

Fertilisation du concombre de transformation. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 09 : Concombre de transformation.

Document présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :

Landry, C., J. Forest-D., C.-A. Joseph, S. Houde, 2022. Fertilisation du concombre de transformation. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Fascicule 09. Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 48 pages.

<https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE ET GESTIONNAIRE DE PROJET

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.

BASE DE DONNÉES

Simon Guillemette, M. Sc.
Mandela M. Jacques, M. Sc.
Lélia Anderson, agr., M. Sc. B. Ing.
Olivier Breton-Bourgault, agr.

PROGRAMMES D'ANALYSE

Stéphanie Houde, agr., M. Sc.
Julie Forest-Drolet, agr., M. Sc.
Michèle Grenier, M. Sc.
Alexandre Leblanc, biologiste, M. Sc.
Anaïs Charles, Ph. D.

VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN NUTRITION DES CULTURES

Christine Landry, agr., biologiste, Ph. D.
Julie Forest-Drolet, agr., M. Sc.
Claude-Alla Joseph, Ph. D.
Stéphanie Houde, agr., M. Sc.

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Christine Landry
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380 poste 640
Télécopie : 418 644-6855
Courriel : christine.landry@irda.qc.ca

PARTENAIRES

 PARTENARIAT
CANADIEN pour
l'AGRICULTURE

Canada Québec 

Ce projet a bénéficié d'une aide financière en vertu du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC).

MISE EN CONTEXTE

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a reçu du MAPAQ le *Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023* (MIRVRF). Un premier volet du Mandat était de créer une base de données (BD) et d'y colliger les données validées des essais du *Programme de soutien à l'innovation horticole* (PSIH, 2004-2008, carotte seulement), du *Programme de soutien aux essais de fertilisation des cultures maraîchères* (PSEFCM, 2008-2012) et du *Programme de soutien aux essais de fertilisation* (PSEF, 2013-2018). Un second volet du mandat consistait à vérifier la possibilité de bonifier la base de données avec les travaux d'autres équipes de recherche québécoises ou de régions pédoclimatiques compatibles lorsque possible. Un vaste travail de recherche a permis l'envoi de dizaines de requêtes visant la récupération et la valorisation de travaux antérieurs. Les documents reçus à l'issue de cette démarche ont été validés et homogénéisés. Les données utiles ont été extraites et intégrées à la base de données, sur approbation des expéditeurs. Ultimement, ce sont les calculs aux fins de la révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui bénéficieront de cette démarche à grande échelle. Dans un troisième volet du MIRVRF, des essais au champ supplémentaires ont été réalisés dans cinq cultures (citrouille et rutabaga en sol minéral; oignon sec, oignon vert et radis en sol organique) afin d'améliorer la représentativité de certaines catégories de sol ciblées lors du précédent mandat octroyé à l'IRDA (*Mandat Plan de révision des grilles de référence en fertilisation du Québec*, 2017-2020). Le dernier volet du MIRVRF consistait à déterminer les indicateurs et les intervalles des classes de fertilité de sol, ainsi que les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) qui leur sont associées, pour les cultures sélectionnées.

Les nouvelles classes de sol et leurs VSRF associées, ainsi que des pistes de réflexion lorsqu'une absence de donnée empêche l'obtention des VSRF par calcul, sont soumises par l'IRDA au Comité scientifique (CS). Celui-ci a pour mandat d'entériner les propositions de l'IRDA afin de produire les prochaines grilles de référence en fertilisation du Québec dans le cadre de rencontres IRDA-CS coordonnées par le MAPAQ. Lors de ces travaux, certaines modifications peuvent ainsi être apportées sur la base de l'expertise agronomique, par exemple pour les classes de sol dans lesquelles il n'y a pas assez de données pour établir une valeur par calcul. Ainsi, les grilles publiées par le MAPAQ peuvent présenter certaines différences en comparaison aux résultats de l'IRDA. Au total, jusqu'à 37 grilles (azote, phosphore et potassium) pourront être produites sur la base de travaux de l'IRDA couvrant les cultures de la carotte, du pois, du haricot, du blé, de l'avoine, de l'orge, de la betterave, de l'oignon espagnol, du cornichon (azote seulement), des prairies de graminées et de légumineuses, de la citrouille et du rutabaga en sol minéral. À celles-ci pourront s'ajouter 7 grilles (azote, phosphore et potassium) traitant de l'oignon vert, du radis et de l'oignon jaune sec (potassium seulement) en sol organique. Ces grilles fourniront aux producteurs et aux agronomes québécois un nouvel outil permettant de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources. Les documents présentant les grilles officielles sont disponibles sur le site web du MAPAQ. Les intervenants qui souhaitent consulter les rapports scientifiques (fascicules) sur lesquels s'appuient les grilles MAPAQ sont invités à consulter la fiche de la chercheuse Christine Landry sur le site web de l'IRDA, où se retrouvent l'ensemble des publications, à cette adresse :

<https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>

NOTE AU LECTEUR

Ce document présente les résultats scientifiques d'essais de fertilisation. La grille officielle publiée par le MAPAQ fait l'objet d'une publication séparée. Celle-ci peut différer des valeurs scientifiques de référence en fertilisation obtenues par l'IRDA et présentées dans ce document en raison de la prise en compte de considérations agronomiques, techniques, autres lors des travaux conjoints entre l'IRDA et le Comité scientifique, sous la coordination du MAPAQ.

TABLE DES MATIÈRES

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES.....	9
1.1 PROVENANCE DES DONNÉES.....	9
1.2 LOCALISATION DES SITES.....	10
1.3 PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS.....	11
1.4 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET TRAITEMENTS.....	12
1.4.1 DISPOSITIF.....	12
1.4.2 TRAITEMENTS.....	13
1.5 RENDEMENTS.....	15
1.6 ASPECTS ADDITIONNELS POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	16
1.6.1 VARIÉTÉ CULTURALE.....	16
1.6.2 PRÉCÉDENT CULTURAL.....	17
1.6.3 IRRIGATION.....	17
1.7 ANALYSE EXPLORATOIRE.....	17
1.8 CALCULS ET ANALYSES STATISTIQUES.....	18
1.8.1 DÉTERMINATION DES CLASSES DE FERTILITÉ DES SOLS.....	18
1.8.2 DÉTERMINATION DES DOSES OPTIMALES DE FERTILISANTS.....	20
1.8.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET QUANTITÉS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS EXPORTÉS.....	21
1.8.4 ANALYSES SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES, LES PERTES À LA RÉCOLTE ET LES PERTES À L'ENTREPOSAGE.....	22
2. FERTILISATION AZOTÉE.....	24
2.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES.....	24
2.2 DÉTERMINATION DES DOSES AGRONOMIQUES OPTIMALES.....	24
2.2.1 RECHERCHE D'INDICATEURS DE FERTILITÉ DU SOL.....	24
2.2.2 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LE RENDEMENT VENDABLE.....	25
2.2.3 EFFET DE LA DOSE D'AZOTE SUR LA QUALITÉ, LES CALIBRES ET LES PERTES À LA RÉCOLTE.....	29
2.3 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN AZOTE.....	31
2.4 NITRATE RÉSIDUEL À LA RÉCOLTE.....	33
2.5 FERTILISATION AZOTÉE PROPOSÉE ET COMPARAISON AVEC LES RECOMMANDATIONS AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	34
3. FERTILISATION PHOSPHATÉE.....	39
3.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES.....	39
3.2 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN PHOSPHORE.....	39
4. FERTILISATION POTASSIQUE.....	41
4.1 PORTRAIT ET REPRÉSENTATIVITÉ DES DONNÉES.....	41
4.2 DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL ET EXPORTATIONS EN POTASSIUM.....	41
5. CONCLUSION.....	43
6. FERTILISATION DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION — VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION.....	44
REMERCIEMENTS.....	44
7. RÉFÉRENCES.....	45
ANNEXE I.....	48

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DES SITES DES ESSAIS DE FERTILISATION DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION	10
TABLEAU 2. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION AZOTÉE	13
TABLEAU 3. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION PHOSPHATÉE	14
TABLEAU 4. DESCRIPTION DES TRAITEMENTS DES ESSAIS DE FERTILISATION POTASSIQUE	14
TABLEAU 5. STATISTIQUES DESCRIPTIVES SUR LES DONNÉES BRUTES (AVANT L'ANALYSE EXPLORATOIRE) DES RENDEMENTS EN CONCOMBRES DE TRANSFORMATION DES ESSAIS N, P ET K.....	15
TABLEAU 6. VARIÉTÉS CULTURALES AYANT FAIT L'OBJET DES ESSAIS N DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION.....	17
TABLEAU 7. BILAN DE LA VALIDATION DES DONNÉES À L'ISSUE DE L'ANALYSE EXPLORATOIRE	18
TABLEAU 8. CALIBRES DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION.....	23
TABLEAU 9. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS N DE CONCOMBRES DE TRANSFORMATION POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	24
TABLEAU 10. VALEURS CRITIQUES DES INDICATEURS DE SOL SIGNIFICATIFS SELON LES TESTS DE CATE-NELSON POUR LES ESSAIS N DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION	25
TABLEAU 11. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN N DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION, SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	32
TABLEAU 12. FERTILISATION AZOTÉE DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION – VALEURS SCIENTIFIQUES DE RÉFÉRENCE EN FERTILISATION.....	36
TABLEAU 13. COMPARAISON DES RECOMMANDATIONS EN N POUR LA PRODUCTION DE CONCOMBRES DE TRANSFORMATION AU CANADA ET À L'ÉTRANGER.....	38
TABLEAU 14. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS P POUR DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	39
TABLEAU 15. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN P ₂ O ₅ DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION, SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL	40
TABLEAU 16. RÉPARTITION DES BLOCS DES ESSAIS K SELON DIFFÉRENTES CLASSES DE PROPRIÉTÉS DE SOL APRÈS LA VALIDATION DES DONNÉES	41
TABLEAU 17. CONCENTRATIONS ET EXPORTATIONS EN K ₂ O DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION, SELON LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL.....	42

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES SITES	11
FIGURE 2. DISTRIBUTION DES BLOCS DES ESSAIS DANS LE TRIANGLE DES TEXTURES.	12
FIGURE 3. RENDEMENT VENDABLE MOYEN ET TOTAL PAR SITE DES EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION.	16
FIGURE 4. DÉFINITIONS DES QUADRANTS D'UN TEST DE PARTITION BINAIRE DE CATE-NELSON (1979).....	20
FIGURE 5. RÉSULTATS DES ANALYSES DE VARIANCE SUR LA RÉPONSE DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION AUX DOSES CROISSANTES D'AZOTE.....	28
FIGURE 6. CALIBRES DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION À LA RÉCOLTE SELON LES DOSES DE N.	30
FIGURE 7. PERTES DE RENDEMENTS À LA RÉCOLTE PAR RAPPORT AU RENDEMENT TOTAL EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION AZOTÉE, TOUTES TEXTURES CONFONDUES.....	30
FIGURE 8. CAUSES DE DÉCLASSEMENT OU DE REJET À LA RÉCOLTE DES CONCOMBRES DE TRANSFORMATION EN FONCTION DES TRAITEMENTS DE FERTILISATION.	31
FIGURE 9. EXPORTATIONS D'AZOTE DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION EN FONCTION DES RENDEMENTS VENDABLES SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).....	32
FIGURE 10. INDICES NITRATE DES TRAITEMENTS D'AZOTE DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION AUX PROFONDEURS 0-30 ET 30-60 CM DANS LES SOLS G1 VS G2-G3, AU MOMENT DE LA RÉCOLTE.	34
FIGURE 11. EXPORTATIONS DE PHOSPHORE DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION EN FONCTION DES RENDEMENTS VENDABLES SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	40
FIGURE 12. EXPORTATIONS DE POTASSIUM DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION EN FONCTION DES RENDEMENTS VENDABLES SELON LES VARIÉTÉS (A) ET LE DIAGNOSTIC NUTRITIONNEL (B).	42

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES ESSAIS ET DES ANALYSES

Le concombre de transformation (cornichon) est produit principalement dans le sud du Québec, par treize entreprises québécoises sous contrat avec la Fédération des producteurs de légumes de transformation du Québec (PLTQ, 2021). Deux acheteurs-transformateurs se partagent la totalité des récoltes, lesquelles s'élevaient à 7 471 tonnes courtes¹ en 2021, soit 8 237 tonnes métriques (PLTQ, 2021). Il est à noter que les essais réalisés dans le cadre de cette étude tiennent compte exclusivement de la culture du concombre de transformation et excluent donc, celle du cornichon frais, laquelle se distingue par des différences dans la régie (ex. plasticulture, espacement des rangs, etc.). Les informations sur la régie de culture utilisée lors des essais sont présentées à la section 1.4.

1.1 Provenance des données

Dans le cadre du MIRVRF, les classes de sol et les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF) du concombre de transformation cultivé en sol minéral ont été déterminées à partir des données collectées dans le cadre du *Programme de soutien aux essais de fertilisation* (PSEF), pour lequel les essais se sont déroulés entre 2014 et 2018. Au total, 20 sites ont été établis pour les essais N, et 10 sites pour les essais P et K. En raison du faible nombre de sites pour les essais de fertilisation phosphatée (10 sites) et potassique (10 sites), seules les valeurs de référence en fertilisation azotée ont été déterminées dans le cadre de ce travail. Les données des essais P et K ont cependant été conservées pour le calcul des valeurs d'exportations (sections 3.2 et 4.2). Une description sommaire de ces sites, avant la validation des données, est présentée au Tableau 1.

¹ 1 tonne courte = 1 tonne impériale = 907 kilogrammes

Tableau 1. Description sommaire des sites des essais de fertilisation du concombre de transformation

Site	Essais	Série de sol	Région ¹	Variété	Date de semis	Durée de	Nb	S-L-A ²	MO ³	ISP ₁ ⁴	K _{M3} ⁵	Population plants/ha	Rdt kg/ha
						l'essai	récoltes						
						jrs	%	%	%	ppm			
1	NPK	Sainte-Rosalie	14	Puccini	27 mai 2016	87	6	37-37-26	3,2	5,7	102	49 213	118 232
2	NP	Baudette	14	Puccini	29 mai 2017	92	6	14-59-27	3,0	8,7 ⁵	126	52 056	53 342
3	N	Baudette	14	Puccini	13 juin 2017	77	6	38-46-16	2,7	14,9	81	52 493	68 044
4	NPK	Baudette	14	Puccini	03 juin 2014	91	7	14-60-26	3,1	5,0	72	48 776	87 947
5	N	Soulanges	14	Puccini	27 mai 2016	88	6	54-31-15	3,6	3,1	114	49 213	71 635
6	NK	Baudette	14	Puccini	13 juin 2017	77	6	46-38-16	1,9	30,3	109	52 274	115 850
7	N	Baudette	14	Puccini	05 juin 2015	90	8	15-54-31	2,7	20,7	134	49 213	120 342
8	NPK	Baudette	14	Puccini	05 juin 2015	90	8	27-46-27	2,3	24,4	113 ⁵	48 994	117 045
9	N	Aston*	16	Arabian	01 juin 2015	84	10	78-11-10	2,9	23,9	95	63 867	116 299
10	N	Aston*	16	Arabian	01 juin 2017	89	11	75-12-13	3,0	23,1	132	83 990	88 151
11	NPK	Aston*	16	Eureka	23 mai 2016	95	10	29-50-21	2,1	5,9	74	43 526	52 387
12	NPK	Courval	16	Arabian	02 juin 2017	83	10	57-15-29	3,0	5,8 ⁵	126	110 893	54 529
13	NP	Courval	16	Arabian	28 mai 2018	85	10	44-18-38	5,2	1,5	38	.	70 936
14	N	Sainte-Brigide	16	Supremo	17 juin 2016	87	11	59-26-14	3,3	9,0	50	60 149	48 629
15	NK	Sainte-Hélène	16	Puccini	02 juin 2017	83	10	60-25-16	3,5	32,3	156	67 367	60 917
16	NPK	Aston*	16	Eureka	01 juin 2015	84	10	74-12-14	2,9	16,9	102 ⁵	56 430	116 521
17	N	Corbin*	16	Arabian	02 juin 2014	87	12	65-16-20	2,3	13,2	162	43 963	61 972
18	N	Corbin*, Saint-Urbain	16	Eureka	23 mai 2016	92	10	55-18-27	3,4	8,2	145	46 807	51 945
19	NPK	Saint-Patrice	17	Puccini	29 mai 2015	87	10	81-5-14	3,1	10,3	45	54 243	85 721
20	NPK	Kierkoski	16	Eureka	01 juin 2014	88	12	32-29-38	2,3	13,7 ⁵	107	43 088	44 408
Moyenne						87	9	48-30-22	3,0	13,8	104	56 661	80 243

¹ Région administrative; 14 : Laurentides; 16 : Montérégie, 17 : Centre-du-Québec.

² S-L-A : Sable-limon-argile.

³ MO : Matière organique du sol, mesurée par perte au feu.

⁴ ISP₁ : Indice de saturation du sol en phosphore (P/Al)_{Mehlich-3}.

⁵ K_{M3} : Teneur du sol en K mesuré par la méthode Mehlich-3. Les valeurs en kg/ha ont été obtenues en multipliant les résultats de l'analyse (en ppm) par le facteur 2,24.

* Série de sol présentant une discontinuité texturale autour de 40 à 50 cm de profondeur.

⁵ Site pour lequel la richesse supposée a été mal évaluée pour les essais P (colonne ISP₁) ou pour les essais K (colonne K_{M3}).

1.2 Localisation des sites

La répartition géographique des essais de concombre de transformation est présentée à la Figure 1. Afin d'assurer une bonne représentativité de la production du Québec, les essais étaient principalement concentrés dans les régions de Lanaudière (8 sites sur 20) et de la Montérégie (11 sites sur 20), tandis qu'un seul site a été établi dans la région du Centre du Québec. Toutefois, tel que montré sur la carte (Figure 1), ce site était situé dans un secteur limitrophe entre les régions de Montérégie et du Centre du Québec. Comme l'indique le MAPAQ dans son plus récent *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des légumes de transformation au Québec (2021)*, cette concentration de la production s'explique par les conditions climatiques favorables, mais surtout par la localisation des usines de légumes de transformation, majoritairement situées en Montérégie.

