

NOUVELLE MÉTHODE D'INTERPRÉTATION DES BESOINS EN OLIGOÉLÉMENTS DES CULTURES MARAÎCHÈRES AU QUÉBEC

Présentation des résultats

**Melissa Quinche, agr., M.Sc., Ph.D.
Léon-Étienne Parent, agr., Ph.D**

Ce projet a été réalisé en vertu du sous-volet 3.1 du programme Prime-Vert 2018-2023 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

2 février 2021

PLAN DE LA PRÉSENTATION

Contexte et objectifs

Partie 1 : L'état général des cultures maraîchères québécoises sensibles aux déséquilibres en oligoéléments

Partie 2 : La caractérisation des cultures maraîchères sensibles en fonction de leurs besoins en oligoéléments

Partie 3 : Les indicateurs de déséquilibre nutritionnel en oligoéléments des cultures maraîchères

Conclusions et perspectives

Contexte

- La fertilisation raisonnée des cultures représente un défi important du point de vue agroenvironnemental.
- Les cultures maraîchères sont sensibles à divers degrés aux carences et aux excès d'oligoéléments, mais les producteurs ne disposent pas d'indicateurs nutritionnels fiables pour les applications d'oligoéléments visant de hauts rendements.
- Une connaissance approfondie des oligoéléments et de leurs interactions est essentielle pour atteindre une fertilisation raisonnée des cultures ayant un impact minimal sur la qualité de l'eau, la conservation et la santé des sols.

Objectifs du projet

Objectif principal

Élaborer une revue de littérature sur la fertilisation des cultures maraîchères en oligoéléments en prenant en compte l'interaction entre les nutriments et les conditions environnementales.

Objectifs spécifiques

- Définir les cultures maraîchères les plus sensibles aux déséquilibres en oligoéléments
- Faire une revue de la littérature scientifique et technique sur les cultures maraîchères sensibles en fonction de leurs besoins en oligoéléments
- Diagnostiquer les oligoéléments dans les sols et les tissus végétaux afin d'atteindre des rendements élevés et une gestion efficiente des oligoéléments en sols québécois

**L'ÉTAT GÉNÉRAL DES CULTURES
MARAÎCHÈRES QUÉBÉCOISES SENSIBLES
AUX DÉSÉQUILIBRES EN OLIGOÉLÉMENTS**

PARTIE 1

1.1 Sélection et description de la population à enquêter

Catégories des intervenants contactés

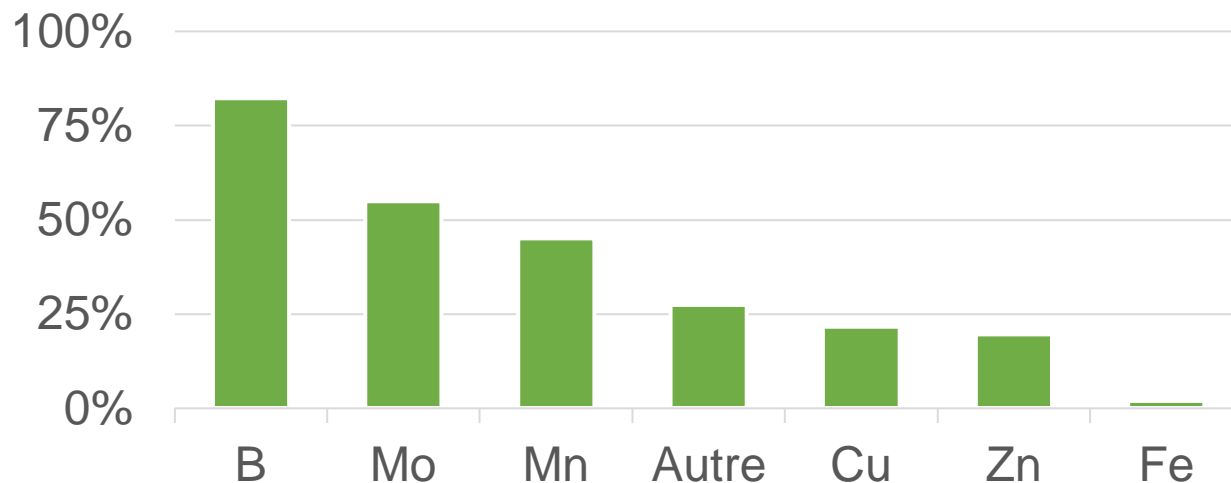
Catégorie	Nombre	Pourcentage	Nombre	Pourcentage
	d'intervenants contactés	d'intervenants contactés	d'intervenants participants	d'intervenants participants
Producteurs	75	54 %	27	19 %
Conseillers	56	40 %	23	17 %
Commercial	8	6 %	1	1 %

Les deux plus importantes régions maraîchères du Québec, soit la Montérégie et Lanaudière, sont bien représentées dans le sondage. Globalement, les autres régions, la Capitale-Nationale, le Centre-du-Québec et le Saguenay – Lac-Saint-Jean sont un peu sous représentées, tandis que les Laurentides et le Bas-Saint-Laurent sont, au contraire, surreprésentés.

1.2 Résultat des enquêtes

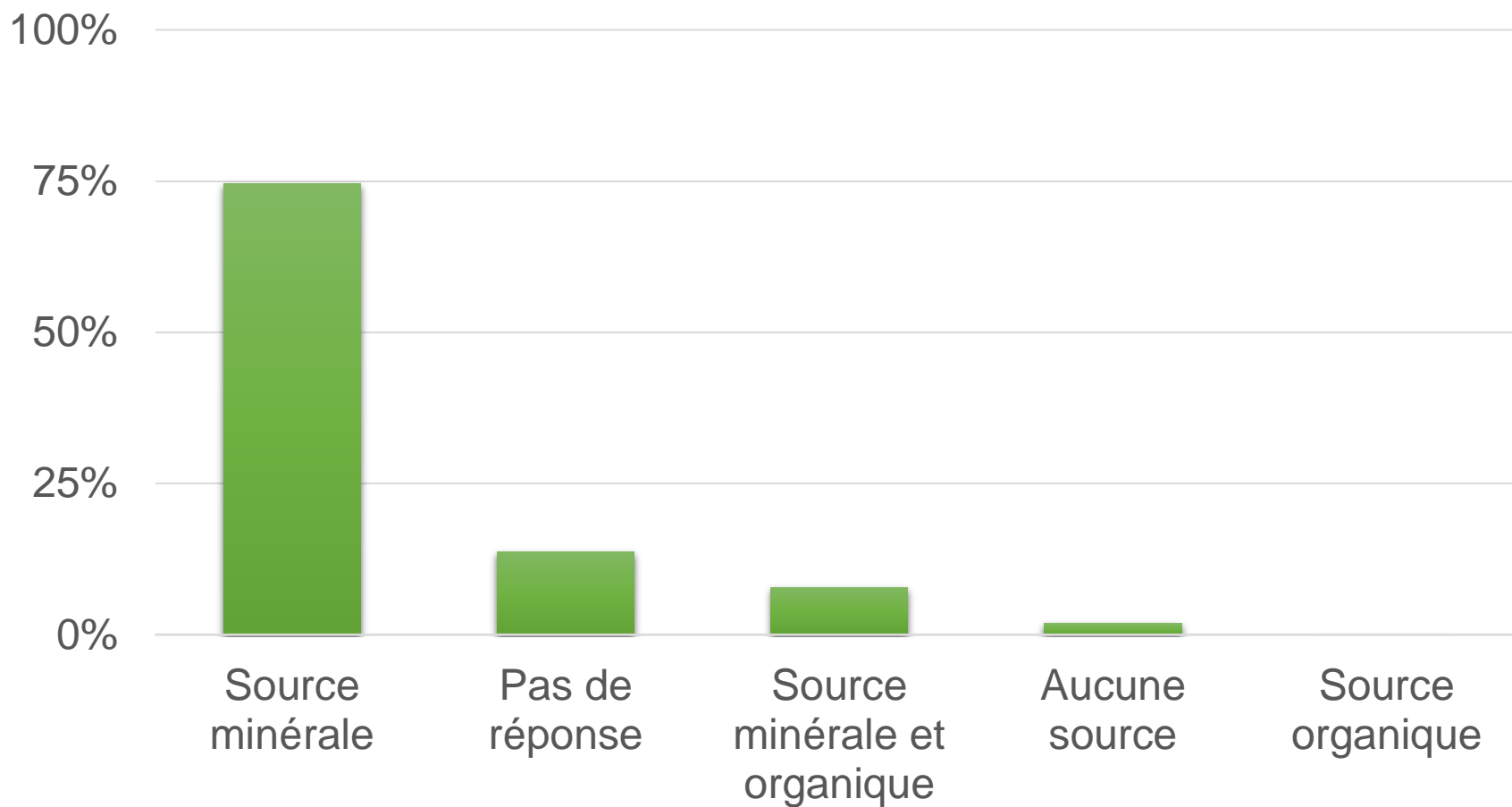
Cultures problématiques en termes de déséquilibre en oligoéléments selon le type de sol

