

ÉQUILIBRE NUTRITIF ET SANTÉ DES SOLS

vers une fertilisation durable et résiliente.

Lotfi KHIARI

10 décembre 2025



UNIVERSITÉ
LAVAL



Plan de la présentation



Bilan au champ

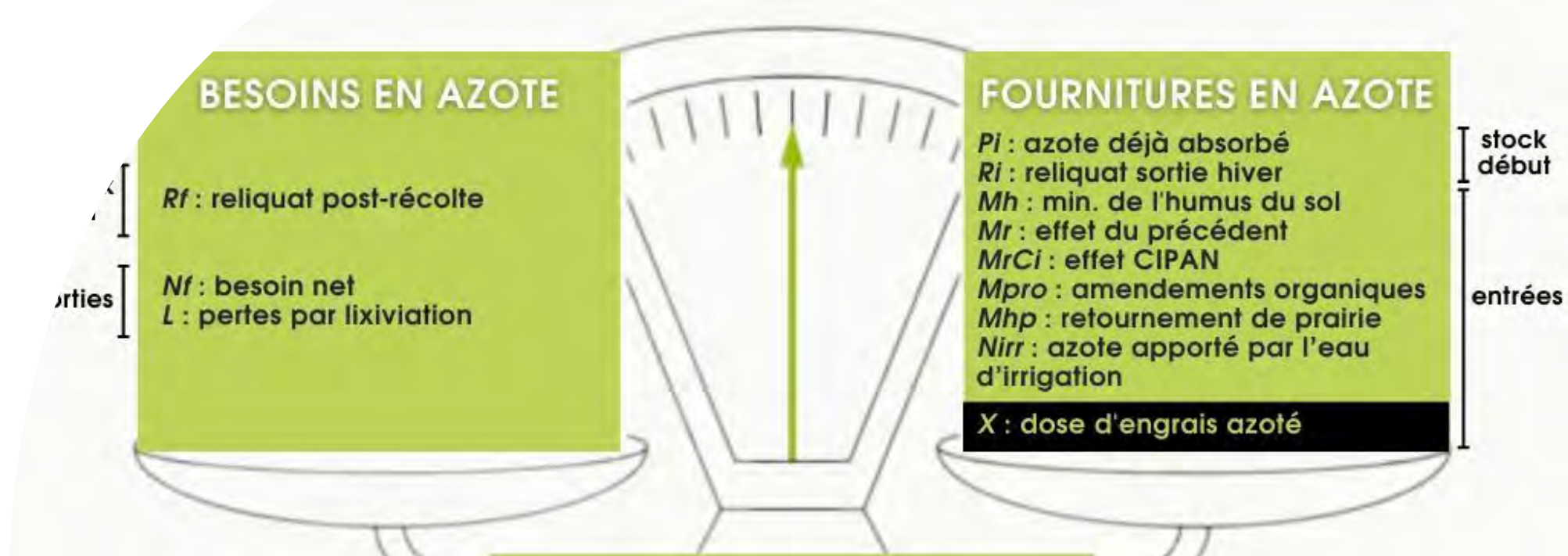
IA et nouvelle philosophie

Agressivité des engrais

Diagnostic spectral

Équilibre nutritif





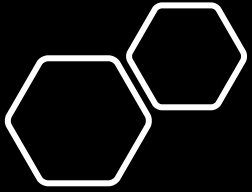
comifer

Centres d'Étude et de Développement

- Ferme porcine
- Gestion Liquide (**lisier**)
- Culture: **maïs grain** précédant: **orge**
- Épandage:
 - Période d'épandage: **pré semis**
 - Mode d'épandage: rampe **avec pendillars**
 - Post-épandage: incorporation **en 24h**
 - Dose: couvrir les **besoins en P** si ISP M-É
 - Épandage subséquent: 20 t/ha en moyenne l'année antérieure et celle d'avant avec même qualité de lisier

Il n'y a pas mieux que de partir avec un exemple concret pour illustrer la notion de bilan d'azote au niveau du champ





Besoins en PAP de la culture

N

- 170 kg
N/ha

P₂O₅

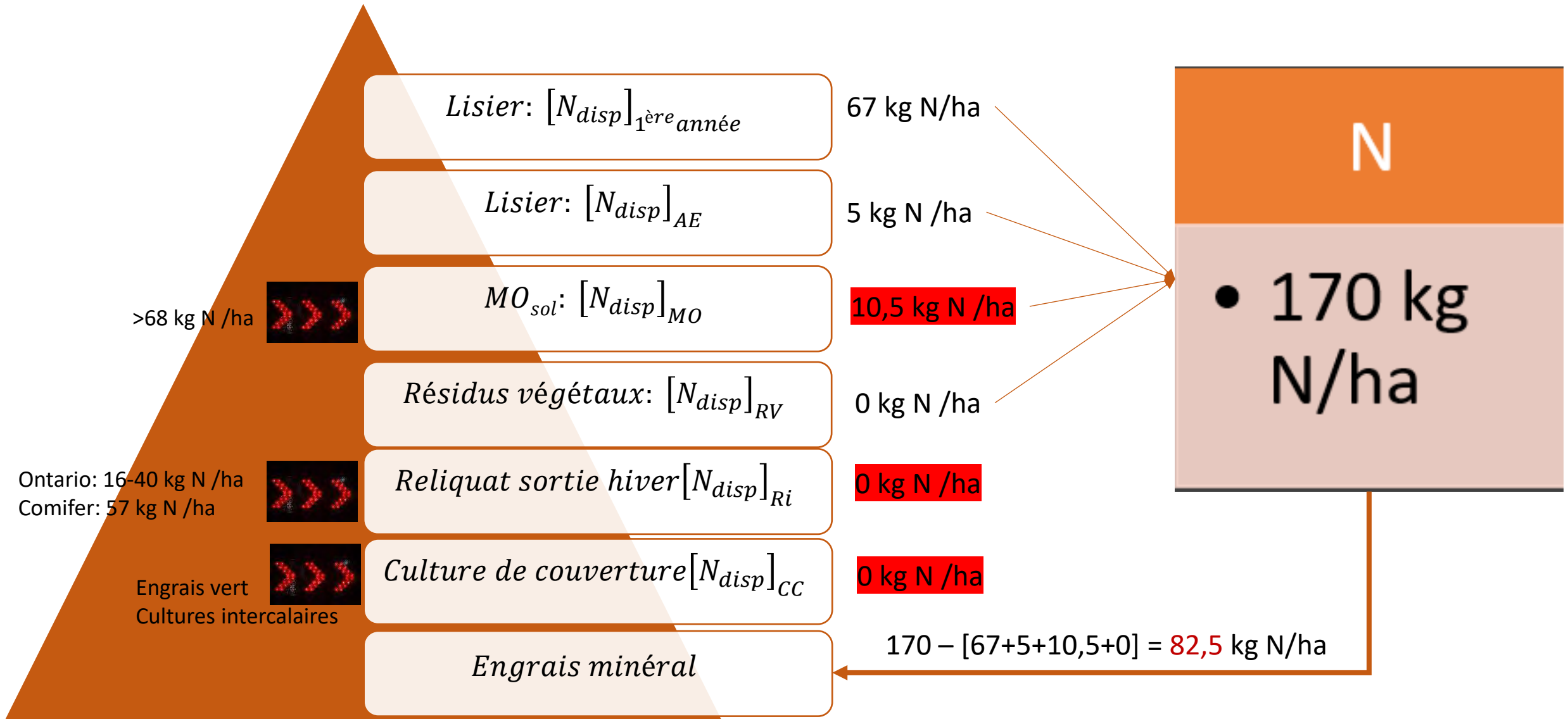
- 40 kg
P₂O₅/ha

K₂O

- 40 kg
K₂O/ha



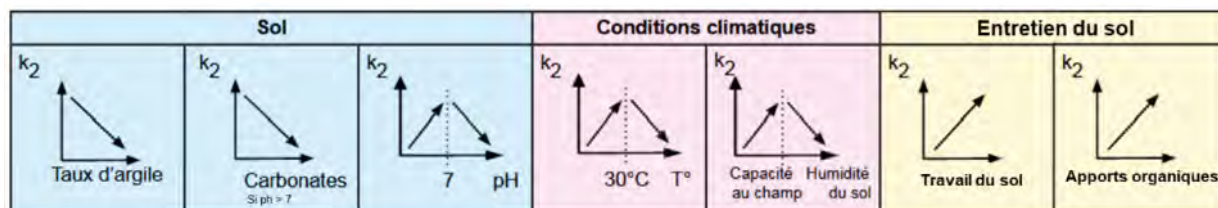
Analyse	MO	P _{M3} (ICP)	K _{M3} (ICP)	Al _{M3} (ICP)	Texture	pH	ISP1(ICP)
Unité	%	kg/ha					%
Valeur	4,7	190	250	942	G2	5,9	9,0





$$MO_{sol}: [N_{disp}]_{MO}$$

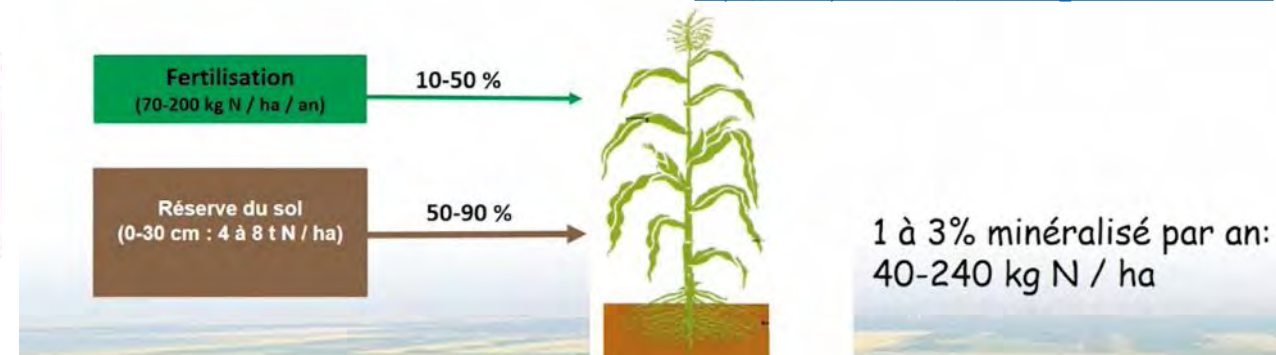
<https://www.youtube.com/watch?v=XZx7iokvAM&t=471s>



Type de sol	Coefficient k2 - %
Sol léger (< 10% d'argile)	2,00
Sol léger à moyen (10 à 15% argile)	1,75
Sol moyen (15 à 25% argile)	1,50
Sol moyen à lourd (25 à 30% argile)	1,25
Sol lourd (> 30% argile)	1,00

			K2 (%)				
3375 T/ha			1	1,5	2	2,5	3
% MO	Stock MO (kg/ha)	Stock N* (kg/ha)	N (unités) minéralisées				
1	33750	1687,5	17	25	34	42	51
1,5	50625	2531,25	25	38	51	63	76
2	67500	3375	34	51	68	84	101
2,5	84375	4218,75	42	63	84	105	127
3	101250	5062,5	51	76	101	127	152
3,5	118125	5906,25	59	89	118	148	177
4	135000	6750	68	101	135	169	203

* La matière organique comprend 5% d'azote



✓ Azote: Tran et al. 1995; Chantigny et al. 2004-2014; Nyiraneza et al. 2010.



Exemple de calcul du bilan prévisionnel d'azote

Culture : maïs-grain avec une dose recommandée de 150 kg N/ha

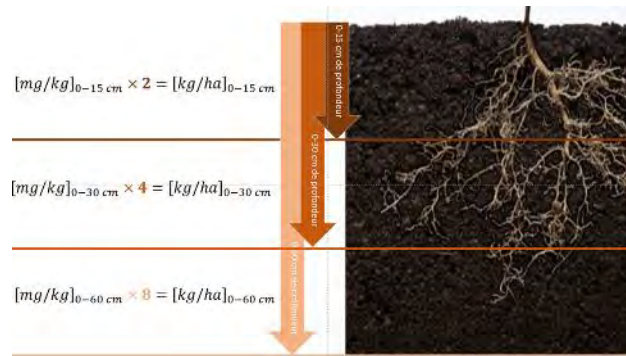
Matière organique du sol : 5 %

Précédent cultural : soya

Contribution de la matière organique : 15 kg N/ha par 1 % au-dessus de 4 % (jusqu'à 7 %) = 15 kg N/ha

Précédent cultural : 25 kg N/ha (selon le tableau 5.2)

Dose à appliquer : 150 kg N/ha – 15 kg N/ha – 25 kg N/ha = 110 kg N/ha



comifer

Comité Français d'Étude et de Développement
de la Fertilisation Raisonnée

➤ Statuts azotés des sols

Le reliquat d'azote minéral mesuré à la sortie de l'hiver (Ri) varie de 5 à 420 kg/ha (moyenne : 57 kg/ha $\pm$ 50).