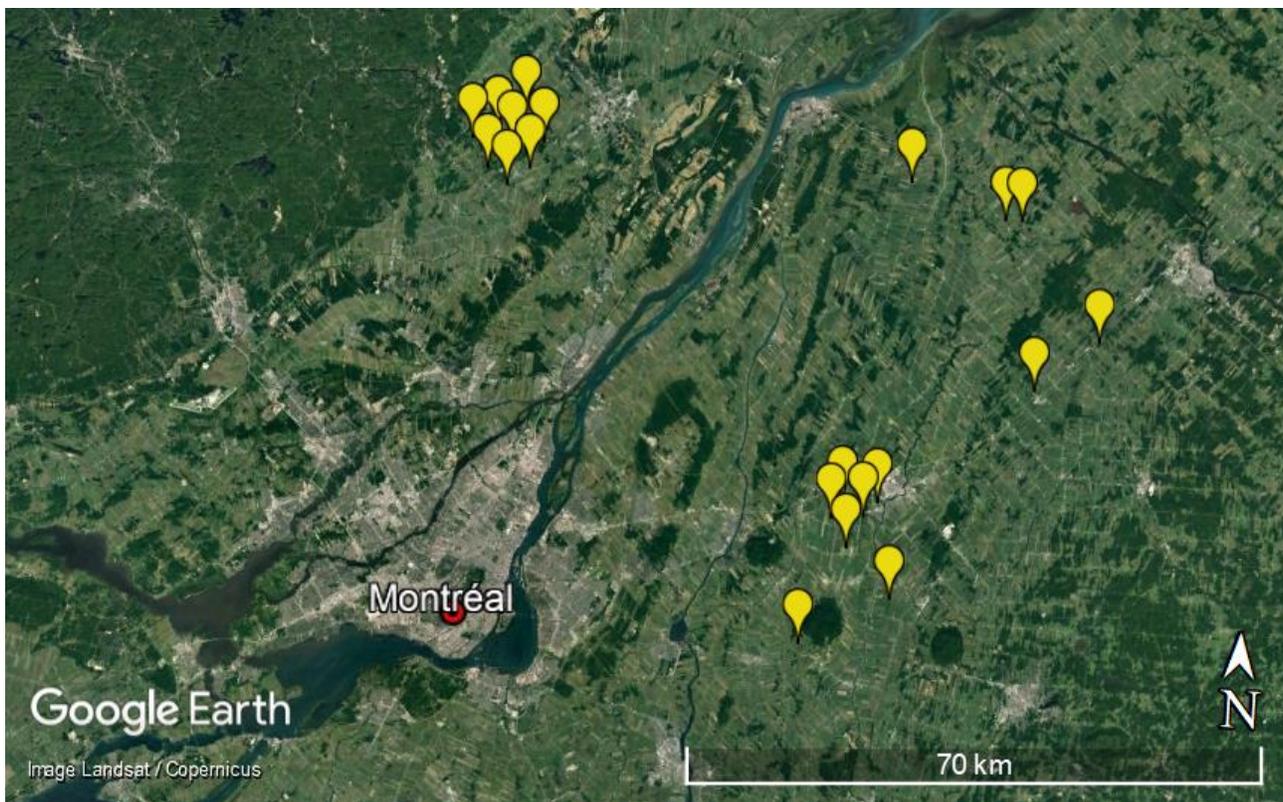


Figure 1. Répartition géographique des sites L'emplacement des repères est approximatif et vise seulement à représenter la répartition géographique des sites sur le territoire du Québec.

1.3 Propriétés physico-chimiques des sols

Les analyses physico-chimiques du sol (0-20 cm) ont été effectuées par bloc afin de déterminer avec une plus grande précision les indicateurs de fertilité des sols et de pouvoir associer les analyses de sol et les rendements d'un bloc. Plusieurs paramètres de caractérisation des sols ont été mesurés, comme le pH_{eau} , la teneur en matière organique (méthode par perte au feu; MO_{PAF}), la concentration en éléments nutritifs extraits au Mehlich-3, la masse volumique apparente, la granulométrie, la distribution des agrégats stables à l'eau et la teneur en $N-NO_3$ (0-30 cm) au semis (méthode KCl 2M). De plus, pour chaque site, une analyse des profils de sol a été réalisée par l'équipe de pédologie de l'IRDA, laquelle a servi à identifier les séries de sols et leurs particularités pédologiques, à valider le groupe de textures et à prendre en considération l'état de santé du sol lors de l'analyse exploratoire des données collectées. Les essais ont été menés sur des sols à textures fine à grossière (Figure 2). Ceux-ci contenaient entre 10 et 42 % d'argile, bien que la majorité en eût moins de 30 %. Aucun essai n'a été effectué sur des sols à forte proportion d'argile, en raison du fait que la culture des concombres de transformation nécessite des sols meubles et bien drainés (MAAARO, 2011), et qu'il est recommandé d'éviter la production en sol argileux (CRAAQ, 2010). De l'ensemble des essais, 38 % ont été réalisés sur des sols du groupe de textures G1, 40 % sur des G2 et 22 % sur des G3. À noter que les sols de la classe texturale « loam sablo-argileux » ont été attribués au groupe G2 plutôt qu'au G1, conformément aux recommandations de l'équipe de pédologie de l'IRDA (C. Bossé, comm. perso., 2021), puisqu'ils partagent davantage les caractéristiques des G2. De plus, certains blocs

qui présentait des résultats d'analyses à la limite de leur classe texturale ont été reclassés dans les catégories de G2 vers G1 (sites 8, 12 et 13) ou de G3 vers G2 (sites 16 et 17), toujours selon les recommandations de l'équipe de pédologie de l'IRDA.

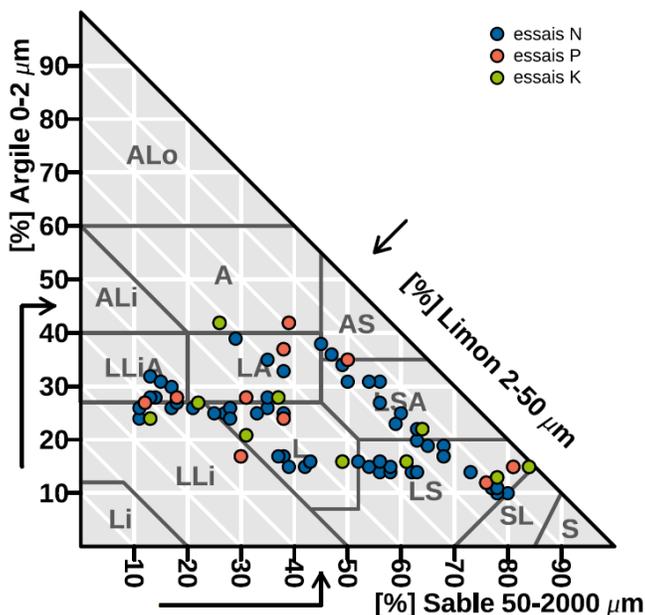


Figure 2. Distribution des blocs des essais dans le triangle des textures. ALo : Argile lourde ; ALi : Argile limoneuse ; A : Argile ; LLiA : Loam limono-argileux ; LA : Loam argileux ; AS : Argile sableuse ; L : Loam ; Li : Limon ; LLi : Loam limoneux ; LSA : Loam sablo-argileux ; LSA : Loam sableux ; SL : Sable loameux ; S : Sable.

Le pH_{eau} moyen du sol était de $6,4 \pm 0,5$, ce qui est adéquat en regard de la recommandation du CRAAQ (2010), qui définit le pH adéquat pour la culture du concombre de transformation à 6,3. À titre de comparaison, les recommandations ontariennes recommandent un pH de 6,1 à 6,5 pour cette culture (MAAARO, 2011). Dans l'ensemble, 90 % des blocs contenaient entre 2 et 4 % de MO_{PAF} (étendue de 1,7 à 5,6 %). L'indice de saturation en phosphore (ISP_1 ; P_{M3}/Al_{M3}), a varié de 1,1 à 59,1 %, avec les deux tiers des données qui étaient sous 15 % d' ISP_1 (moyenne de 13,2 %). Enfin, la teneur du sol en K_{M3} s'étendait de 29 à 185 ppm avec une moyenne de 100 ppm K_{M3} .

1.4 Dispositif expérimental et traitements

1.4.1 Dispositif

La structure du dispositif expérimental des essais était la même à tous les sites. Les traitements (doses d'engrais testées) étaient disposés selon un plan en trois blocs complètement aléatoires. Les unités expérimentales étaient composées d'un seul rang d'une longueur de 6 m, dans laquelle une zone tampon de 1 m était délimitée à chaque extrémité. Lors des essais, certaines particularités agronomiques qui distinguent le concombre de transformation du concombre frais ont été prises en compte. Conformément à la régie des producteurs, les essais ont été réalisés sur sol nu (aucune plasticulture). Sur le rang, les plants étaient espacés de 0,11 à 0,25 m

selon les sites. La distance entre les rangs était de 0,76 m, cependant, afin de faciliter les passages et les récoltes, les rangs de part et d'autre de chaque parcelle ont été détruits. Les essais ont été entretenus selon une régie de production conventionnelle commerciale.

1.4.2 Traitements

Hormis les essais N, les traitements ont été choisis en fonction de la classe de fertilité du sol pour l'élément testé (Essais N, section 1.4.2.1; Essais P, section 1.4.2.2; essais K, section 1.4.2.3). L'indice de saturation en P (ISP₁) et la teneur du sol en K_{M3} ont été utilisés pour classer les sols comme étant « à faible teneur » ou « à teneur élevée » en P ou K de part et d'autre d'un seuil préétabli. Des doses plus élevées de P₂O₅ et de K₂O ont donc été testées dans les sols dits « faiblement saturés en P » ou « à « faibles teneurs en K_{M3} » que dans les sols dits « à teneur élevée ». Par ailleurs, trois sites des essais P et deux sites des essais K ont été mal classés de part et d'autre des seuils présumés de non-réponse de la culture et n'ont pas reçu les doses prévues (ex.: doses élevées pour des sites à forte teneur en K_{M3}). Enfin, pour tous les essais, seul l'élément testé variait, les autres éléments nutritifs majeurs étant fixés au troisième niveau de traitement de chaque élément afin qu'ils ne soient pas limitants.

Les protocoles indiquaient que la première application d'engrais devait se faire en bande au moment du semis. Toutefois, cette application a été effectuée en post-levée, alors que les plants étaient approximativement au stade cotylédon (7 à 14 jours après le semis). Un soin particulier était apporté afin de ne pas déraciner les plantules. Cette adaptation a résulté de la nécessité de visualiser l'emplacement des plants pour assurer le bon positionnement de l'engrais.

1.4.2.1 Doses d'azote

Les traitements des essais de fertilisation azotée correspondaient à cinq doses se situant entre 0 et 180 kg/ha. Ces doses ont été appliquées sous forme de nitrate d'ammonium calcique (27-0-0) en deux apports (Tableau 2). Une première application des engrais était effectuée en bande, c.-à-d. dans un sillon creusé et refermé avec une binette, après la levée. La deuxième application, aussi en bande, avait lieu au stade 5-6 feuilles, ou environ 3 à 4 semaines après le semis. Aux sites 10, 12 et 15, des erreurs dans l'application des engrais ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau (0, 73, 97, 120 et 143 kg N/ha). Tous les traitements de N comportaient des apports complémentaires de P₂O₅ et de K₂O afin que ces éléments ne soient pas limitants.

Tableau 2. Description des traitements des essais de fertilisation azotée

Essais N			Dose de N (kg/ha)				
Année	Nombre de sites	Mode et période d'application	T1	T2	T3	T4	T5
2014-2018	20 ¹	En bande au semis	0	50	70	90	110
		En bande au stade 5-6 feuilles	0	40	50	60	70
Apport total			0	90	120	150	180

¹ Des erreurs d'application aux sites 10, 12 et 15 ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau (0, 73, 97, 120 et 143 kg N/ha).

1.4.2.2 Doses de phosphore

Les traitements des essais de fertilisation phosphatée correspondaient à cinq doses se situant entre 0 et 180 kg P₂O₅/ha ou 0 à 120 kg P₂O₅/ha selon la saturation du sol en phosphore (Tableau 3). Ces doses ont été appliquées sous forme de superphosphate triple (0-46-0), en bande après la levée. Tous les traitements de P comportaient des apports complémentaires de N et de K₂O correspondant au T3 et T13 des essais N et K afin que ces éléments ne soient pas limitants.

Tableau 3. Description des traitements des essais de fertilisation phosphatée

Essais P				Dose de P ₂ O ₅ (kg/ha)				
Année	Nombre de sites	ISP ₁ ¹	Mode et période d'application	T6	T7	T8	T9	T10
2014-	6	≤ 7,6 ou 13,1 %	En bande au semis	0	90	120	150	180
2018	4	> 7,6 ou 13,1 %	En bande au semis	0	30	60	90	120

² Le seuil d'indice de saturation du sol phosphore (ISP₁) était de 7,6 % dans les sols G1 et 13,1 % dans les sols G2 et G3.

1.4.2.3 Doses de potassium

Les traitements des essais de fertilisation potassique correspondaient à cinq doses se situant entre 0 et 180 kg K₂O/ha ou de 0 à 120 kg K₂O/ha, selon la teneur du sol en K_{M3} (Tableau 4). Ces doses ont été appliquées en deux apports sous forme de muriate de potassium (0-0-60) ou de sulfate de potassium et de magnésium (0-0-22-11Mg) lorsque du Mg était nécessaire. Une première application des engrais était effectuée en bande après la levée. La deuxième application, aussi en bande, avait lieu au stade 5-6 feuilles. Aux sites 12 et 15, des erreurs dans l'application des engrais ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau (0, 35, 70, 105, 140 kg K₂O/ha). Tous les traitements de K comportaient des apports complémentaires de N et de P₂O₅ correspondant au T3 et au T8 des essais N et P afin que ces éléments ne soient pas limitants.

Tableau 4. Description des traitements des essais de fertilisation potassique

Essais K				Dose de K ₂ O (kg/ha)					
Année	Nombre de sites	Teneur du sol en K _{M3} (kg /ha)	Mode et période d'application	T11	T12	T13	T14	T15	
2014- 2017	8 ¹	≤ 400	En bande au semis	0	30	60	90	120	
			En bande au stade 5-6 feuilles	0	60	60	60	60	
				Apport total	0	90	120	150	180
	2	> 400	En bande au semis	0	30	30	60	90	
En bande au stade 5-6 feuilles			0	0	30	30	30		
			Apport total	0	30	60	90	120	

¹ Des erreurs d'application aux sites 12 et 15 ont mené à des doses différentes de celles présentées dans le tableau (0, 35, 70, 105, 140 kg K₂O/ha).

1.5 Rendements

Les récoltes ont débuté 6 à 8 semaines après le semis, lorsque les plants contenaient une bonne quantité de concombres de calibres 3 (31,0 mm < diamètre ≤ 42,0 mm) et 4 (42,0 mm < diamètre ≤ 51,0 mm) et une quantité minimale de rejets. Pour les besoins des essais, les concombres étaient récoltés à la main, bien que la récolte soit ordinairement semi-mécanisée. Ces dernières avaient lieu 1 à 2 fois par semaine pendant 5 à 7 semaines, selon le type de production (conventionnel ou parthénocarpique). Les rendements présentés sont la somme des rendements obtenus pour la totalité des récoltes. Les statistiques descriptives des rendements totaux, des rendements vendables et des pourcentages de pertes à la récolte sont présentées au Tableau 5. Les rendements totaux ont été en moyenne de 91 985 à 102 034 kg/ha. Les rendements vendables, quant à eux, étaient en moyenne de 78 278, 80 594 et 87 731 kg/ha respectivement dans les essais N, P et K. Ceux-ci ont varié de façon importante entre les différents sites et les différents traitements, s'étendant de 13 684 à 149 849 kg/ha. Enfin, les pertes à la récolte (rendement non-vendable) ont représenté en moyenne 15 % du rendement total dans les essais N et P, et 13 % dans les essais K.

Tableau 5. Statistiques descriptives sur les données brutes (avant l'analyse exploratoire) des rendements en concombres de transformation des essais N, P et K

	Essai	N _{obs}	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Rendement total (kg/ha)						
	N	291	91 985	37 437	18 257	172 809
	P	148	95 271	38 375	28 519	193 355
	K	141	102 034	38 140	18 816	173 010
Rendement vendable (kg/ha)						
	N	296	78 278	31 227	17 829	143 783
	P	149	80 594	30 900	21 280	149 849
	K	148	87 731	32 546	13 684	146 612
Pertes (%)						
	N	291	15	8	1	41
	P	148	15	7	4	39
	K	141	13	6	3	31

¹ N_{obs} : nombre d'observations.

Les rendements vendables en fonction des sites et des traitements de fertilisation sont présentés à la Figure 3. Dans tous les essais, les rendements enregistrés ont atteint ou dépassé la moyenne des rendements de références de 2014 à 2018, illustrée par la ligne jaune (34 154 kg/ha). Plusieurs sites ont enregistré des rendements avoisinant le double ou le triple des rendements de référence provinciaux. Ces rendements exceptionnellement élevés pourraient, d'une part, s'expliquer en partie par une récolte plus minutieuse en contexte de recherche par rapport celui d'un contexte commercial. D'autre part, ceux-ci pourraient s'expliquer par le fait que de part et d'autre du rang de récolte, les plants ont été détruits pour des contraintes expérimentales (permettre la circulation sans endommager le rang de récolte, distinguer à quel plant appartenaient les concombres récoltés, etc.). Cet espacement, plus grand que la pratique courante, a pu créer des conditions avantageuses (luminosité, eau, etc.) pour la croissance et la fructification des plants. Enfin, les

écarts entre les sites pourraient s’expliquer par d’autres paramètres comme la densité de population à l’hectare et la variété culturale (Resende et al., 2003) (voir Tableau 6 de la section suivante).