- Sols minéraux (SM) : le chou-fleur (72 %), le chou (72 %), le brocoli (56 %), la pomme de terre (34 %) et le céleri (28 %)
- Sols organiques (SO) : l'oignon (58 %), le céleri (39 %), le chou-chinois, (32 %), la laitue (26 %) et la carotte (26 %)



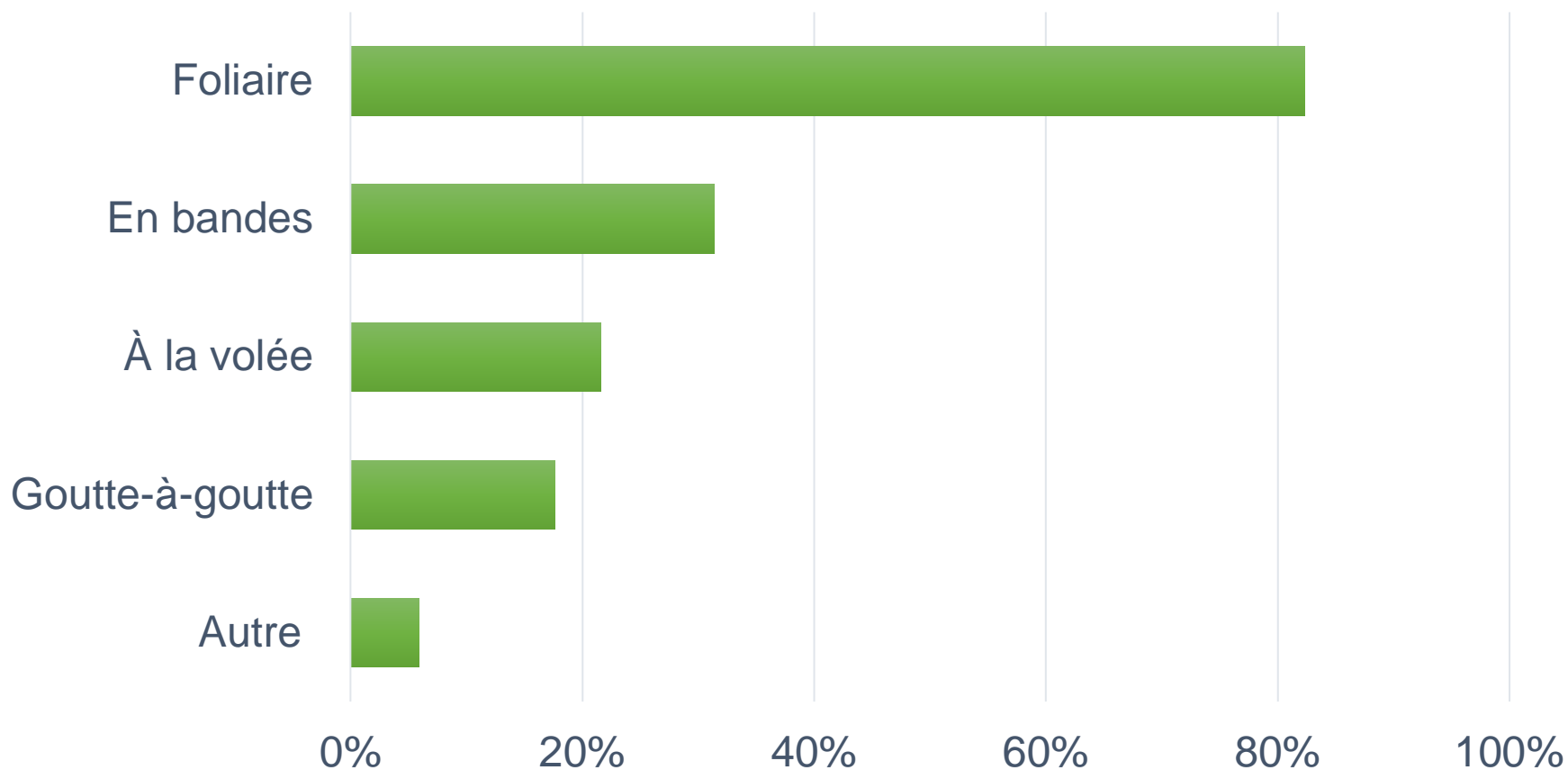
1.2 Résultat des enquêtes

Principales sources d'oligoéléments



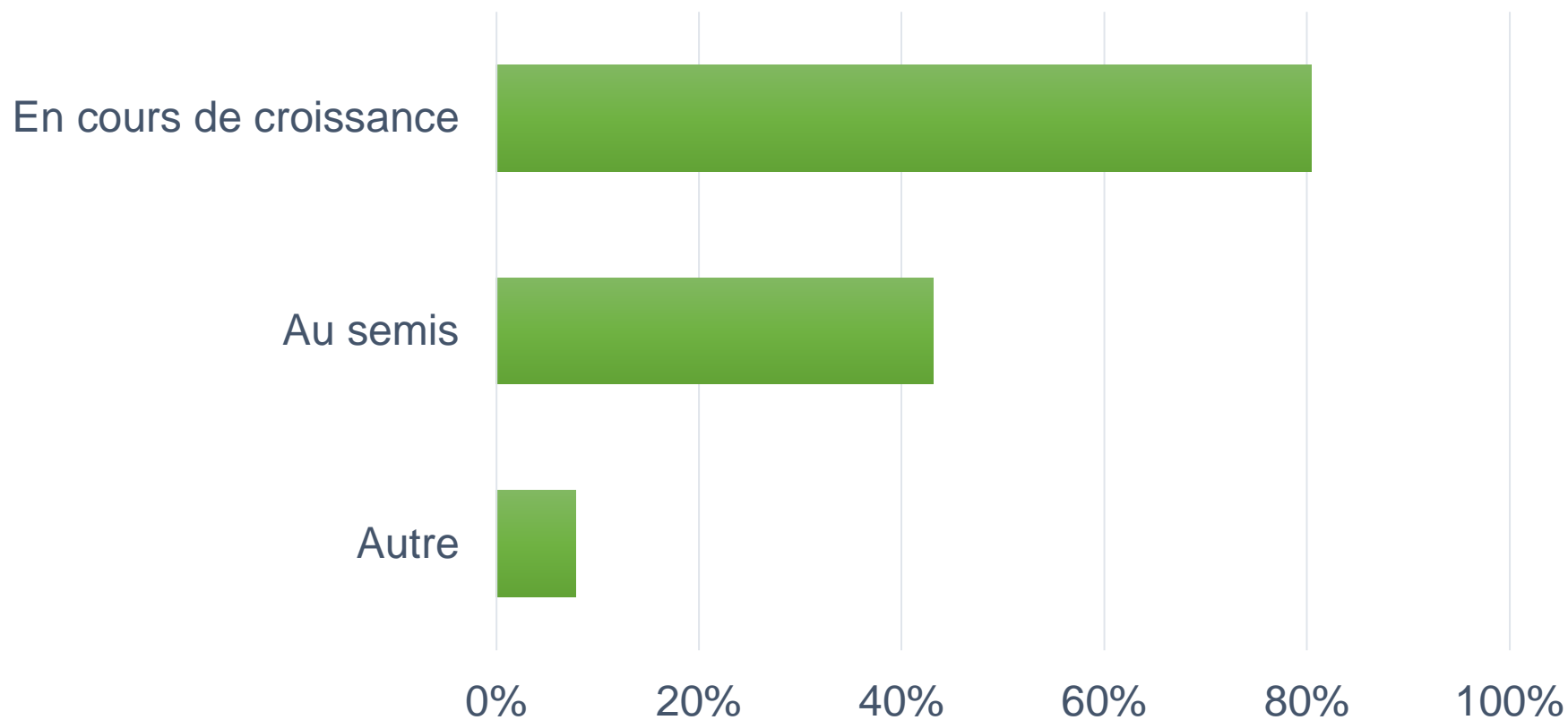
1.2 Résultat des enquêtes

Principaux modes de fertilisation



