

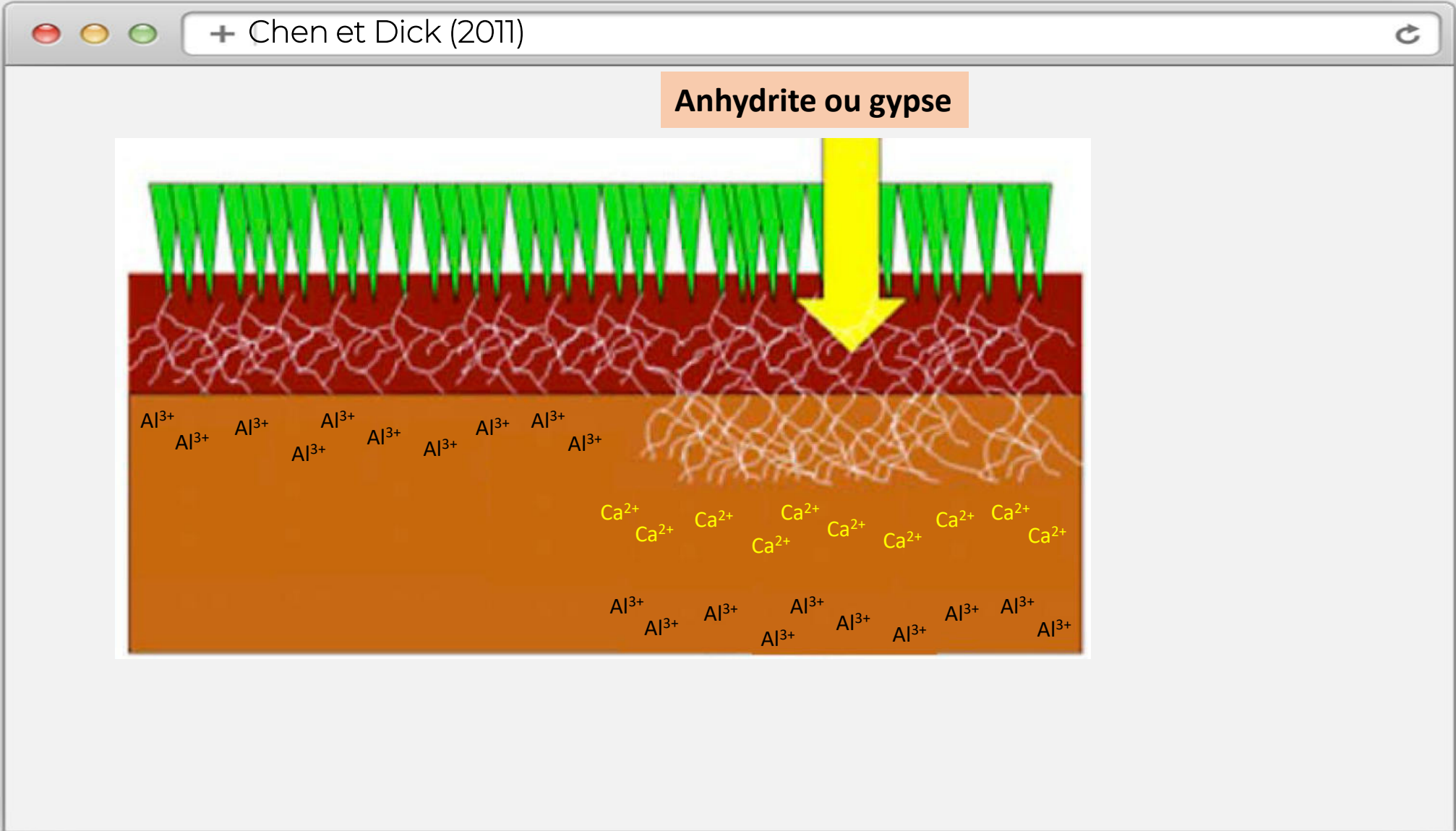
LE GYPSE

*un levier oublié pour revitaliser la fertilité,
structurer les sols et accroître les rendements*



Lotfi Khiari
19 février 2026

Systeme actuel pour les amendements non chaulants

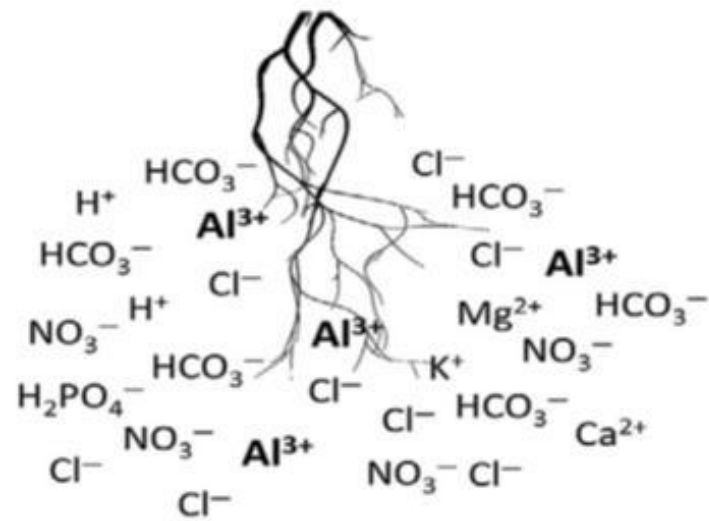


Effet de l' Al^{3+} échangeable

$I = 0.02 \text{ M}$

Solution $\text{Al}^{3+} = 0.037 \text{ mmol L}^{-1}$

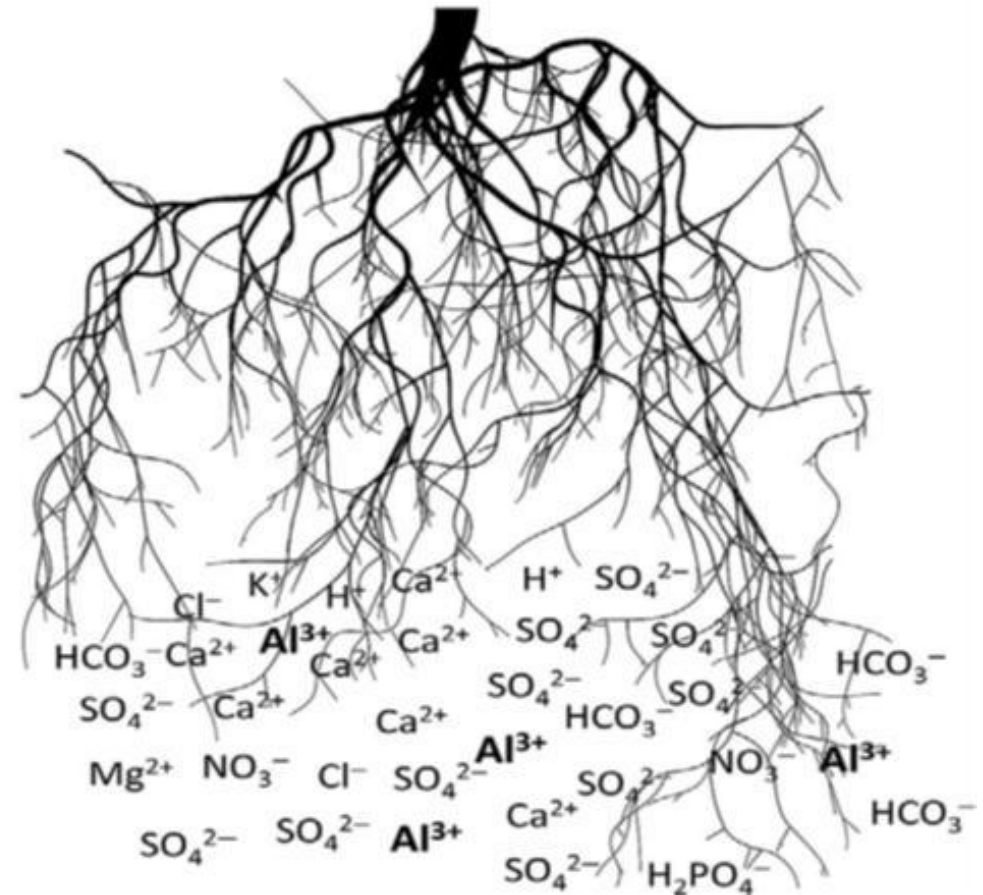
Al^{3+} activity = $0.013 \text{ mmol L}^{-1}$



