



LA FERTILISATION POTASSIQUE C'EST PAS AUTOMATIQUE

ARTICLE

Le point sur la recherche scientifique concernant l'effet de la fertilisation potassique sur les surfaces engazonnées.

Auteur : R. GIRAUD

Cet article a pour but de faire le point sur la recherche concernant la fertilisation potassique des surfaces engazonnées afin d'éclairer l'intendant sur ses propres pratiques. A ce sujet, nombreuses sont les croyances bien établies non réellement vérifiées par des études scientifiques fiables. La clinique du gazon a donc tenté de tirer le maximum d'informations issues des études publiées sur ce sujet.

Le potassium est un élément nutritif primaire considéré comme essentiel dans la culture du gazon. Impliqué dans de nombreux processus au sein de la plante, c'est l'élément le plus abondant dans les tissus foliaires après l'azote avec des concentrations variant entre 1 et 3% en masse¹. Il est traditionnellement utilisé dans les golfs et terrains de sports pour accroître la tolérance aux différents stress du gazon (températures élevées, sécheresse, maladies, conditions hivernales). L'engouement pour le potassium s'explique probablement par les études menées depuis les années 60 et 80 sur son incidence sur les maladies (voir *figure 1*)²⁻⁵.

POTASSIUM ET RÉSISTANCE AUX MALADIES

Roy, L. Goss et Charles J. Gould ont largement étudié l'impact de la fertilisation potassique sur



Figure 1 : Premiers travaux initiés dans les années 60 par Goss et Gould sur l'incidence du potassium sur le développement des maladies. Ici une attaque sévère d'*Ophiobolus* sur une parcelle non fertilisée en potassium. (Source : Goss et Gould, 1968)

l'incidence de différentes maladies du gazon (*Fusariose froide*, *Fil rouge*, *Ophiobolus* et *Rhizoctonia*) avec une diminution des symptômes par rapport à des témoins non fertilisés en potassium sur différentes espèces de gazon. L'effet du potassium semble toutefois lié aux quantités d'azote apportées et ce sont plus les carences en potassium qui sont à craindre².

FUSARIOSE FROIDE ET TYPHULA

Pour la fusariose froide, les deux auteurs déclarent que l'incidence de la maladie est moindre pour des quantités d'azote annuelles comprises entre 300 et 600 kg N/ha et de potassium à 390 kg K/ha soit un ratio N/K compris entre 0.5 et 1,52. Selon eux, l'incidence élevée de la fusariose en automne est liée aux faibles teneurs foliaires en potassium à cette époque de l'année. Les auteurs recommandent alors des plans annuels avec un équilibre de type 3-1-2 (N-P-K) et des quantités de l'ordre de 350-120-400 kg/ha d'azote, phosphore et potassium respectivement pour une résistance et une qualité optimales du gazon².

Pourtant, une publication très complète et plus récente menée sur *Typhula incarnata* (assimilé parfois aux fusarioses froides) et raygrass anglais⁶ présente des résultats inverses (voir figure 2). L'intensité de la maladie est plus élevée lorsque la teneur foliaire en potassium augmente. Cette intensité est maximale avec 3.5% de potassium foliaire soit 441 kg N et K/ha/an et minimale avec 2.8% de potassium foliaire soit 49 kg N et K/ha/an. Sur pâturin annuel, les résultats d'une autre étude de 2011 vont également dans ce sens pour le même pathogène⁷.

Enfin, une excellente étude publiée en 2018 vérifie l'effet à long terme du potassium sur le développement de la fusariose froide^{8,9}. Les chercheurs ont appliqué pendant 6 ans des quantités différentes de potassium (0 à 300 kg K/ha/an sous forme de sulfate de potassium) sur un green tondu à 3mm avec la variété d'agrostide stolonifère *Penn A4* (voir figure 3). Une augmentation significative de l'intensité et de l'incidence de la fusariose froide est constatée lorsque la teneur en potassium augmente et ceci dès 50 kg K/ha/an. La teneur foliaire en potassium varie entre 1 et 2.5% pour le traitement à 300 kg/ha où l'incidence de la fusariose est maximale. La

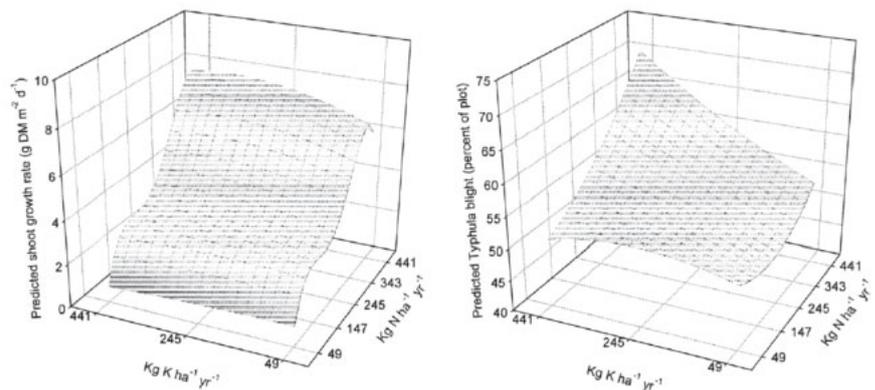


Figure 2 : A gauche : Croissance du gazon en fonction des quantités appliquées d'azote et de potassium. A droite : Incidence de Typhula en fonction des quantités appliquées d'azote et de potassium. (Source : Webster et Ebdon, 2005).

teneur en potassium correspondante dans le sol varie entre 30 et 50 mg/kg (méthode *Mehlich III*). Cette teneur est bien inférieure aux 100-200 mg/kg recommandés par les laboratoires. Les auteurs concluent d'ailleurs sur le risque de suivre les recommandations usuelles concernant la teneur de potassium au sol en ce qui concerne la gestion de la fusariose froide.

ANTHRACNOSE ET PÂTURIN ANNUEL

Le pâturin annuel réussit toujours à s'implanter dans les greens de golfs ou terrains de sports. Sur greens, il compose parfois la majorité de la surface. Plus sensible aux

maladies et à la sécheresse, il représente un réel problème pour les intendants. Ainsi, il est utile de connaître l'influence de la fertilisation potassique sur son développement ou sa résistance aux maladies.

Une étude publiée en 2018 menée sur 3 ans étudie l'effet de cette fertilisation sur le développement de l'antracnose¹⁰ (applications de potassium variant entre 0 et 218 kg K/ha/an). Il en résulte une réduction significative de la maladie dès 54 kg K/ha/an. L'intensité des attaques est corrélée avec la teneur en potassium dans le sol et la teneur en potassium foliaire. L'étude détermine le seuil de concentration critique en potassium au



Figure 3 : Impact de la fertilisation potassique sur la fusariose froide. A gauche : pas d'application de potassium depuis 6 ans. A droite : 10 kg K/ha toutes les semaines depuis 6 ans. (Source : Twitter de Doug Soldat, 2017)



sol à 43 mg/kg (méthode *Mehlich III*) en dessous duquel le développement de la maladie augmente. La concentration foliaire critique en potassium est mesurée à 2%. Une autre étude des mêmes auteurs montre que l'intensité de l'antracnose est dépendante de la quantité de potassium appliquée sur pâturin annuel et que la source de potassium peut avoir une incidence¹¹. 40 kg/ha d'azote et de potassium sont appliqués par mois depuis Avril jusqu'à Octobre avec un ratio N/K=1. La résistance du pâturin annuel augmente pour tous les traitements comprenant azote et potassium. L'intensité de l'antracnose est plus forte pour le chlorure de potassium par rapport au nitrate de potassium et au carbonate de potassium¹¹. Le potassium appliqué sans azote ne diminue pas l'intensité des attaques significativement, montrant encore l'importance de l'azote dans la fertilisation potassique. Une fertilisation déséquilibrée (N/K supérieur à 2) engendre une intensité plus forte de l'antracnose¹¹. L'étude recommande des teneurs de potassium au sol (méthode *Mehlich III*) comprises entre 51 et 116 mg/Kg pour obtenir une qualité satisfaisante et limiter le risque d'antracnose sur pâturin annuel¹¹.

Ces résultats montrent toute la difficulté pour l'intendant à gérer des espèces dont les seuils critiques dans le développement des maladies sont différents.

FIL ROUGE

En 1981, une autre publication tente d'étudier l'influence du potassium sur le développement du fil rouge sur raygrass anglais¹². L'intensité de la maladie est plus faible lorsque les teneurs foliaires en azote et potassium augmentent avec des maximums respectifs de 4.5 et 3.6%. Les meilleurs résultats sont obtenus pour une fertilisation annuelle en azote de 291 kg/ha et de 135 à 270 kg/ha en potassium soit un ratio N/K entre 1 et 2 (voir *figure 4*)¹².