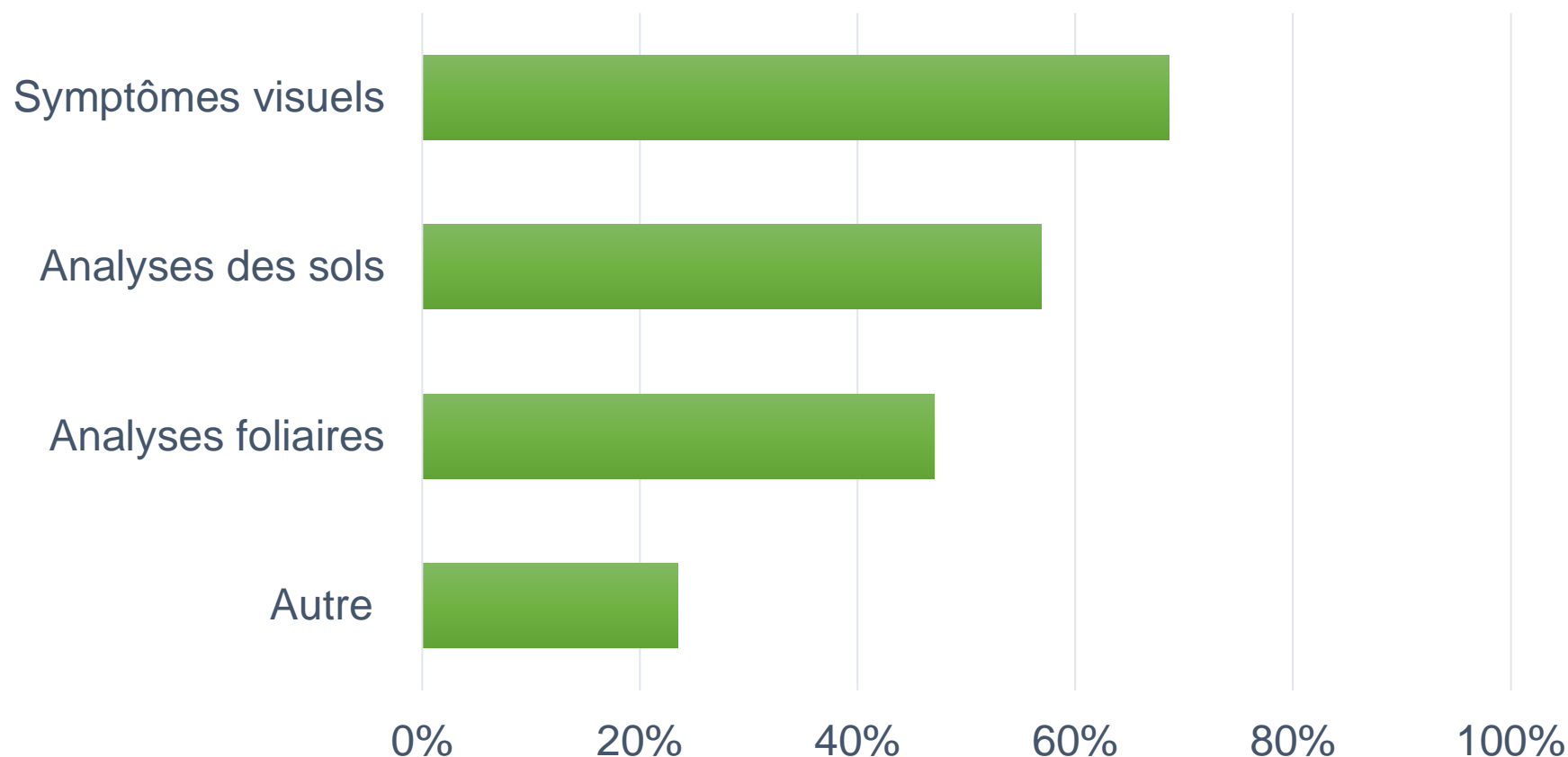
1.2 Résultat des enquêtes

Moment d'application des oligoéléments



1.2 Résultat des enquêtes

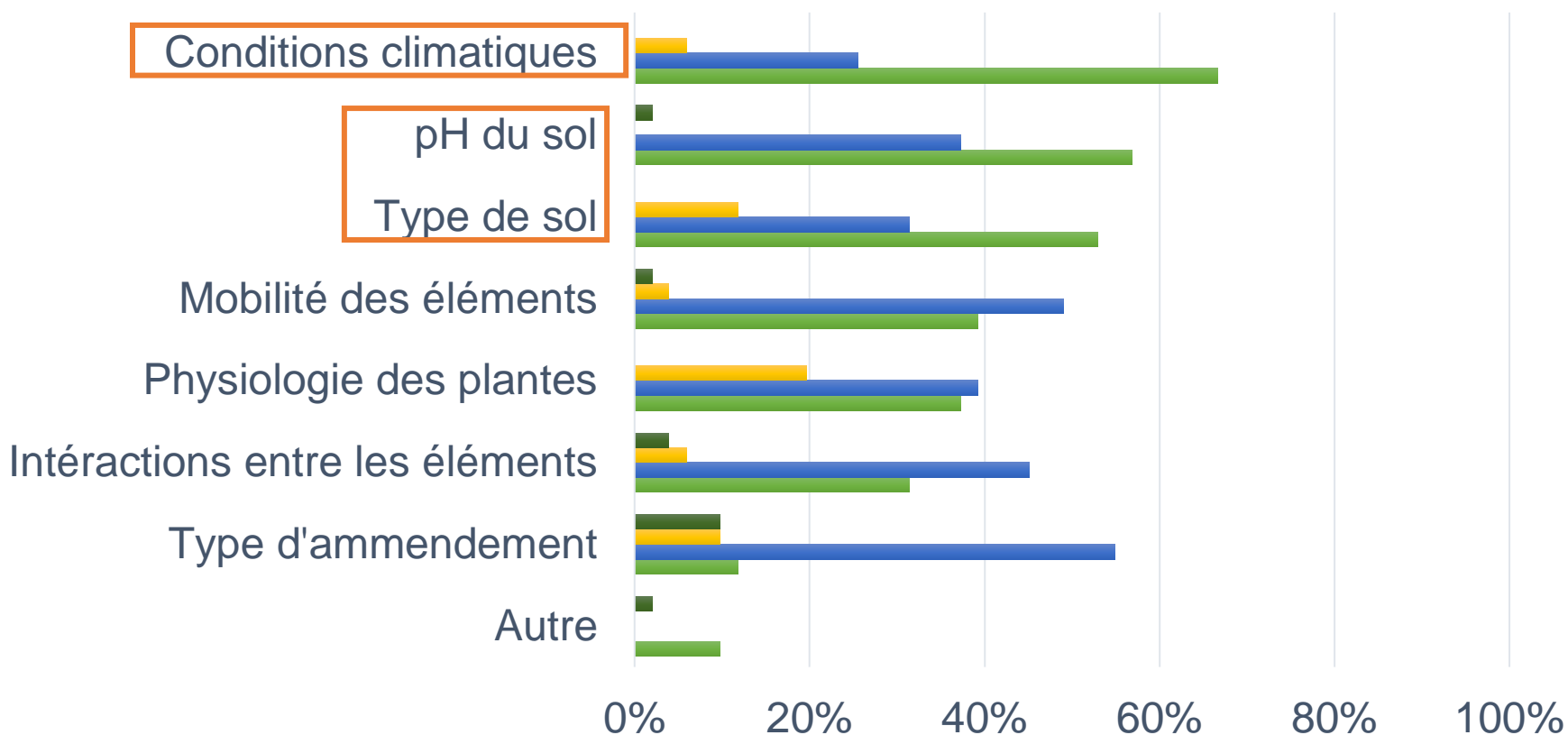
Critères de décision pour l'application des oligoéléments



1.2 Résultat des enquêtes

Facteurs qui influencent la disponibilité des oligoéléments

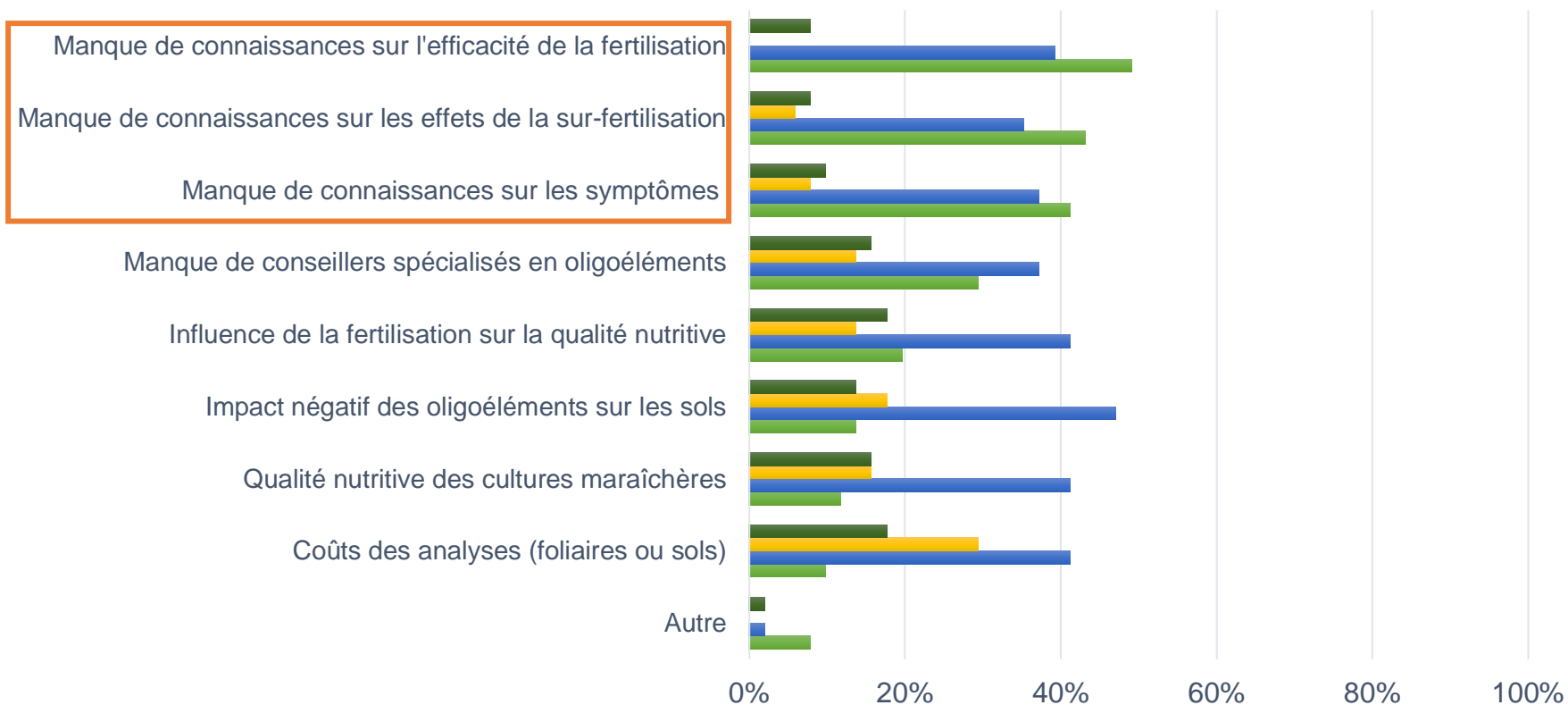
■ Sans importance ■ Faible ■ Moyenne ■ Élevée



1.2 Résultat des enquêtes

Principales préoccupations ou problématiques de la fertilisation en oligoéléments

■ Sans importance ■ Faible ■ Moyenne ■ Élevée



1.3 Sélection des cultures maraîchères les plus sensibles aux déséquilibres nutritifs en oligoéléments

Sélection des cultures maraîchères en sols minéraux

Culture	Enquêtes	Disponibilité des essais	
		Analyse de sols	Analyses foliaires
Chou	72 %	Disponible	-
Chou-fleur	72 %	Disponible	-
Brocoli	56 %	Disponible	-
Pomme de terre	34 %	Disponible	Disponible