$I = 0.14 \text{ M}$

Solution $\text{Al}^{3+} = 0.037 \text{ mmol L}^{-1}$

Al^{3+} activity = $0.006 \text{ mmol L}^{-1}$



Méthodologie

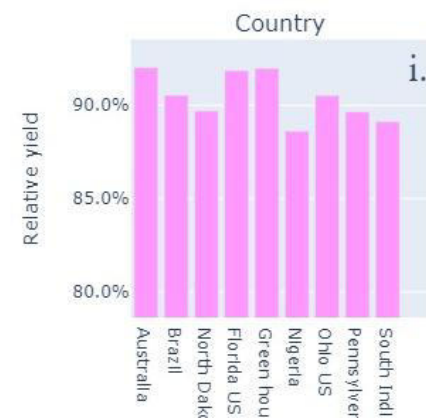
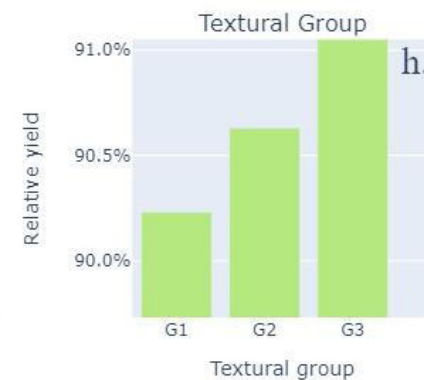
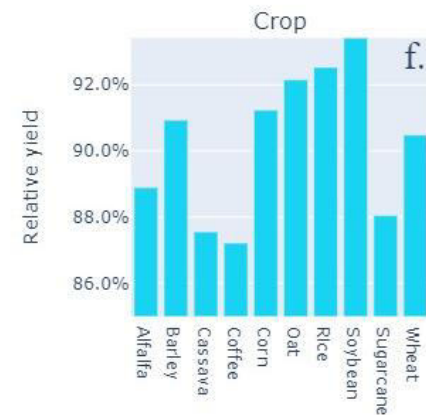
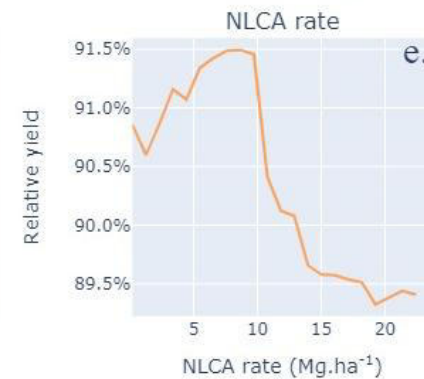
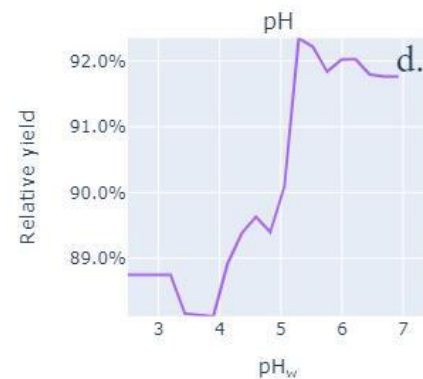
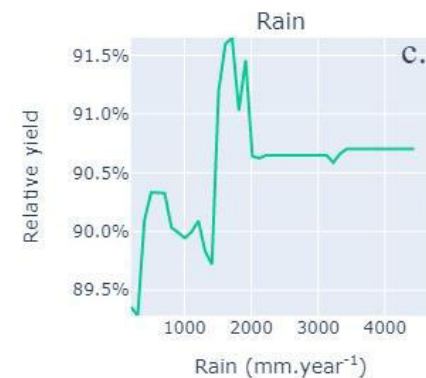
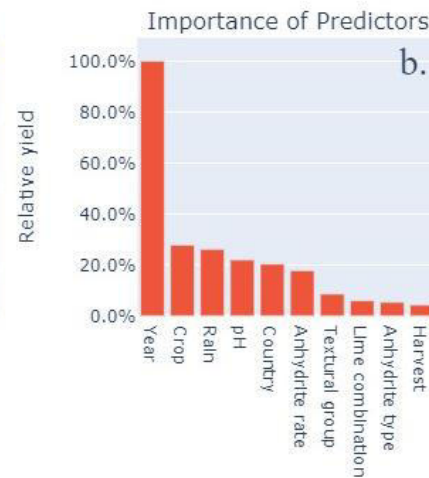
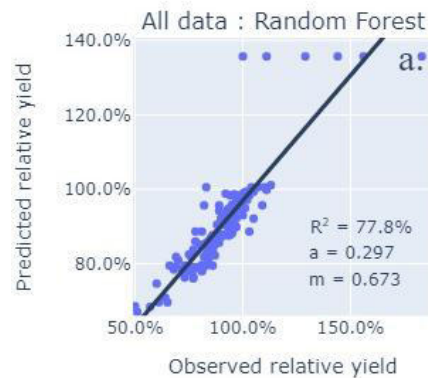
Extraction



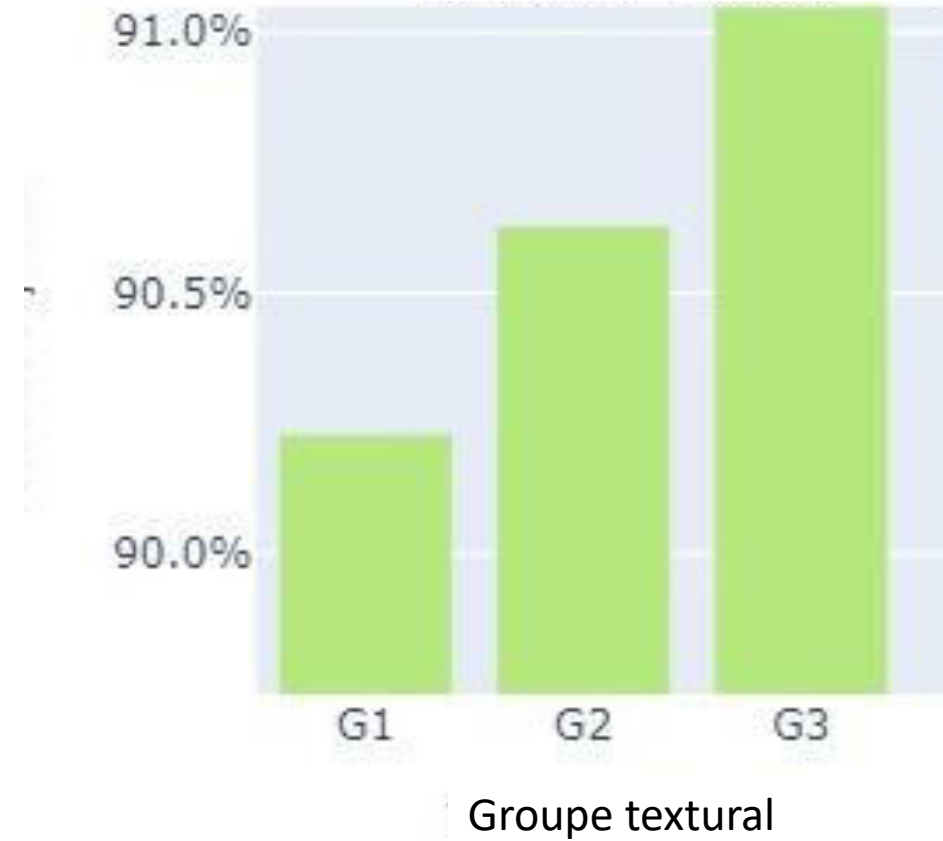
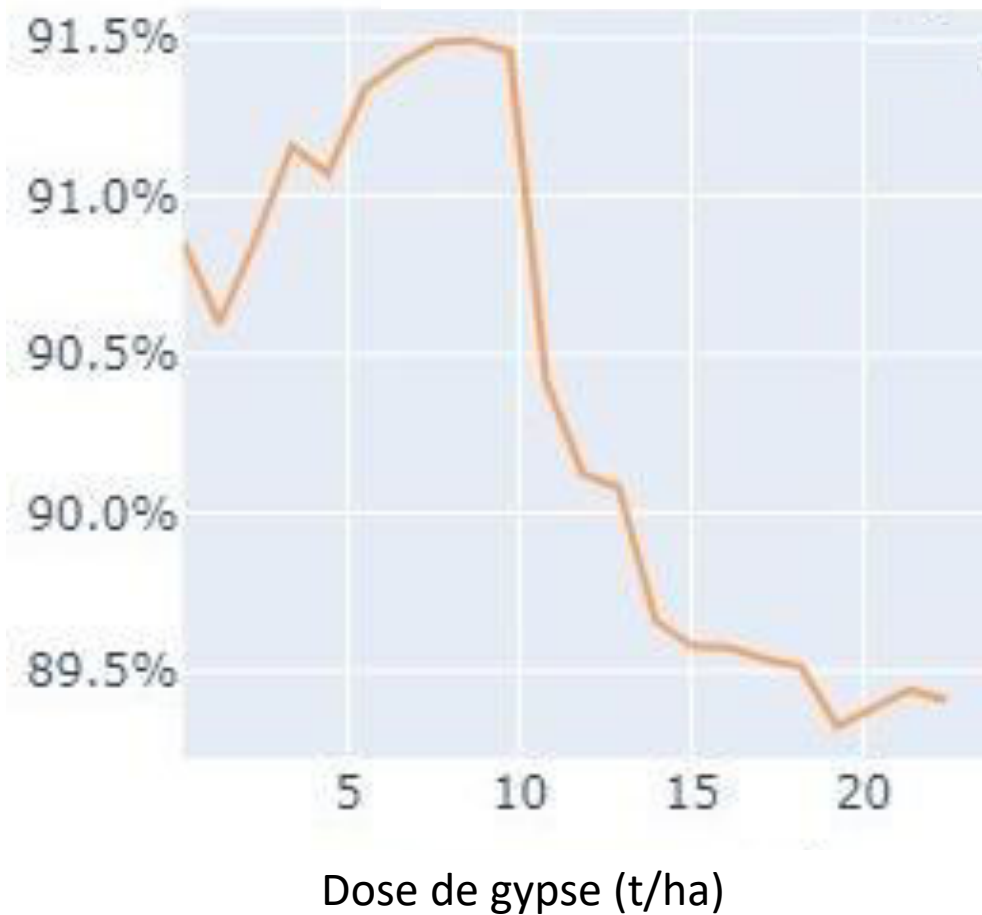
Extraction

- 181 expériences
- 5 pays, 10 cultures
- Sols différents (pH, Texture)
- Moyenne pluviométrique

Résultat de l'étude exploratoire



Effets doses et texture



Fractionnement des amendements calciques

Attention

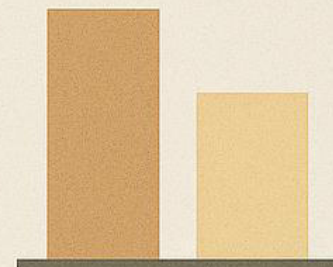
- Éviter le sur-chaulage (carence oligoéléments surtout en sols sableux)
- **Ne pas appliquer en même temps chaux et urée ou engrais de fermes (pertes ammoniacales)**