RHIZOCTONIA SOLANI

Des résultats similaires sont obtenus sur agrostide avec *Rhizoctonia Solani*¹³. Une incidence plus élevée de la maladie est observée lorsque le rapport N/K est déséquilibré (quantités d'azote trop fortes par rapport aux quantités de potassium). En contraste, sur la même espèce, les quantités de potassium appliquées dans une étude récente menée sur 6 ans ne semblent avoir aucun impact sur le développement du pathogène⁹.

DOLLAR SPOT

Dans les années 50, des chercheurs de l'université de Floride ont relevé une plus faible incidence du Dollar Spot lorsque du potassium avait été appliqué². *Drew Smith*, dans son livre « *Fungal Diseases of Turfgrasses* » publié en 1959 mentionne que des applications de potassium sont bénéfiques à la bonne récupération du gazon pour cette maladie¹⁴. Très peu de travaux de recherches sont menés ensuite sur la relation entre la maladie et la fertilisation potassique. *Peter Bier* et *Douglas Soldat* publient en 2018 une étude complète menée sur 6 ans étudiant

l'impact de la fertilisation potassique sur le gazon. Il en ressort que la quantité de potassium appliquée ne semble impacter en rien le développement du *Dollar Spot*⁹. La quantité de potassium au sol serait suffisante selon eux pour subvenir aux besoins en potassium de la plante. Celle-ci utiliserait d'ailleurs du potassium des éléments minéraux du sable considéré comme non échangeable (voir plus bas).

HELMINTHOSPORIOSE

Pour l'helminthosporiose (*Helminthosporium erythrospilum*) sur agrostide stolonifère, la quantité totale de potassium ne semble avoir aucun effet sur la réduction de la maladie¹⁵. Son incidence est largement dépendante de la quantité d'azote foliaire (maximale pour une concentration de 4.70% et minimale pour 3.1%). La teneur foliaire optimale en potassium est donc d'autant plus difficile à définir qu'elle dépend du pathogène et de l'espèce de gazon. Certains pathogènes se développent avec des concentrations foliaires en potassium élevées et d'autres avec des concentrations faibles.

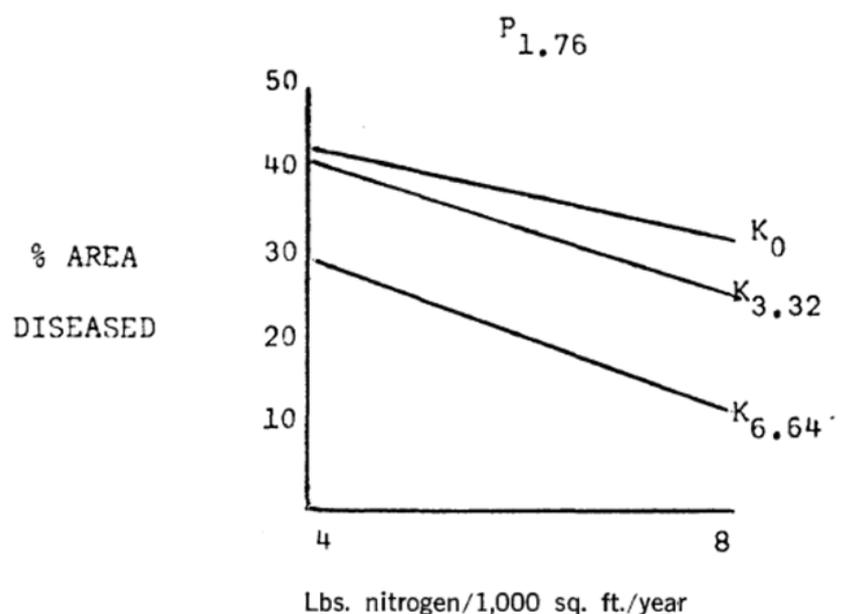


Figure 4 : Pourcentage de surface engazonnée touchée par le fil rouge en fonction des quantités d'azote et de potassium appliquées. (Source : Goss et Gould, 1968)

HYDRATE DE CARBONE, POTASSIUM ET RÉSISTANCE AUX MALADIES

L'accumulation plus importante d'hydrate de carbone durant l'acclimatation au froid du gazon et un métabolisme réduit des hydrates de carbone durant l'hiver sont reliés à une résistance plus importante à la fusariose froide¹⁶. Pourtant, il semblerait que le potassium n'ait qu'un rôle minimal dans ce processus puisqu'aucun changement des teneurs en hydrate de carbone n'a été constaté dans trois études réalisées sur chiendent¹⁷, pâturin annuel⁷ et agrostide stolonifère¹⁵ et quelles que soient les quantités de potassium appliquées (0 à 80 kg K/ha en une application à l'automne pour le chiendent¹⁷ d'une part et 0 à 30 kg/ha d'autre part pour l'essai sur pâturin annuel). L'azote, encore une fois, est responsable de la diminution des hydrates de carbone^{15,17} et de phénols¹⁵ en favorisant la croissance du gazon. Le potassium semble toutefois favoriser la production d'acides organiques⁷.

CE QU'IL FAUT RETENIR :

- L'intensité des attaques de fusariose froide et Typhula augmente avec la fertilisation potassique annuelle sur agrostide stolonifère. Une teneur élevée en potassium foliaire augmente la sévérité du pathogène.
- Il est recommandé de maintenir une concentration foliaire en potassium maximale de 1.5% pour l'agrostide pour limiter le risque d'apparition de fusariose froide.
- Pour le pâturin annuel, il est recommandé de ne pas descendre en-dessous de 2% pour favoriser une bonne tolérance au froid et limiter l'antracnose durant l'été.
- Sauf pour le fil rouge, les applications régulières de potassium ne semblent pas avoir d'impact sur la résistance aux autres maladies si la teneur au sol est suffisante (au-delà de 40 mg/kg pour la méthode Mehlich III).
- Si la teneur foliaire est trop faible, il est conseillé de réaliser un apport foliaire de potassium avec de l'azote qui facilite son absorption à raison d'un rapport N/K proche de 1.
- Les applications de potassium ne semblent avoir aucun impact sur les quantités d'hydrate de carbone dans le gazon.

POTASSIUM ET QUALITÉ DU GAZON

Les effets du potassium sur les qualités du gazon sont contrastés. De nombreux essais montrent que le potassium n'a aucune incidence sur la qualité du gazon sur raygrass anglais^{12,18}, chiendent^{19,20},

agrostide^{8,9,21,22} et pâturin des prés²³ et ceci quelles que soient les quantités apportées (de 0 à 368 kg K/ha). Une de ces études réalisée sur agrostide a d'ailleurs mesuré l'évolution de la teneur en potassium sur 6 saisons successives sans aucune incidence sur la qualité du green (0 à 300 kg K/ha/an)⁹.



Figure 5 : Effet du potassium sur la survie hivernale du pâturin annuel en Mars 2015. Les parcelles vertes sont celles ayant reçu du potassium, les parcelles abîmées n'en ont pas ou peu reçu. (Source : Jim Murphy, 2015)



A l'inverse, une autre publication mentionne une meilleure qualité du gazon (pâturin des prés, fétuques rouges et raygrass anglais) avec l'augmentation de la teneur en potassium foliaire et au sol²⁴. Les concentrations de potassium au sol sont suffisantes mais une augmentation de la teneur foliaire en potassium est toutefois constatée lorsque la teneur au sol augmente. Aussi, dans le cas de teneurs en potassium faibles dans le sol (entre 4 et 15.7 mg K/kg), la réponse du gazon en termes de croissance est cependant positive et corrélée aux quantités de potassium apportées²⁵. Il semblerait donc que le gazon soit relativement autonome en termes de besoins en potassium, tant que le sol en contient suffisamment (voir plus bas le paragraphe sur le seuil minimal pour une nutrition durable).

Pour le pâturin annuel, la qualité semble largement influencée par les quantités annuelles de potassium lorsqu'une fertilisation azotée est réalisée (rapport N/K=1 dans l'étude)¹¹. C'est d'ailleurs une problématique non négligeable sur des greens composés d'agrostide et de pâturin puisque leurs besoins semblent différents.

POTASSIUM ET RÉSISTANCE AUX STRESS

RÉSISTANCE AU FROID

Une étude très approfondie de l'université du Massachusetts de 2005 étudie l'effet de la fertilisation azotée et potassique automnale sur la tolérance au froid du raygrass anglais⁶. Les traitements incluent de nombreux dosages en azote et potassium (entre 49 et 441 kg N ou K/ha/an). Une interaction significative entre azote et potassium a été détectée pour tous les paramètres mesurés. La survie du gazon aux températures négatives (-3 à -19°C) dépend de son acclimatation lors de l'automne (sa capacité à se préparer aux températures hivernales). Cette capacité à tolérer de faibles températures est d'autant plus grande que sa teneur foliaire

en potassium est faible (2.8%) et que sa croissance est faible. La tolérance au froid la plus élevée est obtenue pour des quantités d'azote modérées (49 à 147 kg N/ha/an) et des quantités de potassium élevées (245 à 441 kg K/ha/an) principalement appliquées en automne (rapports N/K compris entre 0.1 et 0.6). L'augmentation de la fumure azotée (343 à 441 kg N/ha) pour des quantités similaires de potassium diminue la tolérance au froid.

