisées. Dans les sols pauvres et moyens, les rendements obtenus

suite au placement en bandes sont rarement dépassés par d'autres méthodes (Randall et Hoeft, 1988).

La température a aussi un effet sur l'efficacité du mode de placement des engrais de démarrage sur le rendement. Ainsi, Knoll et al. (1964a) et Robinson et al. (1959) ont observé que les réponses aux applications de phosphore placé en bande versus à la volée sont plus marquée dans les sols où la température est plus froide.

Les cultures sur sols acides, pauvres en phosphore, podzolisés et à fort pouvoir fixateur sont celles qui bénéficient le plus de l'application des engrais en bandes (Giroux et al., 1996).

Enfin, l'application en bande apparaît importante : 1) lorsque les semis sont réalisés durant une période où la température est basse; 2) pour des cultures dont la majeure partie de leur croissance s'effectue sous des températures froides; 3) sur des sols dont la disponibilité en phosphore est faible, particulièrement s'ils ont une forte capacité de fixation du phosphore (Robinson et al., 1959).

FACTEURS INFLUENÇANT LA RÉPONSE DES CULTURES AUX ENGRAIS DE DÉMARRAGE

Les nombreuses recherches (Bundy et Widen, 1991; Jokela, 1992; Motavalli et al., 1993; Randall et Hoelt, 1988) effectuées sur ce sujet montrent qu'une multitude de facteurs influencent la réponse d'une culture aux engrais de démarrage. Souvent, une réponse positive fut observée en début de saison sans pour autant avoir de répercussion sur les rendements en fin de saison. La présente section permettra de jeter un regard sur ces différents facteurs et de renseigner sur la façon dont ils influencent la réponse des cultures aux engrais de démarrage.

Les raisons qui poussent à utiliser un engrais de démarrage phosphaté dans une culture comme le maïs sont les suivantes. Au début de la croissance, le système racinaire de la plante est très peu développé faisant en sorte que les racines n'arrivent pas à satisfaire les besoins importants de la plante en phosphore. Cette situation est principalement causée par le manque de mobilité du PO_4 . Il importe donc, au moment du semis, d'ajouter au sol du phosphore soluble qui sera à la portée des racines des plantules dès leur levée (Doucet, 1992).

Ainsi, l'application d'engrais de démarrage dans les régions nordiques de production de maïs a permis d'augmenter la croissance et la biomasse des plantules en début de saison (Ghodrati, 1983; Bundy et Widen, 1991). Cependant, l'effet bénéfique des engrais de démarrage sur les rendements du maïs n'est pas constant année après année. Cela est probablement causé par un niveau résiduel d'éléments nutritifs dans le sol et par le facteur climat (Ghodrati, 1983).

La température du sol.

La température optimale pour la croissance des plantes varie selon les espèces. Les plantes originaires des climats chauds comme le maïs sont favorisées par des températures de sol assez élevées en début de croissance. Ainsi, la température optimale dans le sol pour la

croissance racinaire du maïs est environ 24°C (Dickson, 1923). Pour leur part, les plantes de climat froid, comme l'avoine, sont moins affectées par les températures froides de sol, mais sont restreintes dans leur développement par des températures élevées. Il a fréquemment été signalé que des températures froides du sol (soit 10 à 15°C) diminuent les réserves en éléments nutritifs du maïs, ce qui peut contribuer à la diminution de sa croissance (Hagan, 1952).

Les changements de température affectent plusieurs des mécanismes impliqués dans le prélèvement des éléments nutritifs par les plantes. Une réduction de la température sous 25°C réduit ainsi le prélèvement du maïs (Ketcheson, 1957; Knoll et al., 1964b; Walker, 1969; Carter et Lathwell, 1967). La température influence aussi la croissance racinaire (Ching et Barber, 1979) et la diffusion du phosphore dans le sol (Mackay et Barber, 1984).

Les raisons pour lesquelles la température a un effet sur le prélèvement du phosphore par le maïs ont été étudiées par Mackay et Barber (1984). Selon les résultats de leur étude, il est clair qu'une diminution de la température du sol a pour effet de diminuer dramatiquement non seulement la croissance des jeunes pousses et la croissance racinaire, mais aussi le prélèvement du phosphore par la plante. Les auteurs ont identifié plusieurs mécanismes qui ont un effet sur le prélèvement du phosphore par la plante, suite aux variations de température. Cependant, l'effet le plus remarquable provient des variations de température sur le prélèvement de cet élément par la plante et se manifeste aussi sur le taux de croissance racinaire. Ainsi, ils ont observé que la croissance racinaire augmente près de 5 fois lorsque la température du sol augmente de 18°C à 25°C. De fait, en augmentant la croissance racinaire, la surface spécifique des racines augmente, permettant d'augmenter l'absorption du phosphore. Ce processus est particulièrement important pour le phosphore, puisque même à des concentrations élevées dans la solution du sol, il diffuse lentement jusqu'aux racines.