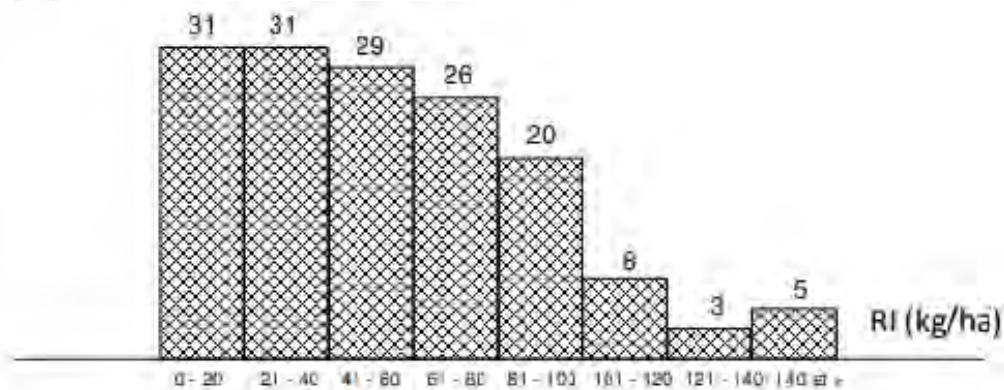
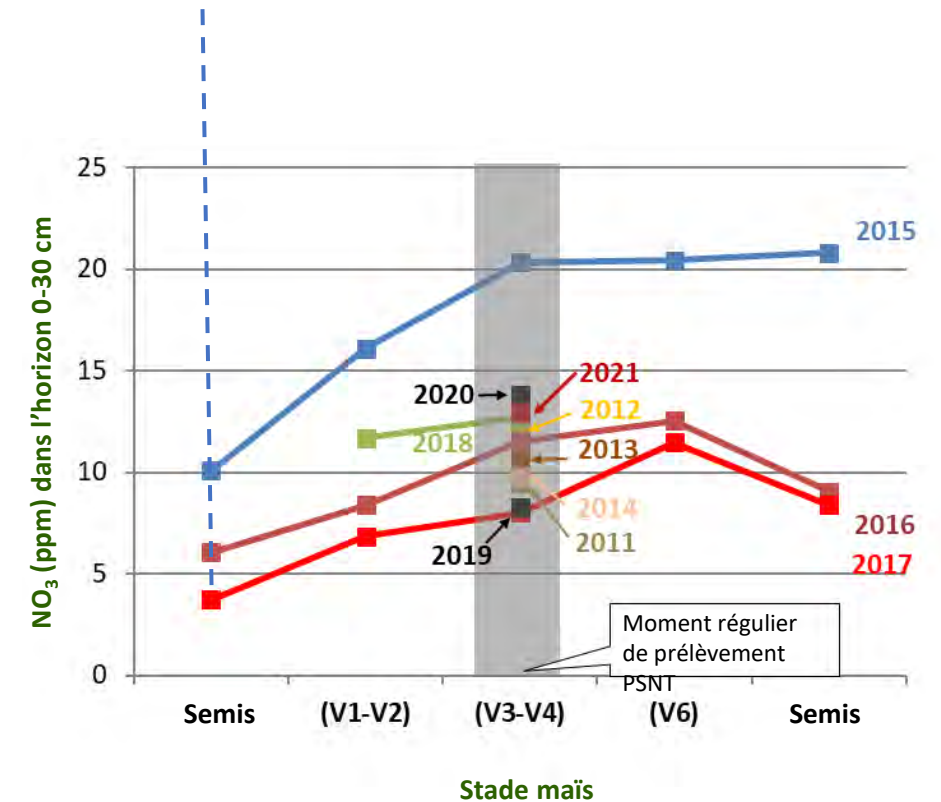


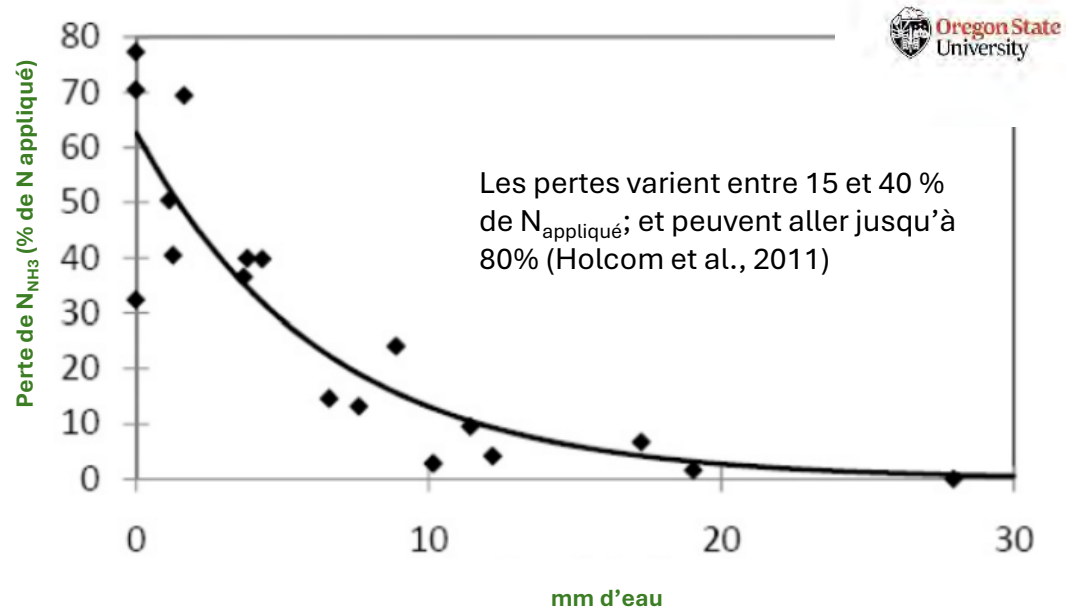
Figure 3 : Répartition des Ri en kg/ha

93 sites à travers l'Ontario

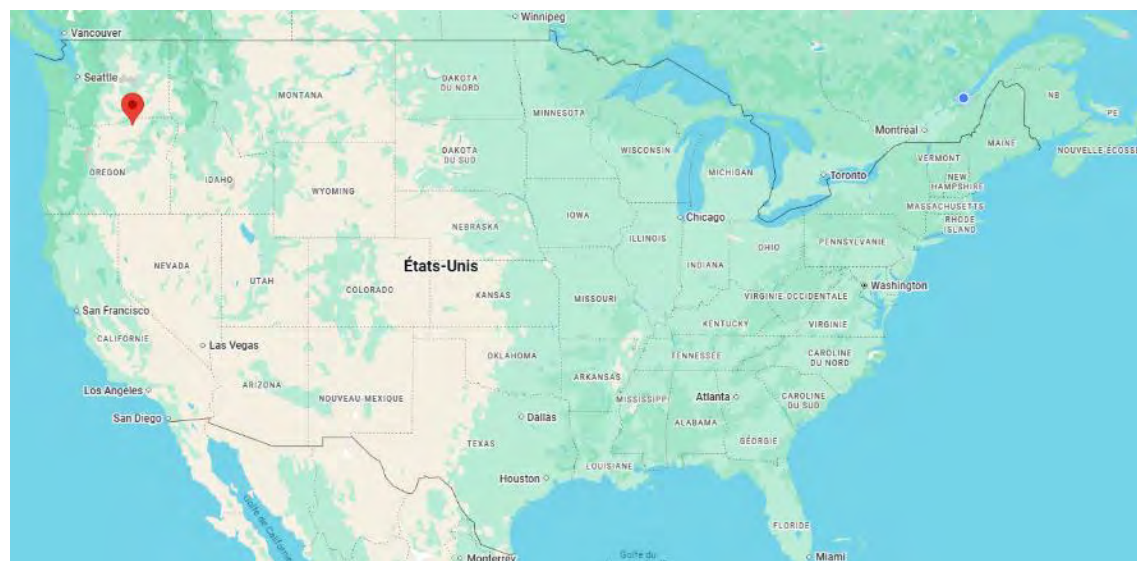
Moyenne de 4-10 ppm, soit 16-40 kg N/ha



<https://fieldcropnews.com/2021/06/nitrogen-status-in-2021-corn-fields/>



Sable limoneux fin, $\text{pH} \approx 6,5$



90 kg N

Perte par volatilisation

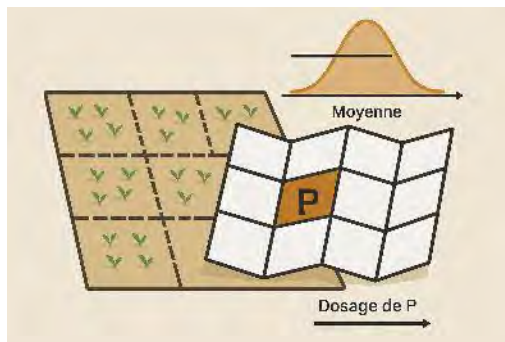
112 kg $N_{\text{urée}}$



Trop d'azote, trop de risques : les 10 dérives qui menacent la santé des sols

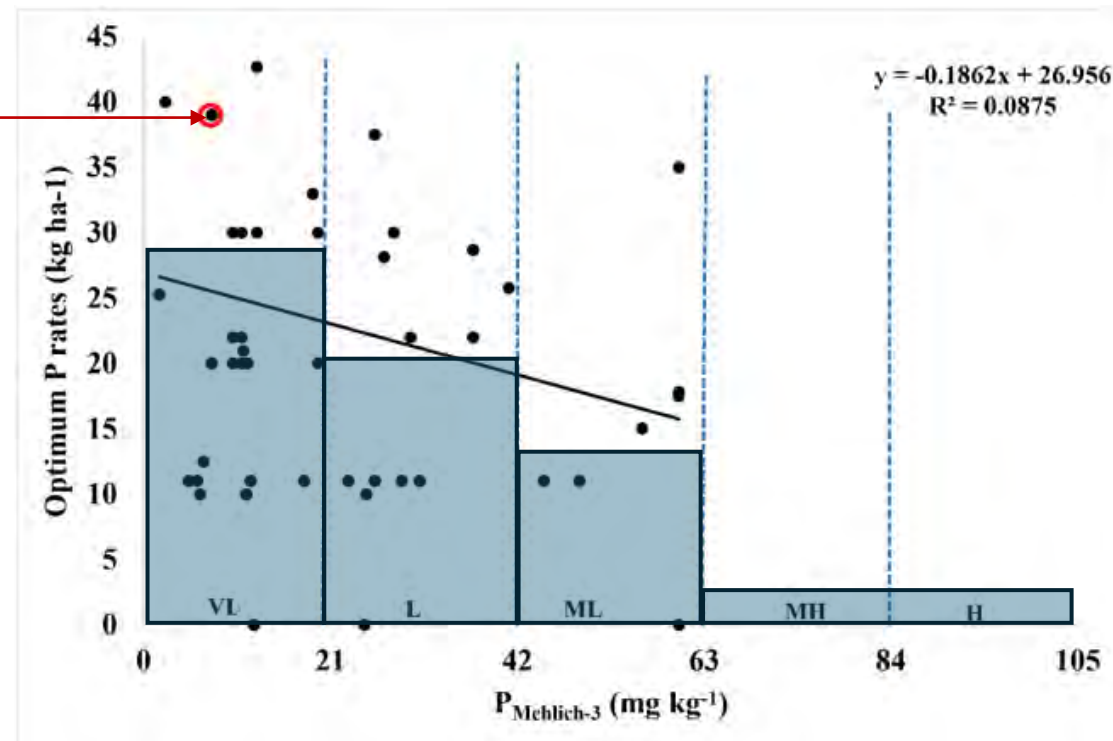
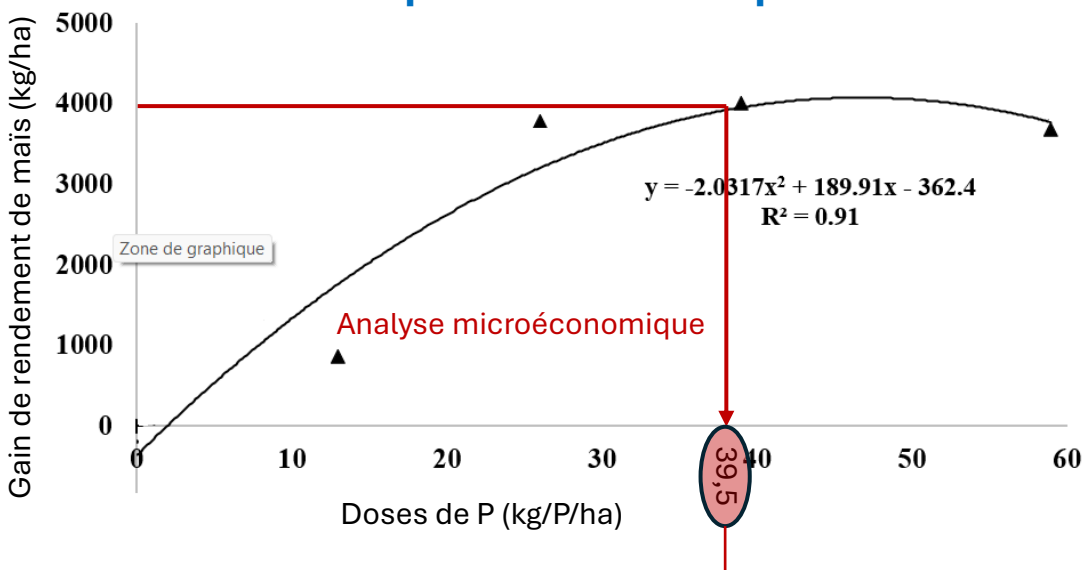
- Acidification du sol par la nitrification du NH_4^+ , entraînant une baisse du pH.
- Augmentation de l'aluminium échangeable (Al^{3+}) → toxicité racinaire et baisse de croissance.
- Désaturation en bases (Ca, Mg, K) par lixiviation accrue des cations.
- Dégradation de la structure du sol (perte d'agrégation) par diminution de l'activité fongique.
- Diminution de la biodiversité microbienne, avec simplification du microbiome.
- Réduction de la mycorhization et perturbation des symbioses (champignons, rhizobium).
- Minéralisation accélérée de la matière organique → perte de carbone et baisse de stabilité du sol.
- Risque accru de compaction dû à une porosité moindre et un développement racinaire moins efficace.
- Lessivage du nitrate (NO_3^-) → perte de nutriments et contamination de l'eau.
- Émissions accrues de N_2O , puissant gaz à effet de serre, signe d'un cycle N dysfonctionnel.