Concernant le pâturin annuel, il semblerait que la survie hivernale soit dépendante des quantités de potassium appliquées (voir *figure 5*)²⁶. De fortes quantités de potassium induisent malheureusement un développement plus important de la fusariose froide pour l'agrostide stolonifère.

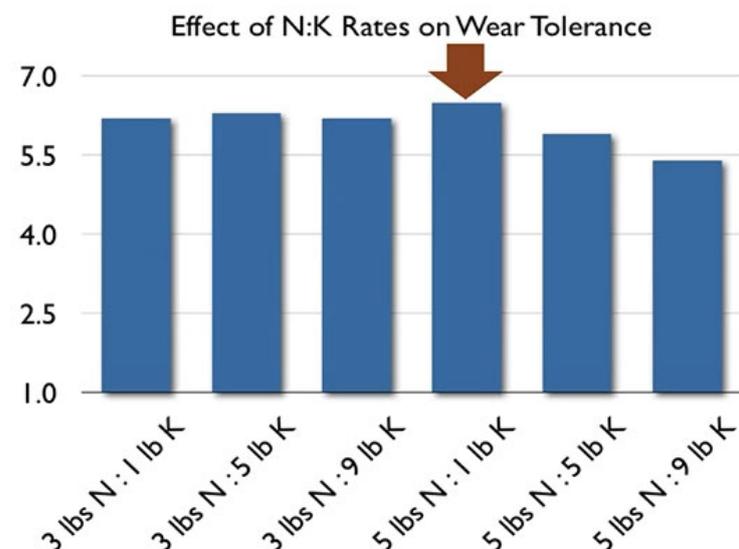
RÉSISTANCE À LA SÉCHERESSE

Une menée sur des sables de construction pour green a montré que la fertilisation potassique n'avait aucun impact sur le temps mis par l'agrostide pour développer

les premiers symptômes dus à la sécheresse²⁵.

D'autres essais menés en 1989 sur pâturin des prés²⁷ ont montré que le potassium seul n'avait aucun effet sur l'évapotranspiration de la plante et ceci quelle que soit la quantité appliquée (entre 0 et 348 kg K/ha). C'est encore l'influence de l'azote qui est la plus importante avec une interaction très significative avec les autres éléments majeurs (P et K) suivant les quantités appliquées des trois éléments²⁷. Pour des quantités appliquées élevées d'azote (294 kg N/ha et 43 kg P/ha) la consommation en eau du gazon augmente avec le potassium appliqué. A des quantités appliquées plus faibles (147 kg N/ha et 21 kg P/ha), la consommation en eau du gazon diminue avec les quantités de potassium appliquées.

Enfin, alors qu'un rapport N/K de 1 à 2 n'a pas d'influence négative sur le potentiel osmotique des feuilles du pâturin des prés, des rapports déséquilibrés (10/1 à 1/5) diminuent largement ce potentiel et la tolérance du gazon à la sécheresse et aux températures



Hoffman et al. 2010

Figure 6 : Influence des fertilisations azotée et potassique sur la tolérance aux piétinements. Le rapport N/K n'a qu'une faible influence sur la tolérance aux piétinements du raygrass anglais. Pour 244 kg N/ha/an (5 lbs), augmenter la fertilisation potassique diminue la tolérance aux piétinements. (Source : Soldat, 2018)

élevées²⁸.

RÉSISTANCE AUX PIÉTINEMENTS

Une publication de 2010 tente de découvrir l'impact des fertilisations azotées et potassique sur la résistance aux piétinements du raygrass anglais²⁹. Les quantités d'azote et de potassium varient entre 0 et 441 kg/ha/an. L'azote explique les variations de tolérance au piétinement à 95%. Suivant la méthodologie appliquée pour le piétinement, la fertilisation potassique diminue la tolérance aux piétinements ou augmente les capacités de récupération. Le rapport N/K ne semble pas avoir d'impact sur la tolérance aux piétinements du raygrass anglais (voir figure 6).

POTASSIUM ET CROISSANCE DE LA PLANTE

En règle générale, les intendants ajustent leur fertilisation potassique sur la fertilisation azotée avec d'éventuelles corrections en fonction des teneurs en potassium échangeable des analyses de terres. Cette réflexion est sans doute basée d'une part sur le rapport des teneurs en azote et potassium dans les tissus foliaires (environ 1.5 fois plus d'azote¹) et d'autre part sur des études menées depuis la fin des années 60 sur la croissance du gazon en réponse à l'équilibre des fertilisations azotées et potassiques^{6,27,28,30-34}.

Dans ces études, il a été montré par exemple qu'à des fertilisations en azote inférieures à 150 kg/ha, l'augmentation de la fertilisation potassique augmentait la production de matière sèche du pâturin des prés. A des fertilisations azotées élevées (entre 300 et 500 kg N/ha), l'inverse est observé : la production de matière sèche diminue^{6,30,31,34}. Il a également été montré que le ratio entre N et K optimal pour la croissance du pâturin des prés et de l'agrostide (rapport N/K optimal) varie selon la quantité d'azote apportée (inférieur à 1 pour des quantités d'azote faibles et supérieure à 1 pour des

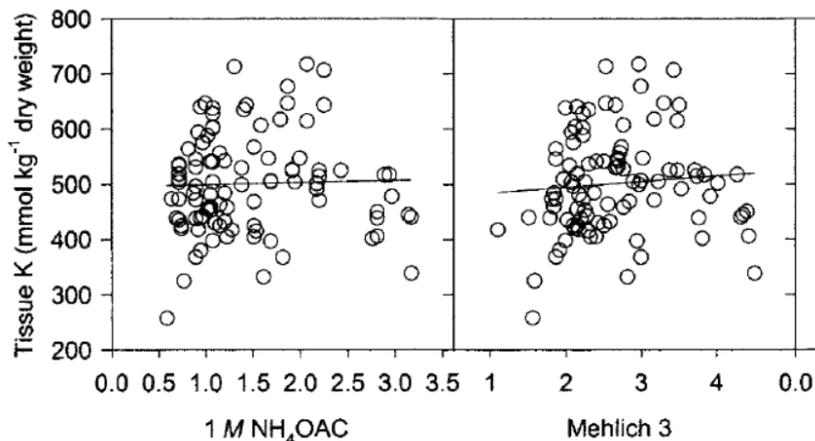


Figure 7 : Relation entre la teneur en potassium foliaire et la concentration en potassium au sol pour les méthodes à l'acétate d'ammonium (méthode Française) et Mehlich III (méthode américaine). Aucune corrélation n'existe entre les teneurs foliaires et au sol, ce qui irait dans le sens d'une consommation dépendante d'autres paramètres. (Source : Woods et al., 2006)

quantités d'azote élevées^{6,30,34}).

Une étude sur chiendent démontre enfin une croissance optimale en réponse à une fertilisation ayant un rapport N/K compris entre 1 et 2³².

consommation de luxe »²³.

Or, si cette hypothèse est parfois observée²⁴, les résultats de plusieurs études réalisées sur pâturin des prés, chiendent et agrostide stolonifère ne vont pas dans

CE QU'IL FAUT RETENIR

- L'impact de la fertilisation potassique est élevé sur le pâturin annuel, espèce sensible. Il est conseillé de maintenir une concentration foliaire au-delà de 2% pour limiter les pertes hivernales ou estivales et augmenter la qualité de la surface engazonnée.
- Pour les autres espèces, l'influence du potassium sur la résistance au stress, la croissance ou la qualité du gazon est très variable et souvent peu significative.
- La fertilisation potassique influence ces différents paramètres en fonction des quantités d'azote appliquées qui expliquent d'ailleurs la plupart des variabilités. A une dose d'azote donnée, l'augmentation ou la diminution de potassium peut avoir une influence.
- Il est conseillé de maintenir un rapport N/K entre 1 et 2 pour obtenir une croissance soutenue du gazon.
- Pour de faibles quantités annuelles d'azote (inférieures à 150 kg N/ha/an) l'augmentation de la fumure potassique peut être bénéfique pour diminuer la consommation en eau et favoriser sa tolérance aux conditions hivernales.

POTASSIUM FOLIAIRE ET TENEURS EN POTASSIUM DANS LE SOL

Il est traditionnellement admis que le gazon absorbe plus de potassium que la quantité nécessaire pour sa croissance optimale si les quantités disponibles le permettent. Cette absorption excessive est appelée «

le sens de cette observation. Ils indiquent parfois l'absence d'augmentation de la concentration en potassium dans les tissus foliaires suite à une augmentation de la fertilisation potassique, malgré des teneurs en potassium échangeable considérées comme faibles dans le sol par les laboratoires d'analyse^{21,23,32,35,36}.