Il a déjà été suggéré que l'addition de phosphore dans le sol puisse contrecarrer l'effet des températures plus froides sur le prélèvement de cet élément. Les résultats de l'étude de Mackay et Barber (1984) indiquent qu'une augmentation de la concentration initiale du phosphore dans la solution du sol compenserait apparemment la réduction de la croissance

racinaire résultant de températures froides. Ainsi, l'augmentation de la concentration de phosphore à la surface des racines permet d'augmenter le flux de phosphore prélevé par les surfaces racinaires plus restreintes.

Selon Robinson et al. (1959), l'application en bandes de phosphore pour une culture de trèfle serait plus efficace que l'application à la volée lorsque la température du sol est froide. Cela serait dû à l'effet de la température sur le taux de prélèvement du phosphore par la plante. Lorsque la température du sol est froide et qu'une petite quantité de cet élément est mélangée avec le sol, le niveau de phosphore disponible dans le sol et la croissance de la plante sont faibles. En élevant la température du sol, le taux de prélèvement du phosphore augmente, ce qui a pour effet de favoriser sensiblement la croissance des plantes. Il semble que le prélèvement rapide du phosphore à des températures élevées serait associé au coefficient d'absorption variable selon la température, plutôt qu'à une augmentation de la concentration de phosphore dans la solution du sol. De plus, à mesure que la température du sol s'élève, les plantes semblent pouvoir absorber plus rapidement le phosphore de la solution du sol malgré une faible teneur du sol en cet élément. Ainsi, l'application en bande de phosphore augmente considérablement la concentration de cet élément dans la zone racinaire. De cette façon, l'effet de la température sur le prélèvement de cet élément devient moins important. Toutefois, il semble que les avantages de la fertilisation en bandes sont moins importants à température élevée. Dans ces conditions, le mélange d'une faible quantité de phosphore dans le sol donnait des résultats satisfaisants (Robinson et al., 1959).

Selon Knoll et al. (1964b), l'application d'engrais phosphatés sur le maïs n'aura jamais comblé totalement les effets nuisibles des températures froides du sol sur la croissance, le contenu ou le prélèvement en phosphore de la plante en sol acide ou neutre, mais aura toutefois permis d'améliorer ces performances comparativement au témoin sans phosphore en présence de telles conditions. Englestad et Terman (1980) de même que Young et al. (1985) ont aussi observé l'effet bénéfique de l'utilisation des engrais de démarrage sur des sols à haut niveau de fertilité situés dans les régions nordiques où les températures au printemps sont souvent basses.

Dans le cadre d'une expérience sur des plants de maïs en pots, Barry et Miller (1989) ont rapporté qu'une forte concentration de phosphore dans les plants de maïs avant le stade 6 feuilles augmente significativement le rendement final en grains.

Le drainage

Dans un premier temps, un bon drainage permet au sol de se réchauffer plus rapidement que lorsqu'il est mal drainé. Cela contribue donc à augmenter la disponibilité du phosphore aux plantes en accélérant la décomposition de la matière organique du sol grâce à l'activité plus efficace des microorganismes et en libérant ainsi du phosphore en provenance du pool organique modérément labile. Dans un deuxième temps, le drainage change la dynamique des réactions entre le phosphore et les oxydes de fer qui précipiteront. Olivier et al. (1992) ont effectué une étude sur quatre sites en Abitibi où ils ont évalué l'effet du drainage sur les teneurs en phosphore extractible après cinq années. Ils ont observé très peu de changements si ce n'est une diminution de la teneur en phosphore extractible du sous-sol à un site, probablement par la formation de phosphates de fer insolubles.

Un climat nordique et les conditions de drainage limitantes de plusieurs sols de certaines régions suggèrent un besoin d'utilisation d'engrais de démarrage (Jokela, 1992).

Le contenu en phosphore du sol.

Tel que mentionné précédemment, il a souvent été observé, chez le maïs, que les carences en phosphore apparaissant durant les premiers stades de croissance disparaissent au cours de la saison. En effet, les plus hautes concentrations de phosphore dans le sol sont requises au cours des premiers stades de croissance de la plante (Seatz et Sturges, 1963; Romer et Schilling, 1986). Ainsi, Garg et Welch (1967) ont constaté que le maïs nécessite une concentration élevée de phosphore dans un petit volume de sol en début de saison et une

concentration plus faible dans un plus grand volume de sol plus tard au cours de la période de croissance.

