
EFFET DE L'APPLICATION DE SULFATE DE CALCIUM SUR LA POMME DE TERRE ET ÉTUDE DES INTERACTIONS AVEC L'AZOTE ET LE POTASSIUM

M. GIROUX¹

RÉSUMÉ

Cette étude a pour but de mesurer l'effet de l'application de sulfate de calcium (CaSO_4) en bande à la plantation avec les autres engrais sur la production de la pomme de terre (cv. Supérieur). Elle vise aussi à mesurer l'effet de l'azote, du potassium et leur interaction avec le calcium sur le rendement total et vendable, le poids spécifique, l'indice de cœur brun et la composition minérale des feuilles à la floraison et des tubercules à la récolte. Le dispositif de type factoriel ($3 \times 3 \times 3$) comporte 3 doses N (100, 150 et 200 kg N/ha), 3 doses K (80, 160 et 240 kg K_2O /ha) et 3 doses Ca (0, 50 et 100 kg Ca/ha). Sur les quatre champs expérimentaux étudiés, deux ont démontré un effet significatif des apports de calcium sur le rendement total ou vendable de pommes de terre. Ces deux champs ont un niveau de saturation en calcium de 12,4 et 18,6%, insuffisant pour fournir le calcium nécessaire à la pomme de terre. Cette affirmation est confirmée par un statut nutritif insuffisant dans les feuilles pour Ca. Les apports de sulfate de calcium aux doses de 50 et 100 kg Ca/ha se sont révélés faiblement efficaces pour redresser le niveau calcique des feuilles et des tubercules et éliminer les symptômes de cœur brun. Des doses de CaSO_4 plus importantes auraient sans doute été nécessaires. Il semble que c'est par le redressement de la saturation en Ca des sols de moins de 20 % de saturation (Ca/CEC) que devrait se corriger la déficience calcique. Les doses d'azote et de potassium ont affecté négativement le poids spécifique des tubercules alors que les doses de calcium n'ont pas eu d'effet. L'effet antagoniste des doses N et K s'est manifesté sur les concentrations en Ca des feuilles à la floraison.

Mots clés : Pomme de terre, azote, potassium, calcium, cœur brun, poids spécifique.

INTRODUCTION

La nutrition en calcium des cultures s'effectue principalement à partir du calcium dans la solution du sol en équilibre avec le calcium échangeable et la saturation en Ca. Pour certaines cultures cultivées en sols acides, comme la pomme de terre, les réserves de calcium échangeable sont faibles, souvent inférieures à 1000 kg/ha en sols légers de faible

capacité d'échange cationique. De plus, la saturation en calcium, représentant la proportion des sites d'échange occupés par le calcium, se situe fréquemment à moins de 20 % dans la culture de la pomme de terre (Tabi *et al.* 1990). Une déficience en calcium est susceptible de survenir dans les sols trop acides et de faible saturation en calcium.

La déficience en calcium de la pomme de terre a été décrite par Wallace et Hewitt (1948). Les symptômes sont visibles sur les feuilles, les germes et les tubercules. Les feuilles déficientes en Ca montrent un enroulement vers le haut et les folioles sont chlorosées sur leur marge. Plus tard, ces symptômes évoluent en nécrose. Dans le cas de déficience sévère, les feuilles sont ridées et les tiges cessent de croître donnant une allure de rosette aux plants. Les racines cessent également de croître entraînant un faible développement du système racinaire. Dans le tubercule, on voit apparaître une nécrose diffuse brune dans l'anneau vasculaire près de l'attache du stolon. Plus tard, ces mouchetures brunes se retrouvent dans le cœur et provoquent le cœur brun. Les germes subissent également une nécrose et noircissent par le bout (Hooker 1983, DeKock *et al.* 1975). Un manque de calcium produit un effet néfaste sur les parois cellulaires entraînant des lésions dans les tissus (Smith 1968). Les désordres dans les tubercules sont beaucoup plus fréquents que ceux sur le feuillage.

Les travaux de Simmons et Kelling (1987) démontrent l'effet positif de la fertilisation au nitrate et au sulfate de calcium, à la dose de 100 kg Ca/ha, en sols déficients en calcium. Tzeng *et al.* (1986) établissent nettement la relation entre le statut nutritif en calcium des plants de pommes de terre et la présence de mouchetures brunes dans les tubercules. Le chaulage des sols, à un niveau de pH de 5,5, constitue la façon généralement reconnue de corriger l'acidité des sols à pommes de terre. La déficience calcique peut quand même survenir à ce niveau de pH. Simmons *et al.* (1988) ont obtenu un accroissement important du rendement de pommes de terre par l'addition de 224 kg Ca/ha sous forme CaSO_4 , dans des sols sableux de pH 5,3 et plus, à faible teneur en calcium échangeable et de faible capacité d'échange cationique. Ces conditions de sols ressemblent à celles rencontrées chez plusieurs producteurs

¹Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 2700 rue Einstein, Sainte-Foy, Qc G1P 3W8

au Québec et tendent à démontrer que la stratégie de chaulage, basée sur un pH visé de 5,5, n'est pas toujours appropriée pour corriger la déficience en calcium. Dans les provinces maritimes, on accorde une importance plus grande à la correction de l'acidité. Les pH varient généralement entre 5,5 et 6,0 et la saturation en calcium se situe généralement à 30% ou plus. L'absence de correction adéquate de l'acidité par le chaulage peut obliger à recourir à la fertilisation calcique. Un accroissement du pH augmente le calcium soluble dans la solution du sol selon l'équation : $\Delta \text{pH} = 1/2 (\text{pCa final} - \text{pCa initial})$.