CULTURES	GAZON GREEN				GAZON GREEN						
	Objectifs de rendements	0 q/ha				0 q/ha					
	Residus de récolte										
	Apports organiques										

CALCUL DES APPORTS	P2O5	K2O	MgO	CaO	P2O5	K2O	MgO	CaO			
	Exportations	130	285	35	0	130	285	35	0		
	Fixation à l'entretien	25	0	0	0	25	0	0	0		
	Lessivage	0	0	0	720	0	0	0	720		
	Fumure d'entretien (E)	155	285	35	720	155	285	35	720		
	Majoration - minoration (M)	115	145	25	-720	115	145	25	-720		
	Besoins annuels = E + M	270	430	60	0	270	430	60	0		

Les apports sont calculés en unités par hectare

Les apports préconisés ne tiennent pas compte des unités provenant des amendements organiques ou les effluents d'élevage.

Figure 8 : Recommandations de fertilisation annuelle d'un laboratoire français pour échantillon de terre issu d'un green de golf. L'intendant peut se baser sur les recommandations mentionnées. Ici, elles surestiment fortement les besoins réels du gazon en potassium (430 kg K/ha/an) et impliquent un risque plus élevé de développer certaines maladies mais également de lessivage du potassium. (Source : R. GIRAUD)

Les études les plus récentes sur l'interaction entre les éléments fertilisants montrent que le prélèvement des nutriments par la plante dépend principalement de la croissance du gazon et que l'azote est considéré comme le facteur limitant^{24,37}. En d'autres termes, en apportant de l'azote à la plante, sa croissance augmente et les besoins dans les différents éléments nutritifs augmentent alors. Cette explication est largement appuyée par plusieurs études. En effet, d'une part, il est constaté l'absence de réponse pour différentes espèces de gazon en termes de croissance et de concentrations foliaires en phosphore et potassium après des applications de ces deux nutriments lorsque ceux-ci sont présents en quantité suffisante dans le sol^{6,20,24,27,31}.

D'autre part, il est régulièrement constaté l'augmentation des teneurs foliaires en différents nutriments lorsque la quantité d'azote appliquée augmente^{6,17,24,37}. Ainsi, le facteur le plus important à considérer dans la fertilisation des terrains de sports reste la fertilisation azotée. La croissance du gazon est limitée par la quantité d'azote

et fixe les quantités des autres éléments utilisés pour ses besoins.

PROBLÉMATIQUE DE LA FERTILISATION POTASSIQUE POUR LES INTENDANTS

Les substrats « sables » sont les plus utilisés pour l'entretien intensif des surfaces sportives. Ces substrats à forte perméabilité et à faible compaction ont le défaut de posséder une capacité d'échange cationique faible¹ (souvent inférieure à 6 mEq/100 g de terre). A ce titre, le potassium est un des éléments les plus sujets au lessivage par rapport au calcium ou au magnésium mieux retenus³⁸. Les flux d'eau dans le sol (précipitations, irrigation) peuvent d'ailleurs largement accélérer ce processus³⁹. Sur ce type de substrat, les intendants sont donc contraints de réaliser de multiples applications de potassium pour maximiser la qualité des surfaces engazonnées¹ comprises entre 150 et 350 kg/ha/an.

L'intendant se base d'abord sur les résultats d'analyses de terres (mesure de la teneur en potassium échangeable) pour ajuster sa

fertilisation potassique (méthode à l'acétate d'ammonium en France et méthode *Mehlich III* aux USA). Il est ensuite contraint par les équilibres d'engrais disponibles. Les fabricants d'engrais proposent en effet souvent des équilibres de type N/K compris entre 0.5 pour les périodes de stress et entre 1 et 2 pour les périodes de croissance. Ainsi, l'équilibre annuel du plan de fertilisation est plus ou moins contraint par les équilibres des produits disponibles sur le marché³².

Si l'intendant souhaite par exemple appliquer 150 unités d'azote sur ses greens, il aura en tête une fertilisation potassique entre 200 et 250 unités de potassium en fonction de la valeur indiquée par les laboratoires d'analyses et des équilibres d'engrais dont il dispose. La problématique rencontrée par l'intendant est donc la suivante :

D'une part, les seuils optimaux proposés par les laboratoires surestiment largement les besoins réels des espèces de gazon^{40,41} impliquant des valeurs de correction trop élevées (voir figure 8). L'analyse de terre devient alors

peu à peu un outil commercial.

Par exemple, pour l'agrostide, il est conseillé de ne pas dépasser les 30 à 50 mg/kg de potassium au sol⁸ (méthode *Mehlich III*) pour limiter le risque de fusariose froide. Pour le pâturin annuel, la valeur critique en-dessous de laquelle le risque d'antracnose est élevé s'élève à 43 mg/kg¹⁰. Ainsi, il serait préférable pour l'intendant de maintenir une teneur en potassium au sol comprise entre 40 et 50 mg/kg alors que les laboratoires conseillent en général 100 et 250 mg/kg. D'autre part, il se pourrait que la méthode de mesure ne corresponde pas à la quantité de potassium que les racines du gazon sont capables d'extraire. Les sables utilisés seraient en effet une source non négligeable de potassium^{9,21,23,25,40}. L'absence d'une réponse du gazon à un apport de potassium dans un substrat sable à faible teneur en potassium échangeable pourrait en effet s'expliquer par la présence de formes considérées « non échangeables » de potassium issues des minéraux constituant le sable. Celles-ci se libèrent alors à une vitesse répondant aux besoins du gazon^{9,25,42}. Les capacités à minéraliser suffisamment le potassium pour répondre aux besoins du gazon dépendent du type de sable²⁵ (voir figure 9).

Ce problème pour l'intendant est d'autant plus important que des fertilisations trop élevées en potassium peuvent induire des problèmes d'assimilation du magnésium et du calcium^{7,36} et un risque de lessivage élevé nocif pour l'environnement¹ (dans un contexte de réduction des intrants). Il est

Sand Source	Total K content (%)
New Jersey 1	0.10
New Jersey 2	0.11
Waupaca Roscoe Fines Free	0.54
Waupaca Dousman Fines Free	0.55
Pennsylvania 1	0.60
Waupaca Fines Free – OJ Noer	0.71
Waupaca Chillicothe Fines Free	0.72
Minnesota 1	0.74
Waupaca Fines Free 1	0.76
Waupaca Fines Free 2	0.78
Indiana 1	0.80
Minnesota 2	0.82
Indiana 2	0.83
Indiana 3	0.83
Indiana 4	0.84
Indiana 5	0.88
North Dakota 1	0.91
Indiana 6	0.93
Waupaca Morris Fines Free	1.01
Michigan 1	1.05
Washington 1	1.10
Ohio 1	1.23

Figure 9 : Teneur totale en potassium dans différents sables utilisés pour les greens de golf. Cette teneur représente le potassium potentiellement utilisable par le gazon. Certains sables, par leur minéralogie contiennent plus de potassium que d'autres. Cette analyse est disponible dans les laboratoires français. (Source : Soldat, 2018)

également constaté une sensibilité plus élevée à la fusariose froide (*Microdochium nivale* et *majus*) pour l'agrostide stolonifère^{8,9,43}.

NOUVELLE MÉTHODE DE GESTION DE LA FERTILISATION POTASSIQUE : le MLSN ou NMND

En 1978, deux chercheurs américains ont démontré la variabilité des interprétations d'analyses de terres en envoyant les échantillons de sols à différents laboratoires aux USA⁴⁴. Chaque laboratoire analysa les mêmes échantillons de terres.

D'abord, les interprétations sur les valeurs mesurées sont à peu près comparables (faible, moyen,

élevé). Ensuite, les recommandations sur les applications d'engrais correspondantes sont plutôt surprenantes car au final moyennement dépendantes des valeurs mesurées. Par exemple, l'échantillon 3 dont la teneur était considérée comme « faible » nécessite des applications comprises entre 60 et 130 kg K/ha. L'échantillon 6, dont la teneur était considérée comme « moyenne » nécessite également des apports compris entre 60 et 130 kg. Dernier exemple : la teneur de l'échantillon 5 est considérée comme « moyenne » pour la plupart des laboratoires et élevée pour un laboratoire qui conseille tout de même un apport de 83 kg K/ha (voir *tableau 1*).

