

Optimisation des amendements pour sols hautement salins-sodiques de la Haute Vallée de Cochabamba (Bolivie) en vue d'améliorer la production fourragère pour l'alimentation animale

Auteur : Cortvrint, Zacharie

Promoteur(s) : Colinet, Gilles

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18080>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**Optimisation des amendements pour sols hautement
salins-sodiques de la Haute Vallée de Cochabamba (Bolivie)
en vue d'améliorer la production fourragère pour
l'alimentation animale**

CORTVRINT ZACHARIE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ DANS LE BUT DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN BIO-INGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

Promoteur : GILLES COLINET

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech. Le présent document n'engage que son auteur.

**Optimisation des amendements pour sols hautement
salins-sodiques de la Haute Vallée de Cochabamba (Bolivie)
en vue d'améliorer la production fourragère pour
l'alimentation animale**

CORTVRINT ZACHARIE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ DANS LE BUT DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER EN BIO-INGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

Promoteur : GILLES COLINET

Remerciements

Je souhaite exprimer ma gratitude au Professeur Gilles Colinet pour l'initiation de mon sujet de recherche et pour son engagement à superviser et accompagner mon travail. Je suis reconnaissant pour le temps qu'il m'a consacré, ainsi que pour ses précieuses corrections et suggestions qui ont considérablement facilité la rédaction du présent travail.

Je tiens à adresser mes remerciements à Demis Andrade, dont la contribution a été inestimable tout au long de cette recherche. Ses conseils et son accueil lors de mon séjour en Bolivie ont été d'une grande utilité, ses suggestions pertinentes ont aussi enrichi la conception de mon expérimentation.

Un grand merci à Andrea Di Maria pour le temps qu'il a généreusement consacré à m'expliquer les fondements de l'ACV. Ses compétences et ses conseils ont été d'une aide précieuse.

Mes sincères remerciements vont également à l'équipe de CISTEL de la Faculté des Sciences Agronomiques et Animales de l'Universidad Mayor de San Simon. Leur accueil chaleureux a été très apprécié, en particulier celui de Karen Christina qui m'a assisté tout au long des démarches administratives en Bolivie.

Jacqueline Maldonado mérite également mes remerciements pour son soutien exceptionnel. Ses efforts pour trouver un logement et son attention lorsque j'ai été malade ont été d'un grand réconfort. Ses conseils touristiques ont aussi contribué à rendre ce voyage inoubliable.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers toute l'équipe du GP pour l'atmosphère conviviale pendant ma période finale de travail. Leur orientation et leur support ont été essentiels pour gérer mon temps au laboratoire et surmonter mes difficultés. Je tiens particulièrement à remercier Mlles Pauline Biron et Emilie Marit, qui m'ont aiguillé, conseillé durant plusieurs semaines.

Un grand merci à M. Raphael Tarantino pour sa gestion des formalités administratives liées à mon aide financière et à l'organisation des billets d'avion.

Gregory Cuvelier mérite ma reconnaissance pour son accompagnement constant dans la rédaction de ce TFE. Sa rigueur et ses conseils avisés ont été d'une valeur inestimable.

Enfin, ma reconnaissance éternelle s'adresse à ma famille et à mes amis pour leurs suggestions et leur soutien moral constant. J'aimerais tout particulièrement exprimer ma profonde gratitude envers mes parents pour leurs cinq années de soutien, qui m'ont offert l'opportunité de réaliser ces études. Merci à Thibaud Danneau d'avoir enrichi mon parcours scolaire de défis plus exigeants. Merci également à Lou Borgers, pour son amour, son soutien et sa patience à mon égard au quotidien.

Aide financière : le voyage en Bolivie, effectué dans le cadre de la présente recherche, a été en partie financé grâce à l'ARES.