Méthode classique de recommandation du P

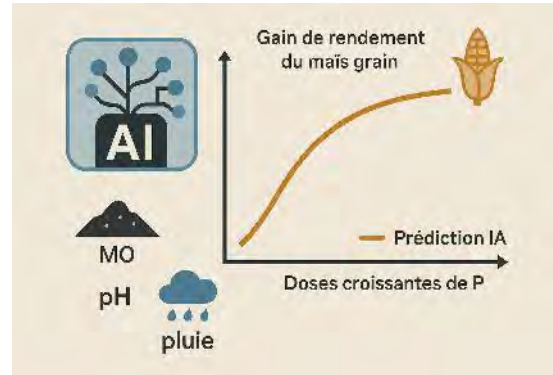
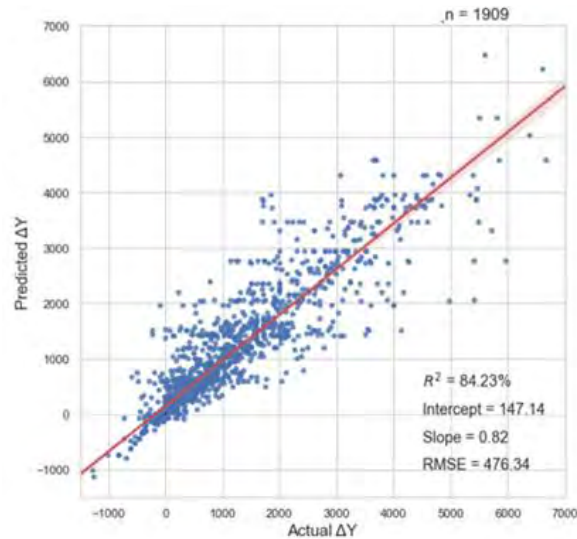


Grille de fertilisation

Optimisation site par site



Méthode IA pour la prescription de P



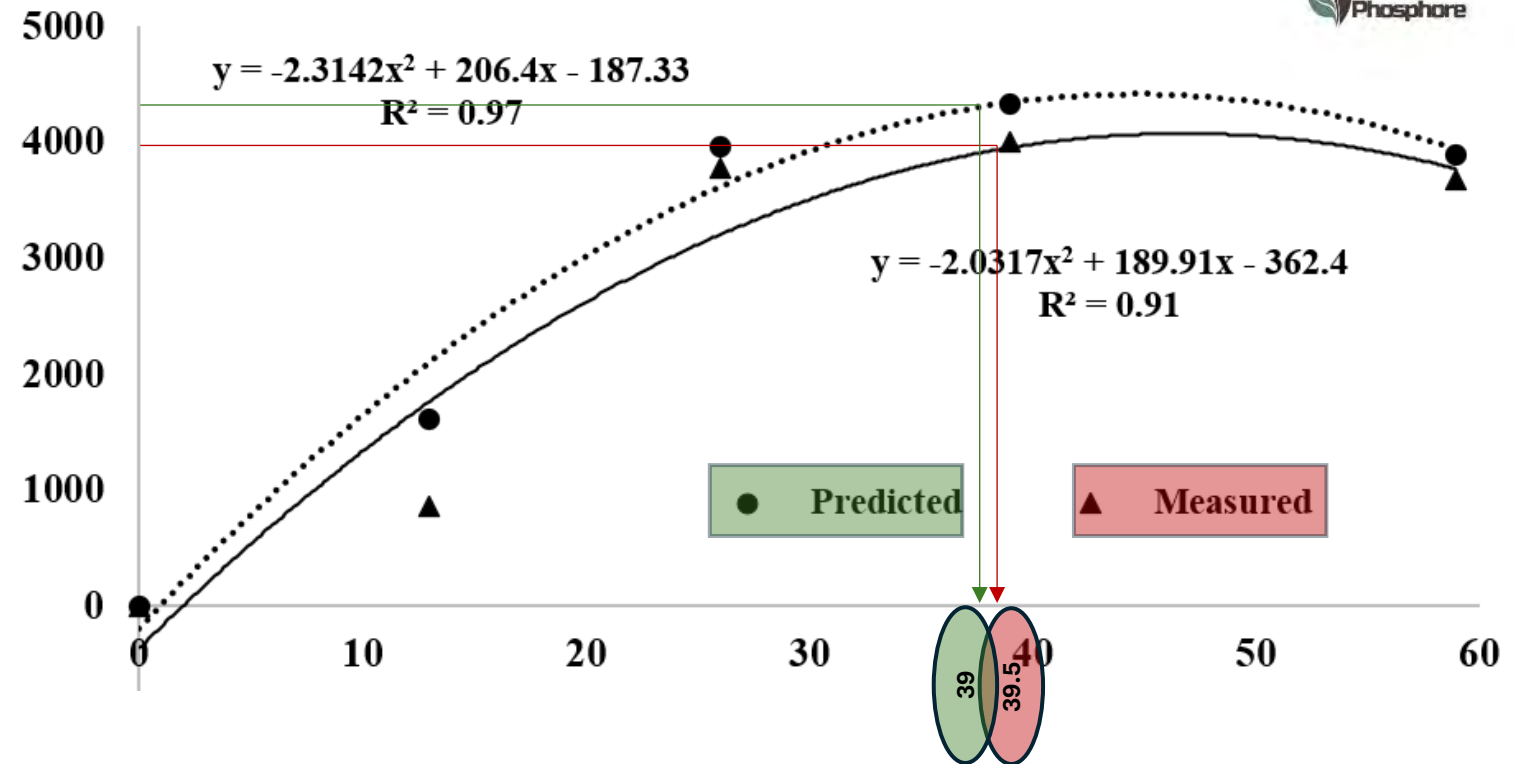
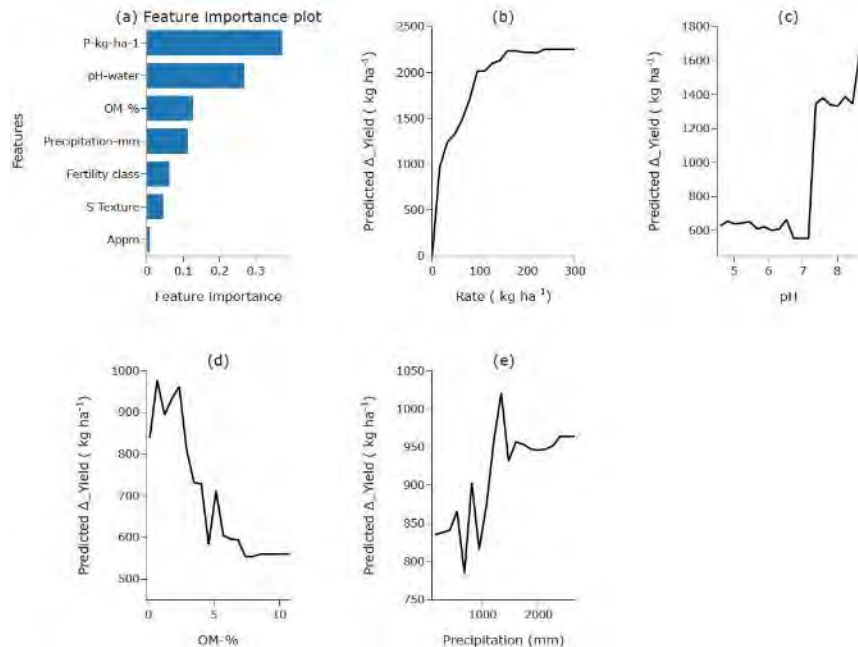
Journal of Soil Science and Plant Nutrition
<https://doi.org/10.1007/s42729-024-01724-x>

ORIGINAL PAPER

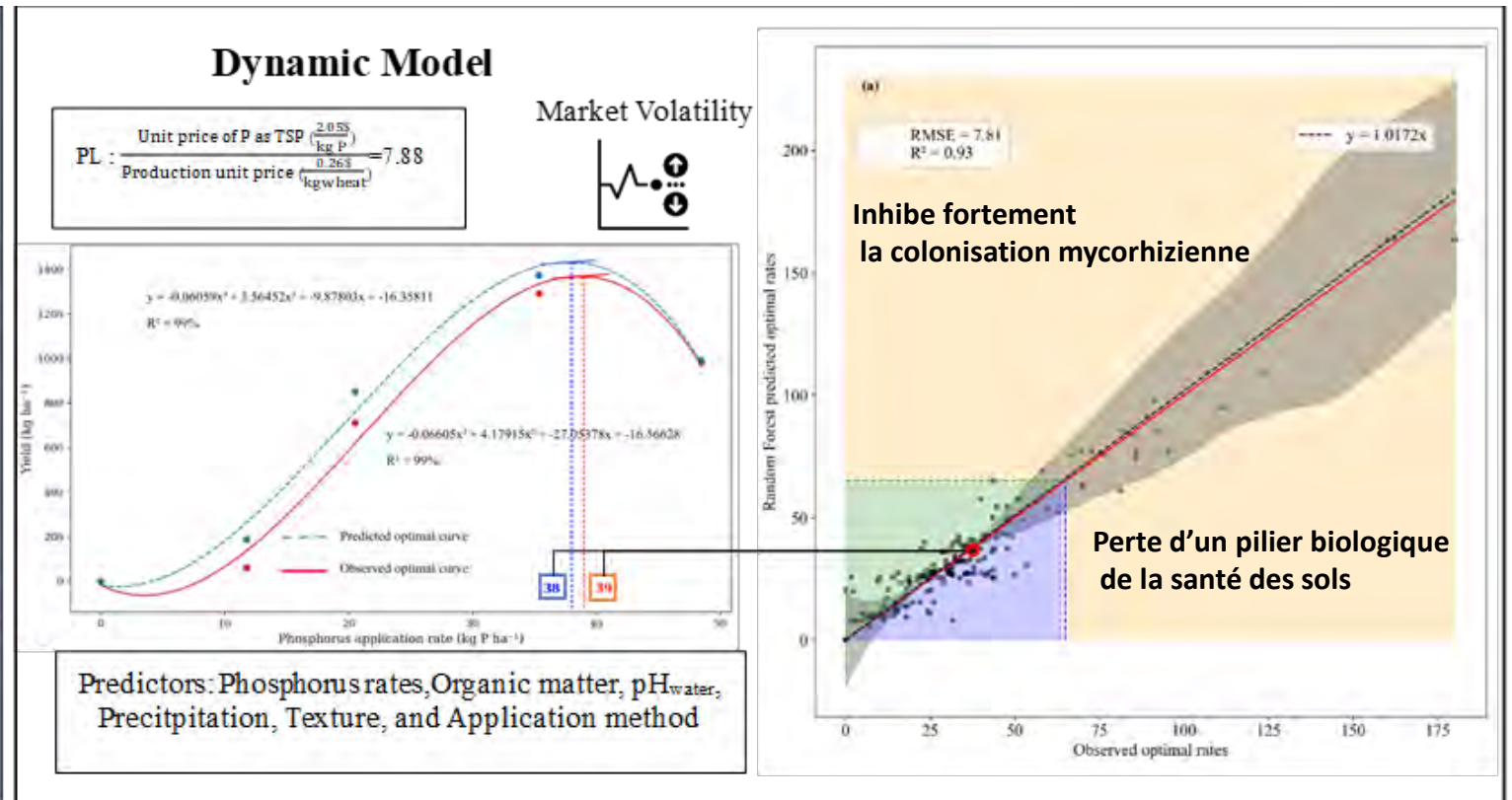
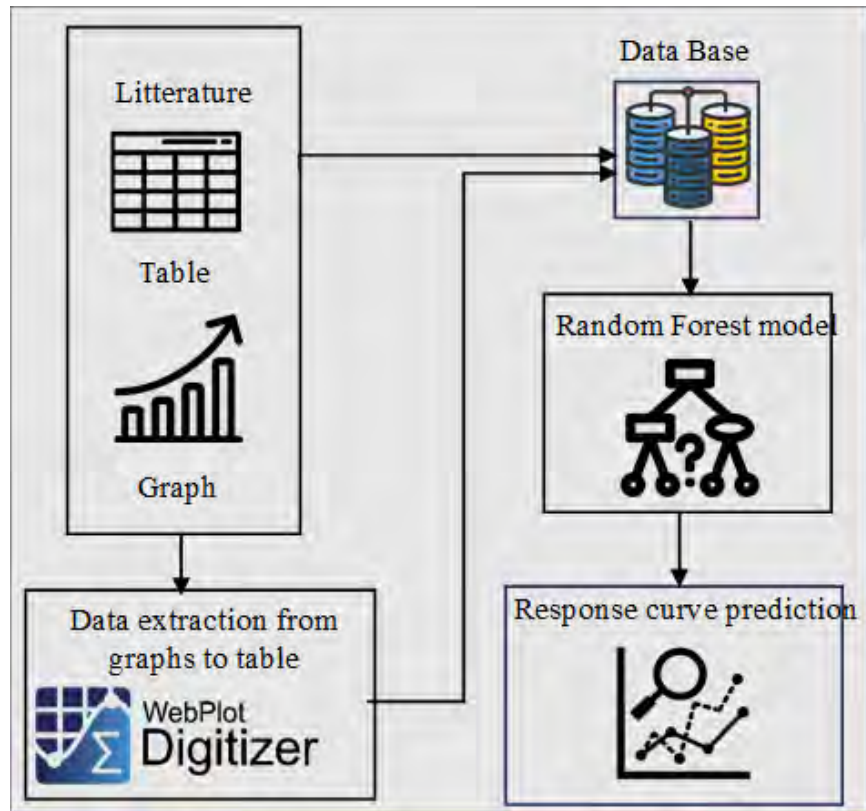
Improving Phosphorus Recommendation Models with Random Forest Regressor. Case of Corn (*Zea mays* L.)