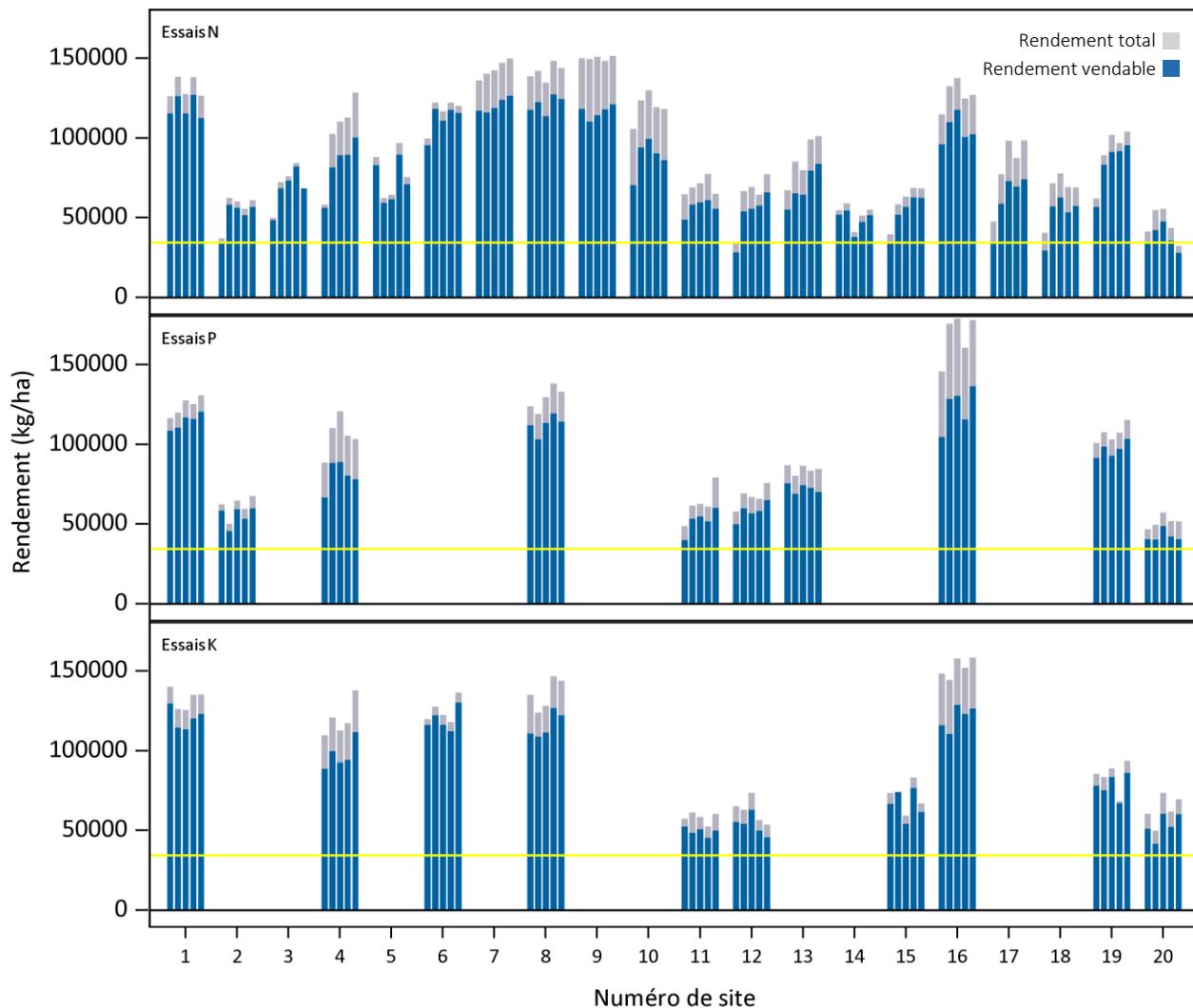


Figure 3. Rendement vendable moyen et total par site des en fonction des traitements de fertilisation. Les traitements de fertilisation sont les doses croissantes d’engrais de l’élément à l’essai et sont détaillés à la section 1.4. Les rendements de référence de la culture (ligne jaune) sont une moyenne des rendements à l’hectare du Québec pour les années 2014 à 2018 (min.: 28 999, max.: 37 978 kg/ha; Financière agricole du Québec, 2014-2018).

1.6 Aspects additionnels pour l’interprétation des résultats

1.6.1 Variété culturale

Les essais ont été réalisés exclusivement avec des variétés utilisées en conditions commerciales. Entre 50 à 60 % des essais ont été menés avec la variété Puccini, de type parthénocarpique, tandis que les autres essais ont été menés avec des variétés de type conventionnel. Les variétés et leurs proportions respectives dans les essais sont détaillées au Tableau 6. De manière générale, la variété Puccini a présenté des rendements beaucoup plus élevés

que les autres variétés. Ces observations supportent l'idée que les variétés parthénocarpique permettraient d'obtenir de meilleurs rendements que celles conventionnelles (CPVQ, 2000).

Tableau 6. Variétés culturales ayant fait l'objet des essais N du concombre de transformation

Variété	Proportion des essais sur lesquels était testée chaque variété (%)			Type de concombre	Rendement vendable moyen (kg/ha)
	N	P	K		
Arabian	25 *	20	10	Conventionnel	70 932
Eureka	20	30	30	Conventionnel	69 455
Puccini	50	50	60	Parthénocarpique	92 791
Supremo	5	0	0	Conventionnel	48 629
Total	100 %	100 %	100 %		81 492

* Par exemple, 25 % des essais N ont utilisé la variété Arabian pour laquelle le rendement moyen —essais N, P et K confondus— était de 70 932 kg/ha.

1.6.2 Précédent cultural

Les essais de concombre de transformation ont suivi des cultures de brocoli (6 sites), de soya (5 sites), de maïs sucré (4 sites) ou de maïs grain (2 sites). Dans des proportions plus faibles (1 site chacun), les essais ont suivi des cultures de blé, de chou ou l'information était manquante.

1.6.3 Irrigation

Dans le contexte de production agricole, l'irrigation permet de prévenir le stress hydrique chez les plantes afin d'assurer un bon fonctionnement physiologique et une nutrition adéquate de ces dernières (FQPFLT, 2017; Janoudi et Widders, 1993) et par conséquent, de garantir une bonne productivité. Un projet de recherche de la Fédération québécoise des producteurs de légumes de transformation (FQPLT) mené sur deux ans rapporte que l'irrigation de plants de concombres parthénocarpiques a diminué la quantité de rejets sans toutefois augmenter les rendements vendables par rapport à des plants non-irrigués (FQPFLT, 2017). Cela concorde avec les observations de Jenni et al. (2007) qui rapportent, toujours sous des conditions climatiques québécoises, que l'irrigation n'a pas accru le rendement vendable des concombres de transformation puisque les précipitations étaient similaires ou supérieures à la normale pour les quatre années à l'étude. Sur l'ensemble des essais de concombre de transformation du PSEF, seulement deux sites ont été irrigués. Les autres sites rapportaient explicitement la non-nécessité de l'irrigation (2 sites) ou l'absence de celle-ci (16 sites). Cela dit, la prise en compte des commentaires des collaborateurs et l'analyse visuelle de la régularité et de la quantité des précipitations de la saison ont servi à identifier les sites qui auraient pu subir un stress hydrique sévère et, le cas échéant, à les exclure des analyses.

1.7 Analyse exploratoire

Lorsque réalisés en plein champ, les essais de fertilisation peuvent faire l'objet de multiples problématiques pouvant entraîner une exclusion de données. Lors de la réalisation des essais, lorsque nécessaire, certaines parcelles ont été abandonnées par l'équipe de terrain pour des raisons diverses, dont la sécheresse, le mauvais établissement dû à la fonte des semis, la présence de maladies foliaires, etc. Dans le cadre du traitement des données, une analyse exploratoire a été également réalisée minutieusement, ce qui a permis entre autres de

détecter la présence de données aberrantes ou influentes, et de vérifier la représentativité des données de rendements en comparaison à ce qui est obtenu en contexte de production commerciale sur la même période. Dans le cadre de cette procédure, les statistiques descriptives sur les rendements et la densité de la population ont été analysées, notamment les coefficients de variation associés aux données de chacun des sites. Par la suite, une attention plus particulière a été portée sur les sites présentant une variation de rendements et de densité de population supérieure à 30 % et à 15 %, respectivement. Pour terminer, une régression robuste a aussi été effectuée pour la détection de données aberrantes en utilisant la procédure *robustreg* et la méthode de l'estimation MM de SAS (Anderson et Schumacker, 2003; SAS Institute inc., 2018).

Le bilan de la validation des données est présenté au Tableau 7. À l'issue de l'analyse exploratoire, 80 % (85, 75 et 75 % des essais N, P et K respectivement) du jeu de données initial a été validé et conservé pour la suite des analyses. La liste des données exclues lors de la validation est présentée à l'Annexe I.

Tableau 7. Bilan de la validation des données à l'issue de l'analyse exploratoire

Essai	Jeu de données initial		Jeu de données final		Validation (%)
	Nb sites	Nb obs.	Nb sites	Nb obs.	
N	20	300	19	255	85
P	10	150	8	113	75
K	10	150	8	112	75

1.8 Calculs et analyses statistiques

La méthodologie générale employée pour le calcul des VSRF et les analyses statistiques préconisées sont similaires pour toutes les cultures traitées dans le MIRVRF. Lorsque des ajustements spécifiques à une culture ont été requis, ceux-ci sont décrits dans la présente section ou directement dans les chapitres des éléments (N, P ou K) requérant ces ajustements. En complément des calculs et analyses, tout au long de la démarche d'établissement des VSRF, divers intervenants du milieu ont été contactés (ex.: conseillers du MAPAQ et de Club conseil en agroenvironnement, producteurs, professionnels de centres de recherche appliquée). Les échanges avec ces spécialistes ont permis de comparer les conditions des essais avec les pratiques culturales en vigueur, afin de valider l'adéquation avec les recommandations (VSRF). Dans les cas où les essais ont été conduits différemment des pratiques en vigueur, ces différences sont mises en évidence dans les notes de bas de tableau et dans les éléments de réflexion amenés par l'IRDA. Dans le cas spécifique du concombre de transformation, ces échanges avec les spécialistes ont permis la validation du mode d'application des engrais, la prise en compte de sensibilités nutritionnelles connues et des caractéristiques édaphiques favorisant spécifiquement le bon établissement de la culture, de même que la considération des méthodes de récolte (biomasse exportée du champ), des particularités liées aux cultivars et des critères liés aux calibres et à la mise en marché.

1.8.1 Détermination des classes de fertilité des sols

La détermination des classes de fertilité des sols est effectuée en se basant sur la partition binaire de Cate-Nelson (Cate et Nelson, 1971; IRDA, 2020a). Ce test de partition consiste à mettre en relation le rendement relatif de la culture (RRel, %) et l'indicateur de prédiction de la fertilité du sol (ex. la teneur en K_{M3}).

Le RRel est calculé par bloc, en divisant le rendement vendable du témoin ($\text{Rendement}_{\text{Témoin}}$) par le rendement vendable maximal ($\text{Rendement}_{\text{Maximal}}$) parmi tous les traitements du bloc, incluant le témoin (Éq. 1). Dans le cas où une unité expérimentale est écartée à l'analyse exploratoire, le rendement maximal du bloc concerné est considéré impossible à déterminer et aucun RRel n'est déterminé.

$$RRel (\%) = \frac{\text{Rendement}_{\text{Témoin}}}{\text{Rendement}_{\text{Maximal}}} \quad (\text{Éq. 1})$$

Un RRel inférieur à 100 % indique une réponse positive de la culture à la fertilisation. À l'opposé, si le rendement maximal est atteint dans la parcelle témoin, le RRel est égal à 100 %, indiquant que le potentiel de rendement de la culture a été atteint sans l'apport du fertilisant testé. La considération des rendements sur une base relative permet, entre autres, d'atténuer les effets de sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité.

Le nuage de points créé est ensuite divisé en quatre quadrants selon un axe vertical et un axe horizontal placés de façon à maximiser le nombre de points dans les quadrants dits vrais négatifs et vrais positifs, tout en minimisant ceux dans les quadrants dits faux négatifs et faux positifs (Figure 4). L'axe vertical correspond au seuil principal d'indicateur de fertilité de sol (axe qui fixe la valeur critique en abscisse, ex. teneur en K_{M3}) qui permet de distinguer deux catégories de sols qui répondent différemment à la fertilisation, habituellement ceux qui répondent davantage de ceux qui répondent peu ou pas à l'apport d'engrais. Ces deux catégories principales peuvent par la suite être resubdivisées par des seuils secondaires en sous-catégories répondant différemment à la fertilisation. Cela est possible en utilisant la procédure de Cope et Rouse (Cope et Rouse, 1973; Benjannet et al., 2018) qui consiste à diviser la valeur critique principale par un facteur arbitraire (ex. divisée ou multipliée par deux ou par quatre) ou, lorsque possible, en exploitant directement la procédure de Cate-Nelson. Pour sa part, l'axe horizontal correspond au rendement relatif optimal (RRel, valeur seuil à l'ordonnée), lequel se trouve généralement fixé autour de 80-85 % (Black, 1993; Cate et Nelson, 1971; Nelson et Anderson, 1977; Pellerin et al., 2006). Des valeurs inférieures ou supérieures peuvent toutefois être sélectionnées dans certains cas, que ce soit pour le seuil principal ou dû à l'élaboration de seuils secondaires. Ainsi, au Québec, Pellerin et al. (2006) rapporte un seuil optimal de rendement relatif aussi faible que 50 % pour la culture de maïs-grain.

Pour s'assurer de la qualité des partitions et de la performance des seuils déterminés, les valeurs du P de Fisher ainsi que les mesures de précision, de sensibilité et de spécificité sont calculées et maximisées (Parent et al., 2013) :

Sensitivité : Probabilité pour qu'une réponse de la culture à la fertilisation soit correctement diagnostiquée dans un sol ayant une caractérisation située en dessous du seuil critique considéré. Ce critère est calculé à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 4) : $VP/(VP+FN)$.

Spécificité : Probabilité pour qu'une non-réponse de la culture à la fertilisation (plateau de l'augmentation des rendements) soit correctement diagnostiquée dans un sol ayant une caractérisation située au-dessus du seuil critique considéré. Ce critère est calculé à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 4) : $VN/(VN+FP)$.

Précision : Probabilité pour que la réponse ou la non-réponse de la culture à la fertilisation soit correctement diagnostiquée pour une analyse de sol donnée. Elle est calculée à partir des nombres d'observations des quadrants suivants (Figure 4) : $(VN+VP) / (VN+FN+VP+FP)$.

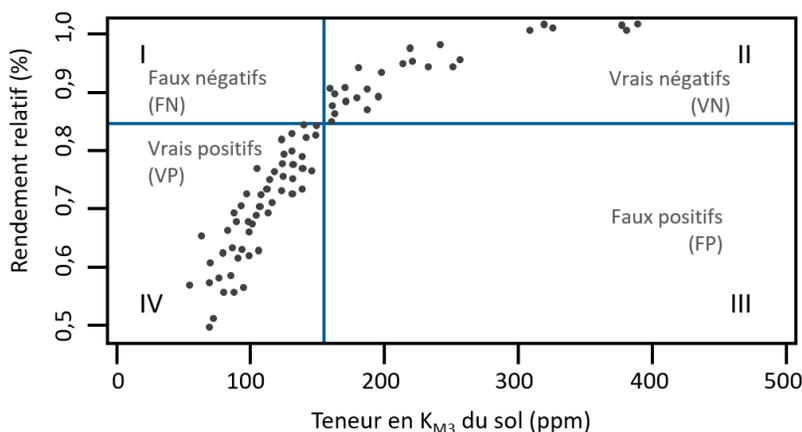


Figure 4. Définitions des quadrants d'un test de partition binaire de Cate-Nelson (1979).

1.8.2 Détermination des doses optimales de fertilisants

Les doses optimales de fertilisants pour chaque classe de fertilité de sol sont calculées par analyses de variances (ANOVA). Ainsi, les ANOVA sont effectuées séparément pour les sols se trouvant de part et d'autre des seuils agronomiques de réponse déterminés avec la procédure expliquée précédemment à la section 1.8.1.

L'effet de l'apport des doses croissantes de fertilisants est étudié en tenant compte du rapport de rendements (ROM, Éq. 2). L'utilisation du ROM permet d'éviter les biais causés par les grandes variations qui pourraient être observées entre les rendements produits en grandes surfaces en contexte de production et ceux obtenus en parcelles de recherche. Comme expliqué précédemment pour le rendement relatif, l'utilisation du ROM permet également d'atténuer les effets des sites et des conditions météorologiques annuelles sur la productivité. Le ROM est calculé pour chaque parcelle fertilisée d'un bloc, en utilisant l'équation suivante (Éq. 2) :

$$ROM = \frac{Rendement_{Fertilisé}}{Rendement_{Témoin}} \quad (\text{Éq. 2})$$

L'ANOVA est effectuée en utilisant la procédure *mixed* de SAS® (SAS Institute Inc., 2013) et en considérant les blocs et les sites comme des effets aléatoires. Lorsque l'ANOVA indique un effet significatif ($P < 0,05$) ou une tendance ($P < 0,12$) à un effet de la dose sur le ROM, des tests de Student (test *t*) sont réalisés afin de faire les comparaisons multiples des moyennes des traitements permettant de déterminer les doses agronomiques optimales menant aux meilleurs rendements. Il est important de souligner qu'en raison de la considération des rendements sur une base relative (ROM), le test de Student permet de faire une comparaison multiple des moyennes des traitements entre elles sans tenir compte de l'effet de la fertilisation par rapport au témoin. Ainsi,

l'absence de différence significative entre les traitements ne traduit pas nécessairement une absence de différence par rapport au témoin. Le calcul des intervalles de confiance à 90 % permet de déterminer si l'augmentation de rendement obtenue pour un traitement donné est numériquement différente en comparaison au témoin. À titre exploratoire, les ANOVA réalisées pour chaque site pris séparément ont également été consultées dans le cadre de la détermination des VSRF.

