



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

**Mesure de la chlorophylle et des composés polyphénoliques des feuilles pour
évaluer le statut azoté du plant de bleuet**

Rapport de recherche - 1 -

Jean Lafond

Mars 2010

Canada

Plusieurs travaux de recherches ont démontré que la culture du bleuet nain sauvage répondait très bien à la fertilisation malgré que cette culture ait des besoins en éléments nutritifs relativement faibles (Lafond et Ziadi 2009 ; Lafond 2010). Comme la culture de bleuet nain sauvage est localisée sur des sols sableux et acides (Raymond et al. 1965), le devenir des éléments nutritifs dans le sol et les végétaux demeure une situation préoccupante au point vue agronomique et environnemental. En effet, les risques de pertes d'azote par lessivage sont élevés (Eaton et Patriquin 1988 ; Lafond 2010), l'efficacité du phosphore dans ces conditions acides est faible (Warman 1987) tandis que peu d'information sur le potassium est disponible. Actuellement, le suivi du statut nutritif du bleuet se fait à l'aide d'analyse foliaire et les résultats sont comparés à des valeurs de références (Lafond 2009). Ce suivi de la culture oblige à échantillonner les feuilles à l'aoûtement de la culture et à envoyer les échantillons à des laboratoires pour effectuer les analyses. Ces opérations engendrent évidemment des coûts que le producteur doit supporter. Comme le bleuet répond fortement à la fertilisation azotée (Lafond et Ziadi 2009; Lafond 2010), des mesures non destructives des feuilles en évaluant le contenu en chlorophylle et en polyphénol ont été utilisées pour évaluer le statut azoté du bleuet. Des études ont démontré que les concentrations en azote et les concentrations en chlorophylle étaient positivement corrélées tandis qu'elles étaient négativement corrélées aux concentrations en polyphénol (Tremblay et al. 2007). De plus, des résultats préliminaires ont indiqué que la concentration en azote des feuilles était significativement corrélée aux concentrations en phosphore et en potassium des feuilles et négativement corrélées aux concentrations en calcium et magnésium des feuilles (Lafond et Ziadi 2009). Ainsi, l'utilisation d'un lecteur de chlorophylle et de polyphénol, comme outil de diagnostique de l'état nutritif du plant de bleuet de façon non destructive et rapide est innovateur dans cette culture et pourrait être intégrée dans le futur dans la gestion spécifique des engrais. Cette entente contribue à l'atteinte des objectifs du ministère en développant de nouveau outil pour mieux gérer les engrais minéraux tout en acquérant de nouvelles connaissances sur la dynamique de l'azote, du phosphore et du potassium dans ces sols spécifiques aux bleuetières. Ce projet est axé sur l'amélioration de la performance environnementale du système agricole canadien. Ces travaux auront un impact positif sur la qualité des sols, de l'eau et des fruits produits.

Objectifs

L'objectif général du projet est de calibrer le lecteur de chlorophylle et de composés polyphénoliques à la fertilisation utilisée dans la culture du bleuet nain sauvage.

Les objectifs spécifiques sont :

- de déterminer la réponse de la culture du bleuet nain sauvage à la fertilisation azotée, phosphatée et potassique;
- de valider sous les conditions naturelles l'endurcissement au froid lié au potassium;
- de déterminer si les lectures de chlorophylle et de polyphénols peuvent être utilisées pour identifier le statut nutritif azoté du plant de bleuet;
- de déterminer les relations entre les concentrations en N, P, K, Ca et Mg des feuilles;
- d'établir les relations entre le rendement en fruit, les concentrations en éléments nutritifs de feuilles et les lectures de chlorophylle et de polyphénols.

Matériel et Méthodes

L'expérience s'est déroulée à deux bleuetières : la bleuetière de Normandin et d'Albanel. Les bleuetières sont situées à moins de 20 km de l'une de l'autre mais connaissent de grande variation quant à la couverture nivéale. Les essais ont été mis en place en mai 2009 dans une bleuetière en végétation. En 2010, le suivi de ces essais sera réalisé pour la détermination des rendements. En 2010, deux nouveaux sites seront également mis en place dans une bleuetière en végétation. L'essai au champ va se terminer en 2011. Ainsi, ce projet va se dérouler sur trois années et les résultats proviendront de 4 années/sites.

Les traitements ont consisté à quatre doses d'azote sous forme de sulfate d'ammonium (0-30-60-90 kg N ha⁻¹), deux doses de phosphore sous forme de superphosphate triple (0-20 kg P ha⁻¹) et quatre doses de potassium sous forme de sulfate de potassium (0-30-60-90 kg K ha⁻¹). Les traitements ont été appliqués au mois de mai lors de l'année de végétation. Ainsi, il y a 32 traitements et ils sont distribués en quatre blocs aléatoires pour un total de 128 parcelles par site. Les dimensions des parcelles ont été de 2,5 X 5 m (12,5 m²).

Des échantillons de sol ont été prélevés au printemps et à l'automne de chaque année. Les échantillons ont été prélevés sur deux (2) couches de sol, soit la litière (couche de matière

organique bien décomposée) (0-5 cm), et la couche de sol 5-30 cm, et ce à trois endroits différents dans la parcelle.

Des échantillons de feuilles ont été prélevés à deux reprises en juillet et en août à l'année de végétation. Des lectures de chlorophylle et de polyphénols ont été prises au même moment dans les parcelles. Les parcelles ont été divisées en deux, soit une partie pour prendre les échantillons de feuilles (1,5 m par 5 m), et l'autre pour prendre les mesures optiques (1 m par 5 m).