Mandela Alema¹ · Lotfi Khilari^{1,2} · Amine Kassam¹ · Hamza Jouichat² · Fasil Kebede¹ · Mahmoud Ismail³

Received: 22 March 2023 / Accepted: 15 March 2024
 © Crown 2025



Prescription dynamique (blé-orge)



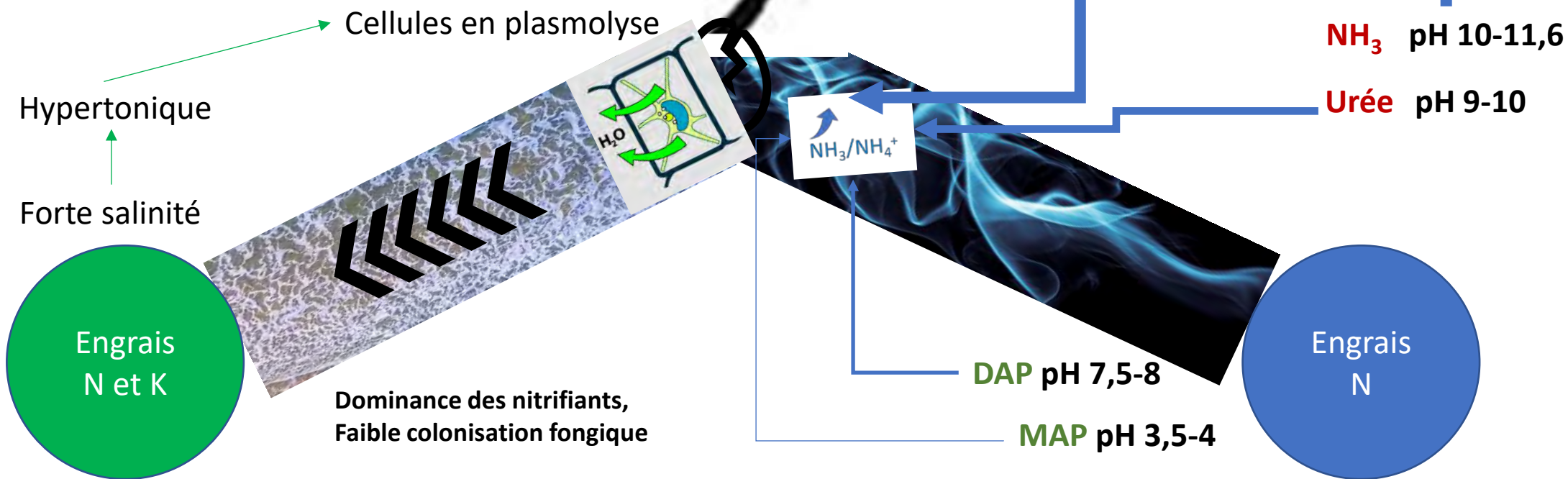
Contrainte de la salinité

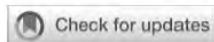


Contrainte de la toxicité ammoniacale



<https://www.dekalbasgrowdeltapine.com/en-us/agronomy/what-you-need-to-know-about-in-furrow-starter-fertilizer.html>





OPEN ACCESS

EDITED BY

Khurram Shahzad,
Lasbela University of Agriculture, Water and
Marine Sciences, Pakistan

REVIEWED BY

Muhammad Tahir Shehzad,
University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan
Manuel Ângelo Rodrigues,
Centro de Investigação de Montanha (CIMO),
Portugal

Optimizing safe rates of pop-up inorganic starter nitrogen and potassium fertilizers for maize

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fagro.2025.1543564/full>

William Makaza^{1,2*}, Lotfi Khiari^{1,2} and Mounir El Achaby³

¹Center of Excellence in Soil and Fertilizer Research in Africa, College of Agriculture and Environmental Sciences, Mohammed VI Polytechnic University, Ben Guerir, Morocco, ²Department of Soils and Agri-Food Engineering, Faculty of Agricultural Sciences and Food, Laval University, Quebec, QC, Canada, ³Materials Science, Energy and Nanoengineering Department (MSN), Mohammed VI Polytechnic University, Ben Guerir, Morocco



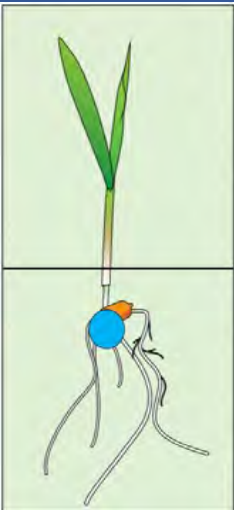
Journal of Plant Nutrition



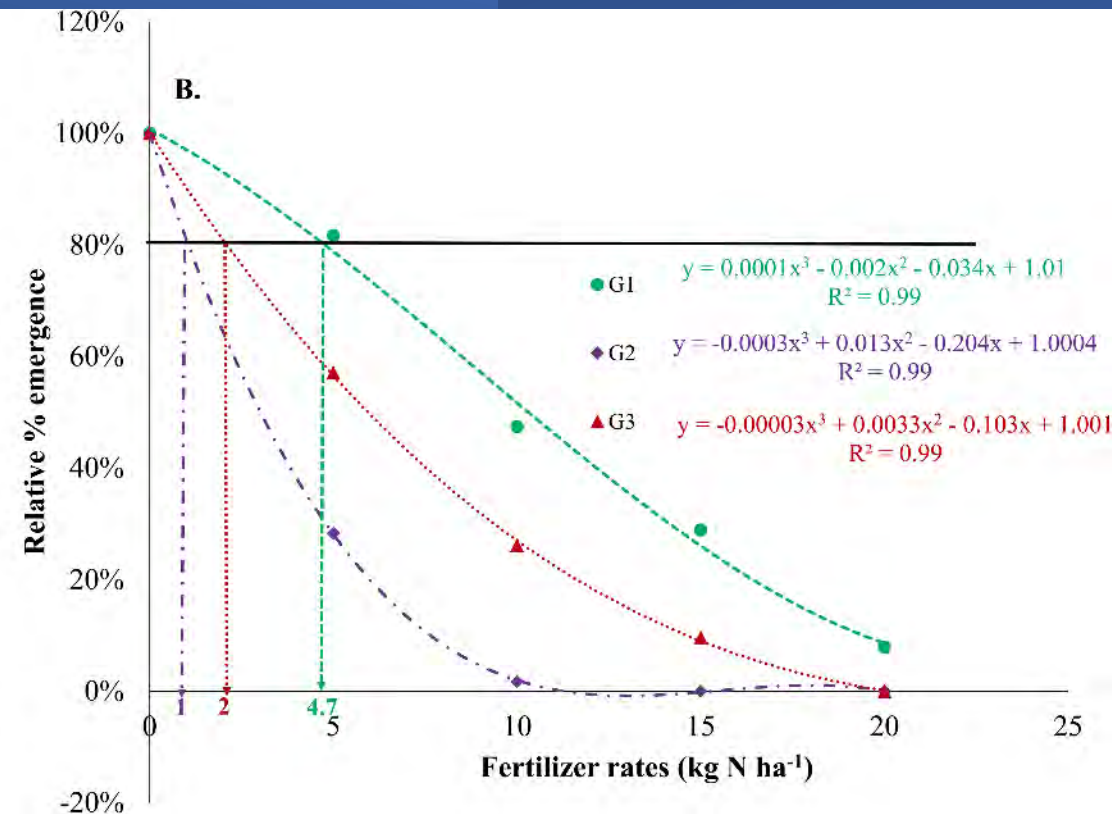
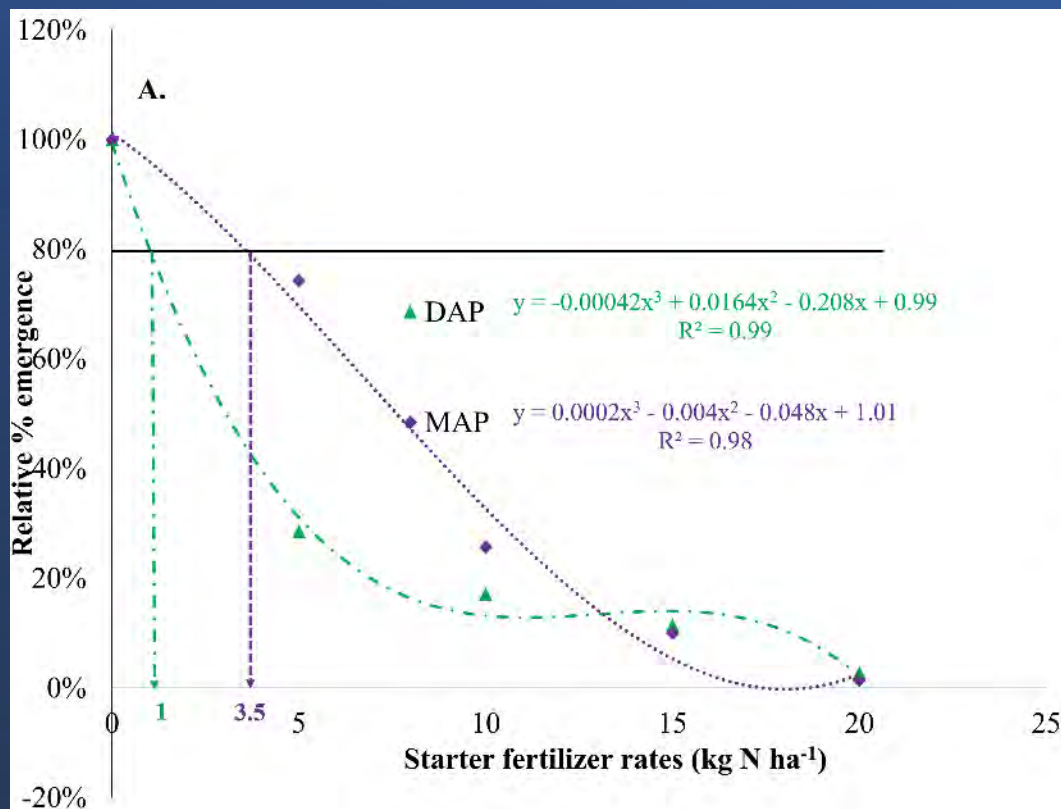
ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: www.tandfonline.com/journals/lpla20

Optimizing co-application of starter ammoniacal-N and K-containing fertilizers for barley in the seed- furrow

William Makaza, Lotfi Khiari, Zainab Lakrari & Mounir El Achaby



Application simultanée de l'engrais avec la semence

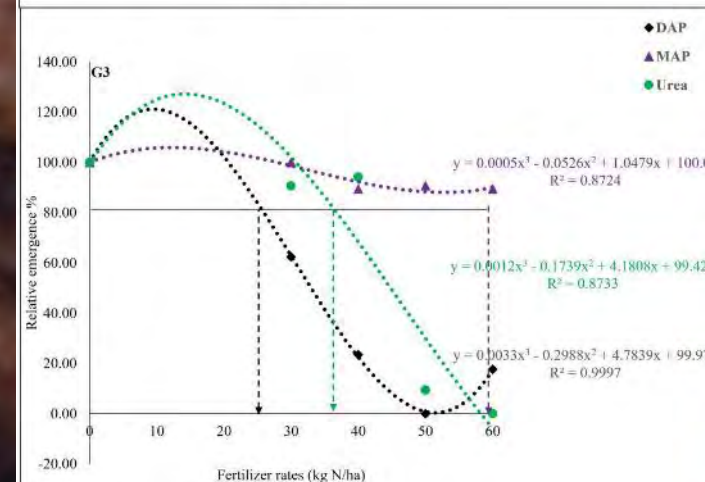
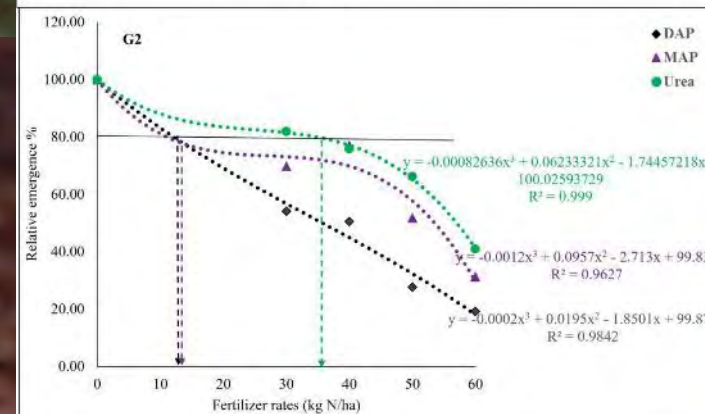
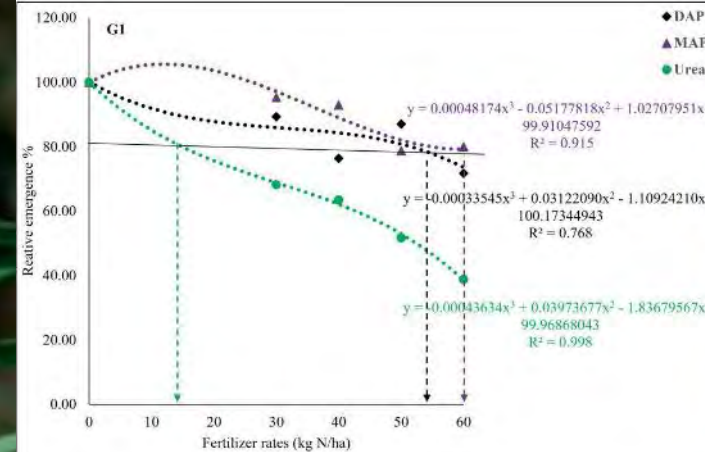




https://www.perspectives-agricoles.com/file/galleryelement/pi/9e/3b/39/d2/363_2249187767639813575.pdf