Résumé

Dans le but d'évaluer les possibilités de remédiation pour promouvoir une agriculture durable sur un sol salin-sodique, une expérience a été menée dans la Haute Vallée de Cochabamba (Bolivie) en utilisant 16 modalités différentes, combinaisons amendements organiques (fumiers de bovins) et inorganiques (gypse) à quatre doses différentes. L'expérience a été réalisée en serre, où des pots contenant 4 kg de sols salins-sodiques ont été utilisés. Des analyses chimiques ont été effectuées sur les échantillons prélevés dans la partie supérieure et inférieure des pots. Les résultats ont montré que seules deux combinaisons d'amendements, G3 (100 % de la dose de gypse recommandée) et G3F1 (100 % de gypse avec 50 % de fumier de la dose testée), ont permis d'atteindre les limites de remédiation pour le sol salin-sodique. Les prélèvements effectués aux 2 profondeurs ont également révélé des différences significatives concernant les propriétés du sol telles que l'ESP, l'EC, le SAR et la concentration des éléments mobiles comme le sodium et le magnésium en fonction de la profondeur du profil.

Pendant la remédiation des sols, des plants d'orge ont été cultivés pendant 42 jours avec une irrigation par submersion discontinuée à 100% de la porosité du sol. Les résultats ont montré que la remédiation des sols salins-sodiques était sérieusement compromise en l'absence d'amendements ajoutés pendant la lixiviation des sols.

En revanche, plusieurs combinaisons d'amendements se sont avérées capables de favoriser le développement des plants d'orge.

Enfin, une analyse de l'impact environnemental des G3 et G3F1 a mis en évidence les conséquences environnementales de leur utilisation.

Mots clés : Sols affectés par le sel, dégradation des sols, amendements organiques et inorganiques, Gypse, fumier de bovins, serre, remédiation des sols, orge, lixiviation, impact environnemental.

Abstract

In order to assess remediation possibilities for promoting sustainable agriculture on saline-sodic soil, an experiment was conducted in the High Valley of Cochabamba (Bolivia) using 16 different modalities, which consisted of combinations of organic amendments (cattle manure) and inorganic amendments (gypsum) at four different doses. The experiment was carried out in a greenhouse, where pots containing 4 kg of saline-sodic soil were used. Chemical analyses were performed on samples taken from the upper and lower parts of the pots.

The results showed that only two combinations of amendments, G3 (100% of the recommended gypsum dose) and G3F1 (100% gypsum with 50% of the tested manure dose), were able to achieve the remediation limits for saline-sodic soil. Samples taken at the two depths also revealed significant differences in soil properties such as ESP, EC, SAR, and the concentration of mobile elements like sodium and magnesium, depending on the depth of the profile. During the soil remediation process, barley plants were cultivated for 42 days with intermittent flooding irrigation at 100% of soil porosity. The results demonstrated that the remediation of saline-sodic soils was severely compromised in the absence of added amendments during soil leaching. On the other hand, several combinations of amendments were found to promote the growth of barley plants.

Finally, an analysis of the environmental impact of G3 and G3F1 highlighted the ecological consequences of their usage.

Key words : Salt-affected soils, soil degradation, organic and inorganic, amendments gypsum, bovine manure, greenhouse, soil remediation, barley, leaching, environmental impact.

Liste des abréviations

CEC	Complexe échange cationique
COT	Carbone organique total
EC	Electro-conductivité
ESP	Exchangeable sodium percentage
SAR	Sodium adsorption ratio