La hauteur moyenne des tiges et le nombre de tige au m² ont été déterminés lors de la première année. Lors de la deuxième année, seulement la hauteur des plants sera déterminée. L'année de fructification, le nombre de bourgeons floraux sera déterminé sur dix tiges le long d'un transect dans chacune des parcelles.

Le calibre (la grosseur des fruits) des fruits sera également déterminé ainsi que le poids de 100 fruits. Les mesures de rendement en fruit frais seront effectuées lors de l'année de production.

Des analyses chimiques ont été effectuées sur des sous échantillons de feuille préalablement moulus. Les concentrations en N, P, K, Ca et Mg ont été dosées après digestion humide (acide sulfurique-peroxyde- acide sélénieux) (Isaac et Johnson 1976). Les concentrations en Al, B, Cu, Fe Mn et Zn ont été dosées après une calcination.

Les échantillons de sol ont été séché à l'air (20 °C) et tamisé à 2 mm avant de procéder aux analyses. Le pH du sol a été mesuré dans l'eau selon un rapport 1:2 (Hendershot et al. 2007). Les éléments nutritifs (P, K, Ca et Mg) du sol ont été extraits avec la solution Mehlich 3 (Ziadi et Tran 2007). La teneur en phosphore du sol a été déterminée par colorimétrie (Murphy et Riley 1962). La teneur en potassium du sol a été déterminée par spectrophotométrie d'émission de flamme et les teneurs en calcium et magnésium par spectrophotométrie d'absorption atomique (Perkin Elmer AAnalyst 300, Überlingen, Allemagne). La matière organique totale du sol a été déterminée par oxydation par voie humide selon la méthode modifiée Walkley-Black (CPVQ 1988).

Résultats et Discussion

Analyses de sol

Les sols des bleuetières ont été caractérisés par des pH acides, par des accumulations de matières organiques en surface et par de faibles quantités d'éléments nutritifs, principalement dans la couche de sol 5-30 cm (Tableau 1). La teneur en matière organique a varié de 9 à 14 % dans la couche de sol de surface tandis que dans la couche de sol 5-30 cm, la teneur en matière organique a été de 2,49 % en moyenne. La couche de matière organique qui repose sur le sol minéral a varié beaucoup en épaisseur expliquant ainsi les variations des éléments nutritifs mesurés dans cette couche.

Le pH du sol (couche de surface et 5-30 cm) a diminué significativement avec l'accroissement des doses de N (Tableaux 2, 3, 4, 5, 6 et 7). Cette diminution du pH du sol a été associée à l'apport de sulfate provenant de l'engrais azoté. Le P_{M3} du sol a augmenté significativement avec l'application de $20 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ uniquement dans la couche de sol de surface (Tableaux 2, 3 et 4). Au site d'Albanel, le P_{M3} a augmenté de 16 mg kg^{-1} tandis qu'au site de Normandin, l'accroissement n'a été que de 3 mg kg^{-1} (Tableau 3 et 4). Le K_{M3} a augmenté significativement dans les deux couches de sol avec l'accroissement des doses de K (Tableaux 2, 3, 4, 5, 6 et 7). L'accroissement moyen a été plus élevé dans la couche de sol de surface comparativement à la couche inférieure (93 vs 14 mg kg^{-1}). Le Ca_{M3} a varié significativement entre les sites mais la fertilisation azotée, phosphatée et potassique n'a eu aucun effet sur la concentration en Ca_{M3} (Tableaux 2, 3, 4, 5, 6 et 7). Le Mg_{M3} a significativement varié entre les sites (le site de Normandin est plus riche en Mg que le site d'Albanel) (Tableaux 2, 3, 4, 5, 6 et 7). La fertilisation azotée a diminué significativement le Mg_{M3} dans la couche de sol de surface (Tableaux 2, 3 et 4).

Analyses foliaires

La concentration en N des feuilles a augmenté significativement avec l'accroissement de la fertilisation azotée aux quatre dates d'échantillonnage (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Par ailleurs, la concentration en N des feuilles a diminué au cours de la saison. Cette diminution est associée à l'effet de dilution du N à travers la plante par l'augmentation de la biomasse totale du plant (Tableaux 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 19). La concentration en P des feuilles a augmenté significativement avec l'accroissement de la fertilisation phosphatée aux quatre dates d'échantillonnage (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Par ailleurs, la concentration en P des feuilles a diminué au cours de la saison (Tableaux 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18, 19). Cette diminution est