Laboratoire	Echant. 1	Echant. 2	Echant. 3	Echant. 4	Echant. 5	Echant. 6	Echant. 7
	Interprétation du laboratoire suivi par la recommandation en fertilisation potassique ()						
1	Très élevé (40 kg/ha)	Elevé (80 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Elevé (80 kg/ha)	Elevé (80 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Très élevé (40 kg/ha)
2	Très élevé (0 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Moyen (120 kg/ha)	Elevé (80 kg/ha)
3	Très élevé (0 kg/ha)	Moyen (100 kg/ha)	Moyen (130 kg/ha)	Moyen (100 kg/ha)	Moyen (100 kg/ha)	Moyen (130 kg/ha)	Très élevé (0 kg/ha)
4	Très élevé (80 kg/ha)	Moyen (80 kg/ha)	Faible (80 kg/ha)	Moyen (80 kg/ha)	Moyen (80 kg/ha)	Moyen (80 kg/ha)	Très élevé (80 kg/ha)
5	Elevé (34 kg/ha)	Elevé (60 kg/ha)	Moyen (60 kg/ha)	Moyen (80 kg/ha)	Moyen (80 kg/ha)	Elevé (60 kg/ha)	Elevé (60 kg/ha)
Teneur K moyenne	386 mg/kg	174 mg/kg	126 mg/kg	146 mg/kg	159 mg/kg	136 mg/kg	377 mg/kg

Tableau 1 : Différence d'interprétation des laboratoires d'analyses de terre dans l'étude de Turner et Waddington. (Source : Turner et Waddington, 1978)



Nutriment	MLSN/NMND (mg/kg)	Recomm. usuelles (mg/kg)
K.ac	26	150-250
K.MIII	37	120

Tableau 2 : caractéristiques des données issues des analyses réalisées avec les méthodes françaises (ac pour acétate d'ammonium, jh pour Joret-Hébert) et américaines (MIII pour Mehlich III). Paramètres calculés des modèles log-logistiques. MLSN et NMND calculées et recommandations usuelles des laboratoires français et scientifiques américains. Les valeurs sont en mg/kg.

Méthode extraction	Très faible (mg/kg)	Faible (mg/kg)	Modérée (mg/kg)	Elevé (mg/kg)
K acétate amm. Sables/Maj. Sols Textures Fines	0-40 0-55	41-75 56-100	76-175 101-235	>176 >235
K Mehlich III Sables/Maj. Sols Textures Fines	0-25 0-40	26-50 41-75	51-116 76-175	>116 >176

Tableau 3 : Seuils de concentrations en potassium dans le sol en fonction de différentes méthodes d'extraction du nutriment dans les laboratoires d'analyses : méthode à l'acétate d'ammonium utilisée en France, Mehlich III couramment utilisée aux Etats-Unis. Les sols à textures fines correspondent à des sols contenant plus de 35% d'argiles. (Source : Turfgrass Soil Fertility & Chemical Problems: Assessment and Management, 2002).

Par conséquent, les laboratoires n'utilisent pas les mêmes méthodes d'interprétation. A l'heure actuelle, chaque laboratoire évalue ses préconisations suivant différents paramètres (texture, pH, CEC, type de culture) avec des calculs différents. Ces préconisations sont en général adaptées aux cultures agricoles où une réponse en termes de rendement est attendue. Ce raisonnement n'est malheureusement pas adapté à l'entretien des surfaces engazonnées.

Les interprétations des mesures sont d'ailleurs basées sur des référentiels issus des graminées fourragères ou cultures agricoles⁴⁵ et les valeurs choisies élevées, non à cause des besoins réels des graminées à gazon mais parce que le coût de la fertilisation était secondaire jusqu'à une certaine époque¹.

Récemment, M. Woods (Asian Turfgrass Center), L. J. Stowell et W. D. Gelernter (Pace Turf) ont proposé un nouveau système d'interprétation des analyses de terres pour les golfs et terrains de sports de plus en plus utilisé à l'heure actuelle : le **MLSN** (Minimum Level of Sustainable Nutrition)⁴⁰. Il utilise un jeu de données réelles issu d'analyses de terres de nombreux golfs et terrains de sports de « bonne qualité » à travers le monde. Ce système est basé sur l'hypothèse que lorsqu'un sol contient assez d'un élément nutritif, apporter de cet élément n'a plus d'effet bénéfique sur le gazon, hypothèse démontrée par plusieurs études^{20,21,25,32,46-52}. Ainsi, plutôt que de classer les sols selon des catégories de type « faible », « moyen », « élevé », l'étude propose de se baser sur un seuil à partir duquel le nutriment

se retrouve en quantité suffisante pour répondre aux besoins du gazon⁴⁰. Le seuil **MLSN** en 2018 calculé par les chercheurs est de 37 mg/kg pour la méthode de mesure *Mehlich III*⁴⁰. Cette valeur est d'ailleurs proche des concentrations minimales évaluées par d'autres études (30 mg/kg)¹⁴.

La méthode a été adaptée en 2018 pour les méthodes de mesures françaises par la clinique du gazon et traduit en "Niveau Minimum pour une Nutrition Durable"⁴¹. Ainsi, cette nouvelle méthode permet à l'intendant d'ajuster sa fertilisation potassique en fonction de seuils calculés à partir de statistiques fiables basées sur des données réelles. A titre d'exemple, le niveau minimum pour une nutrition durable (**NMND**) pour le potassium est de 26 mg/kg alors que les recommandations usuelles des laboratoires se situent autour de 150-250 mg/kg¹⁷ soit 5 à 10 fois moins (voir tableau 2).

UNE CARENCE EN POTASSIUM EST-ELLE POSSIBLE?

Dans leur livre "Turfgrass Soil Fertility & Chemical problems"¹⁴, les scientifiques américains R. N. Carrow, D. V. Waddington et P. E. Rieke définissent les différents seuils de concentrations critiques en ce qui concerne le potassium dans le sol pour différentes méthodes d'extraction de cet élément (voir tableau 3). Pour la méthode utilisée en France (acétate d'ammonium) des concentrations entre 0 et 40 mg/kg sont considérées comme très faibles sur des milieux sableux (0-25 mg/kg pour la méthode *Mehlich III* utilisée dans les laboratoires américains). Une carence en potassium se situerait donc dans cette gamme de concentrations dans le sol. La nouvelle méthode de nutrition minimum pour une fertilisation durable (**NMND** ou **MLSN**) considère que le seuil suffisant en potassium échangeable pour des terrains de sports de qualité s'élève à 28 mg/kg (méthode française à



Figure 10 : Carence en potassium sur agrostide stolonifère variété "Penn A-1". De la gauche vers la droite : de moins en moins de potassium dans le sol qui aboutit à une carence dans les deux derniers pots de droite : le gazon meurt. (Source : Woods, 2014).

l'acétate d'ammonium) et 37 mg/kg (méthode américaine Mehlich III) avec une certaine marge. Il est donc possible de considérer le potassium comme un facteur limitant potentiel entre 0 et 28 mg/kg pour la méthode à l'acétate d'ammonium et entre 0 et 37 mg/kg pour la méthode Mehlich III.

Dans un cas avéré de carence en potassium pour un gazon, les dégâts observés sont importants. Micah Woods, dans un excellent article sur les nutriments - dont le potassium⁵⁵ - illustre une carence observée en potassium sur agrostide stolonifère lors de ses études à l'université de Cornell (voir figure 10). Une carence en potassium implique la mort du gazon dans le cas de très faibles teneurs en potassium.

Tout ceci est à relativiser fortement. En moyenne, sur les greens sable de golfs français, la teneur en potassium échangeable s'élève à 230 mg/kg de terre (méthode à l'acétate d'ammonium) soit 7 fois supérieure à la valeur minimale conseillée pour une nutrition durable. C'est dire la marge que possède le greenkeeper en France avant d'arriver à des carences en potassium.

Pour finir d'insister sur les teneurs largement suffisantes en potassium dans les substrats sportifs, il est intéressant de regarder la concentration moyenne en potassium échangeable dans les sables de construction. Sur 20 sables

différents, la moyenne mesurée en potassium échangeable (acétate d'ammonium) est de 15 mg/kg avec des minima à 10 mg/kg. Cette gamme mesurée correspond à la tranche potentielle de carence en potassium ce qui indiquerait que le gazon risque une carence s'il est installé dans un substrat composé uniquement de sable non amendé, ce qui est rarement le cas. Comme évoqué précédemment, le gazon aurait la possibilité d'extraire une partie du potassium minéral du sable considérée comme "non échangeable" dans les analyses. Ceci expliquerait aussi pourquoi le

gazon est capable de se développer avec des teneurs aussi faibles.