Règles d'art

- **Dose minimale de chaux :**
 - Dose permettant de ramener le pH à un minimum de **5,5**
 - En ne dépassant pas les doses annuelles ci-dessous
- **Dose maximale théorique par année :**
 - **6 t/ha** en texture grossière (**G3**)
 - **7 t/ha** en texture moyenne (**G2**)
 - **8 t/ha** en texture fines (**G1**)
 - **5 t/ha** pour les chaux fines ou vives (**G1, G2, G3**)
- **Dose maximale pratique par apport: 5 t/ha**
- **Dose minimale pratique par apport: 1,5 t/ha**
- **Dose maximale de printemps 3 t/ha**
- **Dose maximale sur les prairie entretien: 2,5 t/ha**



DIMINUTION DES DÉPÔTS DE SO₂



Luzernières



**MIEUX
DIAGNOSTIQUER
LE SOUFRE**





Site 2 (46°43'52" N; 71°31'08" W)

Site 1 (46°43'42" N; 71°30'27" W)

Sites expérimentaux ULaval

Site1

Clay	36.1
Silt	23.9
Send	40.0
Texture Class	Clay loam
Textural Group	Fine (G1)



	Depth	Site 1
pH _{water}	0–20 cm	5.90
	20–40 cm	5.88
	40–60 cm	5.59

Site2

Clay	12.2
Silt	18.4
Send	69.4
Texture Class	Sandy loam
Textural Group	Coarse (G3)

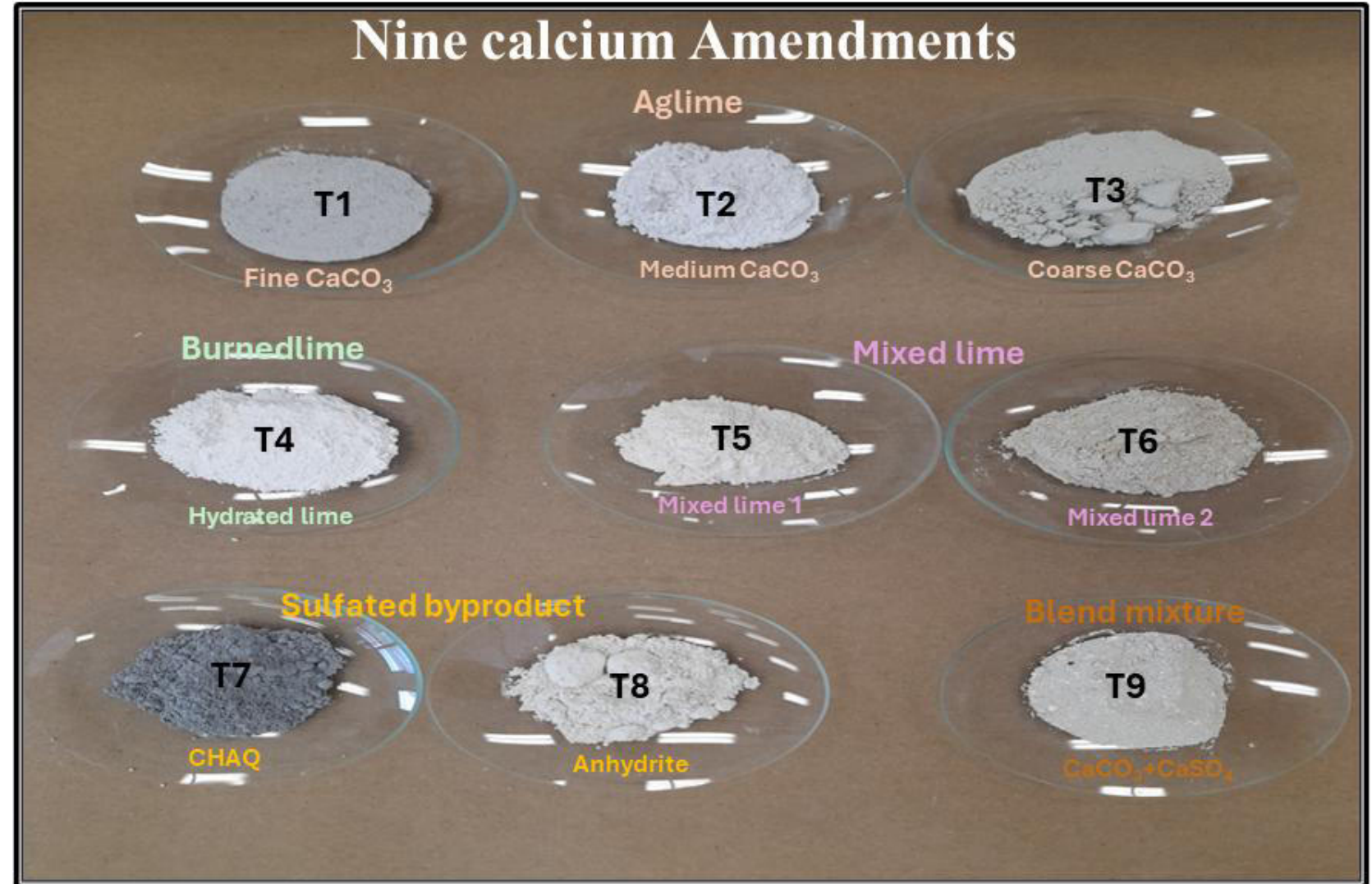


	Depth	Site 2
pH _{water}	0–20 cm	6.56
	20–40 cm	6.96
	40–60 cm	7.42

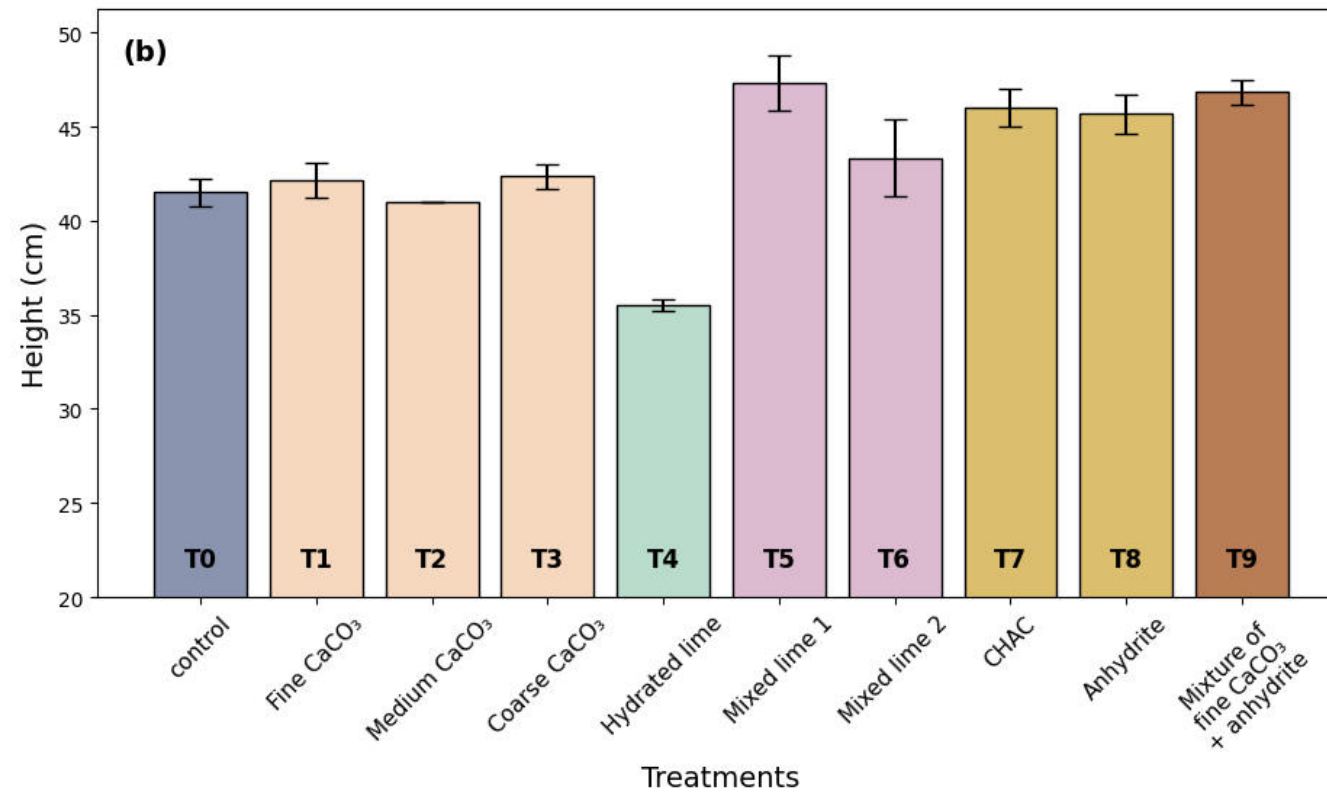
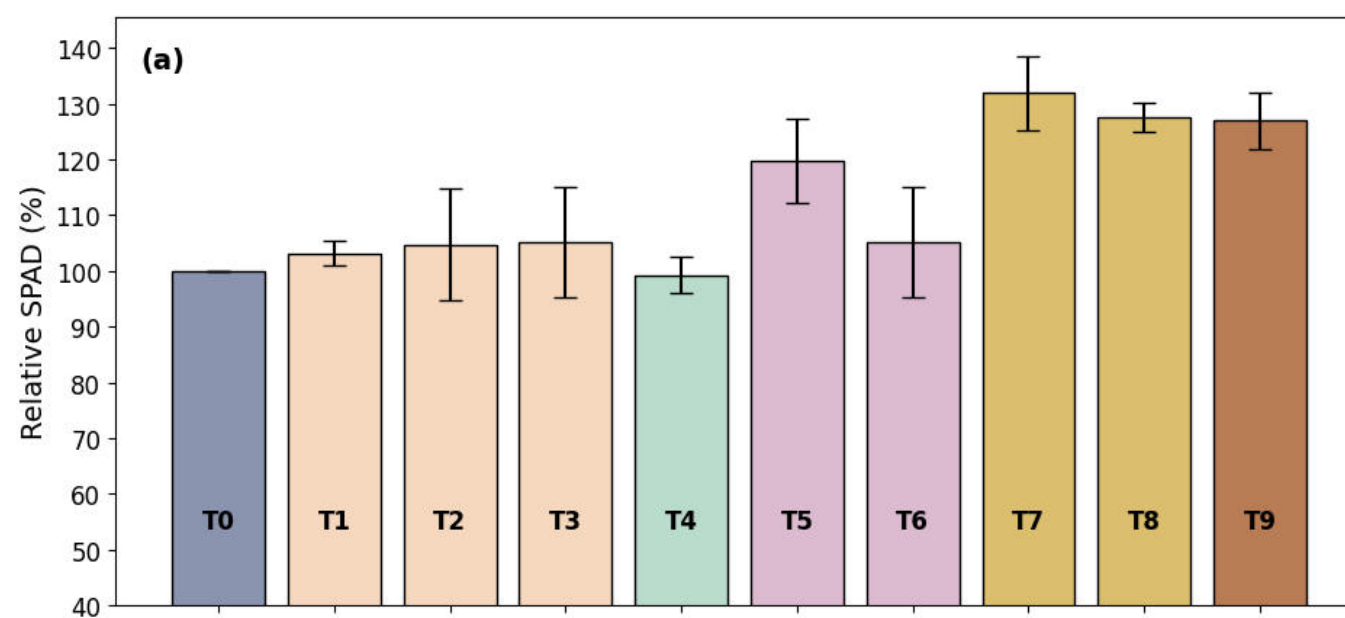
9 amendements calciques