associée à l'effet de dilution du P à travers la plante par l'augmentation de la biomasse totale du plant. Aux trois premiers échantillonnages, la fertilisation azotée a également augmenté la concentration en P des feuilles. La nutrition phosphatée de la plante est ainsi fortement influencée par le N (Percival et Sanderson 2004; Smagula et al. 2004). À la première date d'échantillonnage, la concentration en K des feuilles n'a pas été significativement influencée par la fertilisation potassique (Tableaux 8, 9 et 10). Toutefois, la fertilisation azotée a augmenté significativement la concentration en K des feuilles. Aux autres échantillonnages, la fertilisation potassique a augmenté significativement la concentration en K des feuilles tout comme la fertilisation azotée. Cette interaction entre le N et le K a été également mesurée dans une étude antérieure sur la fertilisation du bleuet sauvage (Percival et Sanderson 2004). La concentration en K des feuilles a diminué au cours de la saison. La concentration en Ca des feuilles a été significativement influencée par la fertilisation azotée à tous les échantillonnages (Tableaux 8, 11, 14 et 17). À de faible dose de N, la concentration en Ca des feuilles a augmenté tandis qu'avec des doses de 60 et 90 kg N ha⁻¹, la concentration en Ca a diminué. Cet effet négatif de la fertilisation azotée sur le Ca des feuilles a été également mesuré dans une étude effectuée au Saguenay-Lac-Saint-Jean (Lafond 2010). Par ailleurs, la fertilisation phosphatée a augmenté significativement la concentration en Ca des feuilles. Toutefois, des études antérieures n'ont pas démontré cet effet (Sanderson et Eaton 2008; Lafond 2010). La concentration en Ca des feuilles a augmenté au cours de la saison. La concentration en Mg des feuilles a diminué avec la fertilisation azotée à tous les échantillonnages (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Au deuxième, troisième et quatrième échantillonnage, la fertilisation phosphatée a augmenté significativement la concentration en Mg des feuilles. Toutefois, des études antérieures n'ont pas démontré cet effet (Sanderson et Eaton 2008; Lafond 2010). La concentration en Mg des feuilles a augmenté au cours de la saison. La concentration en Al des feuilles a augmenté au cours de la saison (Tableaux 8, 11, 14 et 17). La concentration en Al des feuilles a été peu affectée par la fertilisation azotée. La fertilisation phosphatée a augmenté significativement la concentration en Al des feuilles aux trois derniers échantillonnages. La concentration en B des feuilles a augmenté significativement avec la fertilisation azotée au premier échantillonnage (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Au deuxième échantillonnage, la fertilisation azotée n'a eu aucun effet sur la concentration en B des feuilles. Au troisième échantillonnage, la concentration en B des feuilles a diminué significativement avec la fertilisation azotée et phosphatée. Au quatrième échantillonnage, la concentration en B des feuilles a diminué significativement avec la

fertilisation azotée. La concentration en Cu des feuilles a augmenté significativement avec la fertilisation azotée au premier et deuxième échantillonnage (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Au troisième échantillonnage, la concentration en Cu des feuilles a diminué significativement avec la fertilisation azotée et phosphatée. Au quatrième échantillonnage, la concentration en Cu des feuilles a diminué significativement avec la fertilisation azotée. La fertilisation azotée et phosphatée n'a eu aucun effet sur la concentration en Zn des feuilles à tous les échantillonnages (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Au premier échantillonnage, la fertilisation azotée et phosphatée n'a eu aucun effet sur la concentration en Fe des feuilles. La concentration en Fe des feuilles a augmenté significativement avec la fertilisation azotée au deuxième, troisième et quatrième échantillonnage (Tableaux 8, 11, 14 et 17). Au premier échantillonnage, la fertilisation azotée et phosphatée n'a eu aucun effet sur la concentration en Mn des feuilles (Tableaux 8, 11, 14 et 17). La concentration en Mn des feuilles a augmenté significativement avec la fertilisation azotée au deuxième, troisième et quatrième échantillonnage. La concentration en Mn des feuilles a augmenté significativement avec la fertilisation phosphatée au deuxième et troisième échantillonnage. La concentration en B et en Mn des feuilles a augmenté au cours de la saison tandis que la concentration en Cu et en Zn des feuilles a diminué. La concentration en Fe des feuilles est demeuré relativement constante toute au cours de la saison. Ces variations des concentrations en éléments nutritifs dans les feuilles ont été également mesurées dans une étude réalisée au Maine (Trevett et al. 1968)

Mesure de la chlorophylle dans les feuilles

Les mesures de la chlorophylle ont augmenté significativement avec la fertilisation azotée à toutes les dates d'échantillonnage (Tableaux 20, 21 et 22). Il est reconnu que l'azote a un impact direct sur la concentration en chlorophylle des feuilles. À la troisième et quatrième date d'échantillonnage, l'augmentation des mesures de chlorophylle entre le témoin et la plus forte dose de N a été plus grande pour le site d'Albanel (Tableau 21) que pour le site de Normandin (Tableau 22), expliquant l'interaction entre les sites et les doses de N. À la quatrième date d'échantillonnage, la fertilisation phosphatée a significativement diminué la mesure de chlorophylle, mais la baisse est très faible. Au cours de la saison, les valeurs des mesures de la chlorophylle ont peu varié malgré les changements physiologiques de la culture.

Mesure des composés phénoliques dans les feuilles

Comme l'appareil a brisé et qu'il manque des données pour le site d'Albanel, les données ont été analysées par site contrairement aux autres variables.

La fertilisation azotée a diminué significativement la concentration en polyphénols aux deux premiers échantillonnages (Tableaux 23 et 24). Cette diminution est généralement observée avec l'apport de N qui favorise une meilleure vigueur de la plante. Au cours de la saison, les valeurs des mesures des composés polyphénoliques ont peu varié malgré les changements physiologiques de la culture (Tableaux 25 et 26).

Le rapport entre la chlorophylle et les composés polyphénoliques (chl/phen) a augmenté significativement avec la fertilisation azotée à tous les échantillonnages (Tableau 23, 24, 25 et 26).

Relation entre les analyses foliaires et les mesures de chlorophylle et de composés polyphénoliques

Des coefficients de corrélations ont été déterminés pour l'ensemble des paramètres et pour chaque date d'échantillonnage (Tableau 27). À la première date d'échantillonnage, les mesures de chlorophylle ont été significativement corrélées à la concentration en N et Mg de feuilles. Les concentrations en composés polyphénoliques ont été significativement corrélées avec les concentrations en N, P, K, Ca et Mg des feuilles tout comme le rapport chl/phen. Au deuxième échantillonnage, les mesures de chlorophylle ont été significativement corrélées aux concentrations en N, P, K et Mg des feuilles. Les concentrations en composés polyphénoliques ont été significativement corrélées avec les concentrations en N, P et K des feuilles tout comme le rapport chl/phen. Au troisième échantillonnage, les mesures de chlorophylle ont été significativement corrélées aux concentrations en N, P, K et Mg des feuilles. Les concentrations en composés polyphénoliques ont été significativement corrélées avec les concentrations en N et K des feuilles. Le rapport chl/phen a été significativement corrélé à la concentration en N, P, K et Mg des feuilles. Au quatrième échantillonnage, les mesures de chlorophylle ont été significativement corrélées aux concentrations en N, K, Ca et Mg des feuilles. Les concentrations en composés polyphénoliques ont été significativement corrélées avec les concentrations en N des feuilles. Le rapport chl/phen a été significativement corrélé à la

concentration en N, K, Ca et Mg des feuilles.