Les équilibres cationiques du sol et des engrais sont susceptibles de modifier les équilibres dans la solution du sol et d'affecter l'alimentation en calcium de la pomme de terre. Tisdale *et al.* (1985) indiquent que la fumure NH_4^+ et K^+ produit un effet antagoniste sur Ca^{++} . Allard (1972) et Locascio *et al.* (1992) ont démontré que la fumure K a freiné l'absorption du calcium dans les pétioles des feuilles de pommes de terre. La forte fertilisation à l'azote et au potassium utilisée dans la culture de la pomme de terre serait donc un élément prédisposant à la déficience calcique.

En ce qui concerne le diagnostic foliaire, la concentration de suffisance en calcium dans les feuilles de pommes de terre à la floraison se situe environ à 1% de Ca. Cambouris (1991) a établi les indices DRIS pour cette culture et les rapports nutritifs souhaitables du calcium avec les autres éléments majeurs pour une production maximale. Il faut également mentionner qu'il existe des spécificités variétales très marquées en ce qui concerne la susceptibilité aux déficiences calciques. Les travaux de Yelle (1993) et de Lehoux (1997) réalisés dans la région de Québec ont permis de démontrer la susceptibilité au cœur brun des cultivars Mouraska et Supérieur. Cependant, des applications de 50 et 100 kg de Ca à la plantation n'ont pas affecté ni les rendements, ni l'incidence du cœur brun, pourtant élevée chez certains cultivars sensibles. Par contre, la dose 100 kg Ca/ha a produit un effet sur la concentration en calcium du périoderme et de la moelle des tubercules.

Le but de ce travail est d'étudier l'effet d'application d'une fertilisation calcique effectuée sous forme de sulfate de calcium granulaire en bande à la plantation sur le rendement, la nutrition minérale, le poids spécifique et l'incidence du cœur brun sur la pomme de terre. Il a également pour but d'étudier l'effet des interactions cationiques Ca-NH_4 et Ca-K sur ces facteurs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Quatre champs expérimentaux de pommes de terre (cv. Supérieur) ont été implantés à Saint-Lambert-de-Lévis entre 1993 et 1995. Les sols utilisés étaient le sable loameux Saint-Jude et le loam

sablo-graveleux Fourchette. Les sols ont été analysés par la méthode Mehlich-3 pour déterminer leur contenu en P, K, Ca et Mg (Tableau 1). De plus, le pH à l'eau, le pH tampon, la CEC et la saturation en K et Ca ont été mesurés.

Chaque site comportait 3 doses de calcium (0, 50 et 100 kg Ca/ha) sous forme de sulfate de calcium, trois doses d'azote (100, 150 et 200 kg N/ha) sous forme de sulfate d'ammonium et 3 doses de potassium (80, 160 et 240 kg K_2O /ha) sous forme de chlorure et de sulfate de potassium dans une proportion de 50% de K. La concentration en calcium du gypse granulaire (CaSO_4) utilisé était de 18,5% Ca; elle a été vérifiée en laboratoire. Le dispositif expérimental était de type factoriel $3 \times 3 \times 3$ (3 facteurs à 3 niveaux) et comportait 27 traitements arrangés en 3 blocs aléatoires complets. Chaque parcelle était composée de 2 rangs de 5 mètres espacés de 1 mètre. Une fumure complémentaire de base de 150 kg P_2O_5 /ha et 50 kg Mg/ha a été appliquée. Tous ces engrais ont été appliqués 5 cm sous la semence à la plantation.

Des tubercules certifiés cv Supérieur coupés en deux dans le sens longitudinal, ont été plantés à une distance de 25 cm centre à centre des plantons pour un peuplement de 40,000 plants/ha. Le précédent cultural était la pomme de terre dans chacun des sites.

L'analyse de la 4^e feuille, à partir des points de croissance, a été effectuée au stade de floraison. La détermination du poids spécifique des tubercules a été effectuée à partir de la différence du poids dans l'air et dans l'eau, sur un échantillon d'environ 3 kg. Un indice de cœur brun à la récolte a été établi pour chaque parcelle en prélevant au hasard dix tubercules. Ceux-ci sont tranchés en deux et classés en 4 catégories : sain (0), vitreux (1), brun (2) et bruncreux sévère (3). Le nombre de tubercules dans chaque classe multiplié par l'indice de la classe (exprimé entre parenthèse) permet de quantifier l'indice de cœur brun de la parcelle. Le rendement total et vendable a été déterminé en séparant les tubercules avec un diamètre supérieur à 58 mm sur une longueur de rang récolté de 10 mètres. Un échantillon de 5 tubercules par parcelle a été recueilli. Ceux-ci ont été lavés puis pelés. La partie enlevée au pelage, représentant le périoderme, a été séchée puis analysée. La partie restante a été taillée pour récupérer un cube d'environ 4 cm de côté dans le cœur, représentant la zone médullaire. Celle-ci a été séchée puis analysée pour déterminer son contenu en N, K et Ca.

RÉSULTAT

Rendement total et vendable

C'est l'azote qui produit le plus fort accroissement du rendement total et vendable (Tableaux 2 et 3). Le rendement maximum vendable a été obtenu avec la dose 200 kg N/ha (Tableau 4). Les besoins

Tableau 3. Rendements vendables de pommes de terre selon les doses N, K et Ca et analyse de variance