La réponse des cultures suite à l'application de phosphore et de potassium se produit rarement sur les sols riches et excessivement riches et ce, indépendamment de la méthode de placement (Randall et Hoelt, 1988). Ces mêmes conditions de sol peuvent fournir une concentration en phosphore suffisamment élevée pour la croissance de la culture tôt en saison (Garg et Welch, 1967). Selon Giroux et al. (1996), il n'est pas possible d'établir avec exactitude à partir de quelle teneur en phosphore du sol l'utilisation d'un engrais de démarrage n'est plus requise, puisque ce niveau peut varier d'un sol à l'autre et d'une saison à l'autre. Cependant, dans les sols dont la teneur en phosphore est excessivement riche, contenant plus de 250 kg P_{M3} /ha, les probabilités de réponses aux engrais phosphatés sont très faibles et les recommandations en phosphore pour plusieurs cultures sont nulles.

Suite à une étude portant sur l'effet des engrais de démarrage sur les rendements du maïs ensilage sur des sols de fertilité moyenne et élevée en phosphore, Jokela (1992) a fait les observations suivantes :

- Sur la plupart des sites (3 sites sur 4) où les sols présentaient un niveau de fertilité moyen et une mauvaise qualité de drainage, l'utilisation d'un engrais de démarrage a produit une augmentation significative des rendements du maïs ensilage. De plus, les quantités plus faibles d'engrais de démarrage ont été adéquates dans tous les cas sauf un.
- Lorsque les sols présentaient un niveau de fertilité moyen-élevé et élevé, sans regard au drainage du sol, la plupart des sites (6 sites sur 7) n'ont pas montré d'augmentation de rendement ou d'augmentation de la croissance des plantules avec l'utilisation de engrais de démarrage. La capacité de fixation plus élevée tel qu'indiquée par un taux élevé de l'aluminium réactif, serait responsable de l'augmentation de rendement du dernier site.

Basé sur les résultats de cette étude, Jokela (1992) conclut qu'une recommandation adéquate d'engrais de démarrage pour la production de maïs ensilage sur les sols des régions nordiques

dont la teneur en phosphore et/ou en potassium présente un niveau moyen, est d'appliquer une dose réduite de N-P-K (11-17 kg N/ ha, 28-34 kg P₂O₅/ ha et 17-34 kg K₂O/ ha) et spécialement sur les sols mal drainés. L'auteur prétend que sur les sols dont la teneur en phosphore et en potassium est élevée, la probabilité d'une augmentation de rendement due à l'usage d'engrais de démarrage est faible et elle l'est d'autant plus lorsqu'un apport en éléments nutritifs a été fourni par les fumiers de ferme. Sur les sols dont la teneur en phosphore est faible ou encore avec des semis très tôt en début de saison (c'est-à-dire début mai), il pourrait y avoir un besoin pour des doses élevées d'engrais de démarrage.

Une étude menée par Giroux et Guertin (1998) présente des conclusions intéressantes concernant la fertilisation phosphatée et potassique en sols riches et extrêmement riches en phosphore. Elle démontre notamment qu'en sols riches à très riches en phosphore assimilable et en potassium échangeable, seule une fumure azotée produit un effet significatif sur le rendement, le poids à l'hectolitre, la teneur en eau des grains, le contenu en azote total des feuilles et des grains et l'indice de chlorophylle des feuilles. En fait, il n'y a pas d'effets significatifs sur les éléments susmentionnés malgré la majoration des doses de phosphore et de potassium et selon les interactions entre les doses d'azote, de phosphore et de potassium. Les auteurs concluent donc que seule une application d'engrais composé uniquement d'azote est suffisante pour répondre aux besoins en éléments nutritifs du maïs dans l'atteinte d'un rendement optimal en sols très riches en phosphore et en potassium et pour obtenir une qualité optimale des grains en sols riches en phosphore.

Les amendements organiques.

Dans une étude portant sur l'effet des engrais de démarrage sur le rendement du maïs-ensilage sur des sols de moyenne et de haute fertilité, Jokela (1992) compare le besoin d'utiliser les engrais minéraux ou les déjections animales (lisier de bovins laitiers) sur un site n'ayant jamais reçu de telles déjections. Ainsi, chaque parcelle de cette étude a reçu la même quantité d'engrais de démarrage et l'une d'elles a reçu 65 m³/ha de déjections animales juste avant le travail du sol (labour) au printemps. Malgré que le dispositif expérimental ne puisse

permettre les comparaisons statistiques de l'effet de l'utilisation des fumiers, il semble plausible que l'apport d'éléments nutritifs fournis par ce dernier juste avant le semis (approximativement 123 kg N, 93 kg P₂O₅, 169 kg K₂O / ha) minimise le besoin d'un engrais de démarrage pour des sites dont la teneur en phosphore et en potassium est considérée moyennement élevée.