Traitements	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	
	Chaux crue: CCr: CaCO ₃			Chaux calcinée CCa	Chaux mixtes		ACM		Mixtes	
	Fine	Moyenne	Grossière	Chaux hydratée	Mixte 1	Mixte 2	CHAC	Anhydrite	CaCO ₃ +CaSO ₄	
					CCr+CCa					
Granulométrie (%)	< 2mm	100	90	47.1	99.8	68	66.4	98.8	73.5	granular
	<0.15mm	100	100	99.5	99.9	99.9	90.7	38.6	47.7	granular
Humidité (%)	0.2	0.1	3.3	0.6	0.1	19	11.1	10.1	0.7	
CaCO ₃ (%)	92.3	56.8	58.5	2.1	39.3	47.6	2.1	ND	20	
CaO (%)	ND	ND	ND	2	15.8	ND	ND	4	ND	
Ca (OH) ₂ (%)	ND	ND	ND	95.2	5	39.2	35	ND	ND	
Mg CO ₃ (%)	2.66	40.3	37.1	1	ND	ND	ND	ND	ND	
CaSO ₄ (%)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	45	95	70	
NV (%CCE)	94.1	103.6	102.9	ND	95.4	107.0	87.0	ND	36.0	
Efficacité (%)	100	96	78.5	ND	87.5	81	100	ND	ND	

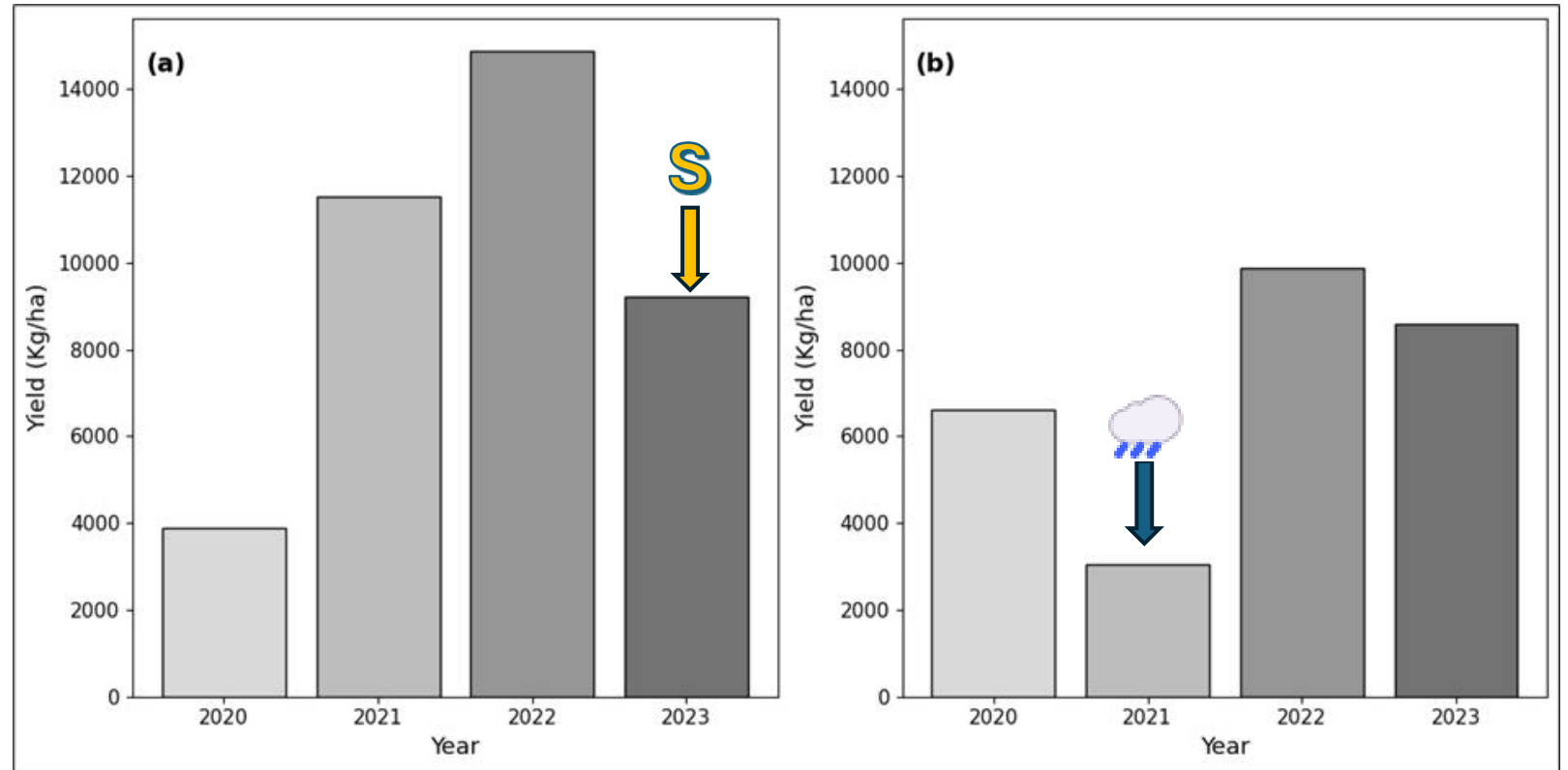
9 traitements



Effet démarrage



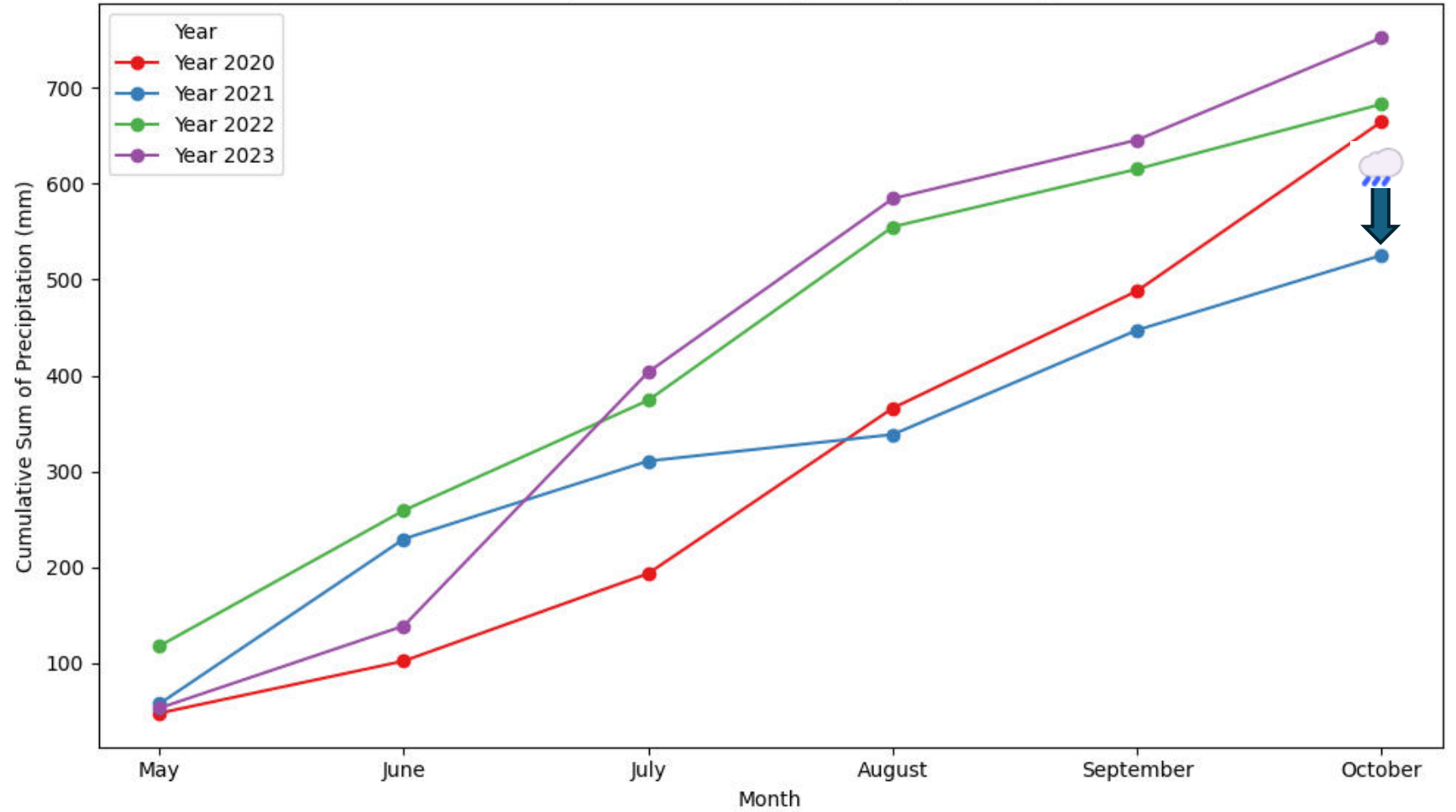
Moyenne des rendements sur les 4 années d'expérimentation