Enfin, certaines études scientifiques sur l'impact du potassium ont montré que des carences n'étaient pas observées pour des teneurs respectives de 8⁵⁶ mg/kg pour du chiendent et 9²⁸ mg/kg pour du pâturin des prés (potassium échangeable, méthode Mehlich III). Dans ces cas, les apports de potassium ont eu toutefois un effet bénéfique sur la gestion de l'eau pour les deux espèces de gazon et probablement sur la qualité du gazon. Le potassium peut être

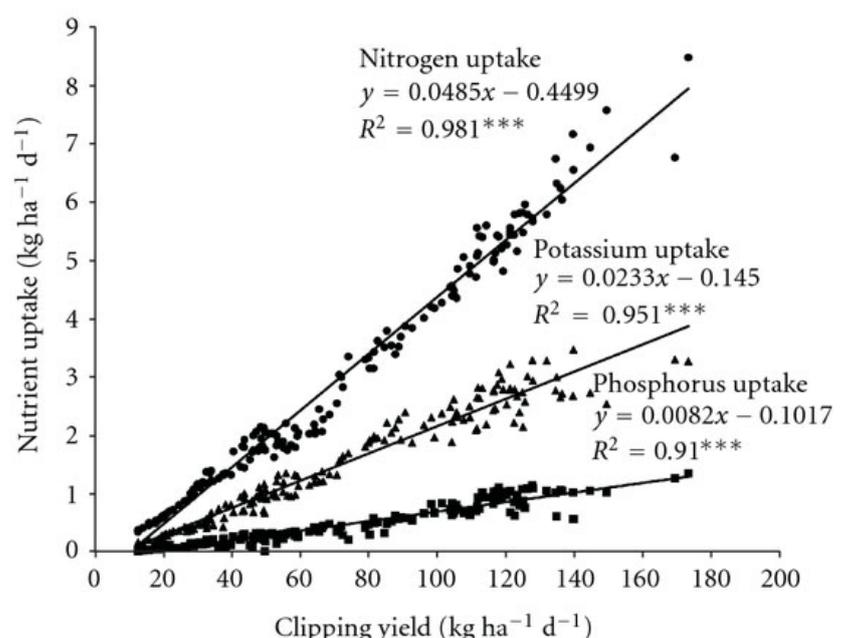


Figure 11 : Relation entre quantité de nutriments prélevés par le gazon et croissance du gazon (quantité de déchets de tonte). (Source : tiré de Kussow et al., 2012).

considéré comme limitant pour ces concentrations dans le sol (<10 mg/kg, méthode *Mehlich III*) sans pour autant montrer des signes de carence forte. **Aussi, il n'est tout de même pas recommandé d'atteindre des concentrations aussi faibles dans le sol et se fier aux recommandations du MLSN/NMND au minimum.**

Ainsi, le gazon est capable de subvenir à ses besoins en potassium avec des teneurs en potassium échangeable considérées comme très faibles. Le risque de carence en potassium sur un gazon installé peut donc être considéré comme faible, compte tenu des résultats moyens mesurés sur de nombreux substrats sportifs. Il doit être considéré seulement à l'installation sur des substrats sable faiblement amendés.

AJUSTER SA FERTILISATION POTASSIQUE EN FONCTION DE LA QUANTITÉ D'AZOTE ANNUELLE

Comme expliqué précédemment, le prélèvement des nutriments par la plante dépend principalement de

la croissance du gazon et l'azote est considéré comme le facteur limitant^{24,37}. En apportant de l'azote à la plante, sa croissance augmente et les besoins dans les différents éléments nutritifs augmentent également. Il est donc critique pour l'intendant de comprendre le lien entre azote et potassium pour réaliser son plan de fertilisation.

Dans une étude menée par *Wayne Kussow* et *Douglas Soldat* en 2011, il a été montré les relations précises entre utilisation en nutriments majeurs et secondaires et quantités de déchets de tonte pour 419 greens différents³⁷. Une relation largement linéaire existe entre la croissance du gazon et la quantité prélevée de chacun des nutriments (voir *figure 11*). La quantité appliquée d'azote est le facteur qui explique majoritairement les variations de croissance (quantité de déchets de tonte).

Ainsi, l'azote gouverne les quantités des autres nutriments prélevés dont le potassium. La croissance atteint un palier à 700 kg N/ha/an pour le pâturin des prés. 1000 kg N/ha/an ne suffisent pas à

l'agrostide stolonifère pour atteindre un palier montrant ainsi la valeur de facteur limitant de l'azote pour cette espèce³⁷.

Dans la même publication, la quantité de potassium prélevée dépend de la croissance du gazon et le rapport entre l'azote prélevé et le potassium prélevé varie entre 1.5 et 2 (correspondant respectivement à 20 kg de déchets de tonte par hectare et par jour et 200 kg de déchets de tonte par hectare et par jour). Les concentrations foliaires correspondantes sont de 2% d'azote pour le rapport N prélevé / K prélevé de 1.5 et 6% pour un rapport de 2. La relation est non linéaire (voir *figure 12*).

Finalement, en suivant les dernières connaissances scientifiques sur la fertilisation potassique, il devient possible d'ajuster la fertilisation potassique à la quantité azotée optimale souhaitée suivant le type d'entretien, d'espèce et d'exigence de la surface engazonnée. Par exemple, pour un green de golf en agrostide stolonifère, si le greenkeeper souhaite appliquer

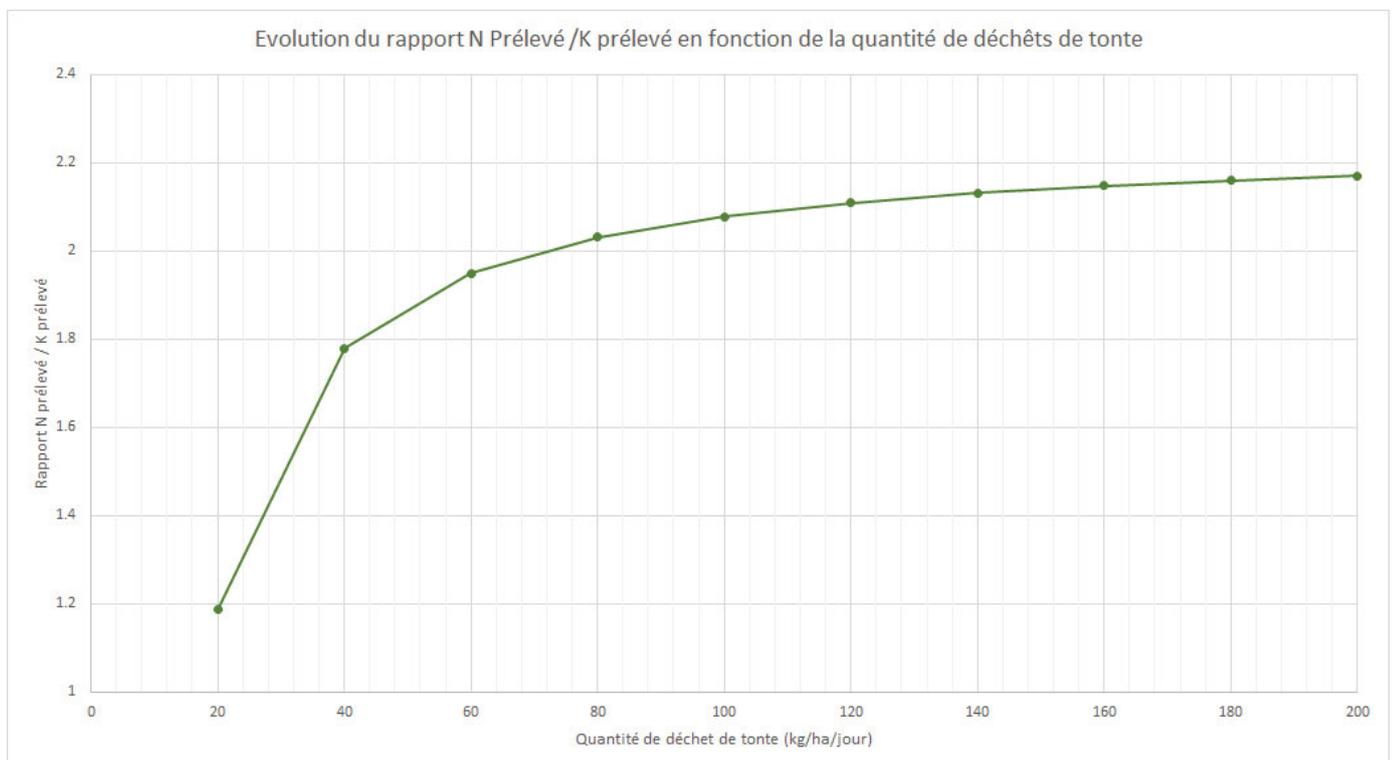


Figure 12 : Evolution du rapport N prélevé / K prélevé par le gazon en fonction de la quantité de déchets de tonte. (Source : tiré et adapté de *Kussow et al., 2012*).



190 kg/ha d'azote annuellement, il devra appliquer potentiellement 90 à 120 kg/ha de potassium (190/2 à 190/1.5) pour satisfaire les besoins annuels de la plante en potassium sans prendre en compte la concentration au sol.

En tenant compte de la valeur minimale souhaitable pour une nutrition

durable des greens déterminée par la méthode de *M. Woods, L. Stowell* et *W. Gelernter*^{40,53,54}, il est possible de gérer durablement la fertilisation potassique du gazon par la *formule 1*.