Les résultats d'une étude portant sur les interactions entre du fumier (fumier semi-liquide de bovins) et des engrais de démarrage dans les productions de maïs situées en zones nordiques, suggèrent que le fumier fournirait des quantités suffisantes d'éléments nutritifs et entraînerait des améliorations au niveau des propriétés physiques et biologiques du sol (Motavalli et al., 1993). L'amélioration de ces propriétés et l'apport d'éléments nutritifs compenseraient tous les bénéfices provenant de l'utilisation d'engrais de démarrage. De plus, l'utilisation de fumier semi-liquide de bovins procure un effet résiduel significatif sur les rendements du maïs ensilage jusqu'à deux ans après son application. Cela s'expliquerait par l'accumulation de phosphore et de potassium dans le sol et par l'intensification de la minéralisation de l'azote suite à l'application répétée de fumier sur la même parcelle (Motavalli et al., 1993). Ces mêmes auteurs ont aussi observé que les engrais azotés n'avaient aucun effet résiduel.

Motavalli et al. (1993) ont aussi étudié l'effet de l'application de fumier (fumier semi-liquide de bovins) combiné avec l'application d'engrais de démarrage. L'addition d'engrais de démarrage n'a pas eu un effet global consistant sur les rendements du maïs ensilage pendant 3 ans. Cependant, le prélèvement de la plante en potassium a été en moyenne supérieur suite à l'application d'engrais de démarrage. Lors de la première année de l'étude, une amélioration de la croissance a été observée en début de saison suite à l'application de l'engrais minéral. Toutefois, cela n'a pas résulté en une augmentation des rendements en maïs ensilage lors de la récolte. Les auteurs expliquent que cela serait probablement causé par de faibles précipitations de juillet à octobre (sous les moyennes) ainsi que par une diminution de la demande en éléments nutritifs due à une faible population de plante cette année-là, comparé aux deux années suivantes. Cependant lors de la troisième année, les rendements du maïs ensilage ont augmenté avec l'application d'engrais de démarrage. En comparaison avec les deux autres années où les mêmes traitements ont été appliqués, la

troisième année évoque un patron relativement normal des degrés-jours et des précipitations malgré un mois de mai relativement sec. Ainsi, la réponse à l'engrais de démarrage au cours de la dernière saison des essais ne peut être expliquée en totalité par les facteurs climatiques.

Le travail du sol.

Lors de l'emploi des techniques conventionnelles de travail du sol et lorsque les sols présentent des niveaux de phosphore moyens à élevés, l'effet des engrais de démarrage, si effet il y a, est généralement strictement cosmétique (Bullock et al., 1993). En effet, ces auteurs soulignent que l'utilisation d'engrais de démarrage augmente le taux de croissance en début de saison et donne une apparence plus verdâtre au maïs tout en le laissant paraître plus gros. Cependant, l'effet est d'autant plus faible sur la grosseur finale du plant et le rendement en grains. Selon ces derniers, les engrais de démarrage ne sont pas recommandés sur des parcelles sous travail conventionnel dont le niveau de phosphore est considéré moyen à élevé, mais ils sont toujours utilisés par plusieurs agriculteurs. Toutefois, l'utilisation d'engrais de démarrage serait vraisemblablement bénéfique pour la production de maïs en semis direct situé dans les régions nordiques et ce pour la plupart des hybrides (Buah et al., 1999).

Randall et Hoeft (1988) expliquent que les pratiques de conservation générant des quantités plus importantes de résidus à la surface du sol retardent le réchauffement du sol en comparaison avec un sol sous pratiques conventionnelles, ce qui suggère un besoin accru d'utiliser des engrais de démarrage. D'un autre côté, les pratiques de conservation augmentent avec le temps la teneur en phosphore disponible de la couche de surface ce qui pourrait favoriser l'absorption du phosphore par les jeunes plants.

Kapusta et al. (1996) ont réalisé une étude d'une durée de 20 ans portant sur les rendements du maïs sous différentes techniques de travail du sol. Ils ont ainsi comparé les rendements provenant de parcelles sous travail conventionnel, sous travail réduit (chisel et travail alterné) et sous semis direct. Ils ont aussi étudié l'effet de différents engrais minéraux (démarreur en

bande, démarreur à la volée) en interaction avec les différents travaux du sol sur le rendement du maïs. Une conclusion intéressante de cette étude révèle que sous semis direct, l'emploi d'engrais de démarrage n'est pas bénéfique sur un sol imparfaitement drainé.

Les hybrides.