Trait.	Doses			Champs			
	N	K ₂ O	Ca	SL-93 Rendement vendable (t/ha)	G-93 Rendement vendable (t/ha)	SL-94 Rendement vendable (t/ha)	SL-95 Rendement vendable (t/ha)
1	100	80	0	26,7	25,6	18,2	16,1
2	100	80	50	32,4	23,0	18,6	20,3
3	100	80	100	32,6	22,0	18,4	18,4
4	100	160	0	33,2	17,8	23,2	23,9
5	100	160	50	33,5	22,4	18,5	19,2
6	100	160	100	30,9	20,5	20,7	21,0
7	100	240	0	32,6	23,2	19,3	20,1
8	100	240	50	33,7	20,7	18,9	20,1
9	100	240	100	31,9	22,4	20,3	27,8
10	150	80	0	31,2	26,5	25,2	22,2
11	150	80	50	35,9	20,7	21,9	24,6
12	150	80	100	31,0	24,2	18,2	18,8
13	150	160	0	34,4	19,0	24,5	18,6
14	150	160	50	30,4	23,6	20,0	20,4
15	150	160	100	33,2	31,2	23,4	20,4
16	150	240	0	35,2	24,3	24,5	25,5
17	150	240	50	32,9	24,2	23,3	25,2
18	150	240	100	36,0	29,3	20,5	21,5
19	200	80	0	35,1	29,0	25,9	26,2
20	200	80	50	35,8	27,3	33,4	27,5
21	200	80	100	35,7	25,7	25,0	19,8
22	200	160	0	36,7	27,7	36,3	23,0
23	200	160	50	37,8	28,9	29,9	27,5
24	200	160	100	33,6	25,7	29,4	27,2
25	200	240	0	36,4	22,2	26,5	17,0
26	200	240	50	33,9	27,0	32,7	29,9
27	200	240	100	36,3	34,7	32,3	23,3
F		N		4,4*	9,1**	26,0**	7,8**
		K		0,61	1,0	0,80	1,72
		Ca		0,23	2,67*	0,91	3,24*
		N x Ca		0,39	1,45	0,94	1,43
		N x K		0,36	0,64	0,09	2,94*
		K x Ca		1,50	1,91	1,64	2,27
		N x K x Ca		0,75	1,08	0,63	1,39
C.V. (%)				12,6	10,2	20,2	16,4
ppds (5 %)				2,3	2,1	3,5	2,0

Tableau 4. Rendements totaux et vendables des tubercules selon les doses N, K et Ca appliquées

Doses (kg/ha)	SL-93 Rendement total	SL-93 Rendement vendable	G-93 Rendement total	G-93 Rendement vendable	SL-94 Rendement total	SL-94 Rendement vendable	SL-95 Rendement total	SL-95 Rendement vendable
100 N	39,6 b*	32,0 b	33,5 b	21,4 c	32,0 c	18,3 c	31,1 b	20,8 b
150 N	40,8 ab	33,4 ab	35,4 ab	24,2 b	34,2 b	21,9 b	30,6 b	21,9 b
200 N	42,7 a	35,3 a	36,7 a	27,1 a	40,3 a	30,6 a	37,7 a	24,6 a
80 K ₂ O	39,9 a	32,9 a	35,0 a	23,8 a	34,4 a	22,7 a	31,3 a	21,5 a
160 K ₂ O	41,3 a	33,6 a	35,1 a	23,6 a	35,4 a	24,8 a	31,2 a	22,4 a
240 K ₂ O	41,9 a	34,2 a	35,6 a	25,3 a	36,8 a	23,3 a	31,9 a	23,4 a
0 Ca	41,1 a	33,5 a	34,5 b	23,5 b	36,1 a	24,9 a	30,8 a	21,4 b
50 Ca	41,3 a	34,0 a	34,6 b	23,5 b	35,4 a	23,4 a	32,8 a	23,9 a
100 Ca	40,8 a	33,2 a	36,5 a	25,7 a	35,1 a	22,5 a	30,8 a	22,0 ab

*Test Waller-Duncan**Les données porteuses d'une même lettre ne diffèrent pas entre elles au seuil statistique P = 0,05*

Tableau 5. Poids spécifique des tubercules selon les doses N, K et Ca et analyse de variance

Traitement	Doses			SL-93	G-93	SL-94	SL-95
	N	K ₂ O	Ca				
				Poids spécifique			
1	100	80	0	1,085	1,080	1,095	1,092
2	100	80	50	1,083	1,082	1,089	1,085
3	100	80	100	1,082	1,080	1,092	1,090
4	100	160	0	1,079	1,074	1,087	1,085
5	100	160	50	1,080	1,076	1,093	1,088
6	100	160	100	1,077	1,075	1,089	1,086
7	100	240	0	1,075	1,073	1,089	1,083
8	100	240	50	1,076	1,073	1,091	1,084
9	100	240	100	1,075	1,075	1,084	1,081
10	150	80	0	1,081	1,078	1,092	1,086
11	150	80	50	1,078	1,076	1,094	1,083
12	150	80	100	1,074	1,078	1,093	1,085
13	150	160	0	1,078	1,073	1,089	1,083
14	150	160	50	1,078	1,072	1,088	1,084
15	150	160	100	1,078	1,074	1,090	1,081
16	150	240	0	1,072	1,069	1,084	1,081
17	150	240	50	1,073	1,071	1,087	1,082
18	150	240	100	1,073	1,071	1,084	1,079
19	200	80	0	1,075	1,076	1,087	1,078
20	200	80	50	1,075	1,078	1,091	1,085
21	200	80	100	1,075	1,075	1,089	1,084
22	200	160	0	1,071	1,074	1,083	1,078
23	200	160	50	1,071	1,074	1,082	1,081
24	200	160	100	1,069	1,071	1,088	1,085
25	200	240	0	1,072	1,071	1,085	1,081
26	200	240	50	1,071	1,070	1,087	1,079
27	200	240	100	1,066	1,070	1,088	1,079
F		N		29,3**	8,2**	4,9*	11,0**
		K		20,81**	21,1**	10,9**	7,8**
		Ca		2,45	0,13	0,31	0,06
		N x Ca		0,13	1,62	1,03	1,38
		N x K		1,08	0,54	2,05	0,47
		K x Ca		0,89	0,60	1,22	0,78
	N x K x Ca		1,38	0,39	1,24	1,21	
C.V. (%)				0,33	0,34	0,34	0,38
ppds (% %)				0,002	0,002	0,002	0,002

élevés en engrais azotés de la pomme de terre sont en accord avec les travaux de Giroux (1982) et Allard (1972) qui ont mesuré les effets des doses d'azote sur le rendement pouvant atteindre 200 kg N/ha. Cependant, pour des raisons de qualité des récoltes et pour des raisons environnementales, il n'est pas souhaitable d'appliquer des doses d'azote supérieures à celles des grilles du CPVQ inc. (1996).