La formule est simple et les différents paramètres peuvent être

facilement estimés par l'intendant. Avec cette méthode, la fertilisation potassique est souvent revue à la baisse sans perte de qualité ou de risque de maladie (voir paragraphes précédents) et s'inscrivent dans une gestion technique, raisonnée et durable des surfaces engazonnées.

Formule 1 : Calcul du besoin en potassium

Besoin en potassium (g/m²) = MLSN K (g/m²) + Exp. Déchets tonte K (g/m²) – Conc. K ANL (g/m²)

où :

- **MLSN K** est le niveau minimum pour une nutrition durable (NMND).

Son unité de base est le *g/kg* ou le *mg/kg*. En tenant compte d'une épaisseur fixée de substrat (10 cm par exemple) et d'une densité moyenne (autour de 1.5 pour le sable), il est possible de convertir cette valeur en *g/m²*.

-**Exp. Déchets tonte K** est la quantité de potassium potentielle exportée par les déchets de tonte.

En considérant l'azote comme le facteur limitant, il est possible de déterminer un potentiel maximal de croissance foliaire et de déterminer la quantité de potassium exportée en considérant le rapport *N/K* dans les tissus foliaires.

-**Conc. K ANL** est la teneur en potassium échangeable mesurée par une analyse de terre.

CONCLUSION

Le potassium est traditionnellement utilisé dans les golfs et terrains de sports pour accroître la tolérance aux stress du gazon avec des doses moyennes variant entre 100 et 400 kg/an. Cette croyance d'un besoin élevé en potassium est probablement basée sur des études menées depuis les années 60 qui montraient l'importance de la fertilisation potassique dans la résistance aux maladies.

Les résultats de nombreuses publications récentes ne remettent pas en cause le rôle primordial du potassium. Elles montrent cependant que les quantités de potassium appliquées usuellement ne revêtent pas l'importance qu'on leur donne. La fertilisation potassique peut même parfois aggraver le développement de certaines maladies.

Le besoin du gazon en potassium dépend de sa croissance et des quantités d'azote annuelles appliquées. Les différentes espèces de gazon sont relativement autonomes en termes de potassium et les teneurs usuellement rencontrées dans les substrats suffisent à alimenter correctement le gazon. Les substrats sableux contiennent des composants minéraux considérés comme « non échangeables » par les analyses mais toutefois utilisables par les racines du gazon. Les teneurs de potassium au sol « échangeables » peuvent par conséquent être revues à la baisse et les besoins annuels ajustés en fonction des résultats d'analyses et de la quantité d'azote annuelle.

Romain GIRAUD

Agronome & Chargé de recherche chez Natural Grass

Auteur de la Clinique du Gazon

Clinique du Gazon©. Tous droits réservés

ETUDE DE CAS

Appliquons notre méthodologie sur un exemple réel. Prenons le cas d'un green de golf en agrostide et pâturin annuel. L'intendant a réalisé une analyse de terre de l'ensemble de ses greens. Les résultats sont visibles dans le *tableau 4*.

Comme expliqué précédemment, la teneur au sol est considérée comme "**très faible**" par le laboratoire. Celui-ci estime le besoin annuel du gazon en potassium à **285 kg K/ha** avec une fumure de correction de **145 kg K/ha**.

Pour obtenir un green de qualité satisfaisante, l'intendant estime avec son expérience les besoins annuels en azote du gazon à **180 kg N/ha**. Il a ensuite l'habitude de fixer la quantité de potassium aux alentours de celle de l'azote et cette année il avait donc en tête **200 kg K/ha**.

Il est clair que la quantité de potassium estimée par le laboratoire est élevée, d'autant plus si l'intendant

choisit de garder sa fumure azotée à **180 kg N/ha/an** (rapport N/K = 0.4).

Il y a fort à parier qu'une bonne partie de cette fumure soit lessivée d'autant plus que la capacité d'échange cationique du substrat est faible (**4.1 mEq/100 g de terre**). De plus, le risque de fusariose froide augmente clairement avec une telle fumure potassique.

Avec la *formule 1* citée dans le paragraphe précédent, l'estimation de la fumure potassique basée sur la quantité d'azote appliquée et sur le niveau minimum pour une fertilisation durable peut être calculée (voir *tableau 5*).

Ainsi, la valeur estimée par le laboratoire est de **430 kg K/ha/an**, la valeur estimée par l'intendant de **200 kg K/ha/an** contre **76 kg K/ha/an** avec la nouvelle méthode soit une différence de **83%** avec la valeur estimée par le laboratoire et de **62%** selon un raisonnement classique. Ces différences peuvent paraître élevées mais l'estimation est basée sur les résultats d'études scientifiques fiables et un jeu de

données réel obtenu avec de nombreuses analyses de terre.

S'il le souhaite, l'intendant peut tout à faire prendre une marge de sécurité et appliquer par exemple **100 kg K/ha/an**.

Il veillera bien sûr chaque année à réaliser à nouveau une ou plusieurs analyses de terres pour vérifier que sa teneur en potassium reste bien supérieur au seuil fixé par le **MLSN/NMND**.

Pour plus de précision, la mesure des quantités de déchets de tonte peut être relevée et des analyses foliaires peu coûteuses réalisées régulièrement afin d'obtenir des estimations plus précises des paramètres cités dans la *formule 1*.

Pour finir, il est utile de rappeler que ces calculs permettent de réaliser des **estimations** du besoin potassique. Elle ne constituent en aucun cas des valeurs véritables mais permettent d'orienter l'intendant vers une fertilisation raisonnée plus objective.

Nutriment	Teneur du sol	Optimum selon le laboratoire	Besoins annuels estimés par le laboratoire	Besoins estimés par le greenkeeper
Potasse - K₂O NF X 31-108	0.06 g/kg (60 mg/kg)	0.12 g/kg (120 mg/kg)	430 kg/ha	200 kg/ha

Tableau 4 : Résultats d'analyses de terre pour le potassium pour un green de golf français

Nutriment	Besoin maximal de la plante	Teneur sol	MLSN / NMND	Besoins estimés
K	106 kg/ha	90 kg/ha	60 kg/ha	76 kg/ha