1.3 Sélection des cultures maraîchères les plus sensibles aux déséquilibres nutritifs en oligoéléments

Sélection des cultures maraîchères en sols organiques

Culture	Enquêtes	Disponibilité des essais	
		Analyse de sols	Analyses foliaires
Oignon	58 %	Disponible	Disponible
Céleri	39 %	Disponible	Disponible
Laitue	26 %	Disponible	-
Carotte	26 %	Disponible	Disponible

LA CARACTÉRISATION DES CULTURES MARAÎCHÈRES SENSIBLES EN FONCTION DE LEURS BESOINS EN OLIGOÉLÉMENTS

PARTIE 2

2.1 Fonction des oligoéléments

Fonction	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Croissance	■	■	■	■	■	■
Synthèse de protéines	■	■	■	■	■	■
Activité enzymatique	■	■	■	■	■	■
Photosynthèse	■	■	■	■	■	■
Métabolisme	■	■	■	■	■	■
Fixation d'azote	■	■	■	■	■	■
Réduction de nitrates	■	■	■	■	■	■
Résistance de la plante	■	■	■	■	■	■
Coloration	■	■	■	■	■	■
Qualité de stockage	■	■	■	■	■	■

2.2 Absorption des oligoéléments

Absorption racinaire des oligoéléments

Oligoélément	Forme chimique absorbée	Mécanisme d'absorption
Bore	Borate (BO_3) ³⁻	Débit massique
Cuivre	Cu^{2+} ou chélaté	Interception
Fer	Fe^{2+} ou chélaté	Interception
Manganèse	Mn^{2+} ou chélaté	Diffusion
Molybdène	MoO_4 ²⁻	Débit massique
Zinc	Zn^{2+} ou chélaté	Diffusion

2.3 Sources d'oligoéléments

Sources minérales

Oligoéléments	Source d'oligoélément	Teneur en oligoélément (%)
Bore	Borate de sodium	10-20
	Solubor *	21
	Acide borique	18
Cuivre	Sulfate de cuivre *	25-35
	Oxyde cuivreux *	75-89
	Chélates *	10 -13
Fer	Sulfate ferreux *	19
	Oxyde ferreux	77
	Chélates *	5-14
Manganèse	Sulfate de manganèse *	26-28
	Oxyde manganoux	41-68
	Chélates **	12
Molybdène	Molybdate de sodium *	39
	Molybdate d'ammonium *	54
Zinc	Sulfate de zinc	23-35
	Oxyde de zinc	78
	Chélates	9-14

* Convient aux applications foliaires

** Ne convient pas aux applications dans le sol

2.3 Sources d'oligoéléments

Sources organiques

Source organique	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	g/t ¹					
Foin de graminées et légumineuses	1-5	2-15	91	25-200	0.1-4	15-60
Paille	91	5	91	181	0.5-45	23
Fumier de volailles	36- 60	14-27	421-907	81-209	3-5.5	82-113
Fumier de bovins	14-20	5-10	40-123	5-10	0.5-1	13-15
Fumier de porcs	40	5	254-280	20	1	60
Fumier de chevaux	15	5	36-135	10	1	15
Fumier d'ovins	10	5	145-160	10	1	25

¹ Base humide pour le fumier, sinon base sèche pour les autres sources organiques

2.4 Modes de fertilisation

Oligoélément	Mode de fertilisation recommandé
Bore	En bandes
Cuivre	En bandes
Fer	En bandes ou foliaire
Manganèse	En bandes ou foliaire
Molybdène	En bandes ou foliaire
Zinc	En bandes ou à la volée

L'efficacité des applications est influencée principalement par :

- Le type d'engrais (source et forme)
- Les propriétés du sol
- Le mode d'application
- Les caractéristiques et le statut nutritionnel de la plante

2.5 Standards actuels en oligoéléments

Sols

- Les intervalles de référence du CRAAQ (2010) sont exprimés en concentration d'oligoéléments et visent principalement les grandes cultures.
- Les valeurs de référence n'ont pas été changées par rapport aux éditions précédentes car aucune nouvelle donnée probante n'était alors disponible.
- Il n'y a aucune valeur de référence spécifique aux cultures maraîchères.

Foliaires

- L'absence de standards pour :
 - Le chou-fleur, le céleri et l'oignon;
 - Le chou et le brocoli (Cu et Fe);
 - La carotte (Cu, Mn).
- Il n'y a aucune valeur de référence pour le molybdène.

2.6 Symptômes de déséquilibre en oligoéléments des cultures maraîchères

Sensibilité des cultures maraîchères aux carences en oligoéléments

Culture	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Chou	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Faible
Chou-fleur	Élevé	Moyen	Élevé	Moyen	Élevé	-
Brocoli	Moyen	Moyen	Élevé	Moyen	Élevé	-
Pomme de terre	Faible	Faible	-	Élevé	Faible	Moyen
Oignon	Faible	Élevé	-	Élevé	Élevé	Élevé
Céleri	Élevé	Moyen	-	Moyen	Faible	-
Laitue	Moyen	Élevé	-	Élevé	Élevé	Moyen
Carotte	Moyen	Moyen	-	Moyen	Faible	Faible

2.6 Symptômes de déséquilibre en oligoéléments des cultures maraîchères

Symptômes de carence



2.6 Symptômes de déséquilibre en oligoéléments des cultures maraîchères

Toxicité :

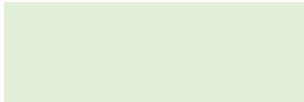

Les risques de toxicité sont surtout liés aux sols acides

- B : nécrose progressive des feuilles, les feuilles peuvent tomber prématurément .
- Cu* : chlorose des feuilles, inhibition de la croissance
- Fe : l'apparition de taches nécrotiques sur les feuilles, diminution de la croissance
- Mn : taches noirâtres
- Mo* : les choux-fleurs présentent une couleur pourpre vif.
- Zn* : les symptômes correspondent généralement à ceux d'une chlorose ferrique.

*** Cet élément peut être absorbé en quantités supérieures aux besoins sans effets toxiques apparents ou baisses de rendement !**

2.7 Facteurs qui affectent la biodisponibilité des oligoéléments

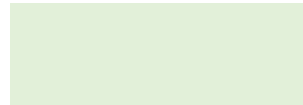
Facteurs	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
pH ↑	Diminution	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Diminution	Augmentation
Matière organique ↑	Augmentation	Augmentation	Diminution	Augmentation	Diminution	Augmentation
Excès d'eau	Augmentation	Augmentation	Diminution	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Sécheresse	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Mobilité des éléments	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Interactions	N, K, Ca	N, P, Fe, Mn Mo	P, Cu, Mn K	Fe, Ca, Cu K	N, Cu	P, Ca, Fe

Biodisponibilité : Diminution  Augmentation 

2.7 Facteurs qui affectent la biodisponibilité des oligoéléments

Facteurs	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
pH ↑	Diminution	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Matière organique ↑	Augmentation	Augmentation	Diminution	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Excès d'eau	Augmentation	Augmentation	Diminution	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Sécheresse	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Mobilité des éléments	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation	Augmentation
Interactions	N, K, Ca	N, P, Fe, Mn Mo	P, Cu, Mn K	Fe, Ca, Cu K	N, Cu	P, Ca, Fe