Pour le potassium, aucun effet significatif n'a été mesuré sur le rendement total et vendable. La dose de K la plus faible, soit 80 kg K₂O/ha, a suffi pour une production maximale dans ces sols; la teneur en potassium des sols se situait entre 185 et 284 kg/ha (Tableaux 2, 3 et 4).

Pour le calcium, deux champs ont répondu significativement à l'application de CaSO₄ sur le rendement total ou vendable (Tableaux 2, 3 et 4). Il s'agit des champs G-93 et SL-95. Le sol G-93 de la série Saint-Jude est un sable loameux très acide

Tableau 6. Poids spécifique des tubercules selon les doses N, K et Ca utilisées.

Doses (kg/ha)	SL-93	G-93	SL-94	SL-95	Moyenne
100 N	1,079 a*	1,076 a	1,090 a	1,086 a	1,083 a
150 N	1,075 b	1,074 b	1,089 a	1,083 b	1,080 b
200 N	1,072 c	1,073 b	1,087 b	1,081 b	1,078 c
80 K ₂ O	1,078 a	1,078 a	1,091 a	1,085 a	1,083 a
160 K ₂ O	1,075 b	1,074 b	1,088 b	1,083 a	1,080 b
240 K ₂ O	1,072 c	1,071 c	1,087 b	1,081 b	1,078 c
0 Ca	1,076 a	1,074 a	1,088 a	1,083 a	1,080 a
50 Ca	1,076 a	1,075 a	1,089 a	1,083 a	1,081 a
100 Ca	1,074 a	1,074 a	1,089 a	1,083 a	1,080 a

* Test Waller-Duncan

Les données porteuses d'une même lettre ne diffèrent pas entre elles au seuil statistique P = 0,05

Tableau 7. Indice de coeur brun des tubercules selon les doses N, K et Ca et analyse de variance

Traitement	Doses			SL-93	G-93	SL-94	SL-95
	N	K ₂ O	Ca				
						Poids spécifique	
1	100	80	0	4,3	13,7	4,0	9,3
2	100	80	50	2,0	17,0	4,7	10,7
3	100	80	100	2,3	14,0	2,3	6,3
4	100	160	0	1,7	14,3	3,7	5,7
5	100	160	50	2,7	12,3	4,3	5,3
6	100	160	100	1,3	15,3	3,0	7,0
7	100	240	0	2,6	13,0	2,3	5,0
8	100	240	50	5,3	14,0	2,7	6,0
9	100	240	100	1,3	11,3	3,3	4,3
10	150	80	0	4,3	14,3	5,3	10,7
11	150	80	50	2,6	15,7	3,3	10,0
12	150	80	100	3,0	15,7	2,0	10,0
13	150	160	0	3,7	12,3	2,3	8,3
14	150	160	50	2,3	13,7	3,0	10,3
15	150	160	100	3,3	12,3	2,0	6,7
16	150	240	0	3,7	12,7	1,7	6,3
17	150	240	50	2,3	12,0	2,7	5,7
18	150	240	100	1,7	11,7	4,0	3,3
19	200	80	0	3,3	14,3	2,3	10,0
20	200	80	50	4,0	12,3	2,7	7,7
21	200	80	100	4,7	14,3	1,3	7,0
22	200	160	0	3,0	14,3	3,7	9,7
23	200	160	50	1,7	15,0	3,3	6,0
24	200	160	100	2,3	10,7	2,3	8,0
25	200	240	0	2,0	10,0	5,0	5,3
26	200	240	50	1,7	12,0	4,7	6,3
27	200	240	100	1,0	11,7	4,3	4,7
		N		0,78	0,95	0,18	1,6
		K		1,41	4,7*	0,07	14,1**
		Ca		0,60	0,46	0,82	2,2
F		N x Ca		0,36	0,05	0,17	0,59
		N x K		0,90	0,32	1,52	0,92
		K x Ca		0,70	0,15	1,23	0,43
		N x K x Ca		0,98	1,13	0,55	0,92
		C.V. (%)		41,9	23,0	40,1	36,9
		ppds (% %)		1,5	1,7	1,6	1,5

Tableau 8. Indice de cœur brun des tubercules selon les doses N, K et Ca utilisées.

Doses (kg/ha)	SL-93	G-93	SL-94	SL-95	Moyenne
100 N	2,6 a*	13,9 a	3,4 a	6,6 a	6,6
150 N	3,0 a	13,4 a	2,9 a	7,9 a	6,8
200 N	2,6 a	12,7 a	3,3 a	7,2 a	6,5
80 K ₂ O	3,4 a	14,6 a	3,1 a	9,1 a	7,6
160 K ₂ O	2,4 a	13,4 ab	3,1 a	7,4 b	6,6
240 K ₂ O	2,4 a	12,0 b	3,4 a	5,2 c	5,8
0 Ca	3,2 a	13,2 a	3,4 a	7,8 a	6,9
50 Ca	2,7 a	13,8 a	3,5 a	7,6 a	6,9
100 Ca	2,3 a	13,0 a	2,7 a	6,4 a	6,1

* Test Waller-Duncan

Les données porteuses d'une même lettre ne diffèrent pas entre elles au seuil statistique P = 0,05

Tableau 9. Concentration en N, K et Ca des feuilles à la floraison selon les doses N, K et Ca appliquées.