Puisque les doses à tester dans les divers essais varient parfois selon les années ou que des erreurs d'application ont pu survenir (voir section 1.4), les doses similaires ont dû être regroupées afin d'équilibrer les jeux de données et d'augmenter la puissance de l'ANOVA. Ainsi, les groupes de doses ont été considérés comme des variables catégoriques plutôt que numériques continues dans le modèle statistique. Les groupes de doses sont exprimés sous cette forme dans le présent document : 1-50-60. Dans ce cas, par exemple, il s'agit du 1^{er} groupe de doses testées (1-50-60) et les doses qui le composent vont de 50 à 60 kg/ha de l'élément testé (1-50-60). La VSRF proposée pour une catégorie de sol donnée est basée sur la répartition des doses testées à l'intérieur du groupe correspondant.

1.8.3 Diagnostic nutritionnel et quantités d'éléments nutritifs exportés

Le taux d'humidité et la concentration en éléments nutritifs (majeurs et mineurs) dans les tissus ont été mesurés sur des concombres sains et représentatifs de la parcelle, prélevés entre la 3^e et la 5^e récolte. Le diagnostic nutritionnel a été effectué sur la base des concentrations en éléments nutritifs de la biomasse et des rendements totaux. Enfin, conformément à la réglementation de production actuellement répandue au Québec, les exportations ont été calculées en considérant le rendement vendable de la saison, le tri des concombres vendables vs. non-vendables se faisant habituellement directement au champ. Les données combinées des essais N, P et K ont été considérées pour le calcul. Le jeu de données contient donc l'analyse de tissus de plants ayant reçu, selon les essais, des taux variables de ces trois éléments (ex. analyses du P quand N ou K varient).

Les calculs ont été effectués à partir d'un sous-ensemble d'individus appelé population de tête, regroupant les individus ayant présenté les rendements totaux les plus élevés et des concentrations équilibrées entre les éléments nutritifs qui composent leurs tissus. Les individus présentant de mauvais rendements, de même que ceux carencés ou en excès (prélèvement de luxe) pour certains éléments, ont donc été écartés du calcul.

Par définition, l'état d'équilibre nutritionnel est atteint si l'interaction est positive entre la productivité de la plante et les différents éléments nutritifs favorisant sa croissance (Brown, 1945). Dans le cadre du calcul des VSRF, le diagnostic nutritionnel des tissus de la plante a été effectué en se basant sur la méthode du *Compositional nutrient diagnosis* (CND) développée par Parent et Dafir (1992), puis améliorée par Khiari *et al.* (2001b) et Parent *et al.* (2009). Selon le CND, la composition des tissus de la plante constitue un simplexe complet S^n , de dimension $n+1$, soit un nombre d'éléments nutritifs n additionné d'une valeur de remplissage (Khiari *et al.*, 2001b). Ce principe considère que tout changement de la concentration d'un élément va affecter simultanément celle des autres à l'intérieur du système. Ainsi, à l'optimum, les éléments nutritifs dans la plante agissent en synergie (Khiari *et al.*, 2001a; L. Parent et Dafir, 1992). Les éléments considérés dans la détermination du statut d'équilibre nutritionnel sont le N, le P, le K, le Ca et le Mg.

La méthode utilisée dans le cadre du calcul des VSRF se base sur celle de Parent *et al.* (2009). Toutefois, afin d'améliorer la robustesse du calcul, ces éléments ont été modifiés par l'équipe IRDA (2020b) :

- 1- La méthode de sélection de la population de référence : Cette population est déterminée *a priori* (De Bauw et al., 2016) en sélectionnant le quart supérieur (25 %) des rendements triés en ordre décroissant. Ce sous-groupe dit à haut rendement servira à la détermination numérique, en plusieurs dimensions, de l'équilibre en N, P, K, Ca et Mg (c.-à-d. la norme, voir l'étape 2).
- 2- La méthode de calcul de la norme : Des estimateurs MCD (*Minimum Covariance Determinant*) ont servi à évaluer la norme. Ces estimateurs correspondent à la moyenne (μ_{MCD}) et à la covariance (Σ_{MCD}) d'un sous-ensemble optimal de points (Hubert et Debruyne, 2010). L'utilisation des MCD permet, entre autres, l'obtention d'une composition équilibrée par l'exclusion des individus en déséquilibre nutritif.

Bien que le nombre d'essais P et K ait été insuffisant pour le calcul des VSRF de ces éléments, le diagnostic nutritionnel et le calcul des exportations en P_2O_5 et en K_2O de la culture ont pu être réalisés en combinant l'ensemble des données des essais menés pour les 3 éléments (N, P et K). De plus, cette possibilité s'explique par le fait que contrairement au calcul des VSRF, le diagnostic nutritionnel ne nécessite aucune subdivision des données en plusieurs sous-groupes définis selon le nombre de classes de fertilité de sol. Le calcul des exportations fournit de nouvelles valeurs scientifiques liées à la nutrition du concombre de transformation. En effet, le Québec ne dispose pas à ce jour de valeurs de composition des tissus et d'exportation des éléments produites sous les conditions pédoclimatiques de la province. De plus, ces valeurs sont d'une grande utilité au regard de l'évaluation des diagnostics nutritionnels et des besoins en éléments nutritifs. Celles-ci sont exploitées à maints endroits lors de l'établissement des grilles de référence en fertilisation, par exemple en France, en Grande-Bretagne, aux États-Unis, en Nouvelle-Zélande et en Allemagne (Culman et al., 2020; Defra, 2010; Metz et Nass, 2015; Reid et Morton, 2019; Sullivan et al., 2017). Près du Québec, plusieurs provinces et États américains au sud des Grands Lacs utilisent ces valeurs pour déterminer les apports de P et K, et ce tant pour les doses d'enrichissement, de maintien, que de réduction des teneurs du sol en l'élément visé (Culman et al., 2020; Munroe et al., 2017; Warncke et al., 2004). Par conséquent, dans le cadre de la détermination des VSRF de certaines cultures, les valeurs d'exportations ont pu être utilisées en absence de données en quantité suffisante pour établir des recommandations, particulièrement dans les classes de sol les plus pauvres.

1.8.4 Analyses sur la qualité, les calibres, les pertes à la récolte et les pertes à l'entreposage

Dans les essais N, des analyses complémentaires ont été effectuées afin d'évaluer l'effet des traitements de fertilisation sur la qualité, les calibres et les pertes à la récolte. L'effet de la fertilisation sur les calibres a été mesuré par des analyses de variance. À cette fin, les concombres ont été classés selon les critères définis par les PLTQ (Producteurs de légumes de transformation du Québec) dans la Convention de mise en marché des légumes de transformation (2022). Les critères de classification sont présentés au Tableau 8.

Tableau 8. Calibres des concombres de transformation

	Diamètre
Calibre 1	0,0 à 26,0 mm
Calibre 2	26,1 à 31,0 mm
Calibre 3	31,1 à 42,0 mm
Calibre 4	42,1 à 51,0 mm
Calibre 5	51,1 à 55,0 mm

Les pertes à la récolte consistaient en un diamètre supérieur à 55,0 mm, la présence de malformations, de pourritures, de cicatrices sur plus de 10 % de la surface du concombre, des stries creuses, une mollesse du fruit, ou pouvait être dû à une insolation. Des analyses de variance (modèles linéaires mixtes) ont servi à déterminer si la fertilisation affectait les pertes à la récolte. Des tests de comparaison de moyennes ont permis de préciser les conclusions au besoin.

De plus, lors de la récolte la plus abondante, soit entre la 3^e et la 5^e récolte, un échantillon constitué de 5 concombres représentatifs de la parcelle a été prélevé aléatoirement dans chaque parcelle afin de vérifier la présence de cœurs creux. Puis, les échantillons ont été regroupés pour former un échantillon composite par traitement sur lesquels étaient effectuées les analyses de la biomasse.

2. FERTILISATION AZOTÉE

2.1 Portrait et représentativité des données

Les résultats des analyses physico-chimiques de la couche de sol de surface (0-20 cm) pour les essais N sont résumés au Tableau 9. Environ les deux tiers des blocs avaient un pH_{eau} du sol qui se situait dans l'intervalle de 6,0 à 7,0, ce qui est adéquat pour étudier la réponse à la fertilisation, considérant que le pH optimal pour la culture des cucurbitacées est établi à 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et entre 6,0 et 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011). En ce qui a trait à la texture du sol, 46 % des blocs étaient de texture moyenne (G2). Du reste, les textures fines (G1) et grossières (G3) étaient représentées à proportions égales (27 % chacune). Cette prédominance de sols G2 peut s'expliquer par le fait que la culture des concombres nécessite des sols meubles, riches en éléments nutritifs et bien drainés (CPVQ, 2000; MAAARO, 2011), tandis que les sols lourds, susceptibles à la compaction, ou encore les sols très sableux, sont moins propices à cette culture. Dans les sols G1, les teneurs en MO_{PAF} des blocs ont varié de 2,3 à 5,6 %, bien que la majorité (63 %) de ceux-ci contenaient entre 2 et 3 % de MO_{PAF} . Dans les sols G2 et G3, les teneurs en MO_{PAF} étaient globalement plus faibles. Celles-ci ont varié de 1,7 à 4,0 %, avec, encore une fois, une majorité (58 %) des blocs qui contenaient entre 2 et 3 % de MO_{PAF} . Dans l'ensemble et toutes textures confondues, seulement 6 % des données avaient moins de 2 % de MO_{PAF} et 6 % avaient plus de 5 % MO_{PAF} . Cette sous-représentation des sols peu pourvus et très bien pourvus en MO_{PAF} constitue une limite du jeu de données pour laquelle la réponse à la fertilisation azotée n'a pu être adéquatement étudiée. Quant aux teneurs des sols en $N\text{-NO}_3$ (0-30 cm) au semis, elles s'étendaient de 1 à 30 ppm, avec 28 % des G1 et 74 % des G2-G3 qui étaient sous les 10 ppm. Globalement, les sites ont été établis *a priori* sur des sols qui permettaient l'étude de la réponse à la fertilisation azotée et ne comportaient pas de lacunes majeures.

Tableau 9. Répartition des blocs des essais N de concombres de transformation pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH_{eau}^1	Blocs (%)	MO_{PAF} (%) ²			$N\text{-NO}_3$ (ppm) ³			Groupe de textures ⁴	Blocs (%)
		G1	G2-G3		G1	G2-G3			
≤ 5,5	6	≤ 2	0	8	≤ 5	7	21	G1	27
5,5 – 6,0	17	2 – 3	63	58	5 – 10	21	53	G2	46
6,0 – 7,0	62	3 – 5	15	34	10 – 15	29	13	G3	27
7,0 – 7,5	15	5 – 6	22	0	> 15	43	13	-	-
> 7,5	0	> 6	0	0	-	-	-	-	-

¹ Le pH du sol optimal pour le concombre de transformation est de 6,3 au Québec (CRAAQ, 2010) et de 6,0 à 6,5 en Ontario (MAAARO, 2011).

² Matière organique déterminée par la méthode de perte au feu.

³ Nitrate mesuré au semis dans la couche de sol 0-30 cm, déterminé par la méthode KCl 2M et dosé par colorimétrie.

⁴ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

2.2 Détermination des doses agronomiques optimales

2.2.1 Recherche d'indicateurs de fertilité du sol

Plusieurs variables de sol reconnues dans la littérature scientifique peuvent influencer la réponse des cultures à la fertilisation azotée et ainsi devenir des indicateurs de prédiction de la fertilité. Le potentiel de plusieurs indicateurs à expliquer la réponse à la fertilisation a donc été testé avec le test de Cate-Nelson (1971) : la teneur

en nitrate du sol (N-NO₃ ; 0-30 cm) au semis, la teneur en matière organique du sol (MO_{PAF} ; 0-20 cm) et la teneur en argile du sol (0-20 cm). Lorsque possible, ces indicateurs ont été également testés à l'intérieur des groupes de textures G1, G2 et G3. Pour alléger la présentation des résultats, seuls les tests dont la valeur de *P* est inférieure à 0,12 sont présentés (Tableau 10). Les valeurs critiques obtenues sont ensuite utilisées pour les analyses de variance en tant que seuils de réponse agronomique.

Les indicateurs potentiels de fertilité du sol, les seuils de réponse (*valeur critique*) à la fertilisation azotée ainsi que les paramètres statistiques des tests de Cate-Nelson sont présentés au Tableau 10. Le rapport C/N du sol (0-20 cm) et la teneur en N-NO₃ (0-30 cm) au semis se sont révélés être des indicateurs potentiels de la réponse des concombres de transformation à la fertilisation azotée. Les seuils de N-NO₃ ont été significatifs pour expliquer la réponse à la fertilisation dans les sols G2 et dans les sols G3, tandis que dans les sols G1, le seuil s'est avéré non significatif, probablement à cause d'un trop faible nombre d'observations (*P* = 0,18; N_{obs} = 11; données non présentées). Enfin, contrairement à ce qui est généralement attendu et qui a été observé pour d'autres cultures pour lesquelles des VSRF ont été établies (Landry et al., 2022a, 2022b), la teneur du sol en MO_{PAF} n'a pas été un bon indicateur de fertilité du sol. Cela s'explique peut-être par la faible étendue du jeu de données, concentré entre 2 et 3,5 % de MO_{PAF}.

Tableau 10. Valeurs critiques des indicateurs de sol significatifs selon les tests de Cate-Nelson pour les essais N des concombres de transformation

Indicateur de sol ¹	Groupes de textures ²	N _{obs} ³	Valeur critique	RRel ⁴ (%)	Sensitivité	Spécificité	Précision	<i>P</i>
Rapport C/N	G1, G2, G3	46	11,7	77	0,40	0,87	0,72	0,057
N-NO ₃ au semis (ppm ; 0-30 cm)	G1, G2, G3	46	10,7	82	0,83	0,82	0,83	< 0,001
	G2	22	9,8	82	0,75	0,94	0,91	0,010
	G3	13	13,1	81	1,00	1,00	1,00	0,003
	G2, G3	35	13,1	82	0,71	0,96	0,91	< 0,001

¹ C/N : carbone/azote ; N-NO₃ : nitrate déterminé par la méthode KCl 2M et dosé par colorimétrie.

² G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

³ N_{obs} : Nombre d'observations.

⁴ RRel : Rendement relatif (100 × rendement du témoin/rendement maximum par bloc).

2.2.2 Effet de la dose d'azote sur le rendement vendable

Comme mentionné dans la section 1.8.2, les analyses de variance (ANOVA) de l'effet de la fertilisation sur la productivité des cultures ont été effectuées en utilisant les rapports de rendements (ROM) et les comparaisons multiples de moyennes pour sélectionner le meilleur traitement. Sur les graphiques en forêt (Figure 5), les ROM se situant à droite de la ligne rouge (ROM > 1) témoignent d'une augmentation de rendement due à un apport d'engrais, par rapport à une parcelle témoin non fertilisée en N. Inversement, les ROM à gauche de cette ligne (ROM < 1) témoignent d'une diminution de rendement. En absence de différences significatives entre les traitements, les intervalles de confiances à 90 % permettent de déterminer si le rendement obtenu pour un traitement donné est numériquement différent du témoin.

L'ANOVA a d'abord été effectuée sans indicateur de fertilité de sol en considérant l'ensemble des observations (Figure 5, modèle A). Ensuite, les ANOVA ont été effectuées à l'intérieur des groupes de textures du sol (modèle B). Enfin, les ANOVA ont été effectuées de part et d'autre du seuil significatif de N-NO₃ déterminé par le test de

Cate-Nelson (modèle C), tous les groupes de textures confondus. Seuls les résultats des ANOVA permettant l'interprétation agronomique de la réponse de la culture à l'engrais sont présentés dans le présent rapport.

À la Figure 5, le modèle sans indicateur (A) démontre un effet significatif ($P = 0,021$; $n = 197$) de l'apport des doses croissantes de N sur les ROM. Le test de comparaison des moyennes indique que la dose agronomique optimale, c'est-à-dire la plus petite dose menant au meilleur rendement, a été de 120 kg N/ha. Cette dernière a permis d'obtenir des rendements de 32 à 66 % supérieurs (49 % en moyenne) aux rendements des parcelles sans engrais azoté.

Le modèle suivant (B) illustre les analyses de variance effectuées en fonction des différents groupes de textures de sol. Ce modèle n'a pas permis de préciser la réponse à la fertilisation puisqu'aucune différence significative n'a été détectée entre les différents groupes de doses tant dans les sols à textures fines (G1, $P = 0,377$, $n = 48$) que dans les sols de textures moyennes à grossières (G2 et G3; $P = 0,188$, $n = 147$). Cependant, en comparaison du témoin non fertilisé, les apports azotés ont engendré des gains considérables pour les deux grands groupes de textures (G1 et G2-G3), avec des gains généralement plus élevés dans les sols G2-G3 (36 à 51 %) que dans les sols G1 (30 à 40 %). De ce fait, l'effet significatif de la fertilisation azotée obtenu dans le précédent modèle (Modèle A) pourrait découler principalement des sols G2-G3. Le fait que les sols G1 étaient relativement plus pourvus en N-NO₃ au semis appuie cette hypothèse (moyennes de 14 vs. 8 ppm, respectivement, en G1 vs. G2-G3) puisque qu'une disponibilité accrue de N-NO₃ au semis est susceptible de diminuer l'ampleur de la réponse à la fertilisation azotée (modèle C). Cependant, il est important de rappeler que la quantité de données disponible dans les sols G1 (48 observations) est relativement faible, en comparaison des sols G2-G3 (147 observations), ce qui diminue la puissance des tests statistiques dans ce groupe (G1). Cela dit, ces résultats pourraient indiquer que dans les sols du groupe de texture G1, la plus petite dose testée (90 kg N/ha) serait suffisante pour combler les besoins de la culture, bien qu'une grande variabilité de réponse ait été observée (intervalles de confiance allant de 0,97 à 1,73), tandis que la dose de 120 kg N/ha pourrait être davantage appropriée dans les sols G2 et G3. Un plus grand nombre d'essais en sols G1 permettrait de vérifier cette hypothèse.