Sommaire

1	Introduction	1
2	Etat de l'art	2
2.1	Description générale des sols salins	2
2.2	Classification des sols salins, sodiques et alcalins	2
2.3	Impact de la salinité et de la sodicité sur les propriétés du sol	3
2.3.1	Impact de la sodicité	3
2.3.2	Impact de la salinité	5
2.4	Impact sur les plantes	5
2.4.1	Accumulation de composés toxiques	6
2.4.2	Réduction de la biodisponibilité des éléments	6
2.5	Processus qui contribuent à la salinité des sols	7
2.6	Traitement des sols affectés par le sel	7
3	Objectifs du TFE	8
4	Matériels et Méthodes	9
4.1	Les sols et leurs conditions expérimentales	9
4.2	Les amendements organiques et inorganiques	9
4.2.1	Caractéristiques et dosages du gypse	10
4.2.2	Caractéristiques et dosages du fumier	10
4.3	Expérimentation	11
4.4	La culture fourragère	13
4.5	Analyse statistique	13
4.6	Analyse de l'impact environnemental des amendements Gypse, Fumier et Eau	13
5	Mesures et analyses réalisées	14
5.1	Analyse des solutions extractions	14
5.2	Analyse du sol	14
5.3	Matériel végétal	15
6	Résultats	15
6.1	Propriétés des sols avant réhabilitation et lixiviation	15
6.2	Analyse du pH et de l'EC des lixiviats récoltés	16
6.3	Evolution de la croissance des plantes d'orge durant la mise en place durant la lixiviation	19
6.4	Analyse des échantillons de sol	24
6.4.1	Analyse du pH	24
6.4.2	Analyse EC	25
6.4.3	Analyse des éléments disponibles	27
6.4.4	Résumé des paramètres de la salinité des sols	32
6.5	Synthèse des moyennes des résultats obtenus entre les échantillons en surface et en profondeur	35
6.6	Evaluation de l'impact environnemental des 2 scénarios	36
6.6.1	Analyse de l'inventaire	38
6.6.2	Résultats de l'analyse des 2 scénarios	40
7	Conclusions et Recommandations	41

8	Bibliographie	42
9	Annexes	43
9.1	Annexes A : Analyse complémentaire pour la mesure du pH et EC final des lixiviations	43
9.2	Annexes B : Analyse complémentaire entre les échantillons de surface et de profondeur	43
9.3	Annexe C : Analyse statistique complémentaire pour les AV1 étudiées	46
9.4	Annexe D : Résultats des scénarios	47

Table des figures

1	Adsorption de sodium et magnésium par les surfaces à charge négative Hanson et al. (2006)	3
2	Variation de la conductivité hydraulique relative en fonction de l'ESP Abrol et al. (1988)	5
3	Quantification de la détérioration du sol en fonction de l'ESP Abrol et al. (1988)	5
4	Impact de la salinité sur le développement des plantes Gay et al. (2009)	5
5	Évolution du rendement en fonction de la salinité décrite par l'EC Shannon and Grieve (1998)	5
6	Impact des concentrations en sel sur les performances des plantes Alaoui et al. (2013).	6
7	Influence du pH sur la biodisponibilité des éléments Genot et al. (2009)	6
8	Illustration du pot et du système de collecte des lixiviats	9
9	Illustration de la disposition du système	12
10	Disposition et croissance des plants d'orge	13
11	Comparaison de l'évolution du pH et de l'EC des lixiviats : Gypse	16
12	Comparaison de l'évolution du pH et de l'EC des lixiviats : Fumier	17
13	Comparaison de l'évolution du pH et de l'EC des lixiviats : Amendements combinés	18
14	Évolution de la hauteur moyenne des plants pour G1, G2, G3 et le sol témoin	20
15	Évolution de la hauteur moyenne des plants pour F1, F2, F3 et le sol témoin	21
16	Évolution de la hauteur moyenne des plants pour G1F1, G2F2, G3F3 et le sol témoin	22
17	Boxplot masse fraîche	23
18	Boxplot masse sèche	23
19	Boxplot pH surface	24
20	Boxplot pH profondeur	24
21	Boxplot EC surface	26
22	Boxplot EC profondeur	26
23	Boxplot Ca en surface	28
24	Boxplot Ca en profondeur	28
25	Boxplot K en surface	29
26	Boxplot K en profondeur	29
27	Boxplot Mg en surface	30
28	Boxplot Mg en profondeur	30
29	Boxplot Na en surface	31
30	Boxplot Na en profondeur	31
31	Boxplot SAR surface	32
32	Boxplot SAR profondeur	32
33	Boxplot ESP profondeur	33
34	Boxplot ESP surface	33
35	Frontières du système	36
36	Évaluation des impacts pour les 2 scénarios :a = Changement climatique(kg CO2 eq), b = Appauvrissement de la couche d'ozone : (kg CFC11 eq), c = Radiation ionisante : (kBq U-235 eq), d = Formation d'ozone photochimique(kg NMVOC),e = Incidence des maladies liées aux particules en suspension(inc), f = Toxicité humaine, non cancérogène(CTUh), g = Toxicité humaine, cancérogène(CTUh), h = Acidification(mol H+ eq), i = Eutrophisation, eau douce(kg P eq), j = Eutrophisation, marine(kg N eq), k = Eutrophisation, terrestre (mol N eq), l = Écotoxicité, eau douce(CTUe), m = Utilisation des terres(Pt),n = Utilisation de l'eau (m3 depriv),o = Utilisation des ressources, combustibles fossiles(MJ) et p = Utilisation des ressources, minéraux et métaux(kg Sb eq)	38