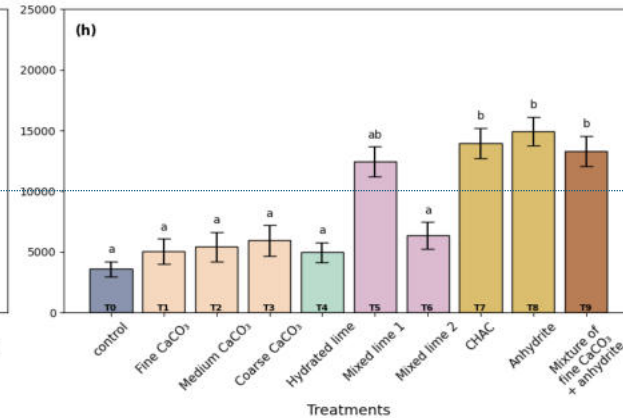
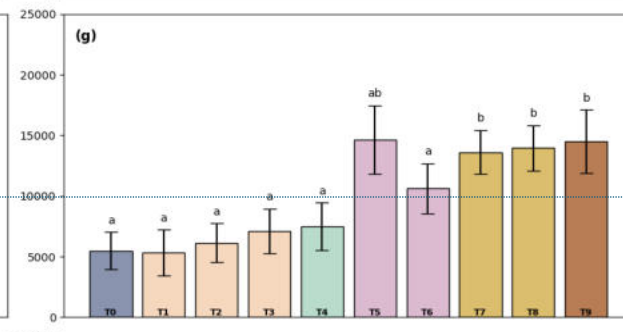
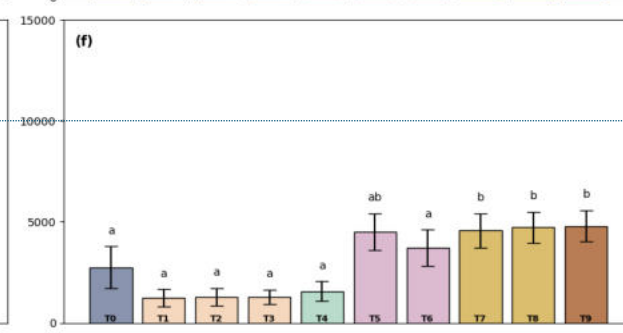
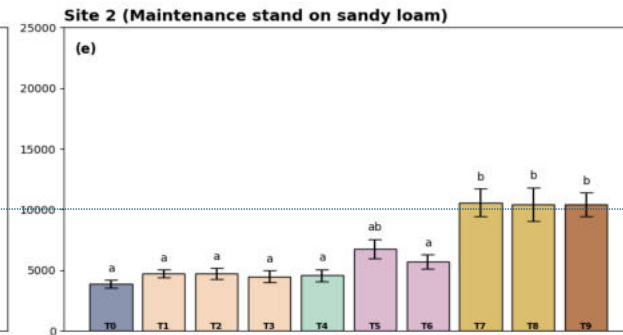
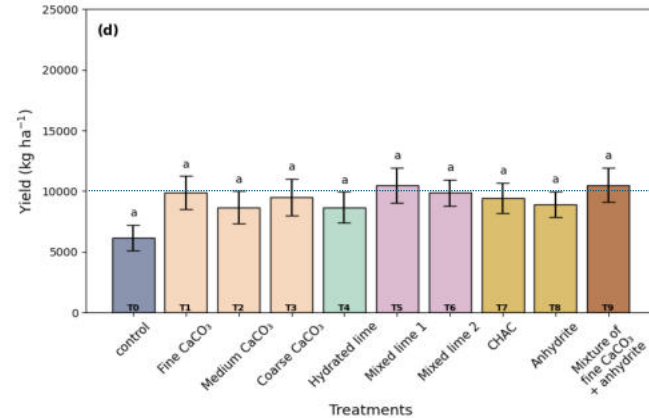
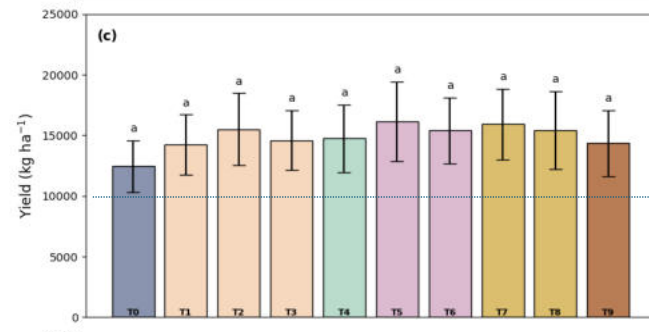
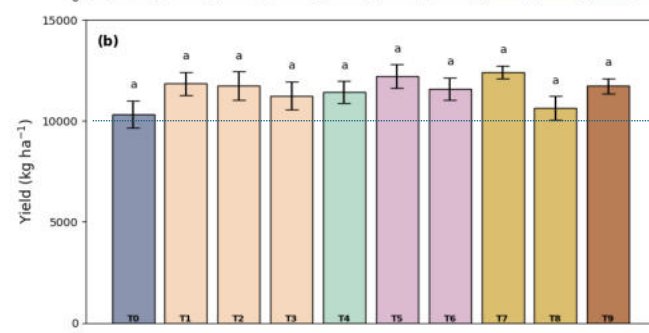
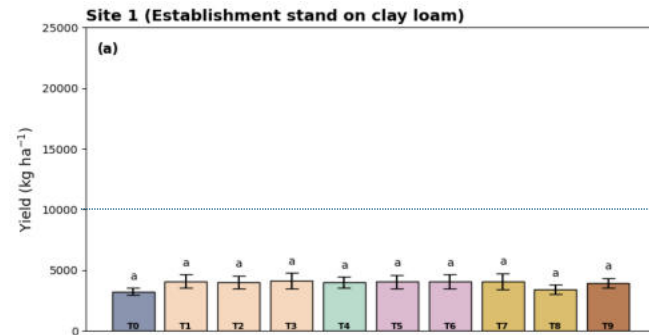