Conclusions

Les analyses de sol ont indiqué que les apports d'engrais phosphaté et potassique ont augmenté les réserves en P et K du sol. Les données préliminaires ont indiqué que la culture du bleuet sauvage a répondu fortement à la fertilisation azotée et peu à la fertilisation potassique. Les mesures de la chlorophylle et des composés polyphénoliques des feuilles ont été affectées par la fertilisation azotée mais la fertilisation phosphatée et potassique a eu peu d'impact. Les mesures de la chlorophylle et des composés phénoliques sont bien corrélées aux concentrations en N des feuilles à tous les stades de la plante, identifiant ainsi le statut nutritif azoté de la plante. Pour les autres éléments nutritifs, le rapport Chl/Phen semble prometteur pour évaluer le statut nutritif de la plante.

Références

- Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 1988.** Méthodes d'analyse des sols, des fumiers et des végétaux. AGDEX 533. Gouvernement du Québec, Québec, Canada.
- Eaton, L. J. et Patriquin, D. G. 1988.** Inorganic nitrogen levels and nitrification potential in lowbush blueberry soils. *Can. J. Soil Sci.* **68**: 63-75.
- Hendershot, W. H., Lalande, H. et Duquette, M. 2007.** Soil reaction and exchangeable acidity. Pages 171-178 dans M.R. Carter et E.G. Gregorich (éd.). *Soil sampling and methods of analysis*. Second Edition. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Isaac, R. A. et Johnson, W. C. 1976.** Determination of total nitrogen in plant tissue, using a block digester. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* **59**: 98-100.
- Lafond, J. 2009.** Optimum leaf nutrient concentrations for wild lowbush blueberry in Quebec. *Can. J. Plant Sci.* **89** : 341-374.
- Lafond, J. 2010.** Fractionnement de la fertilisation azotée dans la production du bleuet nain sauvage et suivi de l'azote du sol. *Can. J. Soil Sci.* **90** : XXX-XXX.
- Lafond, J. et Ziadi, N. 2009.** Fertilisation azotée et phosphatée dans la production du bleuet nain sauvage. Rapport synthèse. PPF. Mai. 47 pages.
- Murphy, J. et Riley, J. P. 1962.** A modified single solution method for the determination of phosphate in surface waters. *Anal. Chim. Acta* **27**: 31-36.

Percival, D. C. et Sanderson, K. R. 2004. Main and interactive effects of vegetative-year applications of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on the wild blueberry. *Small Fruit Rev.* **3(1/2)**: 105-121.

Raymond, R., Mailloux, A. et Dubé, A. 1965. Pédologie de la région du Lac-Saint-Jean. Ministère de l'agriculture et de la colonisation du Québec, Québec, Qc. *Bull. Tech.* no 11. 157 p.

Sanderson, K. R. et Eaton, L. J. 2008. Wild blueberry response to phosphorus applied to Prince Edward Island soils. *Can. J. Plant Sci.* **88**: 363-366.

Smagula, J. M., Litten, W. et Loennecker, K. 2004. Diammonium phosphate application date affects *Vaccinium angustifolium* Ait. Nutrient uptake and yield. *Small Fruit Rev.* **3(1/2)**: 87-94.

Tremblay, N, Wand, Z. et Belec, C. 2007. Evaluation of the Dualex for the assessment of corn nitrogen status. *J. Plant Nutr.* **30**: 1355-1369.

Trevett, M. F., Carpenter, P. N. et Durgin, R. E. 1968. Seasonal trend and interrelation of mineral nutrients in lowbush blueberry leaves. *Maine Agr. Exp. Stat. Bull.* **665**. 68 pp.

Warman, P. R., Murphy, C. J., Burnham, J. C. et Eaton, L. J. 2004. Soil and plant response to MSW compost applications on lowbush blueberry fields in 2000 and 2001. *Small Fruit Review* **3(1/2)**: 19-31.

Ziadi, N. et Tran, T. S. 2007. Mehlich III-Extractable elements. Pages 81-88 dans M.R. Carter et E.G. Gregorich (éd.). *Second Edition. Soil sampling and methods of analysis.* Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Tableau 1. Caractéristiques des sites

Site	Couche de sol (cm)	pH eau					Matière organique %
			P	K	Ca	Mg	
			(mg kg ⁻¹)				
Albanel	0-5	5,21	63	47	152	18	9,30
	5-30	5,44	21	21	3	1	2,33
Normandin	0-5	5,21	60	78	475	52	14,01
	5-30	5,60	36	18	32	2	2,64

Tableau 2 Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la couche de sol de surface

	pH	P	K	Ca	Mg
Site	NS	NS	NS	**	*
N	***	NS	***	NS	*
Site X N	NS	NS	NS	NS	NS
P	NS	**	NS	NS	NS
Site X P	NS	NS	NS	NS	NS
N X P	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	***	NS	NS
Site X K	NS	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes					
N linéaire	***	NS	***	NS	*
N quadratique	NS	NS	**	NS	NS
K linéaire	NS	NS	***	NS	NS
K quadratique	NS	NS	NS	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 3. Caractéristiques des sols à l'automne 2009 au site d'Albanel dans la couche de sol de surface