Liste des tableaux

1	Distinction des différents sols affectés par les sels Abrol et al. (1988)	2
2	Caractéristiques du gypse	10
3	Caractéristiques du fumier	10
4	Dosage des amendements	11
5	Analyses réalisées et méthodes référencées	14
6	Caractéristiques du sol utilisé pour l'expérience	15
7	Caractéristiques moyennes de l'eau utilisée pour l'irrigation par submersion discontinue des sols	16
8	Résultats AV2 croisée fixe pour la masse fraîche/sèche des plantes fourragères.	19
9	Comparaison des masses fraîches et sèches moyennes finales récoltées pour G1, G2, G3 et le sol témoin avec un test de Tukey ($p < 0.05$) indiquant les différences significatives entre les valeurs marquées par des lettres distinctes	20
10	Comparaison des masses fraîches et sèches moyennes finales récoltées pour F1, F2, F3 et le sol témoin avec un test de Tukey ($p < 0.05$) indiquant les différences significatives entre les valeurs marquées par des lettres distinctes	21
11	Comparaison des masses fraîches et sèches moyennes finales récoltées pour G1F1, G1F2, G1F3, G2F1, G2F2, G2F3, G3F1, G3F2, G3F3 et le sol témoin avec un test de Tukey ($p < 0.05$) indiquant les différences significatives entre les valeurs marquées par des lettres distinctes.	22
12	Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour le pH	24
13	Analyse comparative des pH moyens avec écart-type et regroupements issus du test de Tukey	25
14	Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour l'EC	25
15	Analyse comparative des EC moyennes avec écart-type et regroupements issus du test de Tukey	26
16	Résultats de l'AV2 croisée fixe pour les éléments disponibles	27
17	Variation moyenne des concentrations en calcium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey	28
18	Variation moyenne des concentrations en potassium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey	29
19	Variation moyenne des concentrations en magnésium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey	30
20	Variation moyenne des concentrations en sodium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey	31
21	Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour le SAR	32
22	Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour l'ESP	32
23	Synthèse des pH, EC, SAR, ESP, masses fraîches et sèches moyennes en relation avec les différentes modalités employées	34
24	Résultat de l'analyse statistique entre les horizons de surface et de profondeur	35
25	Caractéristiques spécifiques du fumier	36
26	Description des différents scénarios	37
27	Inventaire scénario 1	38
28	Inventaire scénario 2	38
29	"Résultats de l'analyse statistique complémentaire : Moyennes des pH et EC des lixiviats finaux, avec test de Tukey"	43
30	Résultats de l'analyse statistique complémentaire des pH et des EC moyens en fonction de la profondeur	43
31	"Résultats de l'analyse statistique complémentaire des moyennes de Ca et K en relation avec la profondeur"	44
32	Résultats de l'analyse statistique complémentaire des moyennes de Mg et Na en relation avec la profondeur	44
33	Résultats de l'analyse statistique complémentaire des moyennes du SAR et ESP en relation avec la profondeur	45
34	Résultats statistiques additionnels des moyennes de pH	46
35	Résultats statistiques additionnels des moyennes de l'EC	46
36	Résultats statistiques additionnels des moyennes du Ca	46
37	Résultats statistiques additionnels des moyennes du K	46
38	Résultats statistiques additionnels des moyennes du Mg	46
39	Résultats statistiques additionnels des moyennes du Na	46
40	Résultats de l'impact environnemental pour le scénario 1	47

41	Résultats de l'impact environnemental pour le scénario 2	47
----	--	----

1 Introduction

Parmi les nombreux effets du changement climatique, le bouleversement des saisons et des schémas de précipitations génèrent de plus en plus régulièrement des épisodes d'inondations et de sécheresses Bourque (2000).