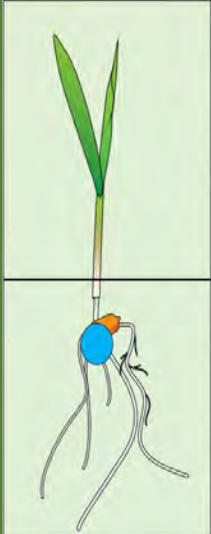
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2016.02.0122>



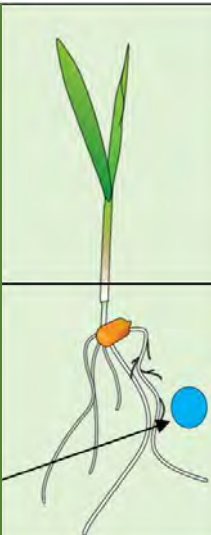
PCU

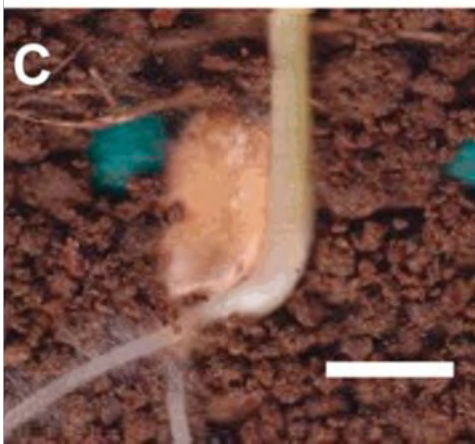
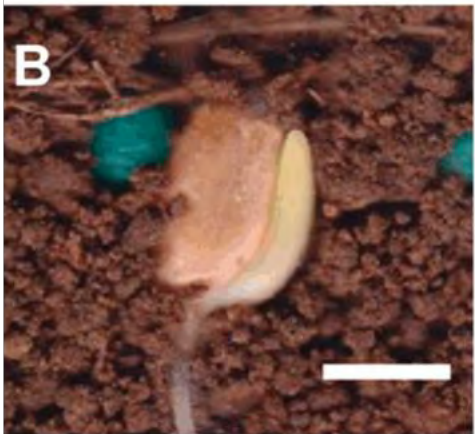
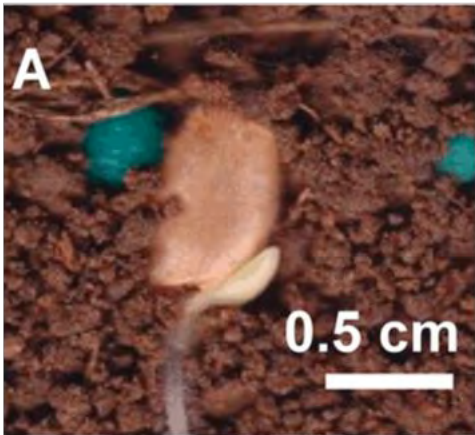
Urée

Doses maximales sécuritaires pour l'application simultanée, cas du maïs

Pop-up in-furrow		Groupe Textural	G1	G2	G3
		Urée (max N)	Non applicable		
		DAP (Max N)	3.0	0.8	0.8
		MAP (max N)	5-7		
		Muriate de potasse(max K)	10	14	14
		Sulfate de potasse (max K)	74	74	74

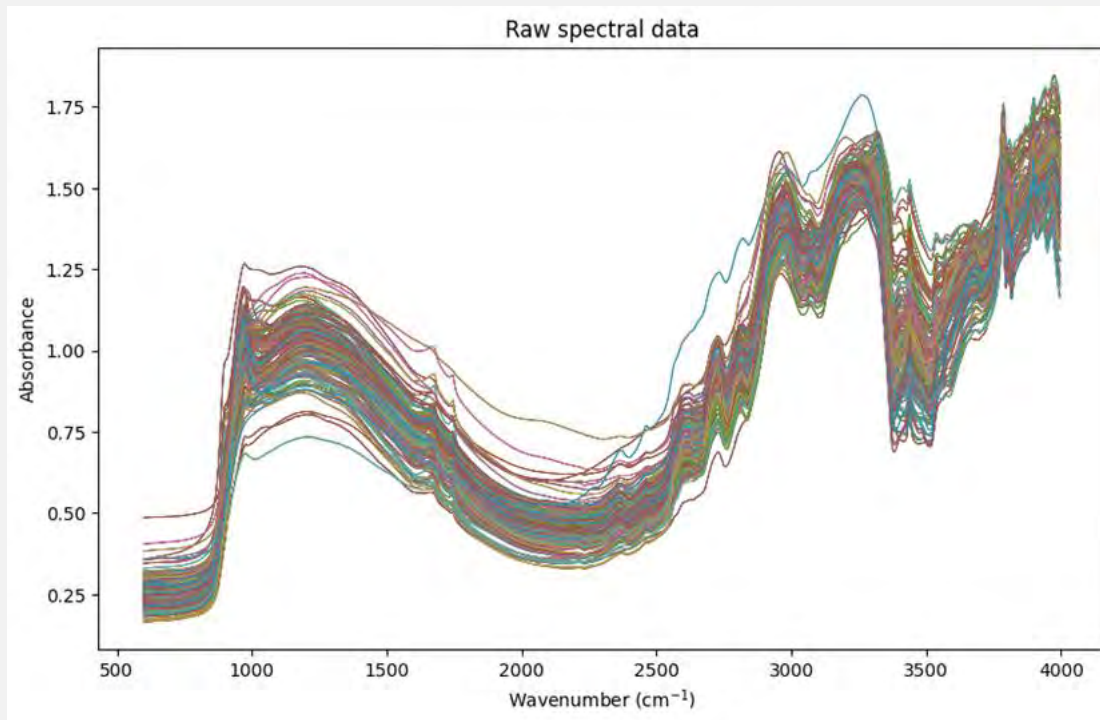
Doses maximales sécuritaires pour l'application à 5 cm, cas de l'orge

2x2 Po ou 5x5 cm		Groupe Textural	G1	G2	G3
		Urée (max N)	35	26	15
		DAP (Max N)	52	37	12
		MAP (max N)	55	11	11
		Muriate de potasse(max K)	67	67	67
		Sulfate de potasse (max K)	74	74	74



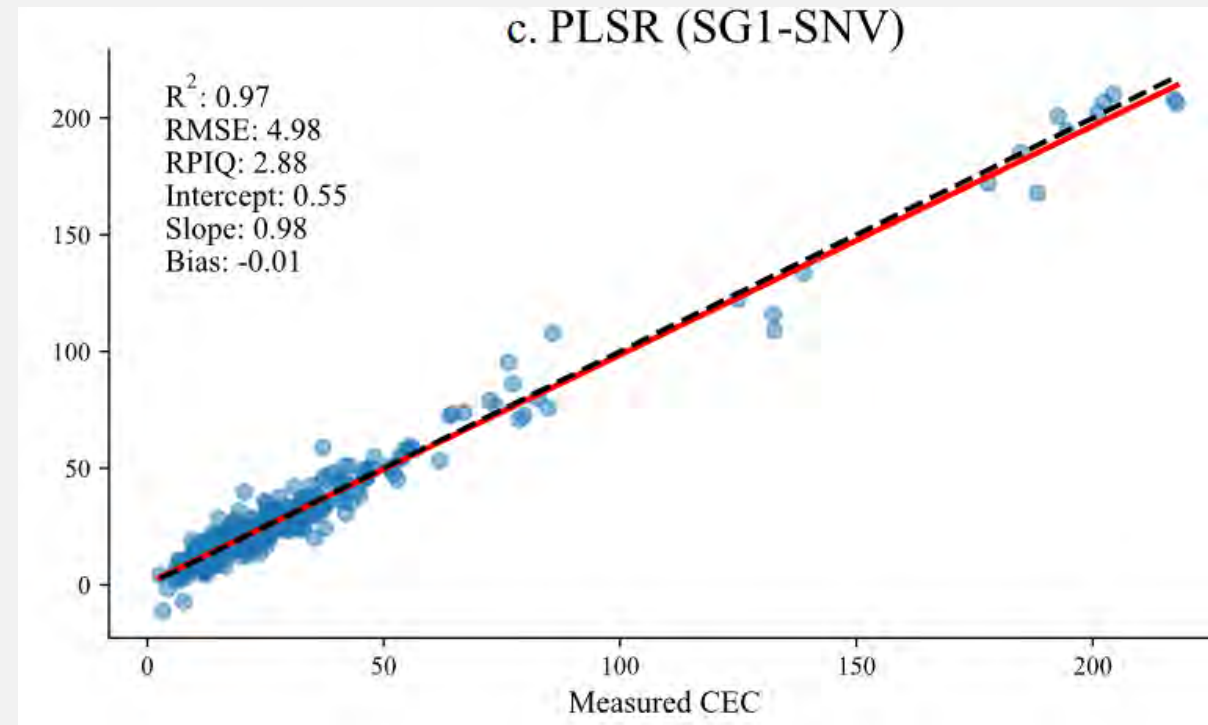


Signature spectrale MIR

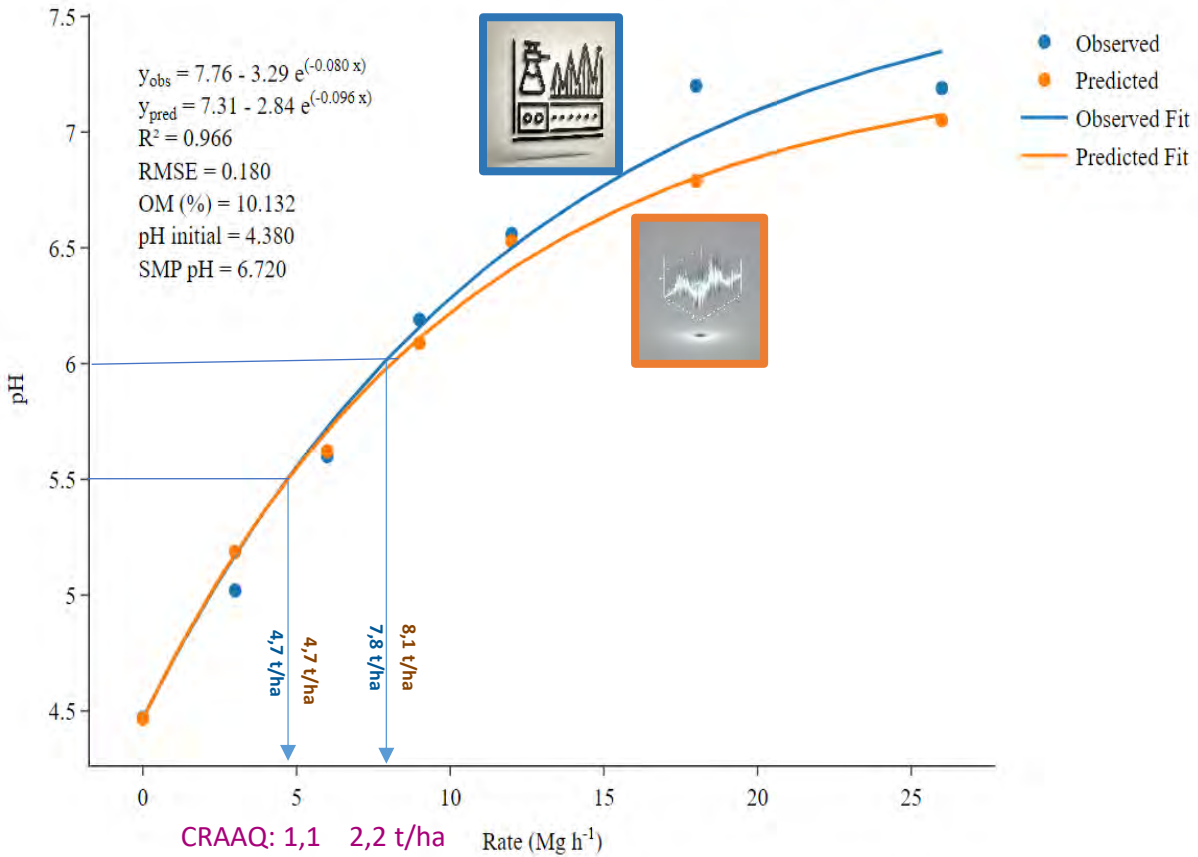


Robustesse: 97%
Exactitude: 98%
Sensibilité: 0.55 CEC unités

Précision: 2.88
Biais: -0.01



Soil 211 pH Incubation Curve (Cubist: SG1-SNV)



Rétablissement optimal du pH, pilier de la santé du sol

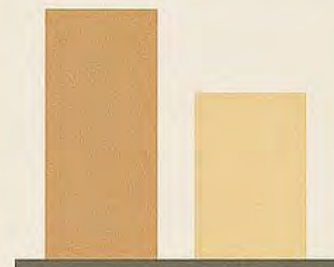


Chaulage de précision un levier essentiel de la santé des sols

- corrige l'acidité et stabilise le pH,
- élimine la toxicité aluminium,
- améliore la disponibilité des nutriments,
- augmente la stabilité structurale du sol,
- stimule la biodiversité microbienne,
- améliore la résilience, l'efficacité des engrais et réduit les émissions.