Teare et Wright (1990) ont démontré lors d'une étude s'étant déroulée sur 3 ans que ce ne sont pas tous les hybrides de maïs qui montraient une réponse positive de leur rendement en grain lors de l'utilisation d'engrais de démarrage. Ainsi, certains hybrides répondent systématiquement de façon positive, d'autres constamment de façon négative, alors que d'autres sont inconstants. Selon ces auteurs, les caractéristiques du maïs qui influencent la réponse aux engrais de démarrage sont les suivantes :

- la croissance racinaire;
- la capacité de prélèvement du phosphore;
- la capacité de prélèvement de l'azote;
- le taux de croissance de la partie supérieure de la plante;
- la réponse de la croissance à la température.

Les hybrides hautement sensibles à la température sont les plus susceptibles de répondre à l'application d'un engrais de démarrage lorsque les températures sont sous les normales (Rhoads et Wright, 1998). Les dates de semis plus précoces utilisées afin de maximiser le potentiel de rendement du maïs (Wright et al., 1988), résultent souvent en une exposition des jeunes plants à des températures de sol froides (Rhoads et Wright, 1998). La croissance lente des plants, résultant de la faible disponibilité de l'azote et du phosphore dans les sols froids, peut survenir sans tenir compte du niveau de fertilité des sols (Touchton et Hargrove, 1983).

L'azote et le phosphore sont considérés comme des ingrédients essentiels des engrais de démarrage (Ketcheson, 1957) permettant de compenser pour la faible disponibilité de ces éléments nutritifs dans les sols froids (Cassman et Munns, 1980; Wallingford, 1978). Un

hybride possédant une importante croissance racinaire et un fort prélèvement en éléments nutritifs est susceptible de présenter une réponse moins intéressante aux engrais de démarrage. Une réponse constante du maïs aux engrais de démarrage aurait lieu lorsque la température du sol est basse (Ketcheson, 1968), et cette basse température du sol a pour effet de diminuer la croissance racinaire (Mackay et Barber, 1984). Ainsi, une réponse positive aux engrais de démarrage devrait survenir avec des hybrides présentant une faible croissance racinaire et/ou une faible capacité de prélèvement des éléments nutritifs.

Certains sols ont une forte capacité à fixer ou à immobiliser les engrais phosphatés. De ce fait, cela réduit la disponibilité de ces engrais pour les plantes présentant un système racinaire limité surtout lorsqu'elles croissent sur des sols froids (Rhoads et Wright, 1998). Les sols à faible fertilité procurent un environnement plus favorable permettant d'obtenir une réponse positive des plantes à l'utilisation des engrais de démarrage comparativement aux sols à fertilité élevée. L'emplacement de l'engrais en bande près de la semence dans un sol de faible fertilité peut procurer une augmentation très marquée de la concentration des éléments nutritifs dans la zone racinaire limitée des jeunes pousses se traduisant par une croissance plus rapide.

Rhoads et Wright (1998) ont mené une étude en serre sur deux hybrides, un premier montrant une réponse constamment positive aux engrais de démarrage et un deuxième présentant une réponse constamment négative. Les essais ont été récoltés 33 et 41 jours après les semis respectivement. Les auteurs mentionnent qu'à des températures élevées, dans les sols dont le contenu en phosphore est élevé ou encore qui ne fixent pas beaucoup cet élément, les hybrides ayant des systèmes racinaires larges ou abondants peuvent ne pas répondre aux engrais de démarrage phosphatés. Dans les sols froids, les hybrides avec des systèmes racinaires abondants peuvent répondre aussi bien à l'azote qu'au phosphore contenus dans les engrais de démarrage, parce que la croissance racinaire de tous les hybrides est réduite par la température froide du sol. Aussi, les hybrides dont le système racinaire est moins développé (plus petit) répondront plus efficacement aux engrais de démarrage. En fait, la différence de réponse suite à l'utilisation d'engrais de démarrage entre deux types d'hybrides, semblerait

provenir de la différence de croissance du système racinaire et de l'efficacité du système d'absorption des éléments nutritifs.

La croissance du maïs avec ou sans engrais de démarrage.

Bates (1971) a étudié l'effet de l'utilisation des engrais de démarrage sur 22 sites différents au Canada. Il a trouvé que les engrais de démarrage placés dans le sillon des semences augmentaient de 35% le poids sec des plants de maïs âgés de 36 jours, mais majoraient les rendements en grain que de 2,9% à la récolte. Nelson et al. (1959) de même que Mengel et al. (1988) ont rapporté que l'utilisation d'engrais de démarrage apportant des quantités importantes d'éléments nutritifs en pré-semis à la volée, augmentait significativement la croissance des plants en début de saison sans toutefois augmenter le rendement en grain.

Aucune information permettant d'expliquer la raison d'une telle augmentation de la croissance en début de saison sans qu'elle ne se transpose en une augmentation finale de la grosseur des plants et du rendement en grain n'a été publiée (Bullock et al., 1993). Cependant, Mengel et al. (1988), travaillant dans le Midwest américain, ont noté que l'utilisation d'engrais de démarrage réduisait la teneur en humidité des grains au moment de la récolte. De la même façon, Usherwood (1991) a rapporté que l'utilisation d'engrais de démarrage hâtait la formation de l'épi chez le maïs.