L'analyse des résultats en fonction de la teneur du sol en N-NO₃ au semis a permis de mieux cerner la réponse de la culture aux apports d'engrais azoté. Selon ce dernier modèle (C), le seuil de 10,7 ppm déterminé lors du test de partition de Cate-Nelson a été utilisé pour distinguer deux classes de fertilité des sols. Dans les sols dont la teneur en N-NO₃ était inférieure à 10,7 ppm, la réponse à la fertilisation azotée a été particulièrement forte et la dose de 120 kg N/ha a mené à des gains de rendements significativement plus élevés que les doses 73 et 90-97 kg N/ha. En effet, par rapport au témoin sans engrais azoté, la dose de 120 kg N/ha a permis d'obtenir des gains de rendements de 70 % ($P = 0,042$, $n = 131$), alors que les doses 73 et 90-97 kg N/ha ont offert des gains respectifs de 50 et 60 %. Au-delà du seuil de 10,7 ppm N-NO₃, les différentes doses ne présentaient aucune différence significative entre elles ($P = 0,480$; $n = 66$) et les gains de rendements moyens étaient plus faibles que sous le seuil de 10,7 ppm, soit de l'ordre de 10 à 18 %. Par conséquent, la plus petite dose testée, soit 90-97 kg N/ha a été suffisante dans cette catégorie de sol pour l'obtention des meilleurs rendements.

Dans cette dernière catégorie de sol (> 10,7 ppm N-NO₃), les trois groupes de textures ont été relativement bien représentés avec 56 % de G1, 17 % de G2 et 27 % de G3. Cependant, tel que mentionné précédemment, les sols G1 étaient plus riches en N-NO₃ que les G2-G3. En effet, l'exploration du jeu de données a démontré que dans

les sols G1, 74 % des parcelles avaient, au semis, une teneur en N-NO₃ supérieure au seuil de réponse de 10,7 ppm, tandis que pour les G2-G3, seulement 21 % avaient des teneurs en nitrate au semis au-delà du seuil. Cette répartition pourrait expliquer qu'une plus faible réponse à la fertilisation ait été obtenue dans les sols G1, où la dose agronomique optimale a été de 90 kg N/ha. L'analyse conjointe des résultats des modèles B et C suggère donc fortement que la faible réponse observée en sols G1 pourrait être principalement attribuable aux teneurs en N-NO₃ plus élevées et généralement au-delà du seuil de réponse établi pour la culture dans le cadre de cette étude.

De manière générale, ces résultats sont en accord avec de précédentes études ayant démontré la propension du concombre à répondre à la fertilisation azotée (Agba et Enya, 2005; Dai et al., 2011; Umamaheswarappa et Krishnappa, 2004; Zhang et al., 2011). Néanmoins, des apports excessifs d'azote (par minéralisation de la MO ou par les engrais) pourraient nuire aux rendements, puisque l'azote favorise la croissance végétative et la floraison au détriment des fruits (Souza et al., 2018), en plus de réduire la qualité de ceux-ci (Elkner, 1982). De plus, fait intéressant, les présents résultats coïncident avec ceux d'une étude menée dans le sud de l'Ontario qui relèvent soit une absence de gains ou de très faibles variations positives ou négatives du rendement pour des sols à textures moyennes à grossières, qui contiennent plus de 10 ppm N-NO₃ au semis (Van Eerd et O'Reilly, 2009). De même, Johnson et al (1973) ont observé que la réponse des concombres à l'azote suivait un gradient de dégradation des sols, aucune réponse n'étant observée dans des sols riches et productifs, tandis que la culture répondait à l'azote en sol dégradé et érodé.

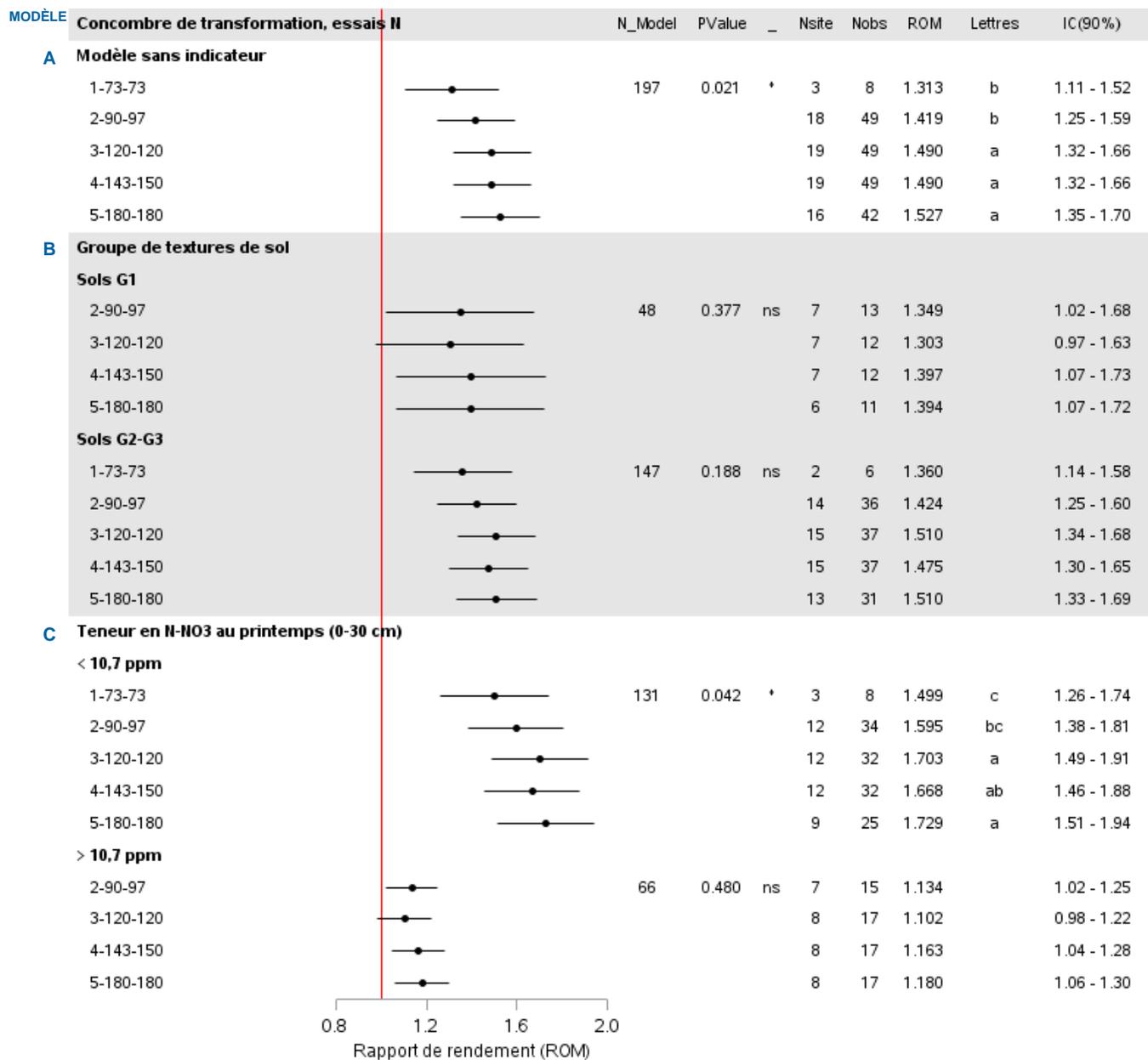


Figure 5. Résultats des analyses de variance sur la réponse du concombre de transformation aux doses croissantes d'azote. G1 : sols à texture fine ; G2, sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière ; N_model : nombre d'observations du modèle ; Nsite : nombre de sites ; Nobs : nombre d'observations ; ROM : rapport de rendement (rendement parcelle fertilisée/rendement parcelle témoin) ; IC : Intervalle de confiance ; Les moyennes d'une même catégorie qui ne partagent pas la même lettre sont significativement différentes au seuil $P < 0,12$.

2.2.3 Effet de la dose d'azote sur la qualité, les calibres et les pertes à la récolte

2.2.3.1 Qualité des concombres de transformation

Présence de cœurs creux

Lors de la récolte la plus abondante, soit entre la 3^e et la 5^e récolte, un échantillon composé de cinq concombres par parcelle a été conservé afin d'évaluer la fréquence d'apparition du problème de cœur creux. Dans le cadre de cette étude, la présence de cœurs creux a été observée dans deux parcelles uniquement, soit dans moins de 1 % des cas. En conséquence, la présence des cœurs creux a été considérée anecdotique, et aucune analyse supplémentaire n'a été effectuée sur ce paramètre. Ainsi, la fertilisation en N a été considérée n'avoir aucun effet sur l'incidence de cœurs creux des concombres de transformation sous nos conditions climatiques et pour les cultivars à l'étude.

Ces résultats contrastent avec les observations faites en Pologne par Elkner (1982), où jusqu'à 30 % des concombres de transformation ont été perdus pour cause de cœurs creux. L'auteure a démontré que la formation des cavités dépend de plusieurs facteurs comme le cultivar et les conditions de cultures (par exemple, humidité du sol, teneur en N du sol). De plus, l'occurrence des cœurs creux augmentait avec le nombre de jours de croissance du concombre, et était plus fréquente chez les concombres de plus gros diamètre (3,0 à 4,0 cm). D'un autre côté, la présence de cœurs creux pourrait être attribuable à une période de sécheresse prolongée ou un important changement de température (Krassowska, 1970 et Elkner et Radzikowska, 1976; cités par Elkner, 1982). Par conséquent, l'absence de cœurs creux pourrait s'expliquer par un apport suffisant en eau tout au long du développement des fruits, de même que par une absence d'extrêmes quant à la température. Alternativement, les différences entre les cultivars ont pu faire en sorte que le diamètre critique pour l'apparition des cœurs creux n'avait pas été atteint aux stades où les mesures ont été prises (calibres 3 et 4).

Calibres à la récolte

À la récolte, les concombres de transformation ont été classés et pesés selon les calibres décrits au Tableau 8. La dose de N n'a pas eu d'incidence sur les proportions relatives des calibres des concombres formant le rendement vendable (Figure 6). En effet, indépendamment de la dose, le rendement vendable était constitué en majorité de concombres de calibres 3 et 4, pour des proportions moyennes et respectives de 38 et 43 %. Les calibres 2 et 5 ont, quant à eux, compté pour respectivement 8 et 9 % du rendement vendable, tandis que les concombres de calibre 1 ont compté pour moins de 2 %. Le faible pourcentage obtenu de concombres calibre 1 est principalement dû au fait qu'étant en régie multi-récoltes, seuls les calibres allant de 2 à 5 et les rejets sont récoltés, tandis que les calibres 1 ne sont prélevés qu'à l'occasion de la dernière récolte de la saison afin de laisser les petits calibres poursuivre leur croissance jusqu'à la prochaine récolte. Ces résultats concordent avec l'étude de Van Eerd et O'Reilly (2009) qui n'observent pas d'effet de la fertilisation sur la distribution des calibres récoltés. De plus, les calibres n'ont pas été influencés par la variété culturale, le groupe de textures ni par la teneur du sol en nitrate au semis (données non présentées). Par conséquent, aucune contrainte par rapport aux calibres n'a été prise en compte dans l'élaboration de la VSRF.

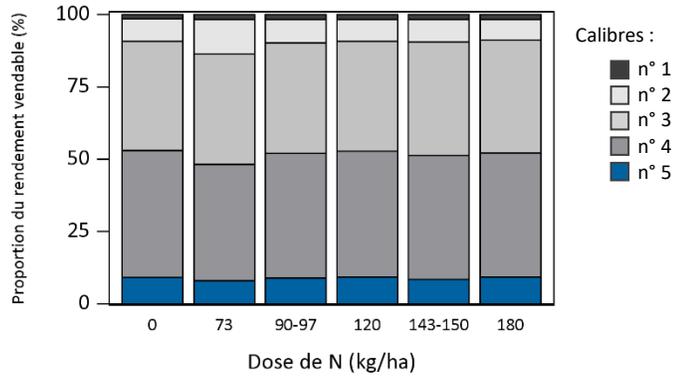


Figure 6. Calibres des concombres de transformation à la récolte selon les doses de N. Pour tous les calibres, aucune différence significative n'a été détectée (LSD, $P < 0,12$) entre les doses de N.

2.2.3.2 Pertes à la récolte

Une fertilisation azotée inadéquate pourrait mener à un déclassement excessif des légumes à la récolte, occasionnant des pertes économiques. Ainsi, dans le cadre des essais, les rendements totaux et vendables ont été mesurés, afin d'évaluer les pertes à la récolte. En moyenne, les pertes à la récolte ont représenté de 14 à 16 % du rendement total de la saison (Figure 7) et n'ont pas été influencées par les apports de N. Toutefois, bien que non statistiquement différentes, les pertes ont été légèrement supérieures dans le témoin (16,1 %) que dans les parcelles fertilisées (moyennes de 14,0 à 14,6 %). De plus, les pertes étaient généralement plus élevées dans les sols lourds que dans les sols moyens-légers (données non présentées), ce qui appuie l'idée communément admise que les sols lourds sont moins propices à la culture des concombres de transformation (CRAAQ, 2010; MAPAQ, 2021; OMAFRA, 2011).

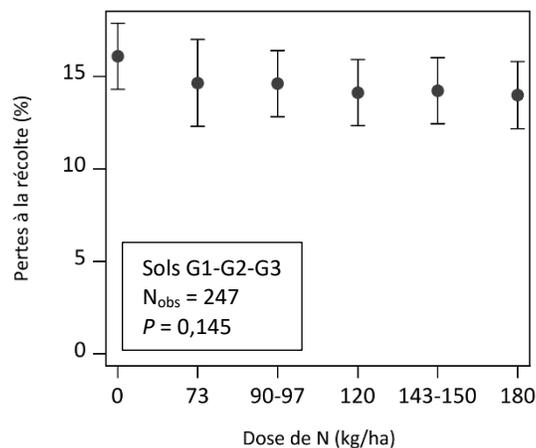


Figure 7. Pertes de rendements à la récolte par rapport au rendement total en fonction des traitements de fertilisation azotée, toutes textures confondues. Les moyennes présentées sont les valeurs estimées du modèle statistique. Les moyennes ne sont pas statistiquement différentes entre elles (LSD; $P < 0,12$). Les barres représentent les erreurs-types. N_{obs} : Nombre d'observations.

Les principales causes de rejet ont été les diamètres supérieurs à 55,0 mm (63 % des pertes) ou les malformations (32 % des pertes), tandis que très peu de concombres ont été déclassés pour cause de pourritures (1,4 %) ou d'autres raisons (3,6 %; cicatrices qui couvrent plus de 10 % de la surface, stries creuses, insolation, etc.) (Figure 8). À la Figure 8, la dose de 73 kg N/ha a été testée à un nombre plus restreint de sites (8 observations, 3 sites) ce qui peut expliquer le plus grand écart des moyennes observées entre la dose 73 N et les autres doses.

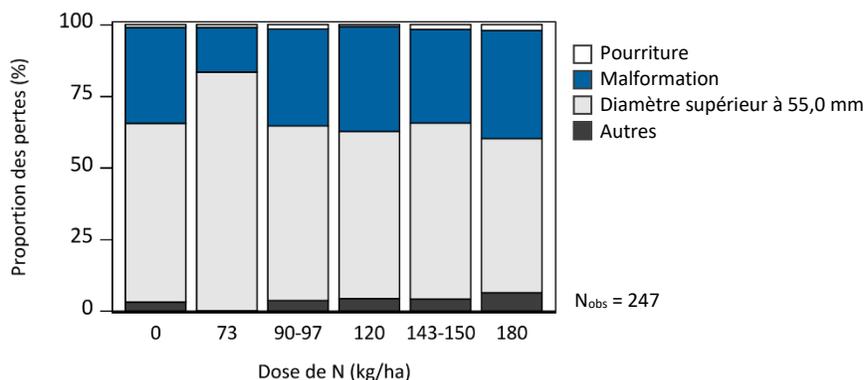


Figure 8. Causes de déclasserement ou de rejet à la récolte des concombres de transformation en fonction des traitements de fertilisation. Seules les catégories non-vendables sont illustrées sur la figure. N_{obs} = Nombre d'observations.

2.3 Diagnostic nutritionnel et exportations en azote

Les concentrations et les exportations de N dans les concombres de transformation en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 11. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne de $1,17 \pm 0,11$ kg N/t humide à 95 % d'humidité (Tableau 11). Cette valeur est légèrement inférieure à la valeur de 1,5 kg N/t humide présentée dans le guide du CRAAQ (2010), laquelle est tirée de la publication de Fink et al. (1999). Cependant, elle correspond à la concentration en N telle que publiée par la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 2021) qui, à 95 % d'humidité, rapporte une teneur de 1,25 kg N/t humide. De plus, les concentrations sont légèrement supérieures à celles rapportées par Warncke et al. (2004) de l'Université de l'État du Michigan, qui évaluent les exportations à 0,91 kg (2,0 lb) N par tonne humide (% humidité non précisé). Plusieurs facteurs peuvent influencer les concentrations en nutriments dans les tissus du concombre, comme les conditions de culture (Gómez-López et al., 2006; Jenni et al., 2007; Schlering et al., 2020), la maturité du fruit (Gómez-López et al., 2006), ou encore le nombre de jours entre le semis et la récolte (Schlering et al., 2020). En Ontario, van Eerd et O'Reilly (2009) ont noté que la teneur en N de la biomasse sèche était plus élevée lorsque les conditions climatiques étaient dans la moyenne et sans extrêmes, comparativement aux années chaudes et sèches ou fraîches et humides. Les mêmes auteurs ont obtenu une corrélation linéaire positive hautement significative entre la dose de N appliquée et la teneur en N de la biomasse des fruits. Enfin, les cultivars à l'étude (Eureka, Puccini et Arabian) ont présenté une faible variabilité (6,1 %) entre eux quant à leur concentration en N. En effet,

la composition de la biomasse selon les cultivars a varié de 1,15 à 1,28 kg N/t humide en moyenne pour les cultivars respectifs de Arabian et Eureka.