Répartition des pluies durant les saisons de croissance de la luzerne

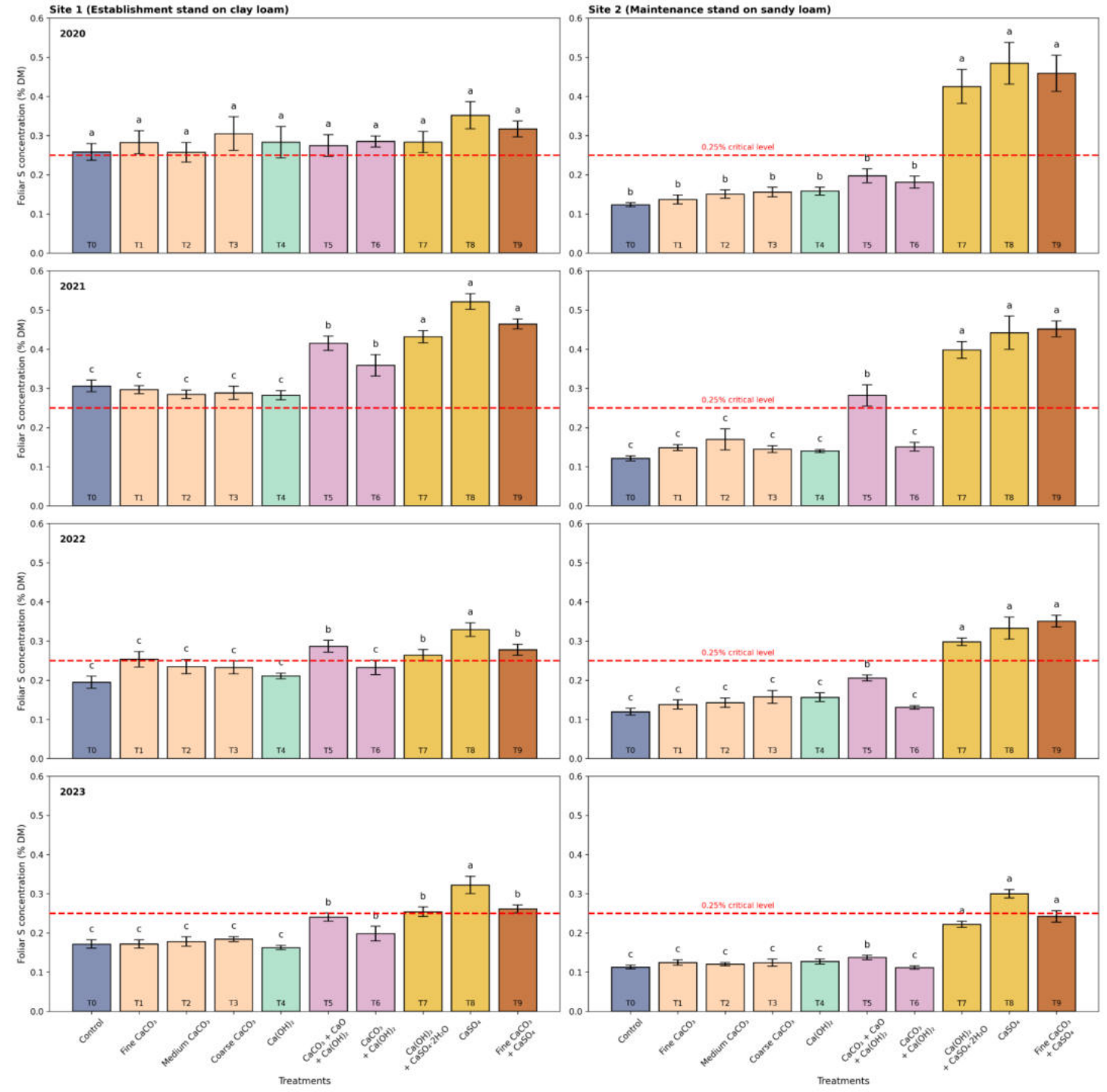
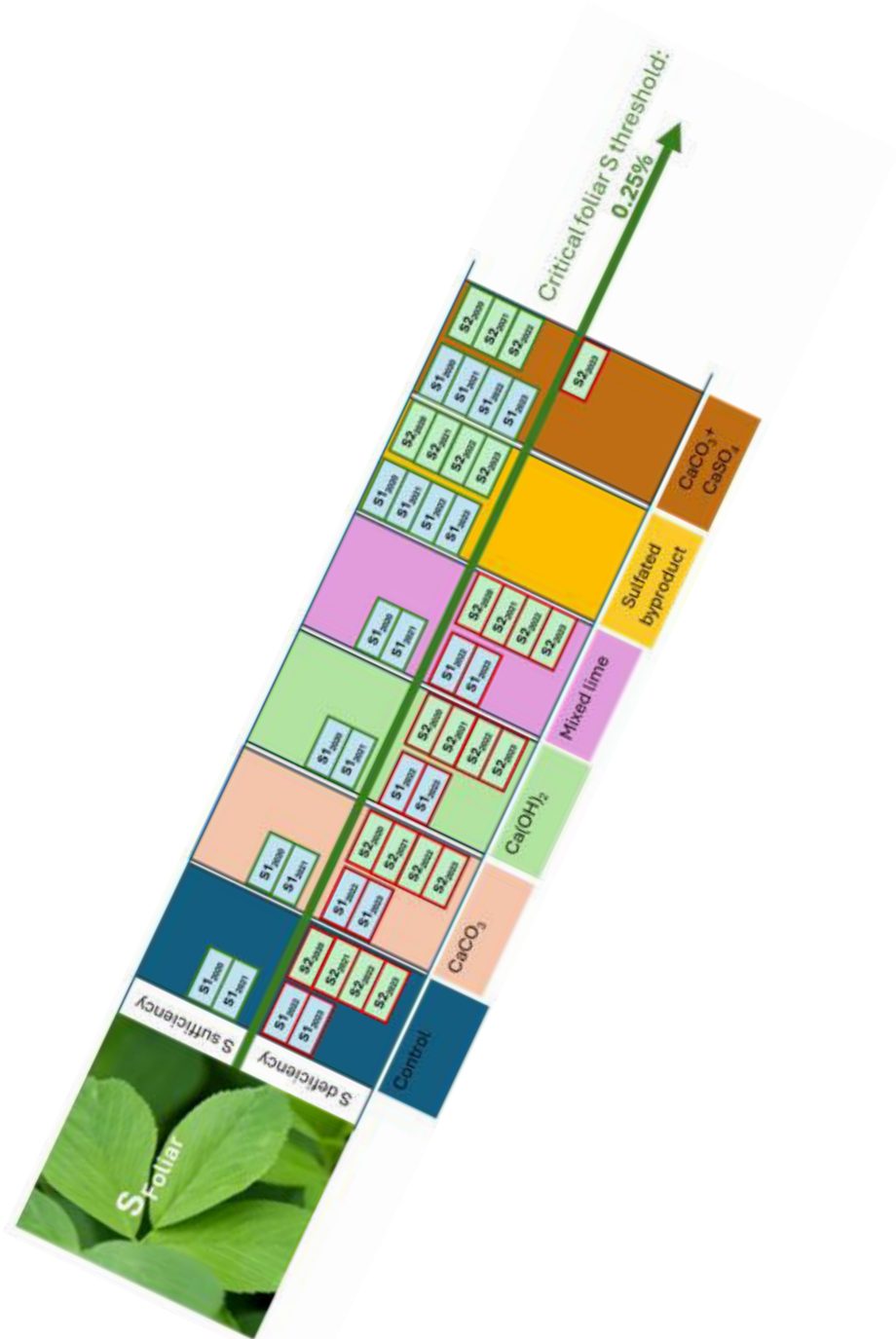
Monthly Cumulative Precipitation (2020-2023)





Treatment categories

- control
- AgL
- BtL
- AgL + BtL
- By-product
- AgL + NLM by-product





S sufficiency

Critical $S_{\text{Mehlich-3}}$ threshold: 10 mg kg^{-1}

Site2₂₀₂₀: $S_{M3} = 7.8 \text{ mg kg}^{-1}$

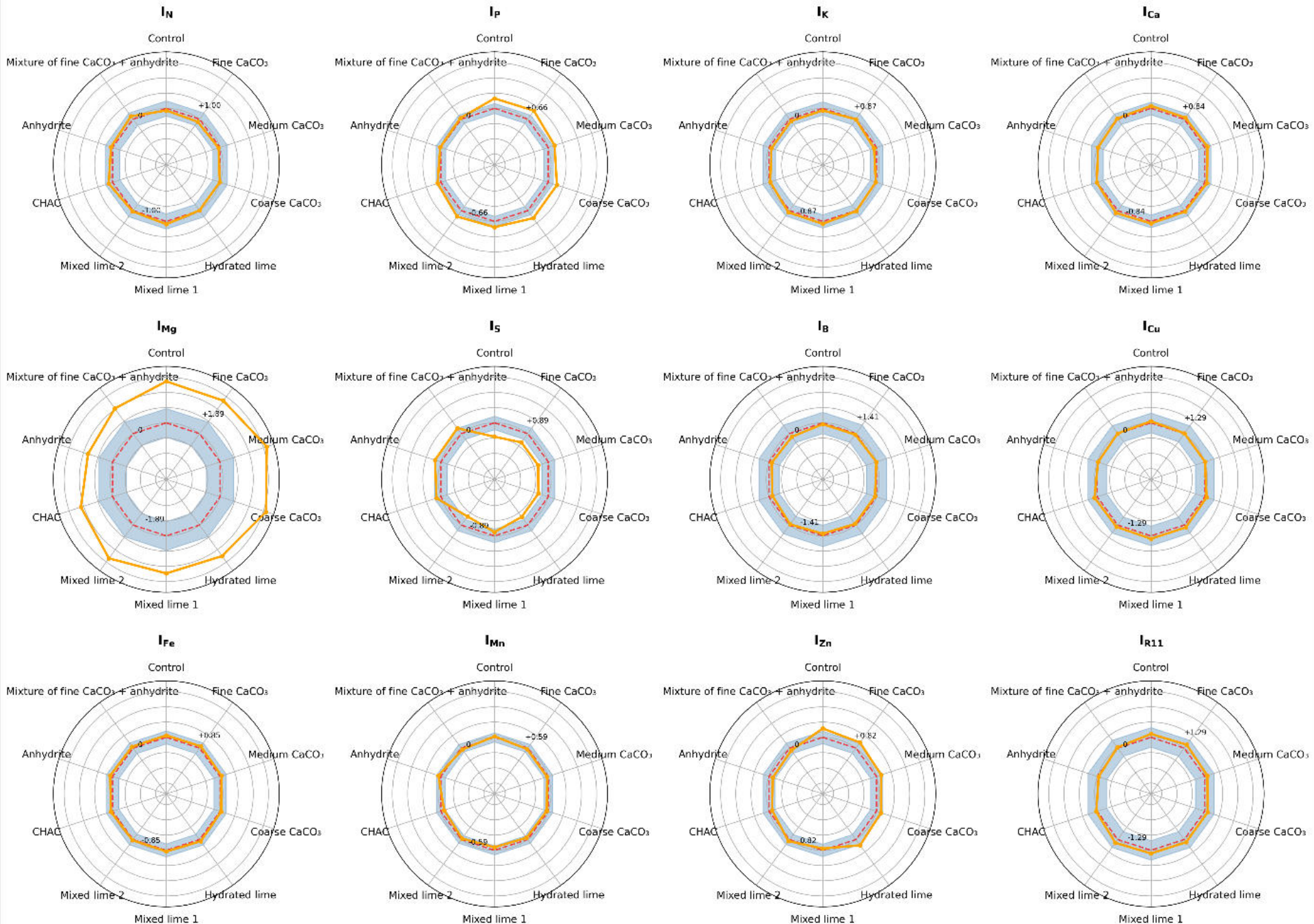
Detection limit: 7.5 mg kg^{-1}

Site1₂₀₂₀

Site1₂₀₂₃

Site2₂₀₂₃

Site 2: Vieille Luzernière de plus de 10 ans sur sol G3





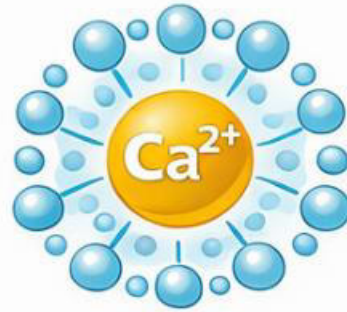
Rôle du gypse dans l'équilibre des bases