Bullock et al. (1993) ont réalisé une étude en Illinois qui consistait en une analyse de la croissance du maïs avec et sans engrais de démarrage. Cette dernière était basée sur les hypothèses suivantes : les engrais de démarrage augmentent généralement la croissance en début de saison sur les sols dont le contenu en phosphore est élevé et hâtent le déclin des marges des surfaces foliaires ne permettant pas d'augmenter la durée de vie des surfaces foliaires. À la fin de l'étude, les auteurs conclurent qu'étant donné la présence de travaux antérieurs démontrant la disparité des réponses obtenues avec différents hybrides suite à l'utilisation d'engrais de démarrage (Teare et Wright, 1990), que les résultats obtenus dans le cadre de leurs travaux ne sont probablement pas représentatifs pour tous les hybrides de maïs. Ainsi, ils proposent que leurs résultats ne s'appliquent qu'à l'hybride ayant fait l'objet

de l'étude (Pioneer 3379), croissant dans le Midwest américain, sur des sols sous travail conventionnel dont les niveaux de phosphore sont de moyens à élevés et pour lesquels les engrais de démarrage augmentent la croissance en début de saison, mais dont les rendements en grain ne sont pas majorés. Pour de tels hybrides, l'effet des engrais de démarrage, si effet il y a, est cosmétique et ne permet pas d'augmenter le profit. Ainsi, cette recherche supporte les recommandations actuellement en vigueur dans le Midwest américain; il n'est pas justifiable d'utiliser des engrais de démarrage sur des sols sous travail conventionnel dont le niveau de phosphore est classé moyen à élevé.

CONCLUSION

Ainsi, il a été observé que le potentiel et/ou l'ampleur de l'augmentation de la croissance et des rendements provenant de l'utilisation des engrais de démarrage se manifeste généralement lorsque les sols présentent un contenu en phosphore faible (Giroux et al., 1996; Jokela, 1992; Rehm et al., 1988; Welch et al., 1966), sont froids (Englestad et Terman, 1980; Randall et Hoeft, 1988; Young et al., 1985), sont cultivés selon une technique de travail réduit (Howard et Tyler, 1987), ou possèdent un fort pouvoir fixateur (Giroux et al., 1996; Robinson et al., 1959; Jokela, 1992). Toutefois, il a aussi été rapporté que le recours aux engrais de démarrage augmentaient la croissance en début de saison et les rendements en grain lorsqu'ils étaient utilisés avec du maïs semé tardivement (Farber et Fixen, 1986) et sur des sols ayant un contenu élevé en phosphore (Touchton, 1988). Enfin, certains auteurs (Bullock et al., 1993) ont observé que l'utilisation d'engrais de démarrage ne produisait qu'un effet cosmétique en début de saison, sans se transposer sur le rendement lors de la récolte.

Comme nous avons pu le constater, les pratiques de fertilisation prévoyant l'utilisation de phosphore minéral en bandes au semis reposent sur un bon nombre d'information appuyée par de nombreux travaux de recherche. Si l'on tente maintenant de répondre aux deux questions soulevées en introduction, voici ce que pourraient contenir les réponses formulées. À la question : doit-on recourir à cette approche lorsque les sols sont « riches » en phosphore? Il est possible de répondre que l'utilisation d'engrais de démarrage dépend, entre autres, de la température du sol et du travail du sol. De plus, Englestad et Terman (1980), ainsi que Young et al. (1985) concluent que leur utilisation peut être bénéfique même sur les sols riches dans les régions nordiques. À l'opposé, Jokela (1992), Welch et al. (1966) ainsi que Randall et Hoeft (1988) affirment, d'une certaine façon, le contraire. Enfin, Giroux et al. (1996) concluent que les probabilités de réponses sont très faibles et que les recommandations pour plusieurs cultures sont nulles.

À la deuxième question : doit-on utiliser cette approche lorsqu'il y a déjà eu un apport d'engrais de ferme comblant l'ensemble des besoins en phosphore de la saison, sans égard à

la richesse en phosphore du sol ? Voici quelques éléments de réponse. Jokela (1992) signale que la probabilité d'obtenir un meilleur rendement est beaucoup plus faible sur les sols dont la teneur en phosphore est élevée, spécialement là où des fumiers sont épandus. Motavalli et al. (1993), quant à eux, indiquent que l'utilisation de fumier à la place des engrais de démarrage peut compenser tous les bénéfices de rendements provenant de l'utilisation de ces engrais.