L'évaporation excessive qui en résulte contribue à la formation de sols salins Tóth et al. (2008). De plus, il est opportun de souligner que l'augmentation du niveau des mers joue également un rôle prépondérant dans l'intrusion de l'eau salée dans les nappes phréatiques, ce qui constitue également l'une des causes de la salinisation Dörfliger et al. (2010). Ces constats doivent alarmer, d'autant plus que le FAO souligne qu'environ 8.7% des terres souffrent de problèmes liés à la salinité et que 19,5% des terres irriguées en sont également affectées Montoroi (2017).

A l'échelle mondiale, la répartition des terres touchées par ce problème n'est pas homogène. L'Afrique, l'Asie, l'Amérique latine et l'est de l'Europe, en raison de leur climat et conditions défavorables, sont particulièrement touchées Rochard (2023).

Ces sols salés se caractérisent par des concentrations élevées en sels, tels que le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de potassium (KCl), le chlorure de magnésium (MgCl₂), le chlorure de calcium (CaCl₂), le sulfate de sodium (Na₂SO₄), le sulfate de magnésium (MgSO₄), le bicarbonate de sodium (NaHCO₃) et le carbonate de sodium (Na₂CO₃) Montoroi (1993). L'hydratation de ces sels varie toutefois en fonction des conditions environnementales.

Que ce soit d'origine primaire, résultant de la dégradation d'un matériau parental riche en composés salés, ou d'origine secondaire, due par exemple à une mauvaise gestion des techniques d'irrigation, l'accumulation de sel dans le sol est délétère Montoroi (2018). Cela dégrade physiquement le sol, affecte sa perméabilité et perturbe son équilibre chimique. De plus, ce déséquilibre affecte également les plantes, entraînant des problèmes de toxicité et de stress osmotique en raison de la forte concentration de ces sels solubles

Valles et al. (1983), Trung et al. (2022).

La plupart du temps, pour remédier à ces sols, des techniques, des techniques de lixiviation sont mises en place et combinées avec l'ajout de divers amendements organiques ou minéraux Montoroi (2018).

La partie expérimentale de l'étude a été menée à la Faculté des Sciences Agronomiques et Animales de l'Universidad Mayor de San Simon à Cochabamba, en Bolivie. L'objectif de cette recherche était de déterminer la combinaison idéale d'amendements inorganiques et organiques permettant de remédier à ces sols tout en favorisant le développement de cultures fourragères destinées à l'alimentation bovine. L'étude a été réalisée en serre, dans des conditions de culture contrôlées.

2 Etat de l'art

2.1 Description générale des sols salins

2.2 Classification des sols salins, sodiques et alcalins

La caractérisation des sols affectés par le sel est une tâche complexe en raison de la diversité des types de sels présents. Cependant, si l'objectif se porte uniquement sur la remédiation, l'établissement de critères devient aisé et les sols peuvent être distingués sur la base de paramètres physico-chimiques.

Les deux paramètres importants qui permettent de caractériser ces sols concernent la concentration des sels évaluée par l'EC. Cette mesure repose sur le principe selon lequel la concentration des ions dans la solution augmente avec la conductivité électrique Montoroi (1997). Ensuite l'acidité du milieu mesurée par le pH joue également un rôle élémentaire dans leur caractérisation.

Ensuite, afin d'évaluer la prévalence de l'ion sodium, dont la forte concentration peut générer des problèmes au niveau de la structure du sol, deux autres mesures peuvent également être envisagées, le SAR et L'ESP Saidi et al. (2004). Celles-ci permettent de déterminer la prédominance du sodium par rapport à d'autres ions dans le sol.

En fin de compte, ces sols peuvent également être distingués physiquement par leur structure dans le tableau suivant.