$K^+ = 0,33 \text{ nm}$
 $r_1 = 0,14 \text{ nm}$

Potassium



$Ca^{2+} = 0,41 \text{ nm}$
 $r_1 = 0,10 \text{ nm}$

Calcium



$Mg^{2+} = 0,86 \text{ nm}$
 $r_1 = 0,07 \text{ nm}$

Magnésium

Dispersant

Plus dispersant $Na^+ > Mg^{++}$



$Na^+ Mg^{2+}$ Effet dispersant

Floculant

Plus floculant $Ca^{++} > K^+$



$Ca^{2+} K^+$ Effet floculant

$Na^+ Mg^{2+}$

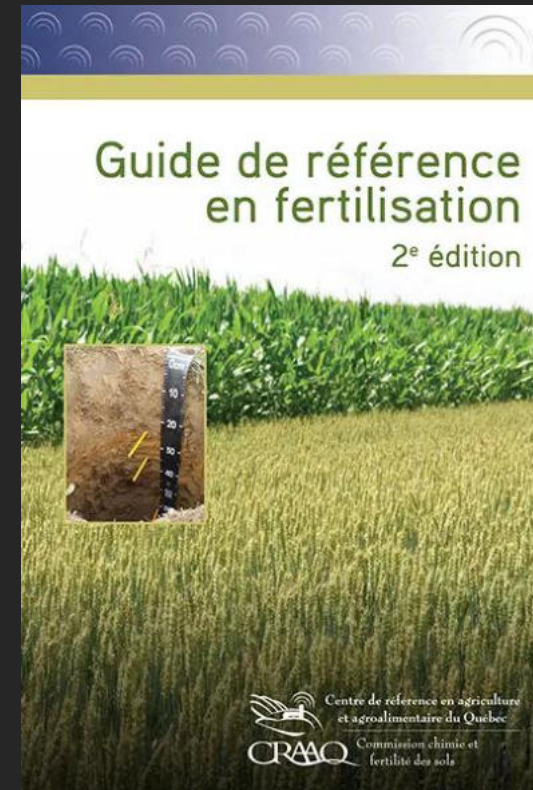
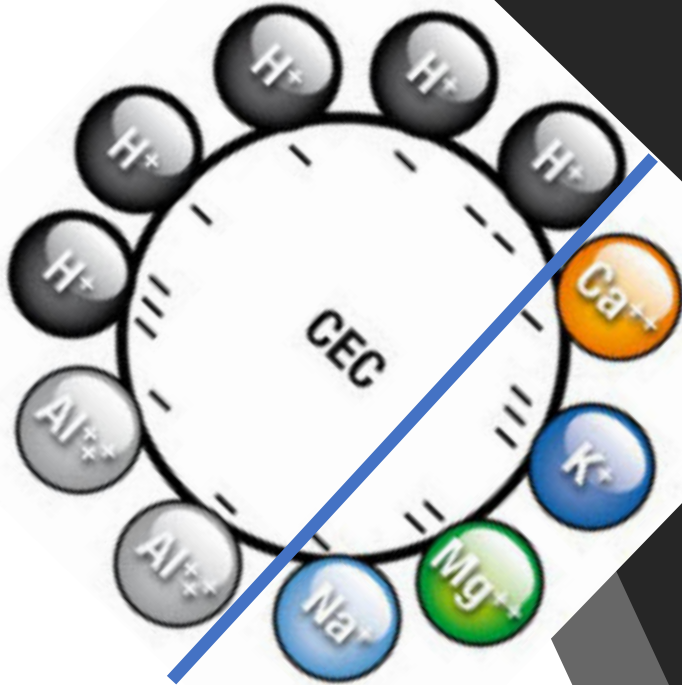
Taille du rayon hydraté

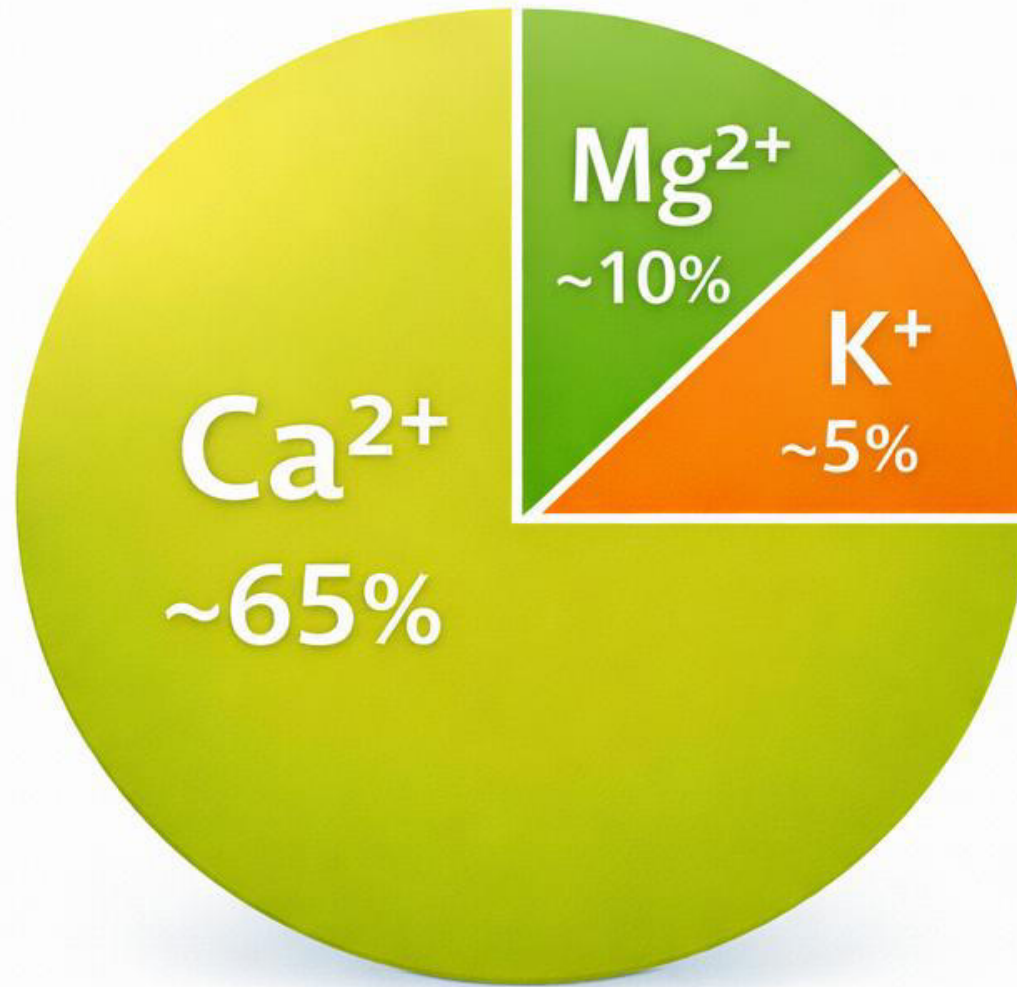
$Ca^{2+} K^+$

• $CEC_{estimée} = (\text{acidité})_{échangeable} + (\text{bases})_{échangeables}$

• $\text{Acidité}_{échangeable} = 9 (7,5 - \text{pH}_{SMP}) (\text{cmol}_{[+]}/\text{kg})$

• $\text{bases}_{échangeables} = (\text{K} + \text{Ca} + \text{Mg})_{M-3} (\text{cmol}_{[+]}/\text{kg})$





Ca⁺⁺ Calcium

Mg²⁺ Magnésium

K⁺ Potassium

CEC_{effective} VS CEC_{NH4OAc}

$$ECEC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+ + Al^{3+} (+H^+)$$

- Sous-estime la capacité réelle du sol lorsque le pH est acide
- Les charges pH-dépendantes (MO, oxydes, argiles 1:1) ne sont pas totalement exprimées
- Non comparable entre sols de pH différent

$$\%K_{\text{échangeable}} = \frac{K_{M3}}{CEC_{\text{effective}}} \times 100$$

$$\%Mg_{\text{échangeable}} = \frac{Mg_{M3}}{CEC_{\text{effective}}} \times 100$$

$$CEC_{NH_4OAc} = \sum \text{sites négatifs disponibles à pH 7}$$

- La capacité réelle du sol à retenir les cations
- Le potentiel combiné : argiles, matière organique, charges variables activées à pH 7
- Une base commune de comparaison entre sols

Avantages majeurs

- ✓ Indépendante du pH
- ✓ Comparable entre régions, systèmes et climats
- ✓ Base de référence pour BCSR et chaulage
- ✓ Indispensable pour exprimer des saturations (%) fiables

$$\%K_{\text{échangeable}} = \frac{K_{M3}}{CEC_{\text{Acétate d'ammonium}}} \times 100$$

$$\%Mg_{\text{échangeable}} = \frac{Mg_{M3}}{CEC_{\text{Acétate d'ammonium}}} \times 100$$

Cela reflète :

- ✓ la vraie dominance du Mg,
- ✓ le potentiel de correction par le Ca,
- ✓ la capacité réelle du sol à tamponner le chaulage.