À partir des informations contenues dans ce document, il faut donc recommander d'effectuer une analyse relativement poussée des conditions relatives à chaque parcelle à fertiliser avant de recommander l'usage systématique d'engrais de démarrage contenant du phosphore.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARRY, D.A.J. and MILLER, M.H. 1989. *The phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield*, Agron. J., 81 : 95-99
- BATES, T.E. 1971. *Response of corn to small amounts of fertilizer placed with the seed : III. Relation to P and K placement and tillage*, Agron. J., 63 : 327-375
- BUAH, S.S.J., T.A. POLITO et R. KILLORN. 1999. *No-Tillage Corn Hybrids Response to Starter Fertilizer*, J. Prod. Agric., Vol. 12, no. 4, pp.676-680
- BULLOCK, D.G., F.W. SIMMONS, I.M. CHUNG et G.I. JOHNSON. 1993. *Growth analysis of corn grown with or without starter fertilizer*, Crop Sci., 33 :112-117
- BUNDY, L.G. et P.C. WIDEN. 1992. *Corn response to starter fertilizer : Planting date and tillage effects*. Better Crops Plant Food 76(1) : 20-23.
- CARTER, O.G. et D.J. LATHWELL. 1967. *Effects of temperature on orthophosphate absorption by excised corn roots*, Plant Physiol., 42 : 1407-1412
- CASSMAN, K.G. et D.N. MUNNS. 1980. *Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth*, Soil Sci. Soc. Am. J., 44 : 1233-1237
- CHING, P.C. et S.A. BARBER. 1979. *Evaluation of temperature effects on K uptake by corn*, Agron. J., 71 : 1040-1044
- CPVQ, 2000. *Guide des Pratiques de conservation en grandes cultures*, Conseil des productions végétales du Québec inc.
- CRAAQ, 2002. *Guide de Référence en Fertilisation*, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, En préparation.
- DICKSON, J.G. 1923. *Influence of soil temperature and moisture on the development of the seedling-blight of wheat and corn*. J. Agr. Research 23 : 837-870.
- DOUCET, R. 1992. *La science agricole : climat, sols et productions végétales du Québec*, Éditions Berger, Canada, 699 p.
- ENGELSTAD, O.P., and G.L. TERMAN. 1980. *Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers*, F.E. KHASAWNEH et al. (ed.), The role of phosphorus in agriculture. ASA, CSSA and SSA, MADISON, WI.
- FAN, M.X. et A.F. MACKENZIE. 1994. *Corn yield and phosphorus uptake with banded urea phosphorus mixtures*, Soil Sci. Soc. Am. J., 58 : 249-255.

- FARBER, H.G. and P.E. FIXEN. 1986. *Phosphorus response of late planted corn in three tillage systems*, J. Fert. Issues, 3 : 46-51.
- GARG, K.P. et L.F. WELCH. 1967. *Growth and phosphorus uptake by corn as influenced by phosphorus placement*, Agron. J., 59 : 152-154.
- GHODRATI, M. 1993. *Effect of broadcast nitrogen and soil test phosphorus and potassium on response of corn to row N, P, and K fertilizer*. M.S. thesis, Univ. Of Wisconsin, Madison.
- GIROUX, M. 1991. *Comparaison des sources et des modes d'apport du phosphore et d'azote sur le rendement et la nutrition minérale du maïs*, Agrosol IV, (1) : 43 - 53.
- GIROUX, M., D. BERNIER et C. ÉMOND. 1996. *Utilisation agronomique et environnementale judicieuse des engrais phosphatés selon les caractéristiques des sols et des engrais*, Dans *Colloque sur la fertilisation intégrée des sols*, CPVQ inc., p. 49-64
- GIROUX, M et S.P. GUERTIN. 1998. *Effets des doses N, P, K et leur interaction sur le rendement, la qualité et la nutrition minérale du maïs-grain*, Agrosol X, (2) : 33 - 40
- HAGAN, R.M. 1952. *Temperature and growth processe,, Soil physical conditions and plant growth*, Ed. B.T. SHAW. Agron. Monographs, 2 : 336-447, Academic Press, N.Y.
- HOWARD, D.D., and D.D. TYLER. 1987. *Comparison of surface applied phosphorus and potassium rates and in-furrow fertilizer combinations for no-till corn*, J. Fert. Issues, 3 : 46-51
- JOKELA, W.E. 1992. *Effect of starter fertilizer on corn silage yields on medium and high fertility soils*, J. Prod. Agric., 5(2) : 233-237
- KAPUSTA, G., R.F. KRAUSZ et J.L. MATTHEWS. 1996. *Corn yield is equal in conventional, reduced, and no tillage after 20 years*, Agron. J., 88 : 812 -817
- KETCHESON, J.W. 1957. *Some effects of soil temperature on phosphorus requirements of young corn plants in the greenhouse*, Canada J. Soil Sci., 37 : 41-47
- KETCHESON, J.W. 1968. *Effect of controlled air and soil temperature and starter fertilizer on growth and nutrient composition of corn, (Zea mays L.)* Soil Sci. Soc. Am. Proc., 32 : 531-534
- KNOLL, H.A., N.C. BRADY et D.J. LATHWELL. 1964a. *Effects of soil temperature and phosphorus fertilization on the growth and phosphorus content of corn*, Agron. J., 56 : 145-147