DIMINUTION DES DÉPÔTS DE SO₂



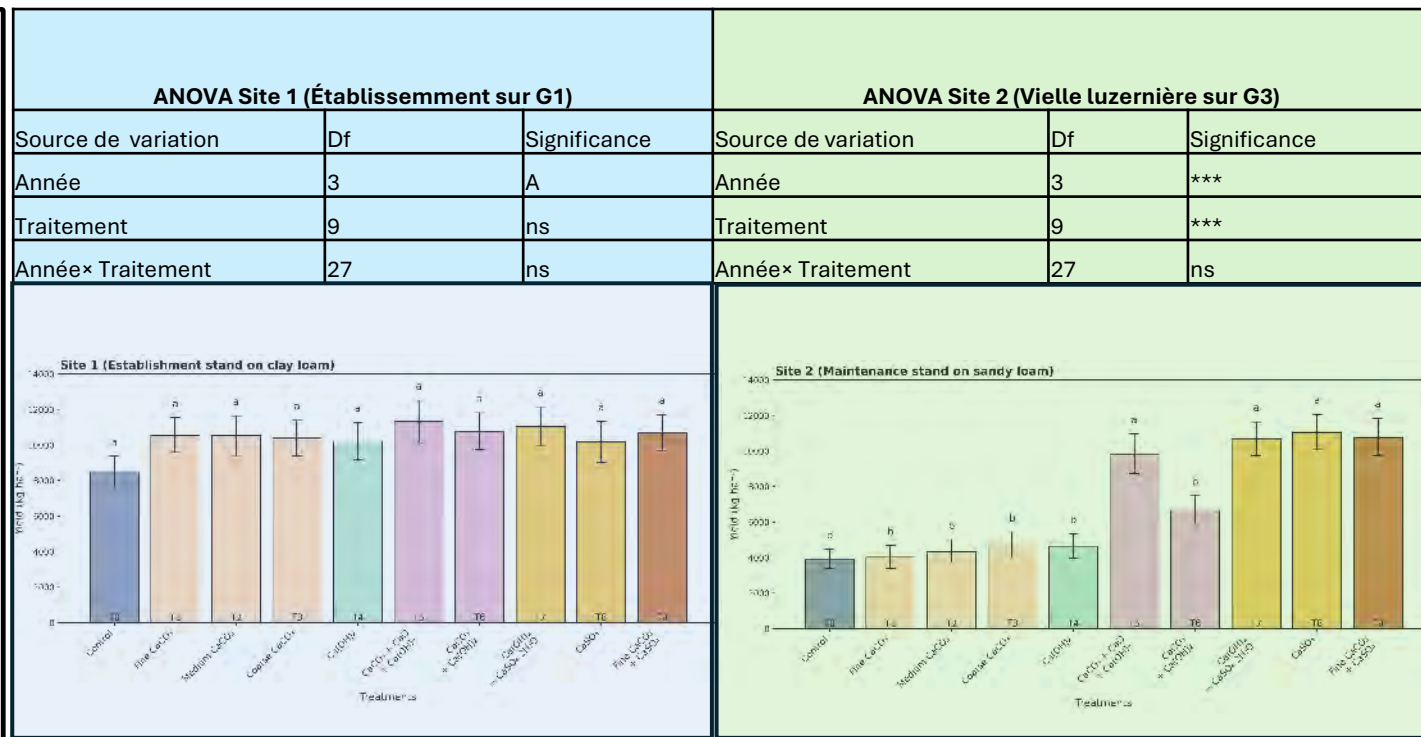
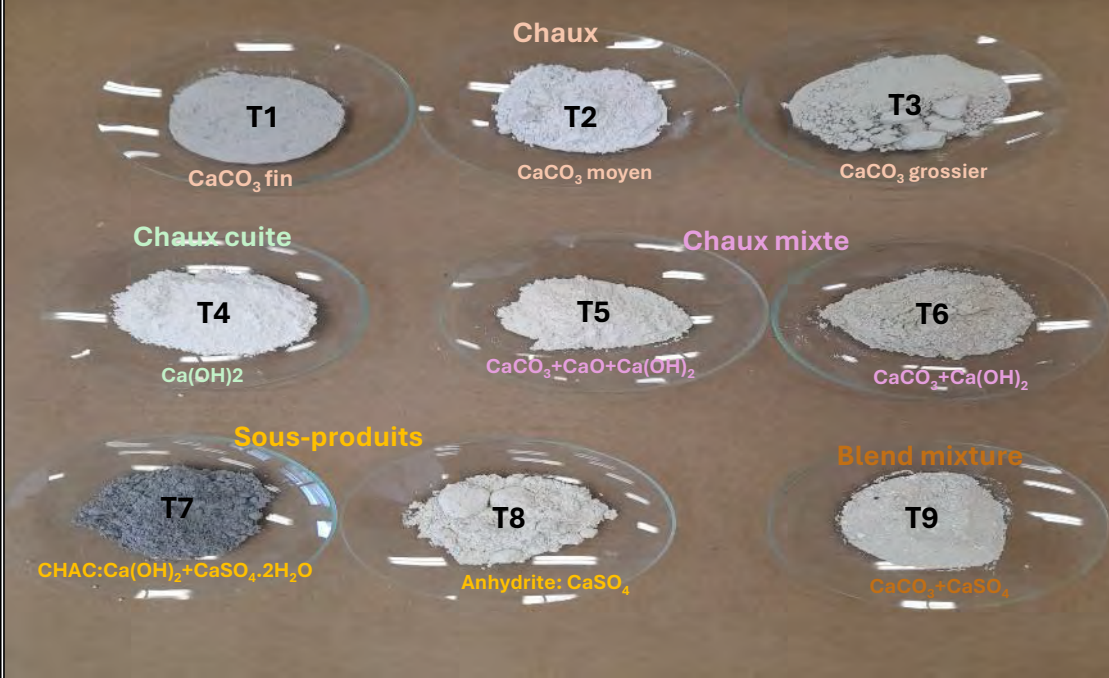
Luzernières



**MIEUX
DIAGNOSTIQUER
LE SOUFRE**



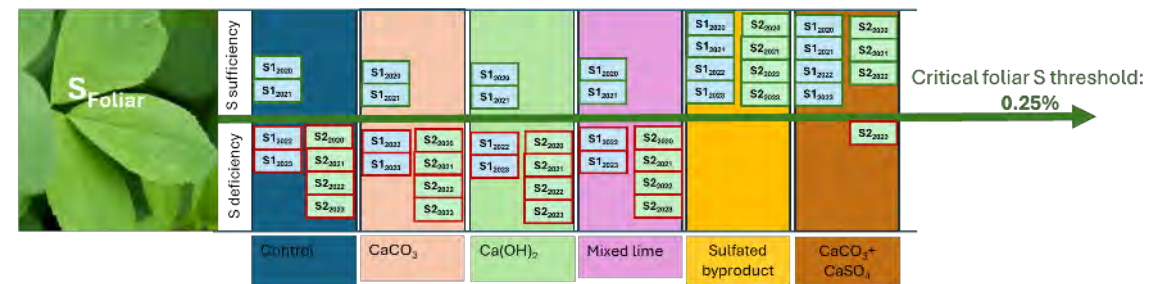
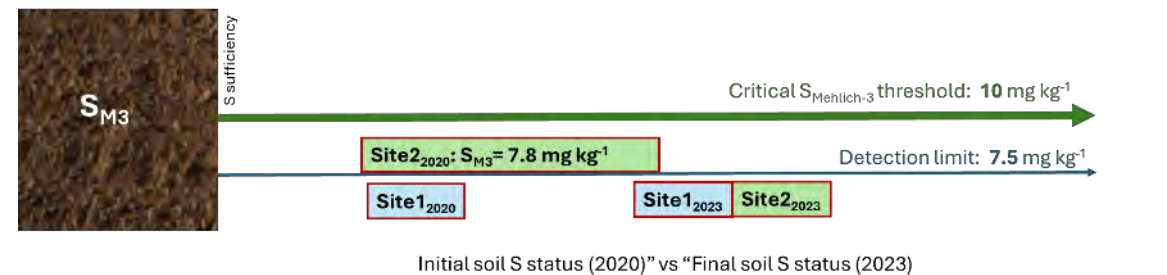
Nine calcium Amendments



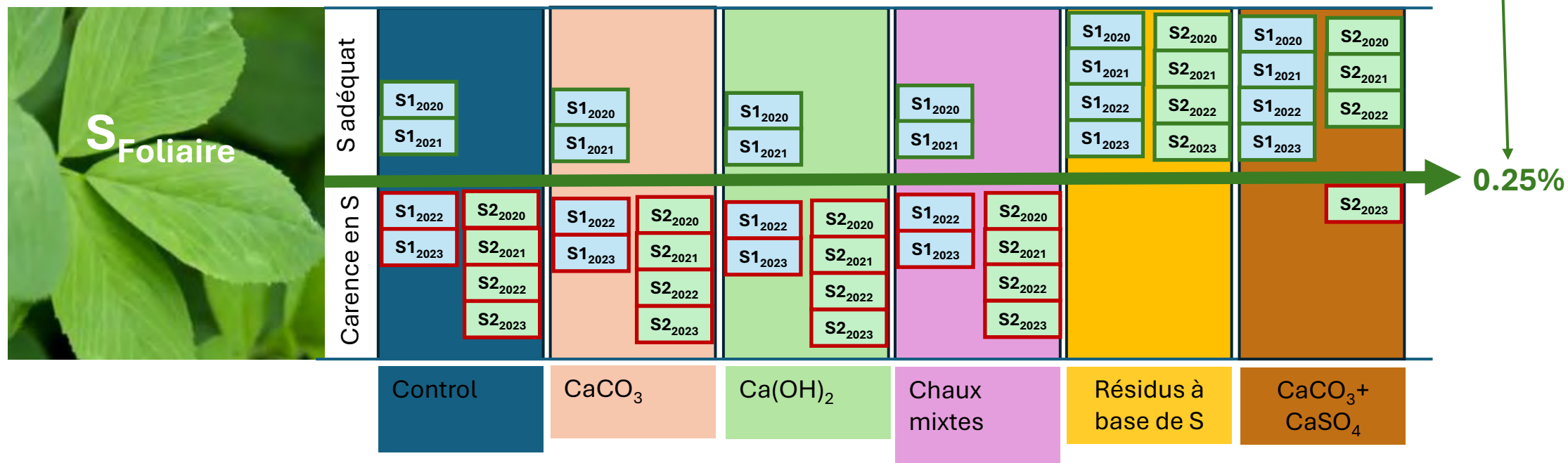
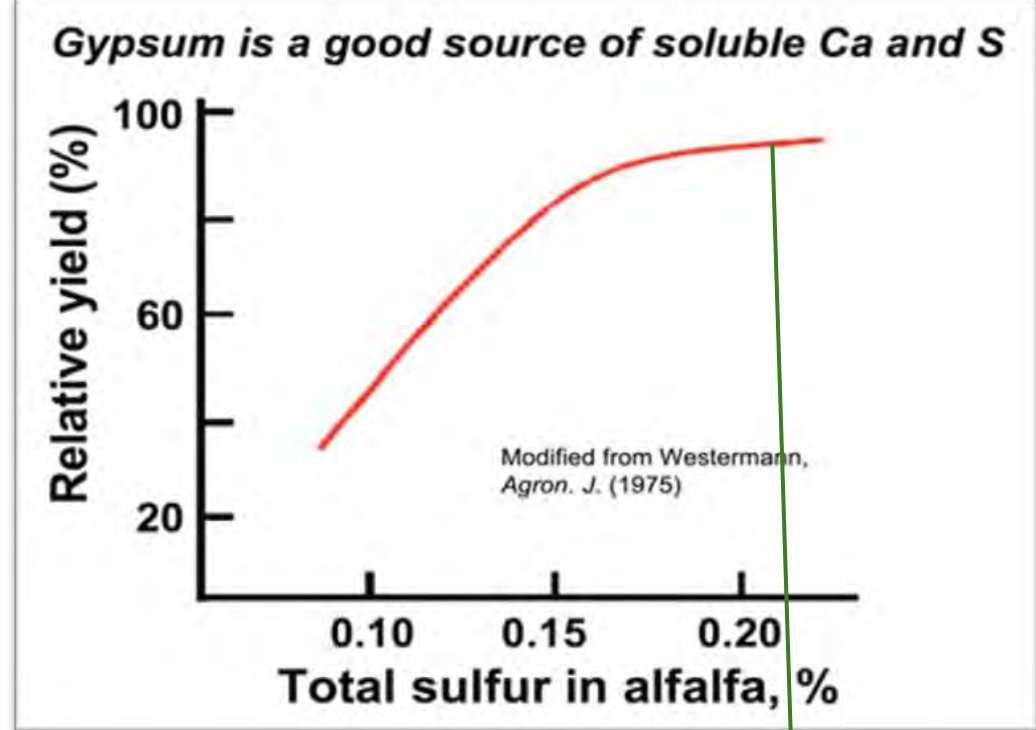
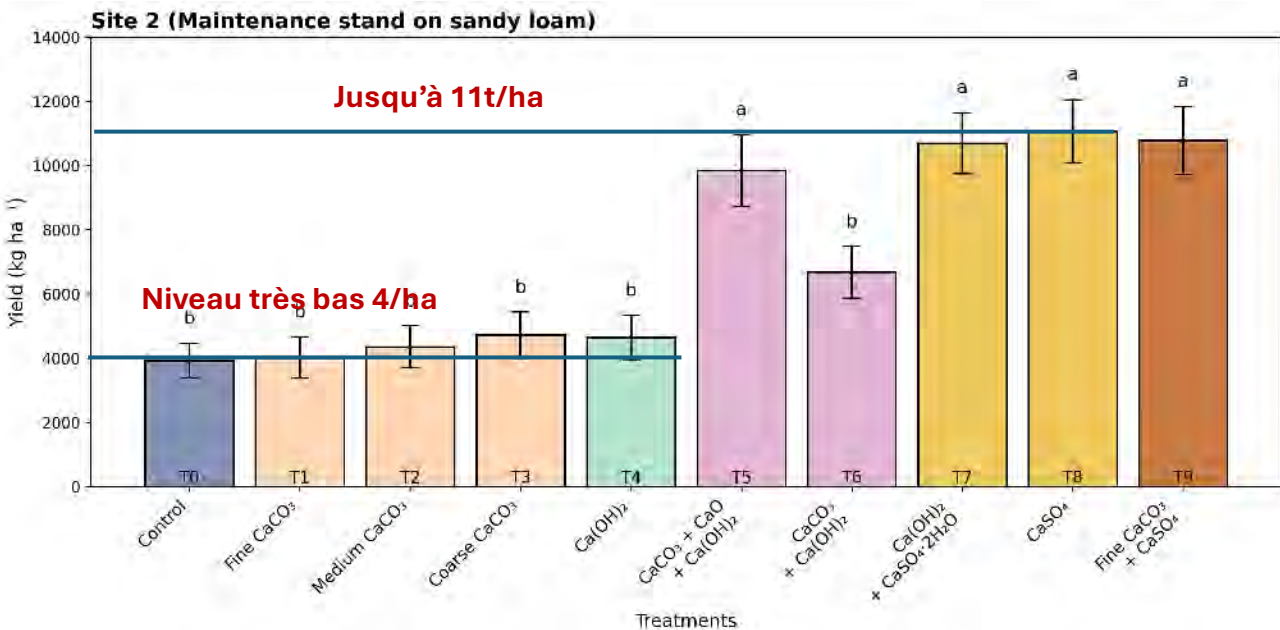
Site 1:
Luzernière à l'établissement