Doses (kg/ha)	SL-93	G-93	SL-94	SL-95	Moyenne
N	% N	% N	% N	% N	% N
100	4,31 a*	4,34 a	3,87 a	4,59 a	4,28
150	4,89 b	4,79 b	4,26 b	4,96 b	4,73
200	5,17 c	4,98 c	4,56 c	5,19 c	4,98
K ₂ O	% K	% K	% K	% K	% K
80	4,83 a	4,71 a	3,87 a	4,01 a	4,36
160	5,60 b	4,90 b	4,59 b	4,66 b	4,94
240	6,11 c	5,25 c	4,99 c	5,14 c	5,35
Ca	% Ca	% Ca	% Ca	% Ca	% Ca
0	1,08 a	0,49 a	1,04 a	0,89 a	0,88
50	1,09 a	0,51 a	1,07 a	0,92 a	0,90
100	1,09 a	0,52 a	1,10 a	0,93 a	0,91

* Test Waller-Duncan

Les données porteuses d'une même lettre ne diffèrent pas entre elles au seuil statistique P = 0,05

(pH 5,0) contenant 433 kg Ca/ha échangeable avec une saturation en calcium de 12,4%. C'est un cas typique où l'insuffisance de calcium affecte les rendements. Le rendement total et vendable s'accroît d'environ 2 t/ha avec une application de 100 kg Ca/ha. Les interactions N x Ca, K x Ca et N x K x Ca sont non significatives sur le rendement total et vendable. Pour ce qui est du champ SL-95 de la série Fourchette, l'effet du calcium est significatif uniquement sur le rendement vendable; sa saturation en Ca est de 18,6%. Les autres champs SL-93 et SL-94 sur le loam graveleux Fourchette ont des teneurs et des saturations en calcium plus élevées (entre 1353 et 1487 kg Ca/ha et 23,8 et 26,8% saturation Ca) (Tableau 1). Il semble que les sols avec moins de 20 % de saturation en calcium présentent un risque de déficience calcique plus élevé, pouvant affecter les rendements de la pomme de terre, du moins pour le cultivar Supérieur. Van Lierop *et al.* (1982) ont obtenu une réponse significative sur le rendement de pommes de terre dans certains sols de faible teneur en calcium échangeable par l'addition de chaux. Ils ont attribué cet effet à l'action de la chaux sur l'acidité des sols et la réduction de la toxicité de Al et Mn. Il n'est pas exclu que la déficience en calcium soit également en cause. Ceci démontre que le chaulage des sols acides devrait d'abord être effectué pour corriger la déficience en Ca des sols. Par la suite, si le chaulage ne suffit pas, le recours à la fertilisation calcique peut être envisagé. De plus, l'analyse de la saturation en calcium des sols devrait être considérée en plus du pH à l'eau et du pH tampon des sols dans la stratégie de chaulage des sols à pommes de terre, en visant à redresser la saturation en Ca à près de 30 %.

Poids spécifique

Un élément important de la qualité de la pomme de terre est son poids spécifique directement relié au contenu en matière sèche et en amidon des tubercules. Tous les champs étudiés ont démontré une baisse significative du poids spécifique avec les doses d'azote. La baisse de poids spécifique est de 1,083 à 1,078 pour les doses de 100 à 200 kg N/ha (Tableaux 5 et 6). Cette diminution est généralement attribuée à l'effet de l'azote sur le cycle physiologique de la pomme de terre, qui retarde la maturité des tubercules et l'élaboration des sucres en amidon (Allard 1972). Cette perte de la qualité liée à la fertilisation azotée vient nuancer l'effet de l'azote sur le rendement. La qualité biologique de la récolte ne varie pas de la même manière que le rendement. Les doses très élevées d'azote, nécessaires au rendement maximum, et la baisse de qualité biologique associée nous indiquent que la recherche de hauts rendements par la fertilisation azotée se fait au détriment de la qualité pour le consommateur et qu'un compromis doit être trouvé entre le rendement maximum et la qualité maximum.

Le potassium affecte aussi négativement le poids spécifique de façon significative. Giroux (1982) avait déjà démontré la relation inverse entre les doses de K et le poids spécifique des tubercules. La raison est cependant différente de celle de l'azote. Contrairement à l'azote, le potassium agit positivement sur la conversion des sucres en amidon. Comme on retrouve beaucoup de potassium au niveau des tubercules, entre 100 et 200 kg/ha dans la récolte, ceci crée un appel d'eau dans les cellules qui a comme effet de diminuer la teneur en matière sèche et d'abaisser le poids spécifique des tubercules. La surfertilisation en potassium se fait donc aussi au détriment de la qualité des tubercules. La baisse moyenne de poids spécifique est de 1,083 à 1,078 pour les doses de K₂O de 80 à 240 kg K₂O/ha (Tableaux 5 et 6). Le calcium appliqué sous forme CaSO₄ n'a eu aucun effet significatif sur le poids spécifique des tubercules. Cette observation confirme celle de Locascio *et al.* (1992) obtenue avec trois cultivars de pommes de terre.

Indice de cœur brun

Le cœur brun est présent à un niveau faible à élevé selon les sites. Le champ G-93 est particulièrement affecté (Tableaux 7 et 8). Il n'a pas été possible d'établir un lien entre cet indice et les doses d'azote ou de calcium appliquées. Ceci signifie que si le calcium est impliqué dans le cœur brun au niveau des tubercules, les doses de calcium utilisées ont été peu efficaces pour corriger cette déficience. Les travaux de Lehoux (1997) ont également démontré que les doses de 50 et 100 kg/ha de Ca ont peu d'effet sur l'incidence du cœur brun.