En considérant le rendement vendable moyen de la population de tête, soit 120 631 kg/ha, les exportations de ont été en moyenne de 122 kg N/ha, et ont varié entre 99 et 146 kg N/ha. Les exportations, présentées à la Figure 9, ont varié de façon linéaire en fonction du rendement. Il est toutefois important de souligner que les rendements obtenus dans le cadre de cette étude sont très élevés comparativement aux valeurs de référence en contexte de production commerciale, soit environ 40 000 kg/ha (rendement vendable) (FADQ, 2014-2018). Un ajustement du calcul des exportations en fonction du rendement vendable réel du producteur serait à considérer afin d’avoir une estimation plus exacte des quantités de nutriments exportés par la culture. À cette fin, le rendement vendable du producteur doit être multiplié par la teneur moyenne en N de la population de tête mesurée dans cette étude (1,17 kg N/t humide). Enfin, tout comme les concombres non-vendables, le feuillage et les tiges demeurent généralement au champ à la récolte. Pour cette raison, ils ne sont pas considérés dans le calcul des exportations, bien qu’ils contiennent de l’azote.

Tableau 11. Concentrations et exportations en N des concombres de transformation, selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ^{1,2}				
	(%)	(kg N/t humide)		(kg N/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	95	1,17	0,11	122	121	99	146
Faible rendement et équilibre nutritionnel	96	1,09	0,12	113	113	104	121
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	96	1,20	0,17	106	103	32	174
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	96	1,23	0,07	143	136	116	178

¹ Moy : moyenne ; Éc-T : Écart-type; Med : médiane ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

² Les exportations présentées dans ce tableau ont été calculées sur le rendement vendable seulement et sont valides pour une régie de culture qui laisse les concombres non-commercialisables au champ.

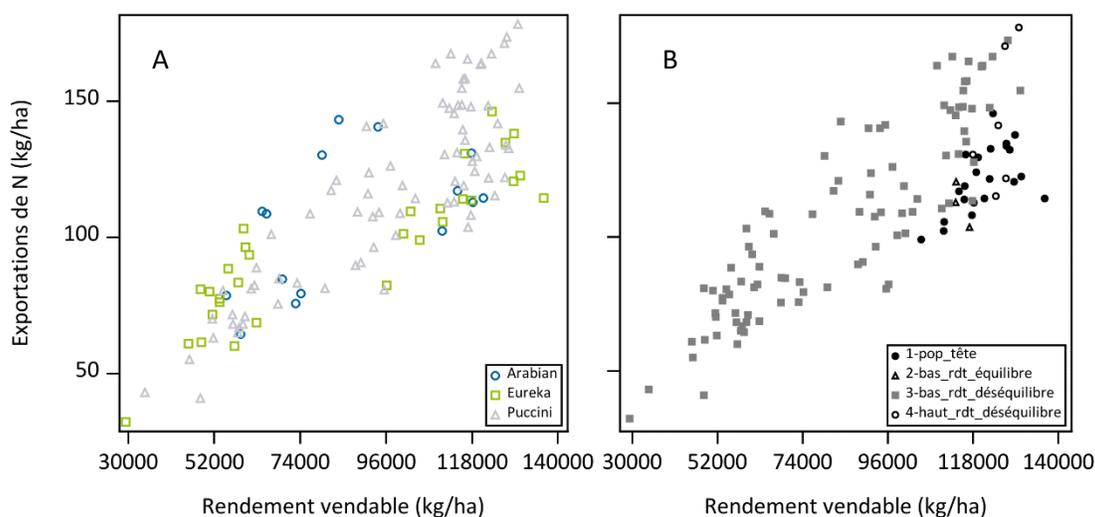


Figure 9. Exportations d’azote du concombre de transformation en fonction des rendements vendables selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B).

2.4 Nitrate résiduel à la récolte

Le N apporté par fertilisation n'est pas absorbé en totalité par les cultures. Ainsi, une partie de ce N restera au niveau du sol à la fin du cycle cultural, à risque de diffuser dans l'environnement (Bélanger et al., 2003). Afin d'évaluer ce risque, le nitrate (N-NO_3) résiduel a été mesuré sur deux profondeurs (0-30 et 30-60 cm) immédiatement après la dernière récolte. Les concentrations en N-NO_3 des différents traitements ont été analysées en tant qu'« indice nitrate ». Cet indice s'obtient en divisant la teneur en N-NO_3 du traitement fertilisé par la teneur en N-NO_3 de la parcelle témoin. Ainsi, un indice nitrate supérieur à 1 signifie qu'il y a une hausse (significative ou non) du nitrate dans les parcelles fertilisées, en comparaison du témoin.

Les indices nitrate obtenus en fonction des différentes doses d'azote sont présentées à la Figure 10. La fertilisation azotée a entraîné une hausse variable des teneurs en N-NO_3 selon la profondeur et le groupe de textures considéré. De manière générale, les teneurs en N-NO_3 résiduel des parcelles témoin étaient plus élevées dans les sols G1 que dans les sols G2 et G3. De plus, conformément aux résultats d'une autre étude (Van Eerd et O'Reilly, 2009), elles étaient plus élevées en surface (0-30 cm) qu'en profondeur (30-60 cm). Dans les sols à texture fine (G1), les teneurs en N-NO_3 des témoins étaient en moyenne de 9,92 ppm et de 6,21 ppm respectivement en surface et en profondeur, tandis que dans les sols G2-G3, les témoins avaient des teneurs respectives de 6,21 ppm et 2,09 ppm aux mêmes profondeurs.

Dans les sols à textures fines (G1), les différentes doses d'azote n'ont engendré aucune augmentation du N-NO_3 résiduel par rapport au témoin tant en surface qu'en profondeur, à l'exception des doses 90 à 97 kg N/ha dans la strate 30-60 cm. Ces doses ont engendré une augmentation de 46 % (indice nitrate de 1,46) des teneurs par rapport au témoin. Malgré cela, le nitrate résiduel semble peu affecté par les doses de N appliquées dans ce type de sol, tant en surface qu'en profondeur.

À l'opposé, dans les sols à textures moyenne et grossière (G2-G3), une augmentation significative du nitrate résiduel a été observée dans les deux profondeurs étudiées dès l'ajout de 90 N. En surface, les doses croissantes d'azote ont graduellement induit une hausse des teneurs en N-NO_3 du sol jusqu'à atteindre 1,55 fois la valeur du témoin avec la dose de 180 N. En profondeur, l'écart était plus important, alors que les teneurs ont grimpé jusqu'à 2 fois les valeurs du témoin pour les plus fortes doses de N testée (Figure 10). Des résultats similaires ont été observés dans des sols de textures limoneuses à sableuses en Ontario, où l'augmentation de la dose d'azote dans les cultures de concombres de transformation a engendré une croissance linéaire significative du nitrate résiduel à la récolte (Van Eerd et O'Reilly, 2009). Fait intéressant, les auteurs de cette étude ont également comparé l'effet du fractionnement (65 + 45 kg N/ha) de la dose de 110 kg N/ha sur les teneurs en N-NO_3 et en N-NH_4 du sol en comparaison à un apport unique en pré-semis. Le fractionnement n'a pas permis de réduire les teneurs en N-NO_3 et en N-NH_4 du sol par rapport à l'apport unique, ce qui suggère que le fractionnement ne réduit pas nécessairement les quantités de N minéral qui peuvent être perdues après la récolte.

Ces résultats démontrent que malgré la réponse importante de la culture aux apports d'engrais azoté jusqu'à la dose de 120 kg N/ha, une partie de celui-ci demeure non-prélevée et à risque d'être perdue par lessivage dans les sols à textures moyennes à grossières. Les plants de concombre disposent d'un système racinaire relativement peu profond, situé majoritairement dans la couche de sol 0-30 cm (CPVQ, 2000; MAAARO, 2011), ce qui cause une efficacité de prélèvement des éléments nutritifs relativement faible et une faible utilisation de

l'azote apporté par fertilisation. En effet, dans le cadre des essais, les coefficients d'utilisation de l'azote ont été de 19 à 33 % selon les doses (données non présentées). En vue d'atténuer le risque environnemental, la dose totale d'azote appliquée pourrait être réduite (Van Eerd et O'Reilly, 2009) en fonction d'un indice de fertilité. Une seconde mesure serait de préconiser le fractionnement en plusieurs apports, de même que la synchronisation des apports avec les besoins de la culture (Reid et Morton, 2019).

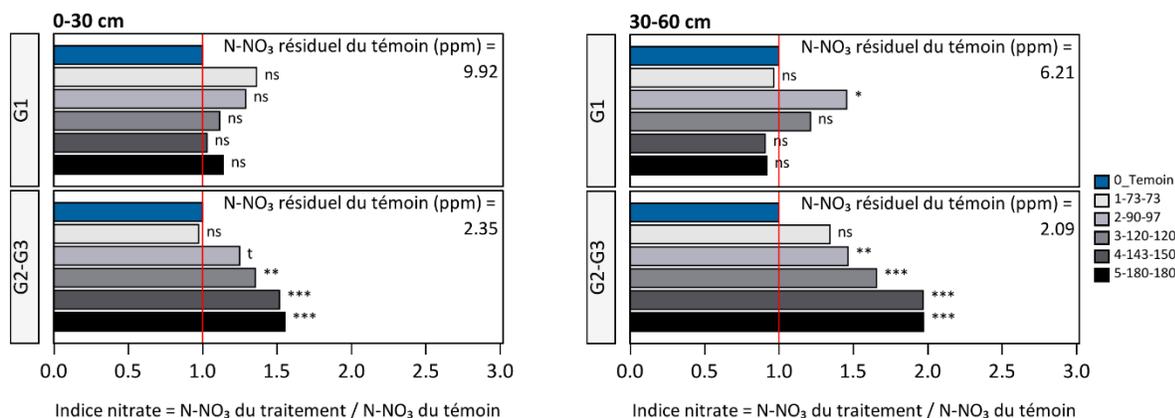


Figure 10. Indices nitrate des traitements d'azote du concombre de transformation aux profondeurs 0-30 et 30-60 cm dans les sols G1 vs G2-G3, au moment de la récolte. La statistique présentée à droite des barres horizontales indique si le traitement est différent du témoin 0 N. NS : non significatif ; t : tendance à $P < 0,12$; * : P entre 0,05 et 0,01 ; ** : P entre 0,01 et 0,001 ; *** : $P < 0,001$.

2.5 Fertilisation azotée proposée et comparaison avec les recommandations au Canada et à l'étranger

La fertilisation azotée proposée pour la culture du concombre de transformation au Québec est présentée au Tableau 12. Les valeurs ont été établies sur la base de données collectées en conditions climatiques québécoises, pour des sols minéraux ayant une teneur en matière organique majoritairement entre 2 et 3,5 % et sous une régie commerciale multi-récoltes. Afin d'établir les valeurs scientifiques de référence en fertilisation (VSRF), la réponse de différents paramètres aux doses croissantes d'azote a été vérifiée, soit le rendement commercialisable, les calibres et la qualité des concombres récoltés, de même que la teneur du sol en nitrate résiduel à la dernière récolte.

La dose de 120 kg N/ha, fractionnée en deux apports (70 kg N/ha au semis et 50 kg N/ha au stade 5 à 6 feuilles), s'est montrée comme étant celle agronomiquement optimale lorsque tous les groupes de textures de sol étaient combinés, en absence d'indicateur de sol. Cet apport a permis l'obtention de rendements moyens environ 50 % supérieurs à ceux obtenus en absence d'engrais azoté (section 2.2.2). Cependant, parmi les indicateurs de fertilité azoté des sols testés, le nitrate (0-30 cm) mesuré au semis par la méthode au KCl 2M a permis de préciser la réponse de la culture à l'engrais. Ainsi, selon cet indicateur, la dose optimale a été réduite à 90 (50 + 40) kg N/ha dans les sols dont la teneur en nitrate est supérieure à 10,7 ppm (arrondi à 11 ppm aux fins de

la présentation des VSRF) au moment du semis. Cette réduction de la dose a permis d'atténuer les risques de pertes d'azote dans l'environnement sans compromettre les rendements ni la qualité des récoltes (section 2.4).

Le peu de données en sol G1 n'a pas permis d'établir formellement des VSRF selon les groupes de texture. Cependant, la gestion attentive de l'azote semble d'autant plus importante en sols G2 et G3, lesquels sont davantage utilisés pour la production de concombres de transformation. De plus, dans les sols G2 et G3, des gains importants ont été observés jusqu'à la dose de 120 kg N/ha, en comparaison aux sols G1 où la dose de 90 kg N/ha semblait suffisante, probablement parce qu'une majorité de sols en G1 avaient des teneurs au-delà du seuil de 10,7 ppm N-NO₃ en comparaison aux G2-G3. Cette richesse accrue en N-NO₃ était encore visible à la fin des récoltes avec une teneur moyenne de trois à quatre fois plus élevée dans les sols témoin G1 que les G2-G3.

Il convient de revenir sur le dosage du nitrate qui a été réalisé par la méthode au KCl 2M en laboratoire. La corrélation entre cette méthode et d'autres permettant le dosage rapide au site de production, par exemple le Nitratecheck, serait à réaliser, car il est attendu que les seuils différeront selon la méthode utilisée (Wetselaar et al., 1998). Comme l'analyse du nitrate au semis ne fait actuellement pas partie des analyses de routine des entreprises, ce résultat n'a pas été intégré directement dans le tableau comme qu'un indicateur de fertilité principal des VSRF, mais sous forme de note avec la référence de la méthode utilisée (Tableau 12). Dans le cas où des contraintes de temps ne permettraient pas de prélever les échantillons au printemps et de recevoir le résultat dans un délai adéquat pour l'ajustement de la fertilisation avant la date prévue du semis, l'agronome en charge de la recommandation pourrait décider d'ajuster la dose au fractionnement, sur la base des résultats du test effectué au semis, bien que cette façon d'appliquer les engrais n'ait pas été testée dans le cadre des essais.

Dans l'ensemble, les calibres 3 et 4 (diamètre entre 31,1 et 51,0 mm) ont constitué environ 80 % du rendement vendable (section 2.2.3.1). Pour tous les traitements de fertilisation, quelques rares cas de cœurs creux ont été détectés (section 2.2.3.1) et les différents niveaux d'azote n'ont pas eu d'incidence sur les pertes à la récolte (section 2.2.3.2). Les exportations en N de la population de tête, calculées sur la base du rendement vendable et selon une régie multi-récoltes, ont été en moyenne de 122 (99 à 146) kg N/ha.

La dose proposée dans la présente étude est similaire à celle actuellement suggérée (115 kg N/ha) dans la grille du guide de référence en fertilisation du CRAAQ (2010), bien que cette dernière englobe plusieurs cultures de cucurbitacées. De plus, un ajustement à la baisse de la dose est proposé au-delà d'un certain seuil de fertilité (11 ppm de N-NO₃ au semis). Ces nouvelles valeurs sont une bonification importante pour les entreprises productrices de concombres de transformation, particulièrement considérant qu'elles ont été établies sur la base d'essais réalisés en conditions québécoises précisément pour cette culture, plutôt que d'être une valeur générale pour l'ensemble des cucurbitacées, qui présentent de grandes différences de développement et de production de biomasse. En effet, outre les grilles du Michigan et du Mid-Atlantic, toutes les grilles présentées au Tableau 13 sont des valeurs plus générales s'appliquant à plusieurs cucurbitacées. Dans l'ensemble, les recommandations du Québec, de l'Ontario, de l'Alberta, du Michigan, du Mid-Atlantic et de la Nouvelle-Angleterre sont similaires à la nouvelle VSRF du Québec quant aux stades d'application et à la dose totale recommandée dans un contexte de récolte manuelle ou semi-mécanisée. L'ensemble des recommandations externes suggèrent de fractionner l'azote, bien qu'aucune n'utilise un indicateur de fertilité. Ainsi, la note

suggérant une diminution de la dose de N au-delà d'un seuil de N-NO₃ du sol au semis est un aspect innovateur de cette nouvelle VSRF.

Tableau 12. Fertilisation azotée du concombre de transformation – Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

Groupe de textures ¹	Période d'application ²	Fractionnement ³ (kg N/ha)	VSRF ^{4,5} (kg N/ha)
G1, G2, G3	Au semis	70	120 * ⁶
	Stade 5 à 6 feuilles	50	

* Dans le cas où le nitrate du sol au semis (N-NO₃) est d'une concentration supérieure à 11 ppm, la dose peut être réduite à 90 kg N/ha sans compromettre les rendements ou la qualité des récoltes. Le N-NO₃ a été dosé au KCl 2M en laboratoire sur la profondeur 0-30 cm. Lors de la réalisation des essais, la dose de 90 kg N/ha a été fractionnée en deux apports de 50 kg/ha et de 40 kg/ha, respectivement au semis et au stade 5-6 feuilles.

¹ G1 : sols de texture fine ; G2 : sols de texture moyenne ; G3 : sols de texture grossière.

² Dans le cadre des essais, la première application des engrais a été effectuée après la levée (une à deux semaines après le semis) pour des raisons techniques.

³ Les fractionnements sont présentés tels que testés.