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	pH eau	P	K	Ca	Mg
			(mg kg ⁻¹)			
N	0	4,40	52	130	341	39
	30	4,29	55	86	259	27
	60	4,15	47	93	293	29
	90	4,12	49	86	247	24
P	0	4,27	43	101	285	30
	20	4,21	59	97	285	29
K	0	4,20	54	64	322	33
	30	4,25	46	87	288	29
	60	4,25	48	107	272	29
	90	4,26	56	137	257	28

Tableau 4. Caractéristiques des sols à l'automne 2009 au site de Normandin dans la couche de sol de surface

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	pH eau				
			P	K	Ca	Mg
			(mg kg ⁻¹)			
N	0	4,34	40	204	848	83
	30	4,25	49	132	714	70
	60	4,21	48	128	743	67
	90	4,11	40	141	759	67
P	0	4,28	43	148	750	72
	20	4,18	46	154	782	72
K	0	4,19	46	91	802	71
	30	4,21	45	124	731	70
	60	4,20	35	203	867	83
	90	4,31	50	187	664	63

Tableau 5. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la couche de sol de 5-30 cm

	pH	P	K	Ca	Mg
Site	**	NS	NS	**	NS
N	***	NS	NS	NS	NS
Site X N	NS	NS	NS	NS	NS
P	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P	NS	NS	NS	NS	NS
N X P	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	***	NS	NS
Site X K	NS	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes					
N linéaire	***	NS	NS	NS	NS
N quadratique	NS	NS	**	NS	NS
K linéaire	NS	NS	***	NS	NS
K quadratique	NS	NS	NS	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 6. Caractéristiques des sols à l'automne 2009 au site d'Albanel dans la couche de sol 5-30 cm

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	pH eau	P	K	Ca	Mg
				(mg kg ⁻¹)		
N	0	4,82	32	18	6	2
	30	4,73	35	22	6	2
	60	4,65	30	28	8	2
	90	4,57	30	15	9	2
P	0	4,71	30	19	7	2
	20	4,68	33	23	8	2
K	0	4,68	35	13	7	2
	30	4,70	28	20	7	2
	60	4,70	28	21	9	2
	90	4,69	36	31	7	2

Tableau 7. Caractéristiques des sols à l'automne 2009 au site de Normandin dans la couche de sol 5-30 cm

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	pH eau	P	K	Ca	Mg
				(mg kg ⁻¹)		
N	0	5,15	34	15	23	6
	30	5,10	35	16	29	10
	60	5,07	32	15	26	5
	90	4,92	35	14	17	5
P	0	5,06	36	14	21	6
	20	5,06	33	16	27	7
K	0	5,08	36	11	24	5
	30	5,08	35	14	19	9
	60	5,06	29	16	25	6
	90	5,03	38	20	28	5

Tableau 8. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la composition chimique des feuilles à l'année de végétation au premier échantillonnage

	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
Site	NS	NS	NS	**	NS	NS	*	*	NS	NS	NS
N	***	*	*	***	***	NS	***	***	NS	NS	NS
Site X N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P	NS	***	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes											
N linéaire	***	NS	NS	***	***	NS	***	***	NS	NS	NS
N quadratique	*	*	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K linéaire	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K quadratique	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 9. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au premier échantillonnage au site d'Albanel

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
		(%)					(mg kg ⁻¹)					
N	0	1,87	0,15	0,60	0,26	0,15	40,00	27,34	5,53	11,00	20,66	241,19
	30	2,03	0,16	0,65	0,26	0,15	39,66	30,16	4,99	11,15	20,91	238,38
	60	2,18	0,16	0,65	0,25	0,15	36,84	29,47	4,75	11,09	20,53	239,88
	90	2,24	0,16	0,63	0,24	0,14	38,41	31,19	4,28	10,76	20,38	238,78
P	0	2,05	0,15	0,63	0,25	0,15	37,84	29,59	4,93	10,80	20,34	238,16
	20	2,11	0,16	0,64	0,26	0,15	39,61	29,48	4,84	11,20	20,89	240,95
K	0	2,07	0,16	0,62	0,26	0,15	39,03	29,47	4,87	11,12	20,63	237,59
	30	2,08	0,16	0,64	0,26	0,15	38,50	28,41	4,91	10,79	20,75	242,38
	60	2,11	0,16	0,64	0,25	0,15	37,84	29,72	4,92	11,28	20,75	241,03
	90	2,04	0,16	0,63	0,25	0,15	39,53	30,56	4,84	10,80	20,34	237,22

Tableau 10. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au premier échantillonnage au site de Normandin

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mr
		(%)						(mg kg ⁻¹)				
N	0	2,03	0,16	0,65	0,24	0,15	42,22	21,22	6,06	10,91	23,69	219,0
	30	2,18	0,16	0,68	0,22	0,14	40,13	22,74	5,48	10,88	22,32	212,10
	60	2,36	0,17	0,67	0,21	0,14	38,78	22,78	5,13	10,69	21,94	217,0
	90	2,41	0,16	0,68	0,21	0,14	39,84	23,31	4,84	10,18	21,47	215,56
P	0	2,26	0,16	0,67	0,21	0,14	40,45	22,64	5,42	10,84	22,11	216,4
	20	2,23	0,17	0,67	0,22	0,14	40,03	22,38	5,33	10,48	22,60	215,63
K	0	2,25	0,16	0,67	0,22	0,14	40,59	22,47	5,43	10,57	22,56	212,53
	30	2,19	0,16	0,66	0,21	0,15	41,31	22,00	5,28	10,55	22,53	214,72
	60	2,29	0,16	0,69	0,23	0,14	38,78	23,06	5,36	10,74	22,09	217,52
	90	2,25	0,17	0,67	0,22	0,14	40,29	22,52	5,43	10,79	22,23	219,0