Pour le potassium, dans deux champs sur quatre, les doses de K ont réduit l'incidence du cœur brun. Ceci est assez surprenant si on considère que le potassium est susceptible d'aggraver la déficience calcique de la pomme de terre. Il est difficile d'expliquer ce phénomène, mais il se pourrait que, même si le potassium présente des effets antagonistes au niveau de l'absorption du calcium dans le feuillage, il puisse réduire le cœur brun au niveau des tubercules.

Teneur en éléments nutritifs dans les tissus végétaux

Azote

La teneur en azote total des feuilles s'accroît avec les doses de N (Tableau 9). La concentration jugée suffisante est de 5% au moment de la floraison (Cambouris 1991). Les teneurs en N mesurées sont généralement inférieures à ce niveau, sauf pour la dose 200 kg N/ha. L'accroissement du rendement jusqu'à la dose 200 kg N/ha semble en relation avec la concentration en N des feuilles.

La concentration en N du périoderme et de la moelle des tubercules est également affectée positivement par les doses N (Tableaux 10 et 11). Dans le périoderme, la concentration moyenne en N est de 2,20, 2,42 et 2,62% N pour les doses 100, 150 et 200 kg N. Dans la moelle, la concentration moyenne en N est de 1,83, 1,98 et 2,18% N respectivement pour les mêmes doses. Les doses N ont donc pour effet d'accroître la teneur en azote des tubercules. Cependant, on ne dispose pas de niveau de suffisance en N dans les tubercules, mais, d'après nos résultats, il serait d'environ 2,6% dans le périoderme et 2,2% dans la moelle pour le cultivar Supérieur.

Potassium

La teneur en potassium des feuilles s'accroît proportionnellement avec les doses de K (Tableau 9). Une concentration de 4,5% est jugée suffisante pour une production maximale (Cambouris 1991). Cette concentration de suffisance est obtenue avec la dose de 80 kg K₂O/ha dans deux champs et avec la dose 160 kg K₂O/ha dans deux autres champs. La dose optimale pour le rendement a été de 80 kg K₂O/ha pour tous les champs. Les tissus du périoderme et de la moelle des tubercules sont fortement affectés par les doses de K (Tableaux 10 et 11). La concentration en K du périoderme varie en moyennede 2,90, 3,15 et 3,35% pour les doses 80, 160 et 240 kg K₂O/ha. Dans la moelle, les concentrations en K sont de 1,73, 1,93 et 2,11% K respectivement pour les mêmes doses de K. Le potassium est donc un élément très mobile qui migre facilement vers les tubercules. La pomme de terre peut être considérée comme une bonne source de potassium. Cependant, des niveaux de K trop élevés diminuent le poids spécifique et la matière sèche des tubercules. On ne connaît pas le niveau de suffisance en K dans les tubercules mais, d'après nos résultats, il serait d'environ 2,9% dans le périoderme et 1,8% dans la moelle pour le cultivar Supérieur.

Calcium

Contrairement à l'azote et au potassium, les doses de calcium appliquées n'affectent pas le contenu en Ca des feuilles, du périoderme et de la moelle des tubercules (Tableaux 9, 10 et 11). La teneur en Ca foliaire montre que deux champs ont des concentrations inférieures au niveau de suffisance de 1% en calcium. Ce sont les champs G-93 et SL-95. Ces deux champs ont répondu significativement aux apports de calcium et ont démontré des indices de cœur brun particulièrement élevés dans les tubercules. Les deux autres champs ont des teneurs près du niveau de suffisance dans les feuilles et des apports de Ca n'ont pas affecté les rendements dans ces deux champs. La comparaison des rapports nutritifs N-K-Ca des feuilles confirme la forte déficience calcique du champ G-93 (tableau 12).

Tableau 10. Teneur en N, K et Ca du périoderme des tubercules de pommes de terre

Doses (kg/ha)	SL-93	G-93	SL-94	SL-95	Moyenne
	% N	% N	% N	% N	% N
100 N	2,39 a*	2,33 a	1,75 a	2,33 a	2,20
150 N	2,65 b	2,53 b	1,86 ab	2,64 b	2,42
200 N	2,93 c	2,70 c	2,05 c	2,78 c	2,62
	% K	% K	% K	% K	% K
80 K ₂ O	2,93 a	3,31 a	2,71 a	2,65 a	2,90
160 K ₂ O	3,16 b	3,53 b	3,00 b	2,91 b	3,15
240 K ₂ O	3,38 c	3,72 c	3,17 c	3,12 c	3,35
	% Ca				
0 Ca	0,10 a	0,059 a	0,078 a	0,077 a	0,078
50 Ca	0,10 a	0,063 a	0,084 a	0,079 a	0,082
100 Ca	0,10 a	0,068 a	0,083 a	0,080 a	0,083

*Test Waller-Duncan

Les données porteuses d'une même lettre ne diffèrent pas entre elles au seuil statistique P = 0,05

Tableau 11. Teneur en N, K et Ca des tissus médullaires des tubercules de pommes de terre (base sèche)

Doses (kg/ha)	SL-93	G-93	SL-94	SL-95	Moyenne
	% N	% N	% N	% N	% N
100 N	1,91 a*	2,03 a	1,56 a	--	1,83
150 N	2,04 ab	2,22 b	1,69 b	--	1,98
200 N	2,35 b	2,37 c	1,82 c	--	2,18
	% K	% K	% K	% K	% K
80 K ₂ O	1,66 a	1,95 a	1,57 a	--	1,73
160 K ₂ O	1,85 b	2,15 b	1,80 b	--	1,93
240 K ₂ O	2,04 c	2,33 c	1,95 c	--	2,11
	% Ca	% Ca	% Ca	% Ca	% Ca
0 Ca	0,017 a	0,013 a	0,021 a	--	0,017
50 Ca	0,018 a	0,013 a	0,021 a	--	0,017
100 Ca	0,017 a	0,013 a	0,021 a	--	0,017

*Test Waller-Duncan

Les données porteuses d'une même lettre ne diffèrent pas entre elles au seuil statistique P = 0,05