⁴ VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

⁵ Les VSRF ont été établies sur la base d'un jeu de données constitué en quasi-totalité de données ayant une MO_{PAF} de moins de 5 %.

⁶ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.

Diminution de la dose d'azote optimale dans les sols ayant plus de 11 ppm de N-NO₃

Les résultats des analyses montrent que dans les sols ayant 11 ppm ou plus de N-NO₃, la dose optimale pourrait être diminuée à 90 kg N/ha sans compromettre les rendements et la qualité des récoltes, en raison de l'absence de différence significative entre les traitements pour cette catégorie de sol. Soulignons que l'apport de 90 kg N/ha correspond à la plus petite dose testée. Par conséquent, il n'est pas complètement exclu qu'une plus faible dose optimale aurait pu être trouvée dans le cas où de plus faibles doses de N auraient été testées. De plus, ces ANOVA ont été réalisées sans tenir compte de la texture du sol. Un plus grand nombre d'essais dans chaque groupe de textures, en particulier dans les G1, aurait permis d'établir des VSRF par groupe de textures et par conséquent de préciser cet effet.

Méthode pour le dosage du nitrate au semis



Le nitrate au semis a été dosé par la méthode au KCl 2M en laboratoire. La corrélation entre la méthode KCl et d'autres méthodes, par exemple le Nitratecheck, n'a pas été évaluée. Comme les seuils peuvent varier selon la méthode (Wetselaar et al., 1998), il n'est pas possible pour l'instant d'émettre un seuil équivalent pour une autre méthode. De plus, actuellement au Québec, l'analyse de la teneur en nitrate ne fait pas partie des analyses de routine des entreprises. Pour ces raisons, la proposition de diminuer la dose à un seuil de N-NO₃ a été intégrée sous la forme d'une note de bas de tableau plutôt que comme indicateur de fertilité principal.

Dans le cas où des contraintes de temps ne permettraient pas de recevoir le résultat du dosage du NO₃ dans un délai permettant l'ajustement de la fertilisation avant la date prévue du semis, l'agronome en charge de la recommandation pourrait décider d'ajuster la dose en fonction du NO₃ du sol au fractionnement, bien que cette façon de procéder n'a pas été testée dans le cadre des essais.

Application en bande des engrais

Les VSRF proposées dans le cadre de cette étude ont été calculées à partir d'essais réalisés en plein champ où l'azote a été appliqué en bande et fractionné en deux apports afin de garantir une bonne utilisation par la plante. Dans l'éventualité où le mode d'apport serait différent, un suivi est recommandé puisqu'un ajustement des doses pourrait être requis.

Tableau 13. Comparaison des recommandations en N pour la production de concombres de transformation au Canada et à l'étranger

Provinces/ États	Cultures ciblées par la grille	Mode et période d'application	Fractionnement	Indicateurs		Dose N (kg/ha)	Source
				Fertilité du sol	Autres		
Québec (CAN)	Concombre, cornichon, citrouille, melon, courge	À la volée avant le semis	oui	-	Non-irrigué	80	CRAAQ (2010)
		En bande à l'apparition des fleurs				35	
		Dose totale				115	
		À la volée avant le semis				80	
		En bande à l'apparition des fleurs			Irrigué	50-55	
		Dose totale				130-135	
Ontario (CAN)	Concombre, cantaloups, melons, citrouille, courge	À la volée avant le semis	oui	-	-	65	MAAARO (2011)
		À la volée, avant que les vignes ne courent				45	
		Dose totale				110	
Alberta (CAN)	Cucurbitacées	À la volée et incorporé avant le semis	oui	-	-	63	Alberta Agriculture and Rural Development (2014)
		À la volée, avant que les vignes ne courent				29-33	
		Dose totale				92-96	
Michigan (É-U)	Concombres de transformation	En bande au semis	oui	-	Récolte manuelle	34	Warncke et al. (2004)
		À la volée, avant que les vignes ne courent				34-45	
		À la volée, en saison				34-45	
		Dose totale				112	
		En bande au semis				34	
		À la volée, avant que les vignes ne courent				34	
		Dose totale			Récolte méca-nique	68	
Mid-Atlantic (É-U)	Concombres	À la volée et incorporé	oui	-	-	28-56	Virginia Cooperative Extension (2018)
		En bande au semis				28	
		À la volée, avant que les vignes ne courent				28-84	
		Dose totale				90-168	
Nouvelle Angleterre (É-U)	Concombres, cantaloups et melons	En bande au semis	oui	-	-	22-45	University of Massachusetts Amherst (2021)
		En bande avant que les vignes ne courent				22-45	
		En bande, 2 à 3 semaines plus tard				22-45	
		Dose totale				66-135	

3. FERTILISATION PHOSPHATÉE

3.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des essais de fertilisation phosphatée du concombre de transformation à travers les différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 14. Un peu plus de la moitié (53 %) des essais P ont été réalisés sur des sols à textures moyennes (G2), tandis que le tiers des essais (34 %) était sur des textures fines (G1) et le reste (13 %) sur des textures plus grossières (G3). Ceci peut s'expliquer par le fait que la culture des concombres nécessite des sols meubles, riches en éléments nutritifs et bien drainés (CPVQ, 2000; MAAARO, 2011). Ainsi, les sols lourds, susceptibles à la compaction, ou encore les sols très sableux, sont moins propices à cette culture. Dans les sols G1, l'ISP₁ a varié de 1,7 à 25,3 %, avec environ les deux tiers des données qui étaient inférieures au seuil de 7,6 % du règlement sur les exploitations agricoles (REA) pour ce type de sol (MDDEP, 2010). Dans les sols G2 et G3, l'ISP₁ a plutôt varié de 5,4 à 18,2 %, avec 80 % des données qui étaient situées sous le seuil critique de 13,1 % du REA pour ces sols. Toutes textures confondues, la teneur en P_{M3} des sols étaient très faible, couvrant des teneurs de 14 à 130 ppm P_{M3} et une médiane de 48 ppm.

Tableau 14. Répartition des blocs des essais P pour différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}	Blocs (%)	ISP ₁ (%) ¹	Blocs (%) G1	ISP ₁ (%) ¹	Blocs (%) G2-G3	P _{M3} (ppm)	Blocs (%)	Groupe de textures ²	Blocs (%)
≤ 5,5	4	≤ 3,8	26	≤ 6,5	27	≤ 50	57,5	G1	34
5,5 – 6,0	18	3,9 – 7,6	39	6,6 – 13,1	53	51-100	31,0	G2	53
6,0 – 7,0	62	7,7 – 15,2	0	13,2 – 20	20	101 – 150	11,5	G3	13
7,0 – 7,5	16	> 15,2	34	> 20	0	151 – 200	0	-	-
> 7,5	0	-	-	-	-	> 200	0	-	-

¹ISP₁ : indice de saturation en phosphore = (P/AI) × 100, éléments extraits au Mehlich-3 (Mehlich, 1984).

² G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

3.2 Diagnostic nutritionnel et exportations en phosphore

Les concentrations et les exportations de phosphore dans les concombres de transformation en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 15. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne de 0,55 ± 0,04 kg P₂O₅/t humide à 95 % d'humidité. Cette valeur est inférieure à la valeur de 0,70 kg P₂O₅/t humide, présentée dans le guide du CRAAQ (2010), laquelle est tirée de la publication de Fink et al. (1999). De plus, elle est similaire sinon légèrement inférieure à la concentration en P₂O₅ telle que publiée par la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 2021) qui, pour une teneur en eau équivalente à celle des présents essais, obtient une teneur de 0,60 kg P₂O₅/t humide (teneur de la biomasse sèche à 0,525 % P, rapportée à 95 % d'humidité et convertie par un facteur P:P₂O₅ de 1:0,437). Les teneurs sont similaires à celle rapportée par Warncke et al. (2004) de l'Université de l'État du Michigan, qui évaluent les exportations en phosphore à 0,54 kg (1,2 lb) P₂O₅ par tonne humide (% humidité non précisé) de concombres. Enfin, les cultivars ont présenté une faible variabilité (3 %) entre eux. En effet, la concentration de la biomasse selon les cultivars a varié de 0,53 (*Puccini*) à 0,57 (*Arabian*) kg P₂O₅/t humide (données non présentées).

Considérant un rendement vendable de 120 631 kg/ha, les exportations de la population de tête ont varié de 49 à 72 kg P₂O₅/ha, avec une moyenne de 57 kg P₂O₅/ha. Les exportations, présentées à la Figure 11, ont varié de façon linéaire en fonction du rendement. Il est toutefois important de rappeler que les rendements obtenus dans le cadre de cette étude sont très élevés comparativement aux valeurs de références en contexte de production commerciale, soit environ 40 000 kg/ha (rendement vendable) (FADQ, 2014-2018). Un ajustement du calcul des exportations en fonction du rendement vendable réel du producteur serait à considérer afin d’avoir une estimation plus exacte des nutriments exportés par la culture. À cette fin, le rendement vendable du producteur doit être multiplié par la teneur moyenne en P₂O₅ de la population de tête mesurée dans cette étude (0,55 kg P₂O₅/t humide). Enfin, tout comme les concombres non-vendables, le feuillage et les tiges demeurent généralement au champ à la récolte. Pour cette raison, ils ne sont pas considérés dans le calcul des exportations, bien qu’ils contiennent du phosphore.

Tableau 15. Concentrations et exportations en P₂O₅ des concombres de transformation, selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ^{1,2}				
	(%)	(kg P ₂ O ₅ /t humide)		(kg P ₂ O ₅ /ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	95	0,55	0,04	57	56	49	72
Faible rendement et équilibre nutritionnel	96	0,48	0,01	50	49	48	53
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	96	0,55	0,09	49	50	20	94
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	96	0,48	0,03	56	54	43	68

¹ Moy : moyenne ; Éc-T : Écart-type; Med : médiane ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

² Les exportations présentées dans ce tableau ont été calculées sur le rendement vendable seulement et sont valides pour une régie de culture qui laisse les concombres non-commercialisables au champ.

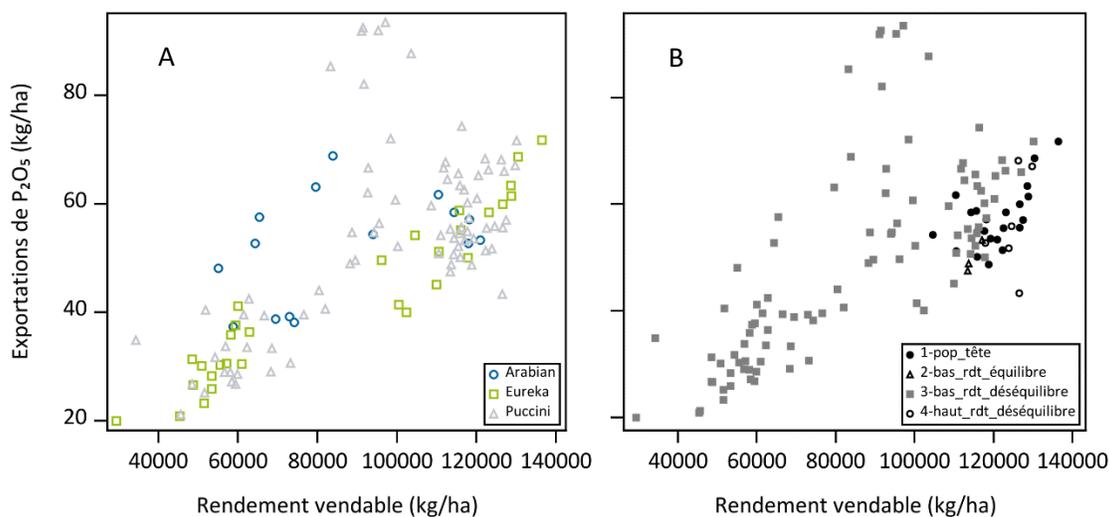


Figure 11. Exportations de phosphore du concombre de transformation en fonction des rendements vendables selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B).

4. FERTILISATION POTASSIQUE

4.1 Portrait et représentativité des données

La répartition des blocs des essais K du concombre de transformation selon différentes classes de propriétés de sol (0-20 cm) est présentée au Tableau 16. De même que dans les essais N et P, les essais K ont été réalisés majoritairement sur des sols de textures moyennes (54 %) et fines (33 %), bien que la totalité des blocs avaient une teneur en argile inférieure à 30 %. Ceci peut s'expliquer par le fait que la culture des concombres nécessite des sols meubles, riches en éléments nutritifs et bien drainés (CPVQ, 2000; MAAARO, 2011). Ainsi, les sols lourds, susceptibles à la compaction, ou encore les sols très sableux, sont moins propices à leur culture. Les sols étaient faiblement pourvus en K_{M3} , s'étendant de 63 à 175 ppm K_{M3} . Les sols à textures moyennes et grossières (G2-G3) étaient majoritairement sous la barre des 100 ppm K_{M3} , tandis que les sols à textures fines étaient généralement plus riches, avec des teneurs principalement situées dans l'intervalle 100 à 200 ppm K_{M3} .

Tableau 16. Répartition des blocs des essais K selon différentes classes de propriétés de sol après la validation des données

pH _{eau}	Blocs (%)	Teneur en K_{M3} (ppm)	Blocs (%)		Groupe de textures ¹	Blocs (%)	Teneur en argile (%)	Blocs (%)
			G1	G2-G3				
≤ 5,5	4	≤ 100	27	67	G1	33	≤ 10	0
5,5 – 6,0	36	101 – 200	73	33	G2	54	10 – 20	40
6,0 – 7,0	53	> 200	0	0	G3	13	20 – 30	60
7,0 – 7,5	7	-	-	-	-	-	> 30	0
> 7,5	0	-	-	-	-	-	-	-

¹ G1 : sols à texture fine ; G2 : sols à texture moyenne ; G3 : sols à texture grossière.

4.2 Diagnostic nutritionnel et exportations en potassium

Les concentrations et les exportations de potassium dans les concombres de transformation en fonction du diagnostic nutritionnel sont présentées au Tableau 17. La population de tête (groupe d'individus à haut rendement et à l'équilibre nutritionnel) a eu une concentration moyenne de $1,98 \pm 0,18$ kg K_2O /t humide à 95 % d'humidité. Cette valeur est inférieure à la valeur de 2,40 kg K_2O /t humide présentée dans le guide du CRAAQ (2010), laquelle est tirée de la publication de Fink et al. (1999). Elle est également inférieure à la concentration en K_2O telle que publiée par la base de données du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA, 2021) qui, pour une teneur en eau équivalente à celle de nos essais, obtient une teneur de 2,56 kg K_2O /t humide (teneur en biomasse sèche à 4,25 % K, rapportée à 95 % d'humidité et convertie par un facteur K: K_2O de 1:0,83). Les teneurs sont cependant supérieures à celle rapportée par Warncke et al. (2004) de l'Université de l'État du Michigan, qui estiment à 1,63 kg (3,6 lb) K_2O par tonne humide (% humidité non précisé) les exportations en potassium. Enfin, les cultivars ont présenté une variabilité de 10 % entre eux. En effet, la concentration de la biomasse selon les cultivars a varié de 1,79 (*Puccini*) à 2,17 (*Arabian*) kg K_2O /t humide (données non présentées).

Considérant un rendement vendable de 120 631 kg/ha, les exportations de la population de tête ont varié de 172 à 248 kg K_2O /ha, avec une moyenne de 206 kg K_2O /ha. Les exportations, présentées à la Figure 12, ont varié de façon linéaire en fonction du rendement. Il est toutefois important de souligner que les rendements obtenus

dans le cadre de cette étude sont très élevés comparativement aux valeurs de références en contexte de production commerciale, soit près de 40 000 kg/ha (rendement vendable) (FADQ, 2014-2018). Un ajustement du calcul des exportations en fonction du rendement vendable réel du producteur serait à considérer afin d’avoir une estimation plus exacte des nutriments exportés par la culture. À cette fin, le rendement vendable du producteur doit être multiplié par la teneur moyenne en K₂O de la population de tête mesurée dans cette étude (1,98 kg K₂O/t humide). Tout comme les concombres non-vendables, le feuillage et les tiges demeurent généralement au champ à la récolte. Pour cette raison, ils ne sont pas considérés dans le calcul des exportations, bien qu’ils contiennent du potassium.

Tableau 17. Concentrations et exportations en K₂O des concombres de transformation, selon le diagnostic nutritionnel

	Humidité		Exportations ^{1,2}				
	(%)	(kg K ₂ O/t humide)		(kg K ₂ O/ha)			
		Moy	Éc-T	Moy	Med	Min	Max
Haut rendement et équilibre nutritionnel (« population de tête »)	95	1,98	0,18	206	202	172	248
Faible rendement et équilibre nutritionnel	96	1,72	0,06	177	179	173	179
Faible rendement et déséquilibre nutritionnel	96	1,92	0,33	169	169	70	292
Haut rendement et déséquilibre nutritionnel	96	1,80	0,10	210	201	170	264

¹ Moy : moyenne ; Éc-T : Écart-type; Med : médiane ; Min : valeur minimale ; Max : valeur maximale.

² Les exportations présentées dans ce tableau ont été calculées sur le rendement vendable seulement et sont valides pour une régie de culture qui laisse les concombres non-commercialisables au champ.