- KNOLL, M.A., D.J. LATHWELL et N.C. BRADY. 1964b. *Effect of root zone temperature at various stages of the growing period on the growth of corn*, Agron. J., 56 :143-145
- MACKAY, A.D. et S.A. BARBER. 1984. *Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn*, Soil Sci. Soc. Am. J., 48 : 818-823
- MENGEL, D.B., S.E. HAWKINS, and P. WALKER. 1988. *Phosphorus and potassium placement for no-till and spring plowed corn*, J. Fert. Issues, 5 : 31-36
- MOTAVALLI, P.P., K.A. KELLING, T.D. SYVERUD et R.P. WOLKOWSKI. 1993. *Interaction of manure and nitrogen or starter fertilizer in northern corn production*, J. Prod. Agric., 6 :191-194
- NELSON, W.L., B.A. KRANTZ, C.D. WELCH et N.S. HALL. 1959. *Utilization of phosphorus as affected by placement : II. Cotton and corn in North Carolina*, Soil Sci., 68 : 137-144
- OLIVIER, N., SIMARD, R.R. et D. ANGERS. 1992. *Impact du drainage souterrain sur les propriétés chimiques et physiques de sols de l'Abitibi-Témiscamingue*. Rapport du projet. Développement régional Agriculture Canada.
- RANDALL, G.W. et R.G. HOEFT. 1988. *Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers : A review*, J. Prod. Agric., 1 : 70-79
- RHEM, G.W., S.D. EVANS, W.W. NELSON, and G.W. RANDALL. 1988. *Influence of placement of phosphorus and potassium on yield of corn and soybeans*, J. Fert. Issues, 5 : 6-13
- RHOADS, F.M. et D.L. WRIGHT. 1998. *Root mass as a determinant of corn hybrid response to starter fertilizer*, Journal of plant nutrition, 21(8), pp.1743-1751
- ROBINSON, R.R., V.G. SPRAGUE et C.F. GROSS. 1959. *The relation of temperature and phosphate placement to growth of clover*, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 23 : 225-228
- ROMER, W. and SCHILLING, G. 1986. *Phosphorus requirements of the wheat plant in various stages of its life cycle*, Plant Soil, 91 : 221-277
- SAMPLE, E.C., R.J. SOPER et G.J. RACZ. 1980. *Reaction of phosphate fertilizers in soils. In The role of phosphorus in agriculture*, Ed. Am. Soc. Agron., 263-310
- SHARPLEY, A.N., S.C. CHAPRA, R. WEDEPOHL, J.T. SIMS, T.C. DANIEL et K.R. REDDY. 1994. *Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters : Issues and options*, J. Environ., Qual., 23 : 437-451
- SEATZ, L.F. et A.J. STURGES. 1963. *Corn response to time and rate of phosphorus Applications*, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 27 : 669-670

- TABI, M., L. TARDIF, D. CARRIER, G. LAFLAMME et M. ROMPRÉ. 1990. *Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec*, Rapport synthèse, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 71 p.
- TEARE, I.D. et D.L. WRIGHT. 1990. *Corn Hybrid-starter fertilizer interaction for yield and lodging*, Crop Science, 30 : 1298-1303
- TOUCHTON, J.T. 1988. *Starter fertilizer combinations for corn grown on soils high in Residual P*, J. Fert. Issues, 5 : 126-130
- USHERWOOD, N. 1991-1. *Starter fertilizer use and Southeast agriculture*, Starter fertilizer proc., Tech. Bull., Potash and Phosphate Inst., Atlanta, GA
- WALKER, J.M. 1969. *One-degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior*, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 33 : 729-736
- WALLINGFORD, W. 1978. *Phosphorus in starter fertilizer*, C.P. Ellington (ed.), Phosphorus for agriculture, Potash & Phosphate Institute, Atlanta, GA., 62-79
- WELCH, L.F., D.L. MULVANEY, L.V. BOONE, G.E. MCKIBBEN et J.W. PENDLETON. 1966. *Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn*, Agron. J., 58 : 283-287
- YOUNG, R.D., D.G. WESTFALL et G.W. COLLIVER. 1985. *Production marketing and use of phosphorus fertilizer*, O.P. Englestad (ed.) Fertilizer technology and use, 3rd ed., SSSA, Madison, WI., 323-376