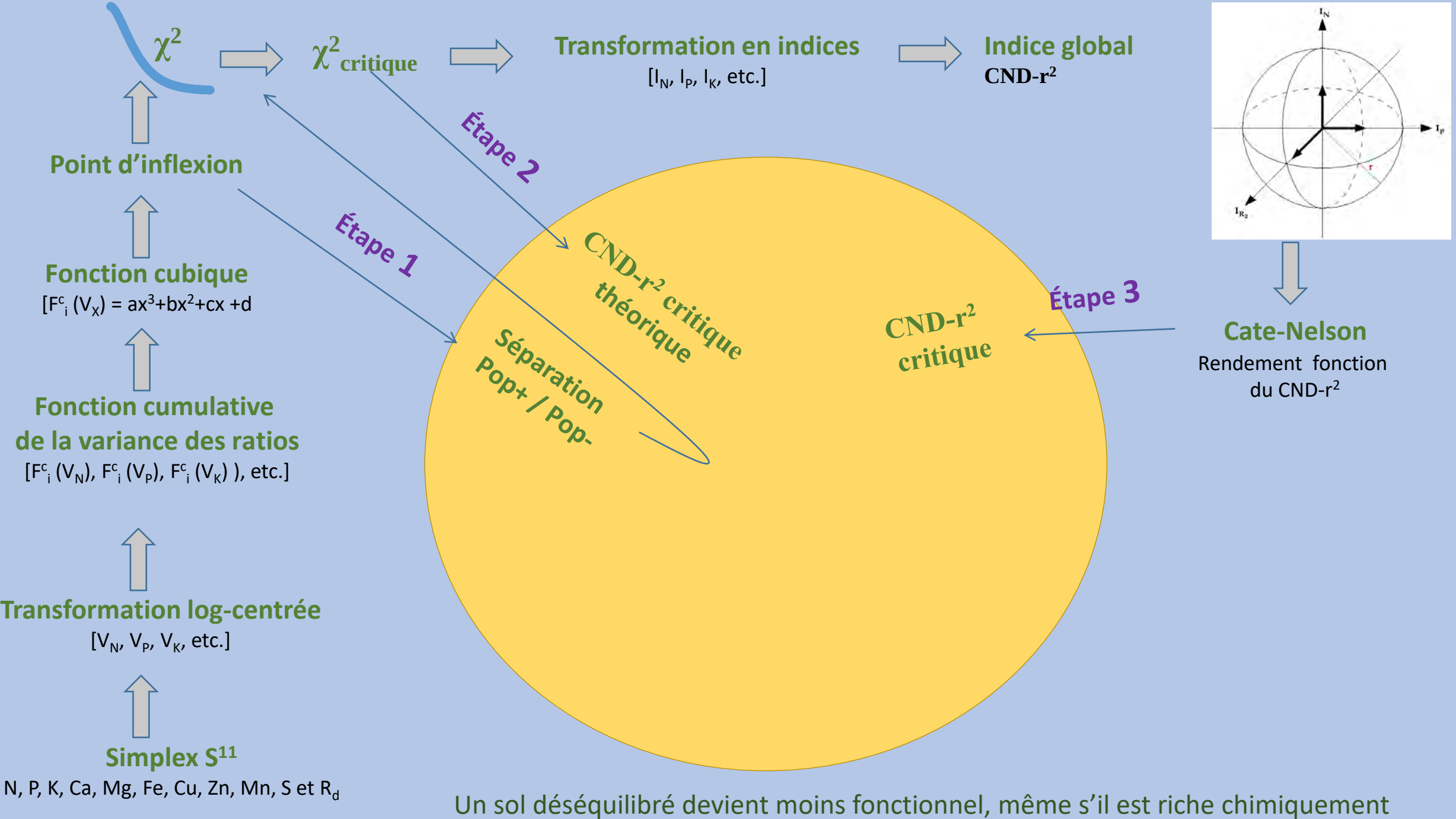


Site 2:
Vieille luzernière de plus de 10 ans



Soil S deficiency alone did not explain treatment responses: foliar S reveals contrasting physiological S demand between establishment (Site 1) and maintenance (Site 2) stands.

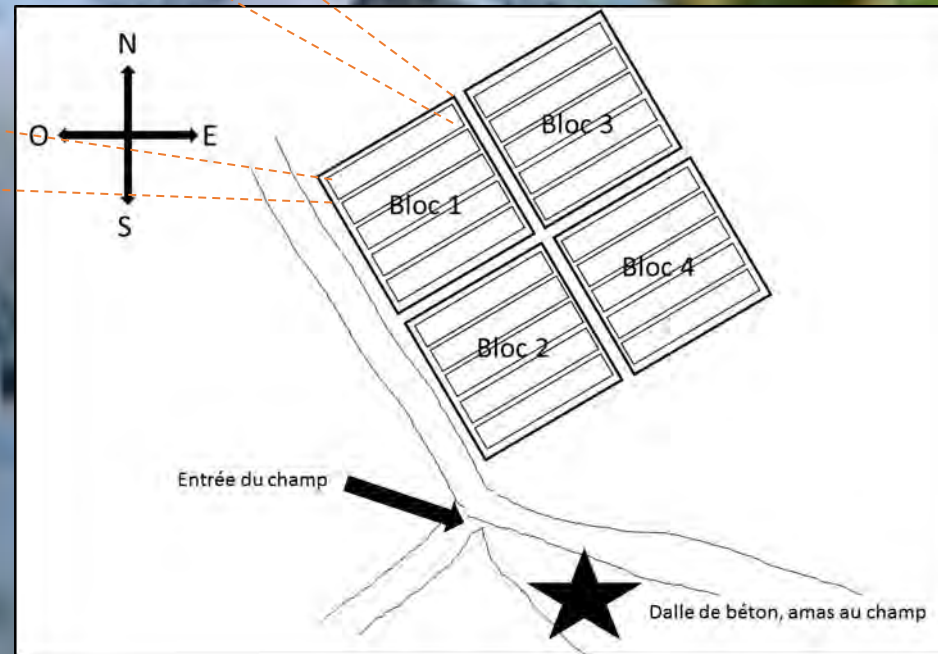


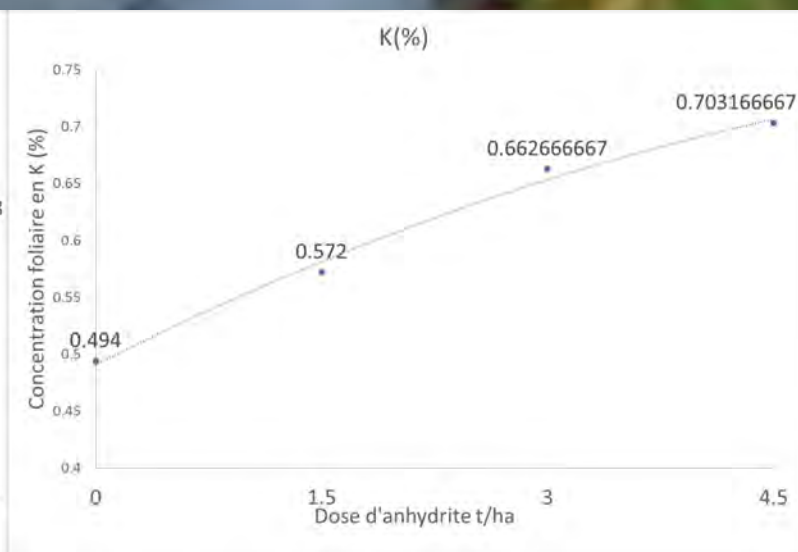
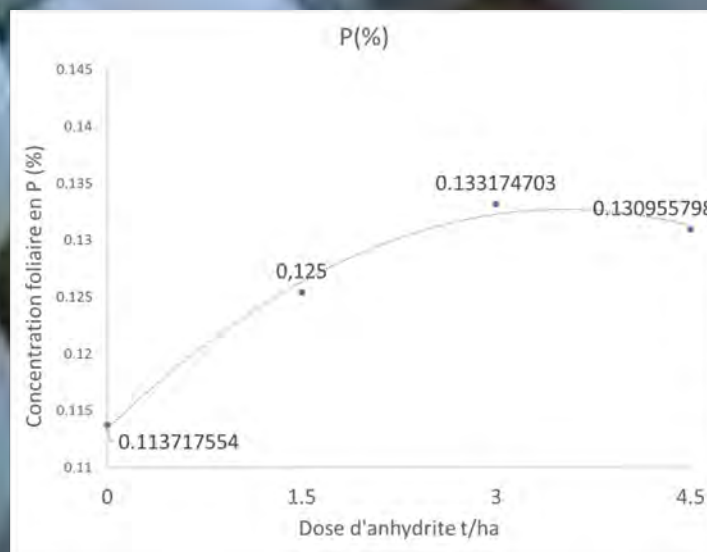
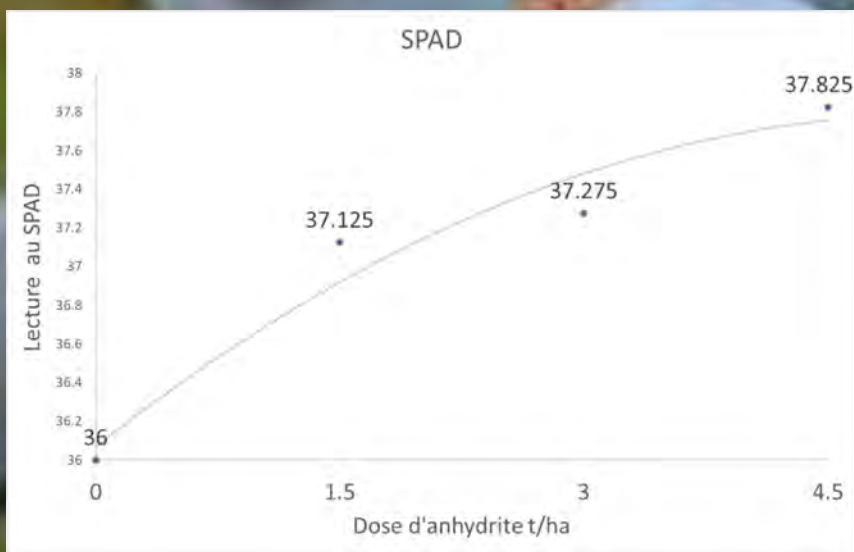
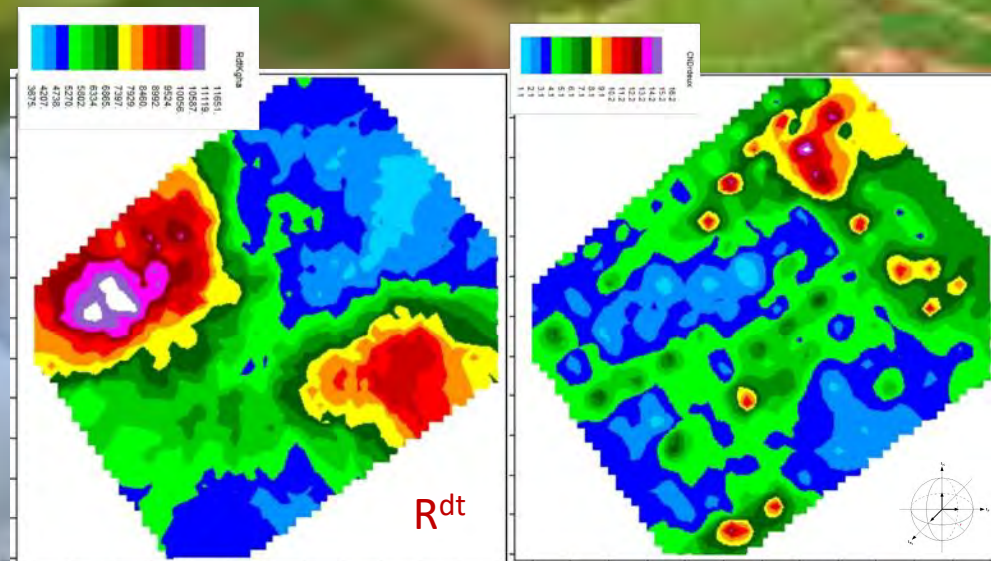
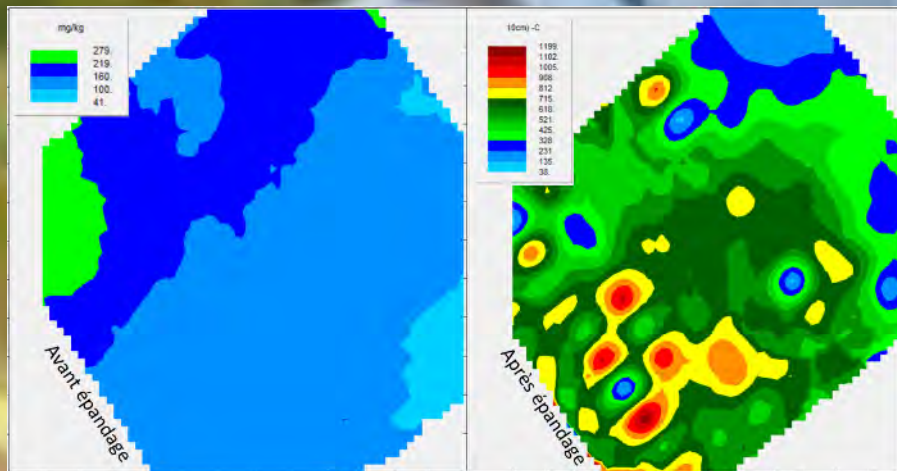