Biodisponibilité : Diminution



Augmentation



2.8 Biofortification

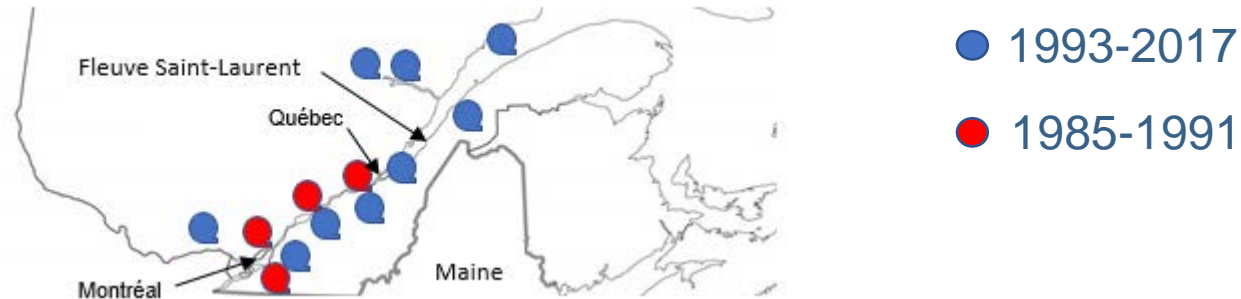
- Améliorer la qualité nutritionnelle d'un aliment par des pratiques agronomiques ou par des méthodes de transformation des aliments.
- Potentiel de biofortification Zn : Chou, brocoli, pomme de terre, carotte, laitue et oignon.
- L'efficacité de la biofortification dépend des espèces végétales, des formes d'engrais et des méthodes d'application.
- Des recherches supplémentaires devraient être menées pour comprendre l'impact de différentes sources d'engrais sur la qualité nutritionnelle des plantes légumières.

LES INDICATEURS DE DÉSÉQUILIBRE NUTRITIONNEL EN OLIGOÉLÉMENTS DANS LES CULTURES MARAÎCHÈRES

PARTIE 3

3.1 Description de la base de données

Localisation des sites expérimentaux



Données de sols

- 290 observations proviennent d'essais de fertilisation NP sur des cultures maraîchères cultivées dans les Histosols (« Sols organiques »).
- 650 observations proviennent d'essais de fertilisation NPK sur des crucifères cultivés dans les sols minéraux (Inceptisols).
- 7 968 observations proviennent d'essais de fertilisation NPK sur des cultures de pommes de terre cultivées dans les sols minéraux (Spodosols et Inceptisols).

3.2 Concentrations d'oligoéléments dans les sols du Québec

Sols minéraux

Culture	Crucifères	Pomme de terre
#Observations	650	7 968
Groupe Textural	G1, G2, G3	G1, G2, G3
pH _{H2O}	5.6-7.9	4.6-7.2
		mg kg ⁻¹
B	-	0.2-20
Cu	1.0-6.1	0-17
Fe	119-460	49-761
Mn	7-206	1-92
Mo	-	-
Zn	1.0-6.5	0-39

G1: sols à texture fine (texture autre que moyenne ou grossière); G2: sols à texture moyenne (limon, limoneux, limon); G3: sols à texture grossière (sable, limon sableux, sables limoneux)

3.2 Concentrations d'oligoéléments dans les sols du Québec

Sols organiques

Culture	Oignon	Céleri	Laitue	Carotte	Pomme de terre	Chou chinois
#Observations	46	42	90	32	48	32
pH _{H2O}	4.6-6.0	4.8-6.0	4.8-6.2	4.4-5.9	3.9-6.6	4.9-5.7
	mg kg ⁻¹					
B	-	-	-	-	-	-
Cu	5.7-49.3	9.7-49.8	6.9-52.2	7.6-51.4	1.4-26.1	4.8-29.4
Fe	278-1627	432-1052	396-1386	475-1216	440-1384	540-1188
Mn	29-81	20-56	19-100	19-91	13-116	19-46
Mo	-	-	-	-	-	-
Zn	13.8-39.6	14.6-41.6	12.5-44.1	8.7-34.6	6.2-35.3	18.1-39.7

3.2 Concentrations d'oligoéléments dans les tissus végétaux au Québec

Tissus végétaux

Culture	Oignon	Céleri	Carotte	Pomme de terre
#Observations	1 025	1 196	1 221	3 192
	mg kg ⁻¹			
B	13-51	37-220	11-131	8-175
Cu	1-229	9-603	2-186	1-329
Fe	47-994	15-281	1-3862	82-3263
Mn	17-1026	6-721	11-965	24-1779
Mo	-	-	-	-
Zn	10-538	1-593	21-233	1-934

3.3a Rendements moyens des cultures légumières au Québec utilisés comme seuils de classification

Culture	Rendement moyen (tonnes/ha)
Oignon	46.6
Carotte	37.7
Céleri	44.7
Laitue	24.7
Brocoli	13.6
Chou-fleur	20.6
Chou	38.8
Pomme de terre	33.8

Déziel, M.H. 2019. Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie de la pomme de terre au Québec. MAPAQ, Québec, Canada.

Déziel, M.H. 2017. Portrait-diagnostic sectoriel des légumes frais au Québec. MAPAQ, Québec, Canada.

3.3b Analyses numériques

Matrice de partition: méthode des forêts aléatoires

		Valeur prédite	
		Équilibré	Déséquilibré
Valeur observée	Rendement élevé	Vrai négatif (VN) <ul style="list-style-type: none"> • Rendement élevé • Équilibré 	Faux positif (FP) <ul style="list-style-type: none"> • Rendement élevé • Déséquilibré
	Rendement faible	Faux négatif (FN) <ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible • Équilibré 	Vrai positif (VP) <ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible • Déséquilibré

3.4 Intervalles adéquats des oligoéléments

Précision du modèle – Sols

Précision du modèle *Random Forest*, en utilisant les résultats des analyses de sol (texture, pH, C total et analyse de sol P, Cu, Zn, Mn, Fe et Al) pour trois groupes de cultures maraîchères.

Groupe de culture	Précision du modèle
Crucifères en sol minéral	0.726
Pomme de terre en sol minéral	0.665
Cultures en sol organique	0.881