Tableau 12. Rapports des éléments nutritifs N-K-Ca souhaitables et ceux mesurés dans les feuilles de 4 champs de pommes de terre (cv. Supérieur)

Éléments	Rapports souhaitables	Rapports mesurés*			
		SL-93	G-93	SL-94	SL-95
K/N	0,94	0,92	1,02	0,91	1,00
N/Ca	5,88	4,79	10,2	4,38	5,83
K/Ca	5,33	5,19	10,0	4,41	5,57

*Les doses des éléments N, K et Ca considérées pour établir ces rapports soit respectivement de 200 kg/ha N, 160 kg/ha K₂O et 0 kg/ha Ca

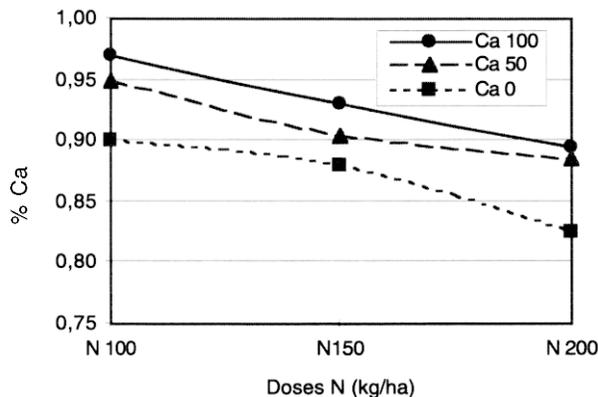


Figure 1. Effet des doses de calcium et d'azote sur les concentrations en calcium des feuilles de pomme de terre à la floraison (Moyenne de tous les champs expérimentaux).

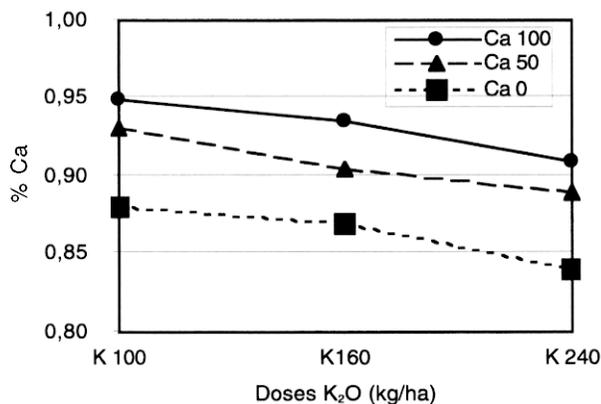


Figure 2. Effet des doses de calcium et potassium sur les concentrations en calcium des feuilles de pomme de terre à la floraison (Moyenne de tous les champs expérimentaux).

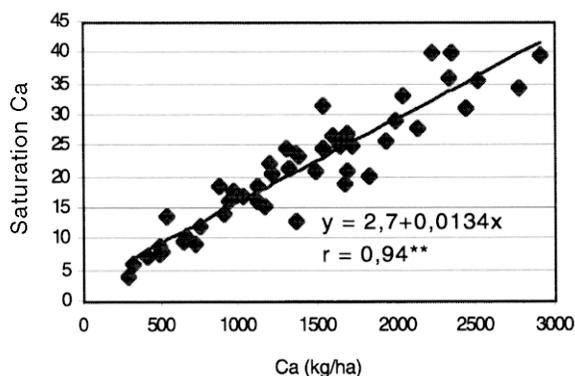


Figure 3. Relation entre la saturation en calcium des sols utilisés pour la culture de la pomme de terre et la teneur en calcium échangeable

Il semble que la teneur en Ca foliaire est reliée à la production si la concentration est inférieure à 0,9%. Par contre, les apports de 50 et 100 kg Ca appliqués ont eu des effets très limités, voire nuls, sur le contenu en Ca des feuilles ou des tubercules, même dans les sols déficients en Ca (Tableaux 9, 10 et 11). De plus, les doses N et K utilisées ont eu pour effet de réduire les teneurs en calcium foliaire (Figures 1 et 2). Cet effet antagoniste démontre que les fortes doses d'engrais N et K sont des facteurs prédisposant à la déficience calcique. Il semble difficile d'augmenter de façon appréciable la concentration en calcium des feuilles et des tubercules par l'utilisation d'engrais calcique en mélange avec les autres engrais. Il faut recourir à des applications beaucoup plus importantes que celles utilisées. Locascio *et al.* (1992) préconisent l'incorporation de 450 kg Ca/ha, soit plus de 2000 kg/ha de gypse pour corriger la déficience calcique dans les sols légers acides de la Floride. La faible absorption et la faible mobilité du Ca obligent à recourir à des doses très élevées de Ca qui constituent davantage des amendements calciques des sols que des engrais pour les cultures. Ces apports élevés ont pour effet d'accroître la saturation en Ca des sols sans produire de variation brusque du pH. La concentration critique en calcium dans le périoderme se situe aux environs de 0,18% alors qu'elle est d'environ 0,018% dans la moëlle.

Teneur et saturation en calcium des sols

Il existe une relation très étroite entre la teneur en calcium échangeable des sols loameux et sableux du Québec et leur saturation en calcium (Figure 3). Cette relation a été établie à partir des données de l'Inventaire de la dégradation des sols du Québec, Tabi *et al.*, (1990). Il s'agit très souvent de sols avec moins de 20 % de saturation en calcium, dans le cas de la culture de la pomme de terre.