Tableau 11. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la composition chimique des feuilles à l'année de végétation au deuxième échantillonnage

	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
Site	**	NS	NS	*	NS	NS	**	**	NS	NS	NS
N	***	***	***	NS	*	NS	NS	***	NS	***	**
Site X N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS
P	NS	***	NS	***	*	*	NS	NS	NS	NS	**
Site X P	*	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P	NS	**	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	*
Site X N X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes											
N linéaire	***	***	**	NS	**	NS	NS	***	NS	***	**
N quadratique	NS	*	**	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS
K linéaire	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K quadratique	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 12. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au deuxième échantillonnage au site d'Albanel

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
N	0	1,53	0,12	0,59	0,34	0,16	44,50	32,97	4,20	9,82	20,56	229,41
	30	1,66	0,13	0,60	0,36	0,16	45,13	32,13	3,53	10,17	22,75	236,7
	60	1,81	0,13	0,64	0,36	0,16	43,53	30,94	3,26	10,32	24,06	239,63
	90	1,88	0,14	0,64	0,36	0,15	45,38	32,84	2,88	10,62	25,66	242,4
P	0	1,69	0,12	0,62	0,35	0,16	43,16	32,55	3,46	9,92	22,91	232,20
	20	1,75	0,14	0,61	0,36	0,16	46,11	31,89	3,47	10,54	23,61	241,9
K	0	1,70	0,13	0,57	0,35	0,16	43,78	32,38	3,37	10,25	23,34	235,10
	30	1,73	0,13	0,62	0,36	0,16	44,25	31,09	3,34	9,82	22,53	238,20
	60	1,72	0,13	0,64	0,36	0,16	44,34	31,91	3,63	10,52	24,06	239,47
	90	1,74	0,13	0,63	0,35	0,16	46,16	33,50	3,53	10,33	23,09	235,50

Tableau 13. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au deuxième échantillonnage au site de Normandin

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
		(%)						(mg kg ⁻¹)				
N	0	1,71	0,13	0,60	0,33	0,17	42,41	24,75	6,69	10,10	22,50	213,94
	30	1,84	0,14	0,65	0,34	0,17	43,91	25,47	5,59	9,98	23,59	214,31
	60	1,97	0,14	0,64	0,33	0,16	42,44	25,56	4,87	9,71	24,69	219,38
	90	2,07	0,14	0,62	0,31	0,15	41,41	27,13	4,78	9,79	25,44	218,53
P	0	1,90	0,13	0,63	0,32	0,16	41,97	25,52	5,54	9,83	24,05	214,67
	20	1,89	0,14	0,63	0,34	0,17	43,11	25,94	5,43	9,97	24,06	218,41
K	0	1,91	0,13	0,60	0,33	0,16	43,44	25,16	5,53	10,27	24,34	212,38
	30	1,85	0,14	0,64	0,33	0,17	42,69	25,91	5,44	10,00	23,75	215,59
	60	1,93	0,14	0,64	0,34	0,17	42,13	26,88	5,41	9,70	23,81	220,28
	90	1,90	0,14	0,63	0,32	0,16	41,91	24,97	5,56	9,64	24,31	217,91

Tableau 14 Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la composition chimique des feuilles à l'année de végétation au troisième échantillonnage

	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
Site	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N	***	***	***	*	***	NS	***	***	NS	***	***
Site X N	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	***
P	NS	***	NS	**	*	*	**	**	*	NS	***
Site X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS
N X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X K	NS	*	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes											
N linéaire	***	***	***	NS	***	NS	***	***	NS	***	***
N quadratique	NS	*	**	**	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS
K linéaire	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K quadratique	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 15. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au troisième échantillonnage au site d'Albanel

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
		%					mg kg ⁻¹					
N	0	1,47	0,11	0,54	0,38	0,18	50,61	38,41	5,02	8,27	18,50	228,16
	30	1,55	0,12	0,59	0,42	0,17	51,78	35,13	4,54	8,73	21,84	258,22
	60	1,69	0,13	0,62	0,42	0,17	49,19	31,44	3,93	9,28	24,69	258,31
	90	1,73	0,13	0,62	0,42	0,16	53,69	33,19	3,38	9,50	26,41	269,50
P	0	1,59	0,11	0,60	0,40	0,17	49,10	35,84	4,24	8,58	22,25	245,03
	20	1,63	0,13	0,58	0,42	0,17	53,52	33,23	4,20	9,31	23,47	262,06
K	0	1,63	0,12	0,50	0,42	0,18	49,19	35,13	4,01	8,96	22,88	259,25
	30	1,60	0,12	0,58	0,41	0,17	53,22	34,13	4,21	8,45	21,78	247,03
	60	1,60	0,12	0,63	0,40	0,17	52,19	33,56	4,25	9,33	23,28	250,94
	90	1,62	0,12	0,64	0,42	0,17	50,72	35,34	4,40	9,04	23,50	256,97

Tableau 16. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au troisième échantillonnage au site de Normandin