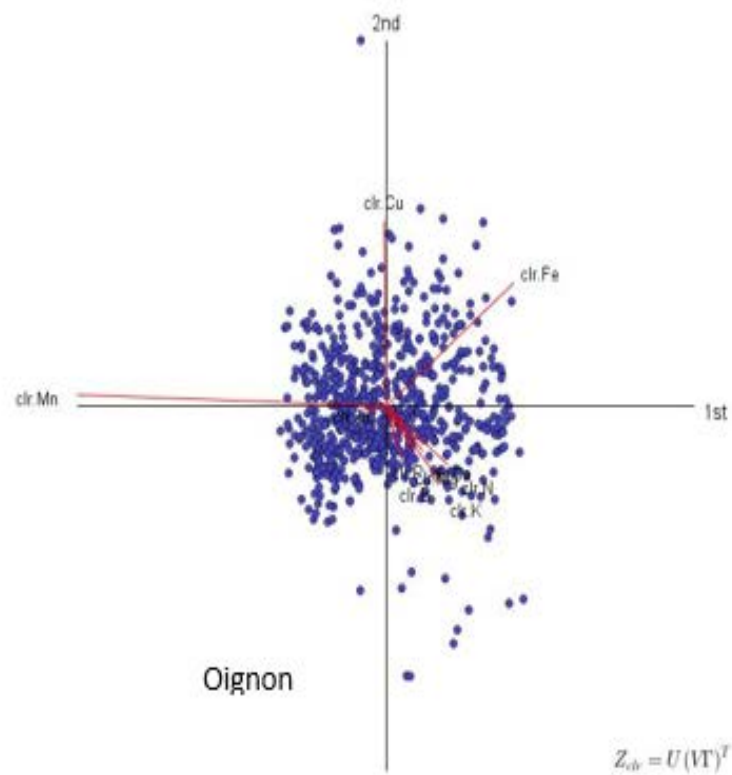
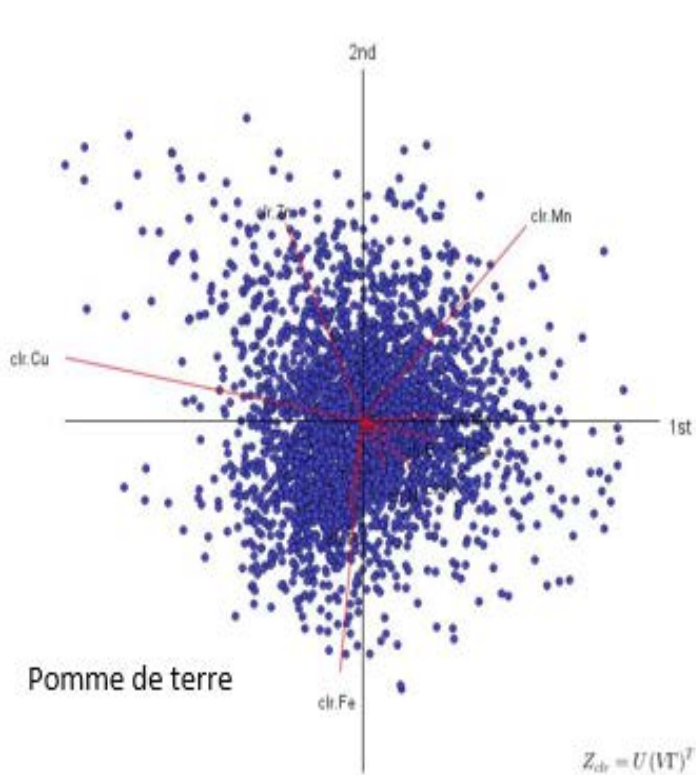
3.4 Intervalles adéquats des oligoéléments

Intervalles adéquats d'oligoéléments et facteurs associés dans les sols

Cu	Zn	Mn	Fe	Al	P	C	pH
mg kg ⁻¹						%	
Crucifères en sol minéral							
1.3-6.1	1.3-7.6	10-206	163-447	570-1287	12-271	1.1-4.2	6.1-7.4
Pommes de terre en sol minéral							
0.3-11.3	0.6-58.2	3-673	116-673	392-2511	15-580	1.1-6.7	4.9-6.7
Cultures en sol organique							
4.8-52.2	8.7-44.1	19-100	278-1628	1-2314	29-669	31.8-53.7	4.7-6.3

3.4 Intervalles adéquats des oligoéléments

Sources de variation de la composition nutritionnelle foliaire:
dominance des oligoéléments



3.4 Intervalles adéquats des oligoéléments

Précision du modèle – Tissus végétaux

Précision du modèle *Random Forest* pour les analyses foliaires (N, P, K, Mg, Ca, B, Cu, Zn, Mn, Fe)

Culture	Précision du modèle
Carotte en sol organique	0.853
Céleri en sol organique	0.791
Oignon en sol organique	0.652
Pomme de terre en sol minéral	0.700

3.4 Description des stades de croissance

Tissus végétaux

Culture	Stade de croissance			
	A	B	C	D
Oignon	2-3 feuilles	4-5 feuilles	6-8 feuilles	Renflement du bulbe
Céleri	30 cm	50 cm	-	-
Carotte	4-5 feuilles	6-7 feuilles	8-10 feuilles	Renflement de la racine
Pomme de terre	20 cm	Boutons	10 % en fleurs	Avant le défanage

3.4 Intervalles adéquats des oligoéléments

Intervalles adéquats des oligoéléments dans les tissus foliaires

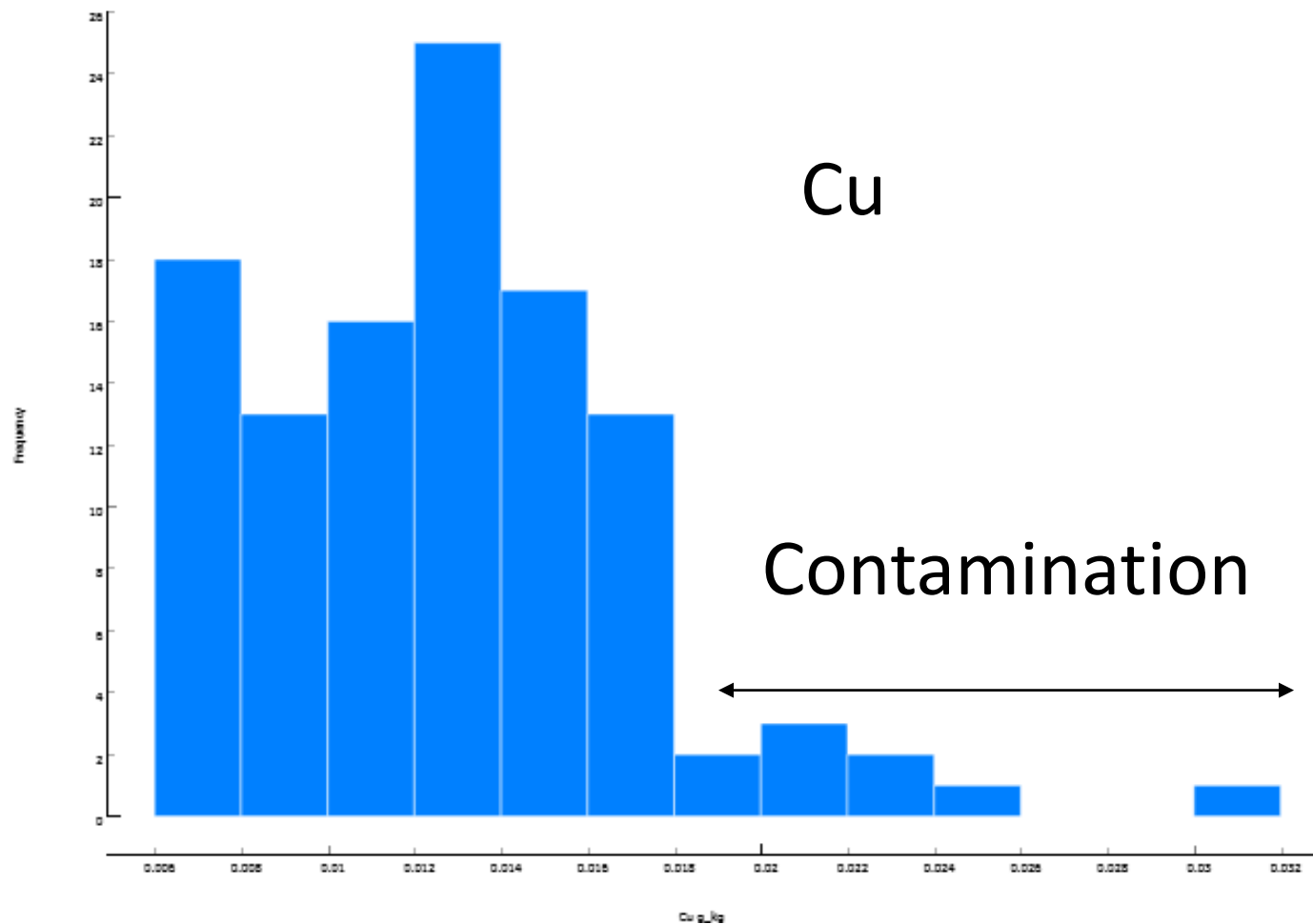
Oligoélément	Stade de croissance			
	A	B	C	D
Intervalles adéquats (mg/kg ⁻¹)				
Oignon en sol organique				
n	51	61	30	64
B	14-37	18-51	23-42	20-43
Cu	8-36	4-22	4-36	4-38
Zn	40-147	33-538	32-144	21-360
Mn	27-808	25-681	43-774	49-903
Fe	85-649	59-510	58-444	47-606
Céleri en sol organique				
n	193	190	-	-
B	37-148	42-220	-	-
Cu	2-593	4-67	-	-
Zn	9-603	27-216	-	-
Mn	13-721	6-106	-	-
Fe	23-275	21-179	-	-