Les résultats de notre étude démontrent que les niveaux de saturation des champs G-93 et SL-95 sont nettement trop faibles pour la culture de la pomme de terre et qu'ils devraient être redressés. Le niveau critique se situe à environ 20%. Il apparaît donc souhaitable de redresser la saturation en calcium des sols cultivés en pommes de terre à un niveau d'environ 30%. Il est suggéré de faire ce changement graduellement par des chaulages successifs modérés de manière à minimiser le risque de gale associé à la variation brusque du pH. Cette stratégie apparaît meilleure que de recourir à une fertilisation calcique. Toutefois, lorsqu'il n'est pas prévu de chauler, le recours à la fertilisation calcique peut s'avérer nécessaire. Il faudra également trouver des modes et des sources de fertilisation calcique plus efficaces que ceux utilisés. Le choix des cultivars moins sensibles, dans les sols à risque de déficience en Ca, se révèle très important. De même, dans les sols chaulés, l'usage de cultivars résistant à la gale peut être préférable.

CONCLUSION

Les sols utilisés pour la culture de la pomme de terre, souvent légers et très acides, ont des teneurs et des niveaux de saturation en calcium faibles et susceptibles de créer des problèmes pour la pomme de terre. Une baisse de rendement ou une déficience calcique avec une incidence sur le cœur brun peuvent en résulter. Le niveau de saturation critique en calcium se situe environ à 20%. Deux champs sur quatre ont révélé des effets sur le rendement vendable d'application de sulfate de calcium, particulièrement pour la dose de 100 kg Ca/ha sous forme CaCO₃. Une déficience calcique particulièrement importante a été diagnostiquée dans le champ G-93 contenant 433 kg Ca/ha et 12,4% de saturation Ca. Les teneurs en calcium des feuilles à la floraison se situaient à environ 0,50, bien inférieures à la concentration critique de 0,9%. Cette déficience a occasionné un important problème de cœur brun. Les analyses foliaires indiquent que la fertilisation calcique, aux doses de 50 et 100 kg Ca/ha, n'accroît pas la concentration en calcium des feuilles et des tubercules. De plus, les doses de N et K appliquées contribuent à réduire les teneurs en Ca foliaire et constituent un facteur prédisposant à la déficience calcique. L'application de 50 ou 100 kg Ca/ha en bande avec les autres engrais s'est avérée incapable de corriger la déficience calcique et d'éliminer le cœur brun. Le redressement du niveau de saturation des sols, jusqu'au niveau optimal de 30 %, devrait être réalisé de façon graduelle par des chaulages successifs pour réduire les risques de déficience en calcium. De plus, d'autres modes et sources de fertilisation calcique devraient être évalués sur cette culture pour corriger plus adéquatement cette déficience. Les fumures N et K ont réduit les poids spécifiques des tubercules, alors que les applications de Ca n'ont pas eu d'effet.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allard, J. 1972. L'effet de trois niveaux d'azote, de phosphore et de potassium sur la qualité de chips de pommes de terre cultivées sur quatre types de sols dans la région de Joliette (Québec). Thèse. Université Laval. 44 p.
- Cambouris, A.N. 1991. Établissement et validation de normes diagnostiques d'éléments majeurs pour la pomme de terre. Thèse. Université Laval.
- CPVQ inc. 1996. Grille de référence en fertilisation. 2e ed. 128 p.
- DeKoch, P.C., P.W. Dyson, A. Hall et F.B. Grabowska. 1975. Metabolic changes associated with calcium deficiency in potato sprouts. *Potato Res.* 18 : 573-581.
- Giroux, M. 1982. Effet des doses, des sources et des modes d'apport de l'azote sur le rendement et la maturité de la pomme de terre cultivée sur différents types de sols du Québec. *Can. J. Soil Sci.* 62 : 503-517.
- Giroux, M. 1982. Étude comparative du chlorure et du sulfate de potassium sur le rendement, la nutrition minérale et la qualité des tubercules. *Agriculture.* Sept. 82 : 9-12.
- Hooker, W.J. 1983. Nutrient imbalance : calcium dans *Compendium of potato diseases.* Am. Phytopathological Soc. 125 p.
- Lehoux, N. 1997. Effets d'une fertilisation en calcium et en bore sur les rendements et l'incidence du cœur brun de la pomme de terre. Thèse de maîtrise. Université Laval. 77 p.
- Locascio, S.J., J.A. Bartz et D.P. Weingartner. 1992. Calcium and potassium fertilization grown in north Florida. I. Effects on potato yield and tissue Ca and K.
- Simmons, K.E. et K.A. Kelling. 1987. Potato responses to calcium application on several soil types. *Am. Pot. J.* 64 : 119-136.
- Simmons, K.E. et K.A. Kelling, R.P. Wolkowski et A. Kelman. 1988. Effect of calcium source and application method on potato yield and cation composition. *Agron. J.* 80 : 13-21.
- Smith, O. 1977. *Potatoes : Production, storing, processing.* Avipub. Inc. Westport. 777p.
- Tabi, M., L. Tardif, D. Carrier, G. Laflamme et M. Rompré. 1990. Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Entente auxiliaire Canada-Québec. 71 p.
- Tisdale, S.L., W.L. Nelson et J.B. Beaton. 1985. *Soil fertility and fertilizers.* Macmillan pub. Co., New-York. 754 p.
- Tzeng, K.C., A. Kelman, K.E. Simmons et K.A. Kelling. 1986. Relationship of calcium nutrition to internal brown spot of potato tubers and sub-apical necrosis of sprouts. *Am. Pot. J.* 87-97.
- Van Lierop, W., T.S. Tran, G. Banville et S. Morissette. 1982. Effect of liming on potato yields as related to soil pH, Al, Mn and Ca. *Agron. J.* 74: 1050-1055.
- Wallace, T. et F.J. Hewitt 1948. Effect of calcium deficiency on potato sets in acid soils. *Nature* 161: 28.
- Yelle, S. 1993. Rôle et gestion des fertilisants : calcium, bore et magnésium. Colloque sur la pomme de terre. Une pomme de terre au cœur sensible. CPVQ, p. 77-84.