La ECEC décrit l'état actuel du sol, alors que la CEC_{NH_4OAc} décrit son potentiel réel. Toutes les saturations critiques (Ca, Mg, K) et les seuils BCSR doivent être interprétés sur la base de la CEC_{NH_4OAc} , pas sur la CEC effective.



Toxicité aluminique

$$\text{Sat-Al}(\%) = \frac{\text{Al}_{\text{Kcl.1M}} [\text{cmol}(+)/\text{kg}]}{\text{CEC}_{\text{estimée}} [\text{cmol}(+)/\text{kg}]} \times 100$$



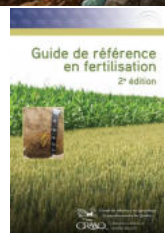
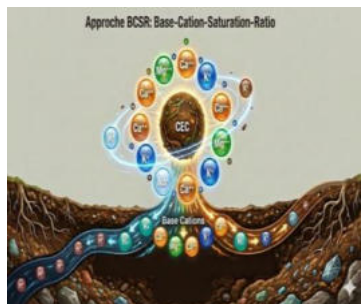
$$\text{Sat-Al} > \mathbf{15} \%$$



$$[\text{Al}^{3+}] > \mathbf{0,45} \text{ cmol}[+]/\text{kg}$$



$$\text{pH}_{\text{eau}} < \mathbf{5,5}$$



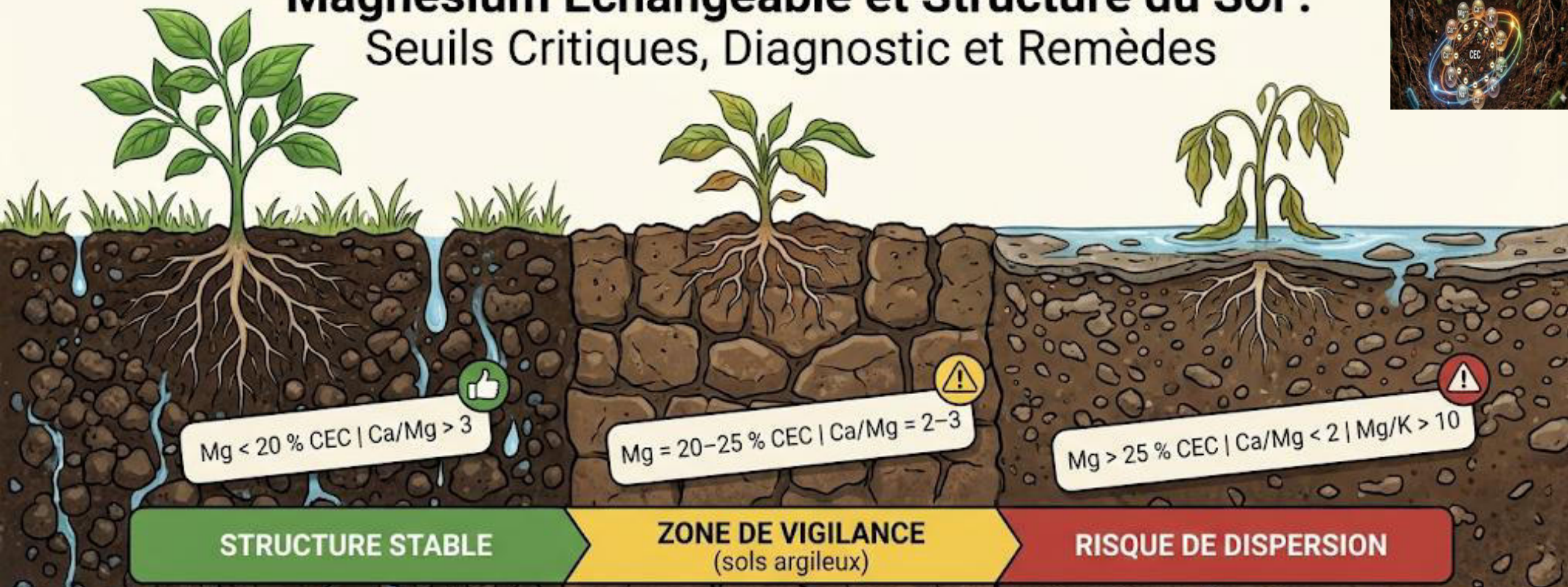
Indicateur	Seuil critique	Diagnostic agronomique / structural	Remède agronomique recommandé
Saturation K (% CEC)	< 3 %	Potassium limitant	Apport K (CRAAQ)
	3 – 5 %	Zone optimale	Aucun
	5 – 7 %	Excès latent	Suspendre apports K
	> 7 %	Excès de K	Corriger les déséquilibres
	> 10 %	Dominance K	Intervention prioritaire
K échangeable (mg/kg)	< 120	Carence K	Apport K raisonné
	120 – 200	Suffisance	Aucun
	200 – 300	Excès potentiel	Réduire apports
	> 300	Excès avéré	Stop K
Ratio K / Mg	< 5	Nutrition équilibrée	—
	5 – 10	Compétition K–Mg	Surveiller Mg
	> 10	Carence Mg induite	Corriger Mg
	> 15	Blocage Mg sévère	Intervention urgente
Ratio K / Ca	< 0,03	Équilibre correct	—
	0,03 – 0,05	Zone de vigilance	Suivi Ca
	> 0,05	Blocage Ca	Apport Ca
	> 0,07	Déséquilibre majeur	CaSO ₄ ou CaCO ₃
Sol riche en K + Mg	—	Risque structural élevé	Apport Ca flocculant



Indicateur	Seuil critique	Diagnostic structural	Remède agronomique recommandé
Saturation Mg (% CEC)	< 20 %	Structure stable	Aucun
	20 – 25 %	 Vigilance sur sols argileux	Suivi Ca/Mg
	> 25 %	 Dispersion probable	Apport Ca flocculant
	> 35 %	 Sol magnésien sévère	Correction prioritaire
Mg échangeable (cmol+)/kg)	< 2,0	Aucun risque	—
	2,0 – 3,5	Dépend du Ca	Vérifier Ca/Mg
	> 4,0	 Risque élevé	Apport Ca
Ratio Ca / Mg	> 5	Très bonne flocculation	—
	3 – 5	Structure stable	—
	2 – 3	Limite inférieure	Préventif
	< 2	 Dispersion	CaSO ₄ ou CaCO ₃
	< 1,5	 Battance, compaction	Intervention urgente
Ratio Mg / K	< 5	Nutrition OK	—
	5 – 10	Compétition Mg–K	Ajuster K
	> 10	 Blocage K + structure	Corriger Mg d'abord



Magnésium Échangeable et Structure du Sol : Seuils Critiques, Diagnostic et Remèdes



REMÈDES AGRONOMIQUES



GYPSE (CaSO₄)
Ca flocculant sans hausse du pH



CHAUX CALCIQUE
si sol acide (éviter dolomie)



ÉVITER
chaux magnésienne et excès de K

Même sol, deux interprétations

Paramètre

Sol A

pH

5,4

Ca

4 cmol(+)/kg

Mg

2 cmol(+)/kg

K

0,3 cmol(+)/kg

Acidité échangeable H⁺ et Al⁺⁺⁺

1,5 cmol(+)/kg

CEC_{NH4OAc}

15 cmol(+)/kg

Bases échangeables
= 6,3 cmol(+)/kg

ECCEC = 7,8 cmol(+)/kg

$$\%Mg = \frac{2}{7,8} = 26\%$$

$$\%Mg = \frac{2}{15} = 13\%$$

CEC_{effective} VS CEC_{NH₄OAc}

Pourquoi la foresterie et l'agriculture n'utilisent pas la même CEC



FORESTERIE

- Sols acides naturels
- pH non corrigé
- Al³⁺ acteur central
- Diagnostic écologique

CEC utilisée :

→ CEC_{effective} (ECEC)

Fonctionnement réel
au pH naturel



AGRICULTURE

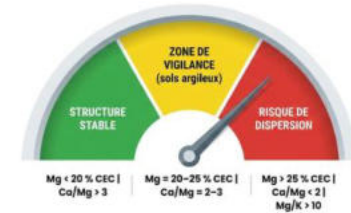
- Sols corrigés ou corrigables
- Chaulage central
- Al³⁺ à neutraliser
- Prescription agronomique

CEC utilisée :

→ CEC NH₄OAc (pH 7)

Capacité réelle
à retenir Ca, Mg, K

Magnésium échangeable et structure du sol Seuils critiques - Diagnostic - Remèdes



REMÈDES AGRONOMIQUES

- ✓ Gypse (CaSO₄) : Ca flocculant sans hausse du pH
- ✓ Chaux calcique si sol acide (éviter dolomie)
- ✗ Éviter chaux magnésienne et excès de K



gypse : investissement à fort retour

PRINCIPE CLÉ

On corrige toujours la base dominante avant de corriger la base déficiente.

Conséquences des sols fortement amendés en Effluents

- *) Rendements plafonnés
- *) Argent investi sans retour
- *) Dégradation de la structure du sol
- *) Mauvaise efficacité des apports futurs
- *) Illusion de fertilité élevée
- *) Découragement face aux analyses de sol
- *) Les carences induites en Ca et Mg sont parmi les plus coûteuses en grandes cultures, car elles sont invisibles, progressives et masquées par des sols “riches”.

Conclusion



- le K est l'élément excédentaire n°1,
- les carences induites en Ca et Mg sont fréquentes,
- le chaulage calcique devient stratégique,
- le Mg doit être diagnostiqué, pas apporté à l'aveugle.