3.4 Intervalles adéquats des oligoéléments

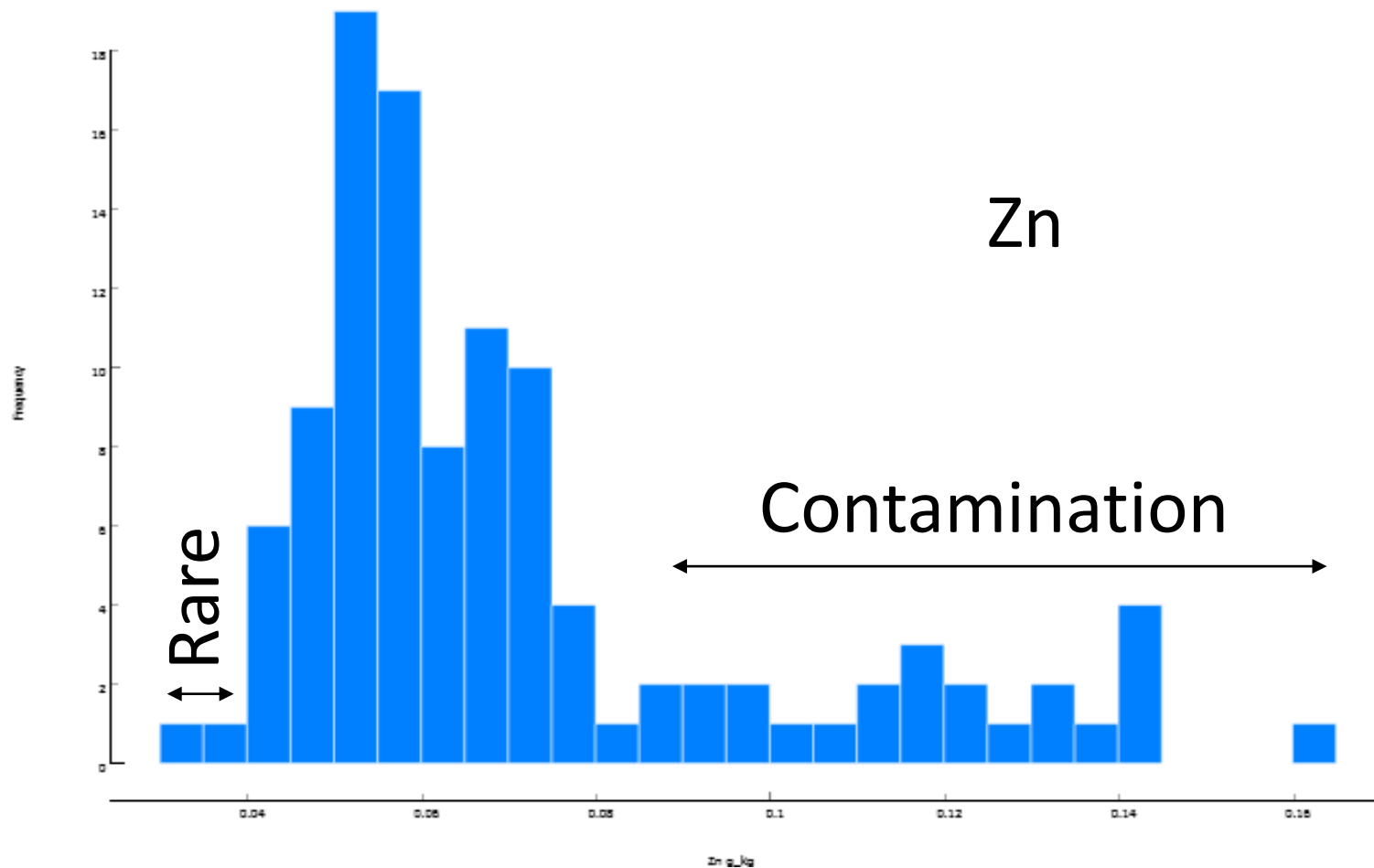
Intervalles adéquats des oligoéléments dans les tissus foliaires

Oligoélément	Stade de croissance			
	A	B	C	D
Intervalles adéquats (mg kg ⁻¹)				
Carotte en sol organique				
n	111	121	118	299
B	22-54	26-55	27-78	24-66
Cu	6-31	2-43	4-22	3-72
Zn	33-164	23-209	29-179	21-233
Mn	24-588	29-872	11-481	22-759
Fe	92-3162	71-633	65-284	53-1862
Pomme de terre en sol minéral				
n	108	125	92	17
B	15-47	15-45	17-175	16-139
Cu	6-30	3-53	4-25	4-20
Zn	23-116	19-102	17-480	19-165
Mn	37-541	38-558	53-1510	94-541
Fe	136-3263	108-2690	110-1139	156-437

3.5 Examen critique des intervalles pour Cu



3.5 Examen critique des intervalles pour Zn



CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Les résultats de ce projet ont permis de faire une évaluation de l'état général des cultures maraîchères québécoises les plus sensibles aux déséquilibres en oligoéléments.
- Ce projet a permis de conduire au développement des nouvelles connaissances sur les bonnes combinaisons d'oligoéléments dans les systèmes culturaux.
- Les intervalles adéquats provenant des spécimens nutritionnellement équilibrés et à haut rendement peuvent différer des normes actuelles du CRAAQ.
- Les parties prenantes ont du matériel probant pour modifier les grilles actuelles du CRAAQ afin de mieux interpréter les résultats d'analyses de sol et de tissus végétaux dans les cultures maraîchères. D'autres données et observations provenant des experts pourront s'ajouter pour ajuster les intervalles rapportés dans ce projet.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Ce projet démontre l'importance des méthodes récentes d'intelligence artificielle pour détecter les intervalles adéquats des oligoéléments, afin de favoriser une fertilisation raisonnée.
- L'identification des meilleures conditions de production requière des bases de données fiables, abondantes et diversifiées.
- Une participation active des parties prenantes aux bases de données permettrait d'appuyer l'auto-apprentissage des méthodes d'intelligence artificielle sur la recherche de teneurs optimales et de dosage des fertilisants pour l'atteinte de rendements élevés en légumes de qualité avec une valeur ajoutée de biofortification.

QUESTIONS ?