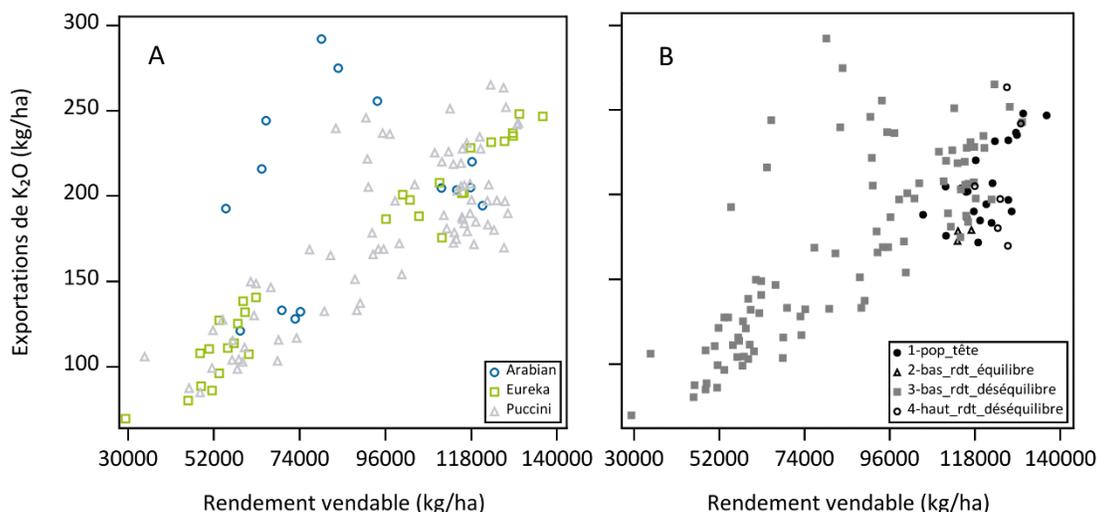


Figure 12. Exportations de potassium du concombre de transformation en fonction des rendements vendables selon les variétés (A) et le diagnostic nutritionnel (B).

5. CONCLUSION

Les travaux réalisés par l'IRDA dans le cadre du Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation 2020-2023 (MIRVRF) ont permis de générer de nouvelles connaissances centrales pour la fertilisation du concombre de transformation en sol minéral, en plus de mettre à jour les classes de fertilité et les doses optimales en azote pour cette culture. Ces recommandations reposent sur l'analyse des données validées d'expérimentations scientifiques québécoises réalisées au champ, appuyées de l'expertise agronomique et de principes scientifiques reconnus dans le domaine de la nutrition des cultures.

Dans le cas du concombre de transformation, la recherche de données supplémentaires n'ayant pas permis de bonifier la base de données, les VSRF ont été déterminées exclusivement à partir des données des essais du PSEF. Celles-ci ont été établies sur la base des gains en rendement vendable par rapport à un témoin non-fertilisé, sans distinction quant au groupe de textures du sol. La quantité d'azote recommandée, tous sols confondus, a subi une légère hausse par rapport à l'actuelle recommandation du CRAAQ (2010) dont la grille porte toutefois sur plusieurs cultures différentes de la famille des cucurbitacées et n'est pas spécifique au concombre de transformation (cornichon). Cependant, les modèles d'analyses utilisant la teneur en N-NO₃ dans le sol ont indiqué que, lorsque le sol contenait plus de 11 ppm de N-NO₃, la dose pouvait être réduite sans compromettre les rendements et la qualité des récoltes. En considérant que le N-NO₃ du sol extrait au KCl ne fait actuellement pas partie des analyses de routine des entreprises agricoles, ce résultat a été intégré sous la forme d'une note de bas de tableau plutôt que comme indicateur de fertilité principal. Ce faisant, les agronomes et les entreprises pourront intégrer progressivement cette analyse et cet ajustement des doses à leurs recommandations. L'ajout de cette précision à la recommandation permettra d'atténuer les risques de diffusion du N dans l'environnement par l'évitement de la surfertilisation. La dose qui considère la teneur en N-NO₃ du sol, soit 90 kg/ha, constitue une diminution en regard de l'actuelle recommandation du CRAAQ (2010). Les VSRF émises ont tenu compte de l'effet de l'azote sur la qualité des concombres de transformation, l'obtention des calibres préconisés et les pertes de récolte, afin de s'assurer de ne pas compromettre un autre aspect de la production. Enfin, bien que seules des VSRF azotées aient été proposées dans ce document, des valeurs de concentrations et d'exportations en N, en P₂O₅ et en K₂O ont été calculées et se trouvent désormais à la disposition des producteurs et conseillers agricoles.

Les travaux de l'IRDA permettront aux acteurs du milieu agricole de bénéficier de recommandations et d'informations reliées à la nutrition du concombre de transformation qui sont propres aux sols et au climat québécois, lesquelles permettront de mieux concilier la productivité et la conservation des ressources.

6. FERTILISATION DU CONCOMBRE DE TRANSFORMATION

Valeurs scientifiques de référence en fertilisation

AZOTE ¹			
Groupe de textures	Période d'application ²	Fractionnement ³ (kg N/ha)	VSRF (kg N/ha)
G1, G2, G3	Au semis	70	120 * ⁴
	Stade 5 à 6 feuilles	50	

* Dans le cas où le nitrate de printemps (N-NO₃) est d'une concentration supérieure à 11 ppm, la dose peut être réduite à 90 kg N/ha sans compromettre les rendements ou la qualité des récoltes. Le N-NO₃ a été dosé au KCl 2M en laboratoire sur la profondeur 0-30 cm. Lors de la réalisation des essais, la dose de 90 kg N/ha a été fractionnée en deux apports de 50 kg/ha et de 40 kg/ha, respectivement au semis et au stade 5-6 feuilles.

Abréviations : G1 : sols de texture fine; G2 : sols de texture moyenne; G3 : sols de texture grossière ; VSRF : Valeur scientifique de référence en fertilisation.

¹ Les VSRF ont été établies sur la base d'un jeu de données constitué en quasi-totalité de données ayant une teneur en MO_{PAF} inférieure à 5 %.

² Dans le cadre des essais, la première application d'engrais a été effectuée après la levée (une à deux semaines après le semis) pour des raisons techniques.

³ Les fractionnements sont présentés tels que testés lors des essais.

⁴ Dose agronomique optimale dans cette catégorie de sols.



Ce tableau présente les résultats scientifiques d'essais de fertilisation. La grille officielle du MAPAQ, établie par le Comité scientifique, fait l'objet d'une publication séparée. Celle-ci peut différer des valeurs scientifiques de référence en fertilisation obtenues par l'IRDA et présentées dans ce document, en raison de la prise en compte de considérations agronomiques ou techniques autres que les données des présents essais.

Remerciements

L'équipe de l'IRDA tient à remercier d'une manière spéciale les divers intervenants, les producteurs et spécialistes pour leur collaboration facilitant la prise en compte des contraintes et des pratiques culturelles.

7. RÉFÉRENCES

- Agba, O. et Enya, V. (2005). Responses of cucumber (*Cucumis sativa* L) to nitrogen in Obubra, Cross River State. *Global Journal of Agricultural Sciences*, 4(2), 165-167.
- Anderson, C. et Schumacker, R. E. (2003). A comparison of five robust regression methods with ordinary least squares regression: Relative efficiency, bias, and test of the null hypothesis. *Understanding Statistics: Statistical Issues in Psychology, Education, and the Social Sciences*, 2(2), 79-103.
- Bélangier, G., Ziadi, N., Walsh, J. R., Richards, J. E. et Milburn, P. H. (2003). Residual Soil Nitrate after Potato Harvest. *Journal of Environmental Quality*, 32(2), 607-612. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.6070>
- Black, C. A. (1993). *Soil Fertility Control and Evaluation*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Brown, D. (1945). The growth and composition of the tops of peach trees in sand culture in relation to nutrient-element balance. *West Va. Agr. Exp. Sta. Bui*, 322, 1-72.
- Cate, R. et Nelson, L. (1971). A Simple Statistical Procedure for Partitioning Soil Test Correlation Data Into Two Classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35(4), 658-660.
- Cope, J. T., Rouse, R. D., Walsh, L. M. et Beaton, J. D. (1973). Interpretation of soil test results. *Soil testing and plant analysis*, 35-54.
- CPVQ. (2000). Le concombre de transformation. Feuillet technique. AGDEX 256. Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ).
- CRAAQ. (2010). *Guide de référence en fertilisation. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec* (2e éd.). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Commission chimie et fertilité des sols Quebec, Canada.
- Culman, S., Fulford, A., Camberato, J. et Steinke, K. (2020). *Tri-State Fertilizer Recommendations for Corn, Soybean, Wheat, and Alfalfa*.
- Dai, J., Liu, S., Zhang, W., Xu, R., Luo, W., Zhang, S., Yin, X., Han, L. et Chen, W. (2011). Quantifying the effects of nitrogen on fruit growth and yield of cucumber crop in greenhouses. *Scientia Horticulturae*, 130(3), 551-561. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423811004092>
- De Bauw, P., Van Asten, P., Jassogne, L. et Merckx, R. (2016). Soil fertility gradients and production constraints for coffee and banana on volcanic mountain slopes in the East African Rift: A case study of Mt. Elgon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 231, 166-175.
- Defra, A. (2010). Fertiliser manual (RB209). *Department of the Environment, Food and Rural Affairs, TSO (The Stationary Office), London*.
- Elkner, K. (1982). The influence of different moisture contents and nitrogen levels on the formation of empty cavities in cucumbers (*Cucumis sativus* L.). *Polish Botanical Society*, 35(1), 61-68.
- FADQ. (2018). Rendements réels en assurance récolte (2014-2018).
- Fink, M., Feller, C., Scharpf, H. C., Weier, U., Maync, A., Ziegler, J., Paschold, P. J. et Strohmeyer, K. (1999). Nitrogen, phosphorus, potassium and magnesium contents of field vegetables - Recent data for fertiliser recommendations and nutrient balances. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 162(1), 71-73.
- FQPFLT. (2017). Validation des rendements des concombres parthénocarpiques sous irrigation goutte-à-goutte. Producteurs de légumes de transformation du Québec (PLTQ).
- Gómez-López, M. D., Fernández-Trujillo, J. P. et Baille, A. (2006). Cucumber fruit quality at harvest affected by

- soilless system, crop age and preharvest climatic conditions during two consecutive seasons. *Scientia Horticulturae*, 110(1), 68-78.
- Hubert, M. et Debruyne, M. (2010). Minimum covariance determinant. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*, 2(1), 36-43.
- IRDA. (2020a). Package « catenelson ». Institut de recherche et développement en agroenvironnement. <https://github.com/irda-rd/catenelson.git>
- IRDA. (2020b). Package « cnd ». Institut de recherche et développement en agroenvironnement. <https://github.com/irda-rd/cnd.git>
- Janoudi, A. K. et Widders, I. E. (1993). Water Deficits and Fruiting Affect Carbon Assimilation and Allocation in Cucumber Plants. *HortScience*, 28(2), 98. <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/28/2/article-p98.xml>
- Jenni, S., Rekika, D. et Stewart, K. A. (2007). Yield, quality and revenue of pickling cucumbers with irrigation and supplemental N fertilizer under a humid climate. *Canadian Journal of Plant Science*, 87(3), 571-580.
- Johnson, W. A., Evans, C. E., Mayton, E. L. et Griffey, W. A. (1973). Soil fertility studies with pickling cucumbers in the Piedmont area of Alabama.
- Khiari, L., Parent, L. et Tremblay, N. (2001a). Critical Compositional Nutrient Indexes for Sweet Corn at Early Growth Stage. *Agronomy Journal*, 93(4), 809-814.
- Khiari, L., Parent, L. et Tremblay, N. (2001b). Selecting the High-Yield Subpopulation for Diagnosing Nutrient Imbalance in Crops. *Agronomy Journal*, 93(4), 802-808.
- Landry, C., Joseph, C.-A., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2022a). Fascicule 05 : Fertilisation de la betterave potagère. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. <https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>
- Landry, C., Joseph, C., Houde, S., Forest-Drolet, J. et Grenier, M. (2022b). Fascicule 06 : Fertilisation de l'oignon espagnol en sol minéral. Mandat IRDA de révision des valeurs scientifiques de référence en fertilisation du Québec (2020-2023). Présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. <https://irda.qc.ca/fr/publications/?r=1745&t=1411#documents>
- MAAARO. (2011). *Recommandations pour les cultures légumières 2010-2011, Publication 363F*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.
- MAPAQ. (2021). *Monographie de l'industrie des légumes de transformation au Québec*. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographie_legumestransformation_web.pdf
- MDDEP. (2010). *Règlement sur les exploitations agricoles (REA)*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/index.htm
- Metz, F. et Nass, D. (2015). Fertilisation des grandes cultures, Guide technique. Chambre d'agriculture région Alsace. https://grandest.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/Alsace_fertilisation_grandes_cultures_guide_Alsace.pdf
- Munroe, J., Brown, C., Kessel, C., Verhallen, A., Lauzon, J., O'Halloran, I., Bruulsema, T. et Cowan, D. (2017). Manuel sur la fertilité du sol. *Publication 611F*, 239.
- Nelson, L. A. et Anderson, R. L. (1977). Partitioning of soil test—Crop response probability. *Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results*, 29, 19-38.

- OMAFRA. (2011). *Vegetable Production Recommendations 2010-2011—Publication 363*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario.
- Parent, L. et Dafir, M. (1992). A Theoretical Concept of Compositional Nutrient Diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(2), 239-242.
- Parent, L., Natale, W. et Ziadi, N. (2009). Compositional nutrient diagnosis of corn using the Mahalanobis distance as nutrient imbalance index. *Canadian Journal of Soil Science*, 89(4), 383-390.
- Parent, S.-E., Parent, L. E., Rozane, D.-E. et Natale, W. (2013). Plant ionome diagnosis using sound balances: case study with mango (*Mangifera Indica*). *Frontiers in Plant Science*.
<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2013.00449>
- Pellerin, A., Parent, L., Fortin, J., Tremblay, C., Khiari, L. et Giroux, M. (2006). Environmental Mehlich-III soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Canadian Journal of Soil Science*, 86(4), 711-723.
- PLTQ. (2022). *Convention de mise en marché*. Producteurs de légumes de transformation du Québec.
- Reid, J. B. et Morton, J. (2019). *Nutrient management for vegetable crops in New Zealand*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.2401910>
- Resende, G. M. de, Flori, J. E. et Costa, N. D. (2003). Productivity of pickling cucumber in the São Francisco Valley, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38(2), 251-255.
- SAS Institute inc. (2018). SAS/STAT® 15.1 User's guide. SAS Institute inc.
- Schlering, C., Schweiggert, R., Dietrich, H., Frisch, M. et Zinkernagel, J. (2020). Effects of moderately-reduced water supply and picking time on the chemical composition of pickling cucumber (*cucumis sativus* L.) in open field cultivation. *Agronomy*, 10(8), 1-21.
- Souza, G. P. de, Borges, I. A., Benett, C. G. S., Salomao, L. C., Benett, K. S. S. et Perfeito, D. G. de A. (2018). Nitrogen fertilization and different crop management practices in pickling cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 12(10), 1603-1608.
- Sullivan, D., Peachey, R., Heinrich, A. et Brewer, L. (2017). Nutrient management for sustainable vegetable cropping systems in Western Oregon. *Oregon State University Extension*, (May), EM 9165.
https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/%0Ahttps://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/em9165_0.pdf
- Umamaheswarappa, P. et Krishnappa, K. S. (2004). Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on cucumber cv. Poinsette grown in dry region of Southern India. *Tropical Science*, 44(3-4), 174-176.
- USDA. (2021). *Crop Nutrient Tool*. Natural Resources Conservation Service. <http://plants.usda.gov>
- Van Eerd, L. L. et O'Reilly, K. A. (2009). Yield, nitrogen dynamics, and fertilizer use efficiency in machine-harvested cucumber. *HortScience*, 44(6), 1712-1718.
- Warncke, D., Dahl, J. et Zandstra, B. (2004). Nutrient Recommendations for Vegetable Crops in Michigan (E2904). *Michigan State University Extension Bulletin*, (E2934), 1-32.
- Wetselaar, R., Smith, G. D. et Angus, J. F. (1998). Field measurement of soil nitrate concentrations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29(5-6), 729-739.
- Zhang, H. xi, Chi, D. cai, Wang, Q., Fang, J. et Fang, X. yu. (2011). Yield and Quality Response of Cucumber to Irrigation and Nitrogen Fertilization Under Subsurface Drip Irrigation in Solar Greenhouse. *Agricultural Sciences in China*, 10(6), 921-930.

Annexe I

Sommaire des données exclues de l'analyse et justifications

# site	Donnée exclue	Raison justifiant l'exclusion
2	303	Plusieurs plants sont manquants sur le rang de récolte. Coefficient de variation du traitement à 44 %.
5	105 (N) Bloc 2 et 3 (N)	Accumulation d'eau dans le bas du dispositif. Les plants sont chétifs. Zone de mauvais rendements non-contrôlée par le dispositif expérimental.
7	202 (N; N-NO ₃ à la récolte; 30-60 cm)	Échantillon inondé par la pluie durant son séchage.
8	308 (P; récolte 4) 109, 110 (P); 111, 112, 211, 212 (K)	Donnée aberrante, coefficient de variation du traitement à 49 %. Zone de mauvais rendements non-contrôlée par le dispositif expérimental.
9	302 (N; récolte 3)	Donnée aberrante, coefficient de variation du traitement à 39 %.
12	Bloc 3 (K et N), essai P 101, 201 (N)	Bris par la machinerie (passage de la récolteuse sur les rangs de ces blocs et essais). Forte pression de mauvaises herbes, zone de mauvais rendements non-contrôlée par le dispositif expérimental.
13	Bloc 3 (P) Données de DASE	Bris par la machinerie et pression de mauvaises herbes résultant en une zone de mauvais rendements non contrôlée par le dispositif expérimental. Données non-conformes au protocole du PSEF.
14	Blocs 2 et 3 (N)	Problématique de terrain, levée inégale et populations non uniformes créant des zones de mauvais rendements non-contrôlées par le dispositif expérimental.
18	201 (N)	Faible population dans cette unité expérimentale à l'origine de faibles rendements.
19	Essai K	Bris par la machinerie et pression de mauvaises herbes créant des zones de mauvais rendements non-contrôlées par le dispositif expérimental.
20	Site	Les profils de sols effectués par l'équipe des pédologues ont révélé que l'essai avait été établi sur un sol dégradé. De plus, la levée a été inégale entraînant des rendements particulièrement variables et des données manquantes. Enfin, un patron spatial de rendements est observé, ce qui crée une zone de mauvais rendements non-contrôlée par le dispositif expérimental.