Tableau 5 : Estimation de la fumure potassique annuelle avec la nouvelle méthode

BIBLIOGRAPHIE

1. **Carrow, R. N.**, Waddington, D. V. & Rieke, P. E. Turfgrass Soil Fertility & Chemical Problems: Assessment and Management. (John Wiley & Sons, 2001).
2. **Goss, R. L. & Gould, C. J.** Turfgrass diseases: The relationship of potassium. Green Section Record 5, 10–13 (1968).
3. **Goss, R. L. & Gould, C. J.** Inter-relationships between fertility levels and Corticium red thread disease of turf grasses. Journal of the Sports Turf Research Institute 47, 48–53 (1971).
4. **Goss, R. L. & Gould, C. J.** Some interrelationships between fertility levels and fusarium patch disease in turfgrasses. Journal of Sports Turf Research Institute 44, 19 (1968).
5. **Goss, R. L. & Gould, C. J.** Some Interrelationships between Fertility Levels and Ophiobolus Patch Disease in Turfgrasses. Agronomy Journal 59, 149–151 (1967).
6. **Webster, D. E. & Ebdon, J. S.** Effects of Nitrogen and Potassium Fertilization on Perennial Ryegrass Cold Tolerance During Deacclimation in Late Winter and Early Spring. HortScience 40, 842–849 (2005).
7. **Moody, D.** The Effect Of Potassium Fertilization On Psychrophilic Pathogen Susceptibility And Carbon Metabolism Of Annual Bluegrass. (2011).
8. **Bier, P. V., Soldat, D. J. & Koch, P. L.** Potassium Fertilization Affects Microdochium Patch Severity on Creeping Bentgrass. American Society for Horticultural Science Annual Conference Waikoloa, Hawaï, 1p. (2017).
9. **Bier, P. V., Persche, M., Koch, P. & Soldat, D. J.** A long term evaluation of differential potassium fertilization of a creeping bentgrass putting green. Plant Soil 431, 303–316 (2018).
10. **Schmid, C. J., Clarke, B. B. & Murphy, J. A.** Potassium Nutrition Affects Anthracnose on Annual Bluegrass. Agronomy Journal 110, 2171–2179 (2018).
11. **Murphy, J. A., Schmid, C. J. & Clarke, B. B.** Annual Bluegrass Response to Potassium and Calcium Fertilization and soil pH. Tero 13, 2–4 (2014).
12. **Cahill, J. V., Murray, J. J., O'Neill, N. R. & Dernoeden, P. H.** Interrelationship between fertility and red thread fungal disease of turfgrass. Plant Disease 67, 1080–1083 (1983).
13. **Bloom, J. R. & Couch, H. B.** Influence of environment on diseases of turf grasses. I. Effect of nutrition, pH, and soil moisture on Rhizoctonia brown patches. Phytopathology 50, 532–534 (1960).
14. **Smith, J. D.** Fungal Diseases of Turf Grasses. (Sports Turf Research Institute, 1959).
15. **Muse, R. R.** Influence of nutrition on the development of Helminthosporium red leaf spot on Seaside bentgrass, *Agrostis palustris*. Physiological Plant Pathology 4, 99–105 (1974).
16. **Pessaraki, M.** Handbook of Turfgrass Management and Physiology. (CRC Press, 2007).
17. **Goatley, J. M., Maddox, V., Lang, D. J. & Crouse, K. K.** 'Tifgreen' Bermudagrass Response to Late-Season Application of Nitrogen and Potassium. Agronomy Journal 86, 7–10 (1994).
18. **XiuJu, B., Lin, H., XiaoLin, L. & FuSuo, Z.** Effect of nitrogen and potassium levels on the growth and turf quality of perennial ryegrass. Acta Prataculturae Sinica 9, 55–59 (2000).
19. **Barrios, E. P. & Jones, L. G.** Some influences of potassium nutrition on growth and quality of 'Tifgreen' Bermudagrass. Journal of the American Society for Horticultural Science 105, 151–153 (1980).
20. **Sartain, J. B.** Tifway Bermudagrass Response To Potassium Fertilization. Crop Science 42, 507–512 (2002).
21. **Woods, M. S., Ketterings, Q. M., Rossi, F. S. & Petrovic, A. M.** Potassium Availability Indices and Turfgrass Performance in a Calcareous Sand Putting Green. Crop Science 46, 381–389 (2006).
22. **Mirmow, W.** Fall Potassium Fertilization and Winter Traffic Effects on a Creeping Bentgrass Putting Green. Clemson University Thèse de Master, 130p. (2016).
23. **Fitzpatrick, R. J. M. & Guillard, K.** Kentucky Bluegrass Response to Potassium and Nitrogen Fertilization. Crop Science 44, 1721–1728 (2004).
24. **Petrovic, A. M., Soldat, D. J., Gruttadorio, J. & Barlow, J.** Turfgrass growth and quality related to soil and tissue nutrient content. International Turfgrass Society Research Journal 10, 989–997 (2005).
25. **Dest, W. & Guillard, K.** Bentgrass response to K fertilization and K release rates from eight sand rootzone sources used in putting green construction. Plant Science Articles (2001).
26. **Schmid, C. J., Murphy, J. A., Clarke, B. B., DaCosta, M. & Ebdon, J. S.** Observations on the Effect of Potassium on Winter Injury of Annual Bluegrass in New Jersey in 2015. Crop, Forage & Turfgrass Management 2, (2016).
27. **Ebdon, J. S., Petrovic, A. M. & White, R. A.** Interaction of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium on Evapotranspiration Rate and Growth of Kentucky Bluegrass. Crop Science 39, 209–218 (1999).

- 28. Carroll, M. J. & Petrovic, A. M.** Nitrogen, Potassium, and Irrigation Effects on Water Relations of Kentucky Bluegrass Leaves. *Crop Science* 31, 449–453 (1991).
- 29. Hoffman, L., Ebdon, J. S., Dest, W. M. & DaCosta, M.** Effects of Nitrogen and Potassium on Wear Mechanisms in Perennial Ryegrass: I. Wear Tolerance and Recovery. *Crop Science* 50, 357–366 (2010).
- 30. Monroe, C. A., Coorts, G. D. & Skogley, C. R.** Effects of Nitrogen-Potassium Levels on the Growth and Chemical Composition of Kentucky Bluegrass. *Agronomy Journal* 61, 294–296 (1969).
- 31. Christians, N. E., Martin, D. P. & Karnok, K. J.** The Interrelationship Among Nutrient Elements Applied to Calcareous Sand Greens. *Agronomy Journal* 73, 929–933 (1981).
- 32. Snyder, G. H. & Cisar, J. L.** Nitrogen/Potassium Fertilization Ratios for Bermudagrass Turf. *Crop Science* 40, 1719–1723 (2000).
- 33. Pellett, H. M. & Roberts, E. C.** Effects of Mineral Nutrition on High Temperature Induced Growth Retardation on Kentucky Bluegrass. *Agronomy Journal* 55, 473–476 (1963).
- 34. Christians, N. E., Martin, D. P. & Karnok, K. J.** The interactions among nitrogen phosphorous and potassium on the establishment quality and growth of kentucky bluegrass (var. Merison). 4th Int. Turfgrass. Res. Conf. Univ. Guelph., 19–23 (1981).
- 35. Schmidt, R. E. & Breuninger, J. M.** The effects of fertilization on recovery of Kentucky bluegrass turf from summer drought. International Turfgrass Research Conference Guelph, 19-23 Juillet 1981, 333–339 (1981).
- 36. Miller, G. L.** Potassium Application Reduces Calcium and Magnesium Levels in Bermudagrass Leaf Tissue and Soil. *HortScience* 34, 265–268 (1999).
- 37. Kussow, W. R., Soldat, D. J., Kreuser, W. C. & Houlihan, S. M.** Evidence, Regulation, and Consequences of Nitrogen-Driven Nutrient Demand by Turfgrass. *International Scholarly Research Notices* (2012).
- 38. Spencer, W. F.** Influence of cation-exchange reactions on retention and availability of cations in sandy soils. *Soil Science* 77, 129–136 (1954).
- 39. Lodge, T. A. & Lawson, D. M.** The construction, irrigation, and fertilizer nutrition of golf greens. Botanical and soil chemical measurements over 3 years of differential treatment. *J. Sports Turf Res. Inst.* 69, 59–73 (1993).
- 40. Stowell, L. J. & Woods, M. S.** Minimum levels for sustainable nutrition (MLSN). Pace Turf publication web 1p. (2014).
- 41. GIRAUD, R.** Golfs : vers un nouveau système d'interprétation des analyses de terres. les articles de la clinique du gazon (2018).
- 42. Mengel, K.** Dynamics and Availability of Major Nutrients in Soils. in *Advances in Soil Science* (ed. Stewart, B. A.) 65–131 (Springer New York, 1985).
- 43. Soldat, D. J.** Potassium Fertilization Increases Microdochium Patch Incidence and Severity on Creeping Bentgrass. 2016 Meeting American Society of Agronomy Crop Science Soil Science Phoenix, USA, (2016).
- 44. Turner, T. R. & Waddington, D. V.** Survey of soil testing programs for turfgrasses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 9, 71–87 (1978).
- 45. Carrow, R. N. et al.** Clarifying soil testing: III. SLAN sufficiency ranges and recommendations. *Golf Course Management* 72, 194–198 (2004).
- 46. Johnson, P., Koenig, R. & Kopp, K.** Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Responses and Requirements in Calcareous Sand Greens. *Agronomy Journal* 697–702 (2003).
- 47. Kreuser, W. C., Pagliari, P. H. & Soldat, D. J.** Creeping Bentgrass Putting Green Mehlich-3 Soil Test Phosphorus Requirements. *Crop Science* 52, 1385–1392 (2012).
- 48. Raley, R. B.** Influence of Phosphorus and Nitrogen on Annual Bluegrass Encroachment in a Creeping Bentgrass Putting Green. (2012).
- 49. Rowland, J. H. et al.** Optimal Nitrogen and Potassium Fertilization Rates for Establishment of Warm-Season Putting Greens. *Agronomy journal* (2010).
- 50. Rowland, J. H. et al.** Drought Resistance of Warm-Season Putting Green Cultivars on U.S. Golf Association Root Zones with Varied Potassium. *Agronomy Journal* 106, 1549–1558 (2014).
- 51. Turner, T. R. & Waddington, D. V.** Soil Test Calibration for Establishment of Turfgrass Monostands 1. *Soil Science Society of America Journal* 47, 1161–1166 (1983).
- 52. St. John, R.** Supplemental calcium applications to turfgrass established on calcareous sand. *Retrospective Theses and Dissertations* (2001).
- 53. Woods, M. S.** Using temperature to predict turfgrass growth potential (GP) and to estimate turfgrass nitrogen use. *Asian Turfgrass Publication* June 2013, 4 p. (2013).
- 54. Woods, M. S.** Understanding Turfgrass Nutrient Requirements. 7p. (2012).
- 55. Woods, M. S. (2014).** Turfgrass

Nutrient Guidelines, peer review, and potassium. Asian Turfgrass Publication. 2014. 8p.

56. Miller et Dickens (1997). Water relations of two Cynodon turf cultivars as influenced by potassium. International Turfgrass Society Research Journal 8, 1298-1306

57. Shearman et al. (2005). Irrigation and potassium effects on Poa Pratensis L. fairway turf. International Turfgrass Society Research Journal 10, 998-1004