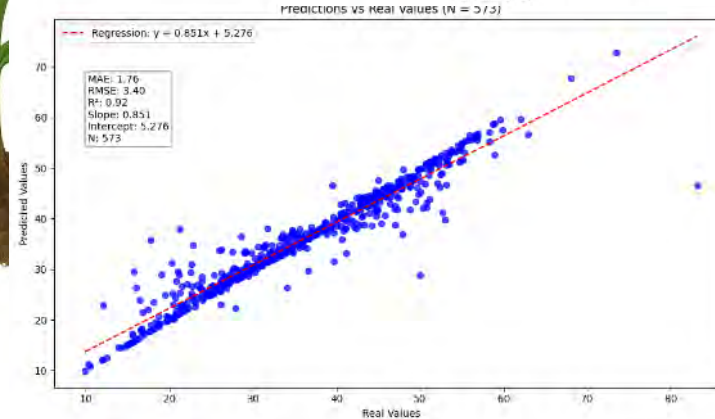
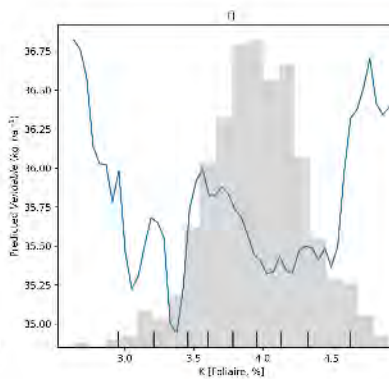
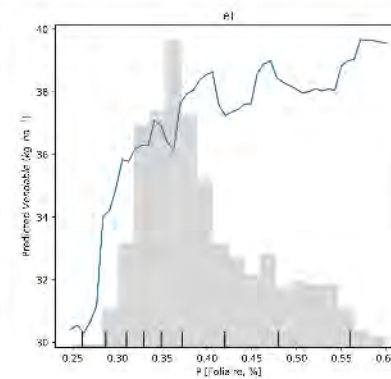
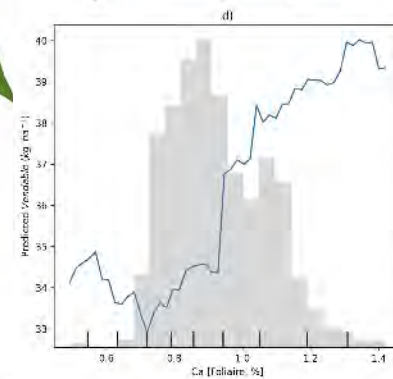
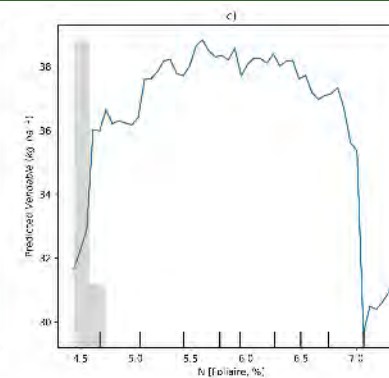
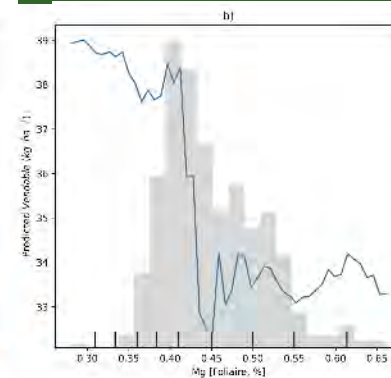
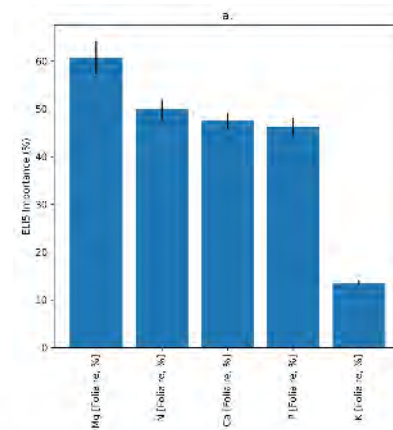
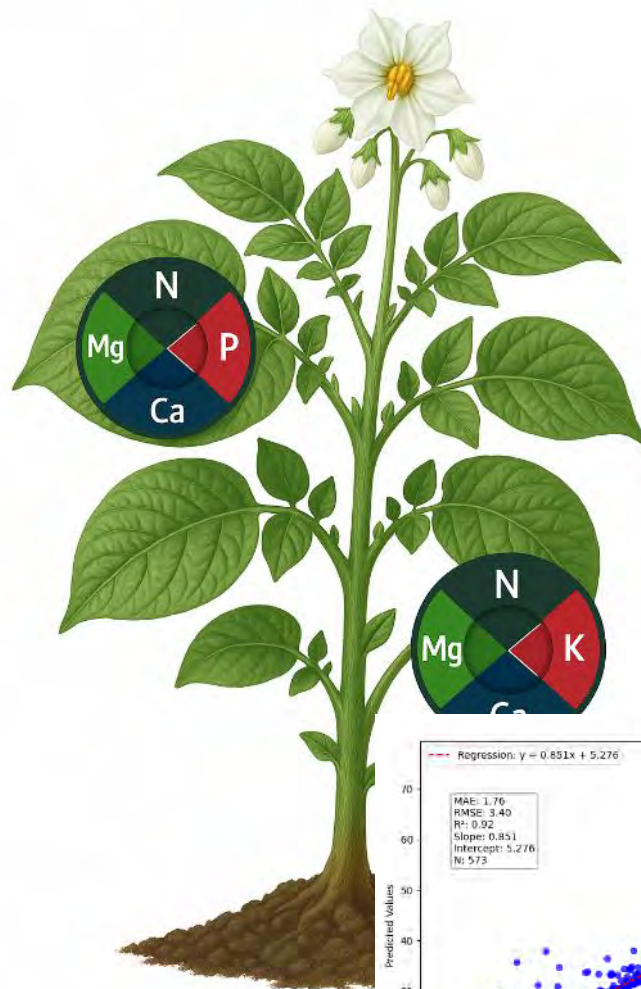
Essai de six ans d'application d'anhydride de Rio Tinto sur les bleuetières du Lac Saint-Jean

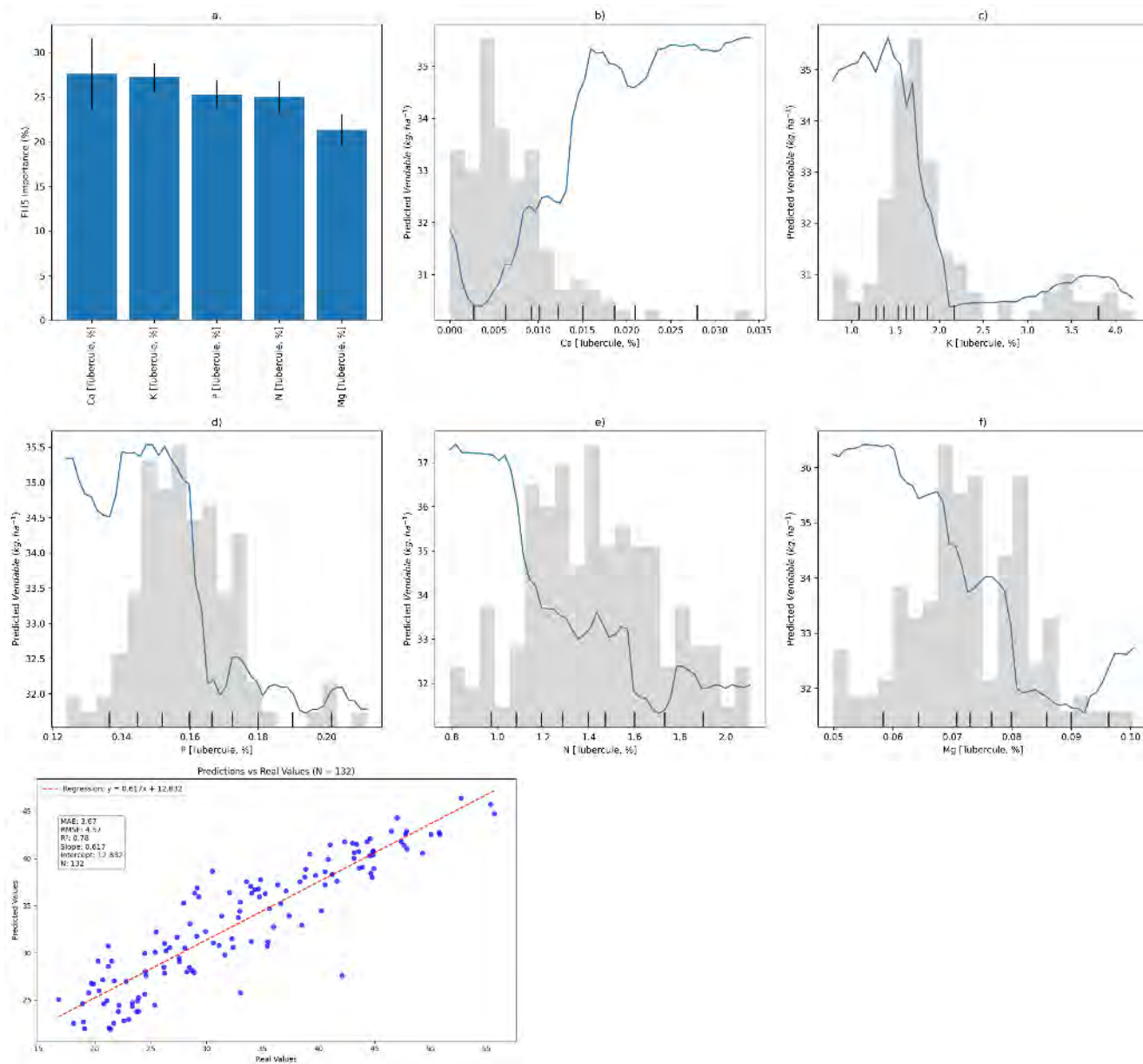
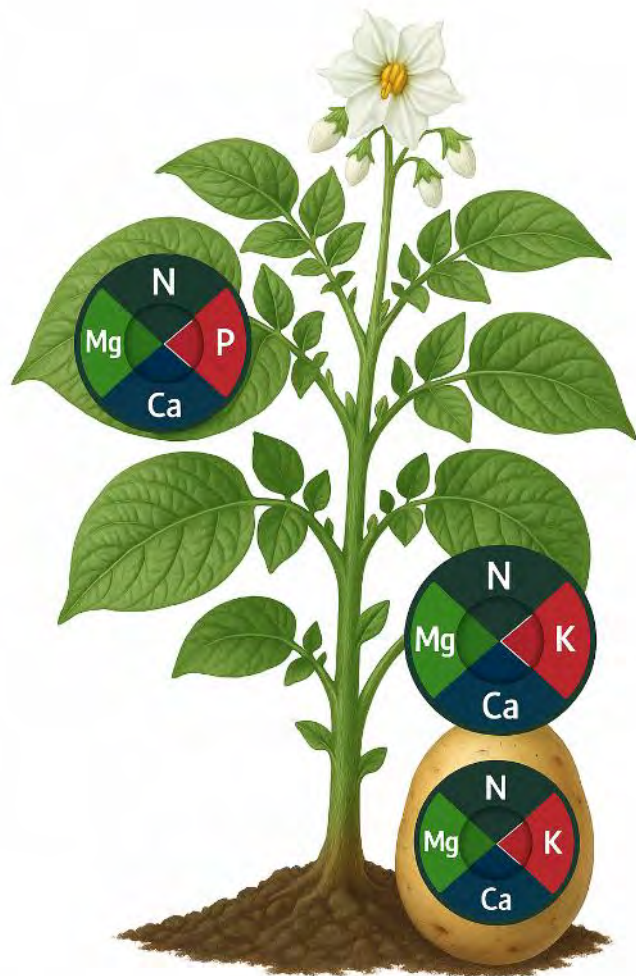


Dispositif expérimental en 4 blocs









Merci