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
		(%)				(mg kg ⁻¹)						
N	0	1,52	0,11	0,56	0,40	0,19	49,34	34,91	4,88	7,82	22,09	236,41
	30	1,57	0,12	0,60	0,42	0,18	47,31	31,25	3,98	8,05	23,34	236,41
	60	1,63	0,12	0,61	0,41	0,18	46,68	29,16	3,38	7,61	24,09	237,53
	90	1,72	0,13	0,61	0,39	0,17	44,50	28,19	2,88	7,85	25,19	232,19
P	0	1,62	0,12	0,60	0,39	0,18	46,44	31,47	4,02	7,74	24,03	232,31
	20	1,60	0,13	0,60	0,42	0,19	47,47	30,28	3,54	7,93	23,30	238,91
K	0	1,60	0,12	0,55	0,40	0,19	47,78	30,84	3,89	7,95	24,56	232,19
	30	1,59	0,12	0,60	0,40	0,18	47,50	31,00	3,58	7,71	22,84	239,01
	60	1,62	0,12	0,63	0,42	0,19	47,55	31,28	3,80	8,20	23,97	238,53
	90	1,64	0,13	0,61	0,40	0,18	45,03	30,38	3,84	7,49	23,28	232,19

Tableau 17. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la composition chimique des feuilles à l'année de végétation au quatrième échantillonnage

	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
Site	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	*
N	***	NS	***	**	***	**	***	***	NS	***	*
Site X N	NS	NS	NS	NS	*	***	NS	*	NS	**	**
P	NS	***	**	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P	*	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P	NS	NS	**	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X K	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes											
N linéaire	***	NS	***	***	***	**	***	***	NS	***	*
N quadratique	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS
K linéaire	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K quadratique	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 18. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au quatrième échantillonnage au site d'Albanel

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K (%)	Ca	Mg	Al	B	(mg kg ⁻¹)			
									Cu	Zn	Fe	Mn
N	0	1,32	0,10	0,50	0,51	0,20	47,77	45,91	4,05	8,39	17,56	295,47
	30	1,40	0,11	0,55	0,53	0,20	48,84	38,56	3,72	9,26	20,25	327,00
	60	1,46	0,11	0,57	0,49	0,18	46,09	32,03	3,35	9,23	21,28	304,44
	90	1,48	0,11	0,62	0,50	0,18	50,56	30,44	2,85	9,55	22,88	306,00
P	0	1,41	0,10	0,57	0,51	0,19	46,25	37,64	3,50	8,84	20,94	311,67
	20	1,42	0,12	0,55	0,51	0,19	50,36	35,83	3,49	9,37	20,05	305,00
K	0	1,41	0,11	0,48	0,50	0,19	46,31	37,22	3,36	8,83	20,09	307,00
	30	1,40	0,11	0,56	0,52	0,19	50,09	34,88	3,35	8,86	19,63	307,00
	60	1,44	0,11	0,61	0,50	0,19	49,19	35,88	3,71	9,45	21,50	305,50
	90	1,41	0,11	0,60	0,50	0,19	47,72	38,97	3,55	9,29	20,75	313,50

Tableau 19. Concentration en éléments nutritifs des feuilles au quatrième échantillonnage au site de Normandin

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Zn	Fe	Mn
		(%)					(mg kg ⁻¹)					
N	0	1,39	0,11	0,53	0,52	0,22	64,31	54,19	5,06	7,74	19,38	279,66
	30	1,41	0,12	0,56	0,49	0,19	56,75	42,88	4,08	7,57	19,41	267,81
	60	1,45	0,12	0,56	0,47	0,19	54,34	39,25	3,66	7,62	20,09	266,34
	90	1,52	0,11	0,59	0,45	0,17	51,28	37,22	3,48	7,58	21,69	245,22
P	0	1,46	0,11	0,57	0,47	0,19	56,27	44,17	4,21	7,45	20,30	260,55
	20	1,43	0,12	0,55	0,49	0,20	57,08	42,59	3,93	7,81	19,98	268,97
K	0	1,43	0,11	0,51	0,49	0,20	57,72	42,44	4,20	8,14	20,91	259,94
	30	1,44	0,12	0,58	0,48	0,19	58,47	43,56	3,76	7,43	19,66	260,31
	60	1,46	0,11	0,59	0,50	0,19	56,88	44,75	4,19	7,80	19,91	278,91
	90	1,44	0,11	0,57	0,47	0,18	53,63	42,78	4,14	7,15	20,09	259,88

Tableau 20. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la mesure de la chlorophylle des feuilles (SPAD) à l'année de végétation aux différents échantillonnages

	Date			
	1	2	3	4
Site	NS	NS	NS	NS
N	***	***	***	***
Site X N	NS	NS	***	***
P	NS	NS	NS	**
Site X P	NS	NS	NS	NS
N X P	NS	NS	NS	NS
Site X N X P	NS	NS	NS	NS
K	NS	NS	NS	NS
Site X K	NS	NS	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS
Site X N X K	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS
Site X P X K	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS
Site X N X P X K	NS	**	NS	NS
Contrastes				
N linéaire	***	***	***	***
N quadratique	*	NS	NS	NS
K linéaire	NS	NS	NS	NS
K quadratique	NS	NS	NS	NS

* $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; $P < 0,001$.

Tableau 21. Mesure de la chlorophylle des feuilles (SPAD) aux différents échantillonnages au site d'Albanel

Fertilisant	Dose	SPAD			
		Date			
		1	2	3	4
N	0	36,75	36,83	35,72	34,70
	30	38,79	38,67	37,70	36,88
	60	39,93	40,94	40,11	40,55
	90	40,21	42,15	42,21	41,53
P	0	39,14	39,66	39,38	38,71
	20	38,70	39,63	38,49	38,12
K	0	39,50	39,51	38,36	38,50
	30	38,30	39,59	38,83	38,04
	60	38,92	40,06	39,31	38,45
	90	38,95	39,42	39,24	38,66

Tableau 22. Mesure de la chlorophylle des feuilles (SPAD) aux différents échantillonnages au site de Normandin

Fertilisant	Dose	SPAD			
		Date			
		1	2	3	4
N	0	36,60	37,85	36,85	36,87
	30	38,67	38,97	38,15	36,87
	60	38,61	40,27	38,71	38,09
	90	39,36	42,13	39,80	39,81
P	0	38,00	40,15	38,54	38,60
	20	38,62	39,46	38,21	37,22
K	0	38,58	39,88	38,74	38,25
	30	37,89	39,58	37,38	37,72
	60	38,95	40,50	38,76	38,24
	90	37,82	39,26	38,62	37,43

Tableau 23. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la mesure des composés phénoliques dans les feuilles et le rapport chlorophylle/phénolique à l'année de végétation aux différents échantillonnages au site d'Albanel

	Phénolique				Chlorophylle/phénolique			
	Date				Date			
	1	2	3	4	1	2	3	4
N	-	***	-	NS	-	***	-	***
P	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
N X P	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
K	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
N X K	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
P X K	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
N X P X K	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
Contrastes								
N linéaire	-	***	-	NS	-	***	-	***
N quadratique	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
K linéaire	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS
K quadratique	-	NS	-	NS	-	NS	-	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 24. Analyse de variance des effets de la fertilisation N, P et K sur la mesure des composés phénoliques dans les feuilles et le rapport chlorophylle/phénolique à l'année de végétation aux différents échantillonnages au site de Normandin

	Phénolique				Chlorophylle/phénolique			
	Date				Date			
	1	2	3	4	1	2	3	4
N	***	**	NS	NS	***	***	**	**
P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K	NS	*	NS	NS	NS	***	NS	NS
N X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
N X P X K	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contrastes								
N linéaire	***	***	NS	NS	***	***	***	***
N quadratique	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K linéaire	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
K quadratique	NS	*	NS	NS	NS	*	NS	NS

* P<0,05; **P<0,01; P<0,001.

Tableau 25. Mesure des composés phénoliques des feuilles et le rapport chlorophylle/phénolique aux différents échantillonnages au site d'Albanel

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	Phénolique				Chlorophylle/phénolique			
		Date				Date			
		1	2	3	4	1	2	3	4
N	0	3,57	3,48	-	3,35	10,06	10,60	-	10,38
	30	3,58	3,43	-	3,33	10,59	11,30	-	11,13
	60	3,51	3,43	-	3,32	11,78	11,97	-	12,22
	90	3,44	3,29	-	3,33	11,72	12,85	-	12,49
P	0	3,54	3,43	-	3,35	10,97	11,60	-	11,58
	20	3,51	3,38	-	3,31	11,10	11,76	-	11,53
K	0	3,56	3,38	-	3,32	10,91	11,72	-	11,65
	30	3,44	3,45	-	3,33	11,26	11,55	-	11,45
	60	3,53	3,40	-	3,33	11,24	11,82	-	11,59
	90	3,59	3,40	-	3,36	10,63	11,62	-	11,53

Tableau 26. Mesure des composés phénoliques des feuilles et le rapport chlorophylle/phénolique aux différents échantillonnages au site de Normandin

Fertilisant	Dose (kg ha ⁻¹)	Phénolique				Chlorophylle/phénolique			
		Date				Date			
		1	2	3	4	1	2	3	4
N	0	3,47	3,40	3,51	3,35	10,57	11,17	10,56	11,09
	30	3,41	3,31	3,47	3,28	11,40	11,83	11,03	11,32
	60	3,23	3,25	3,42	3,28	12,04	12,44	11,38	11,69
	90	3,22	3,19	3,38	3,24	12,29	13,27	11,88	12,40
P	0	3,36	3,29	3,45	3,29	11,39	12,28	11,24	11,84
	20	3,31	3,29	3,44	3,28	11,76	12,08	11,19	11,41
K	0	3,36	3,35	3,46	3,31	11,53	11,95	11,26	11,68
	30	3,34	3,29	3,47	3,32	11,38	12,09	10,81	11,45
	60	3,25	3,20	3,37	3,23	12,05	12,72	11,58	11,92
	90	3,37	3,30	3,48	3,29	11,35	11,96	11,20	11,45

Tableau 27 Coefficients de corrélation entre les concentrations en éléments nutritifs des feuilles et les mesures de chlorophylle et de composés polyphénoliques

Date		N	P	K	Ca	Mg
1	Chl	0,45***	0,10 ^{NS}	0,12 ^{NS}	-0,17 ^{NS}	-0,58***
	Phen	-0,62***	-0,26*	-0,39**	0,45***	0,27*
	Chl/Phen	0,74***	0,31**	0,40**	-0,46***	-0,52***
2	Chl	0,69***	0,51***	0,34**	-0,10 ^{NS}	-0,38**
	Phen	-0,69***	-0,58***	-0,27*	0,17 ^{NS}	-0,03 ^{NS}
	Chl/Phen	0,82***	0,63***	0,36**	-0,15 ^{NS}	-0,24 ^{NS}
3	Chl	0,73***	0,30*	0,43***	0,16 ^{NS}	-0,47***
	Phen	-0,44***	-0,26 ^{NS}	-0,50***	-0,19 ^{NS}	-0,01 ^{NS}
	Chl/Phen	0,67***	0,28*	0,42**	-0,02 ^{NS}	-0,30*
4	Chl	0,63***	0,03 ^{NS}	0,42***	-0,29*	-0,63***
	Phen	0,25*	0,02 ^{NS}	-0,14 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,13 ^{NS}
	Chl/Phen	0,65***	0,01 ^{NS}	0,41***	-0,27*	-0,59***