TABLE 1 – Distinction des différents sols affectés par les sels Abrol et al. (1988)

Type de sols	EC (dS/m)	SAR %	ESP %	pH	Structure
Non Salin	<4	<15	<13	<8.0	Floculée
Salin	>4	<15	<13	<8.5	Floculée
Sodique	<4	>15	>13	>8.5	Dispersée
Salin-sodique	>4	>15	>13	<8.5	Floculée -Dispersée

Les sols salins se caractérisent par une concentration élevée en sels dans leur solution, ce qui se traduit par une conductivité électrique élevée, généralement supérieure à 4 dS/m. Il n'y a pas de prédominance significative de l'ion sodium par rapport aux autres ions présents dans la solution, et les valeurs du SAR et de l'ESP restent en dessous des seuils de 15 % et 13 %. Les sols salins se distinguent souvent par la présence de couches de sels de différentes couleurs à leur surface.

Les sols sodiques se caractérisent par une dominance de l'ion sodium, ce qui se reflète par des valeurs élevées du SAR et de l'ESP. Ces sols présentent également une faible conductivité électrique et un pH élevé. Ils sont souvent recouverts d'une croûte de couleur noire et présentent une mauvaise infiltration d'eau Aubert (1976). Comme mentionné précédemment, la présence de sodium dans ces sols affecte leur structure en dispersant les argiles et les colloïdes.

Quant aux sols salins-sodiques, ils se situent entre les conditions sodiques et salines. Les ions sodium continuent de dominer la solution du sol, ce qui se traduit par des valeurs élevées de l'ESP et du SAR. De plus, la salinité reste élevée avec des valeurs élevées de conductivité électrique. Toutefois, la structure du sol est de meilleure qualité que celle des sols sodiques, car les argiles et les colloïdes sont moins dispersés. Pour les caractériser de la manière la plus exacte, les paramètres liés au sodium comme l'ESP et SAR doivent être utilisés Weil and Brady (2017).

2.3 Impact de la salinité et de la sodicité sur les propriétés du sol

2.3.1 Impact de la sodicité

La sodicité est définie par la fixation prédominante de l'ion sodium sur le complexe d'échange du sol par rapport aux autres cations Weil and Brady (2017). La présence de cet ion sous une forme échangeable peut engendrer des effets considérables sur la structure globale du sol. L'impact négatif du sodium est quantifié en fonction de sa domination en pourcentage par rapport aux autres ions majoritaires de la solution, ce qui peut être exprimé par l'ESP Weil and Brady (2017).

$$ESP = \frac{\text{Sodium}_{\text{Echangeable}}}{CEC} \times 100$$

L'effet négatif de l'ion sodium n'est pas principalement déterminé par sa concentration absolue, mais plutôt par sa relation avec les autres cations dominants de la solution, tels que le magnésium et le calcium. C'est la raison pour laquelle le SAR est considéré comme une mesure plus indicative des dommages potentiels que le sodium pourrait engendrer.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

Néanmoins, ces 2 indicateurs restent essentiels afin de qualifier la sodicité d'un sol et restent complémentaires. La prédominance de l'ion sodium peut engendrer des perturbations significatives dans l'équilibre des feuillets argileux du sol, induisant alors des problèmes de perméabilité, d'aération, de gonflement, de dispersion et en fin de compte, une dégradation générale des sols à charges variables Farahani et al. (2018) AHMED et al. (1969). L'acidité du milieu influence ces charges variables, et par conséquent, ces sols finissent par présenter des charges différentes à leur surface, modifiant ainsi la charge nette négative Weil and Brady (2017).

En renforçant davantage ces charges négatives en surface, elles deviennent les sites de fixation de nombreux cations. Cependant, les divers cations ne sont pas retenus de manière identique Marchuk (2013). Les ions monovalents, en raison de leur faible charge, sont moins fermement retenus et établissent des liaisons moins prononcées avec les particules du sol, comme le montre la figure ci-dessous. Dans cette figure, il est illustré que les ions magnésium sont retenus plus solidement que les ions sodium :

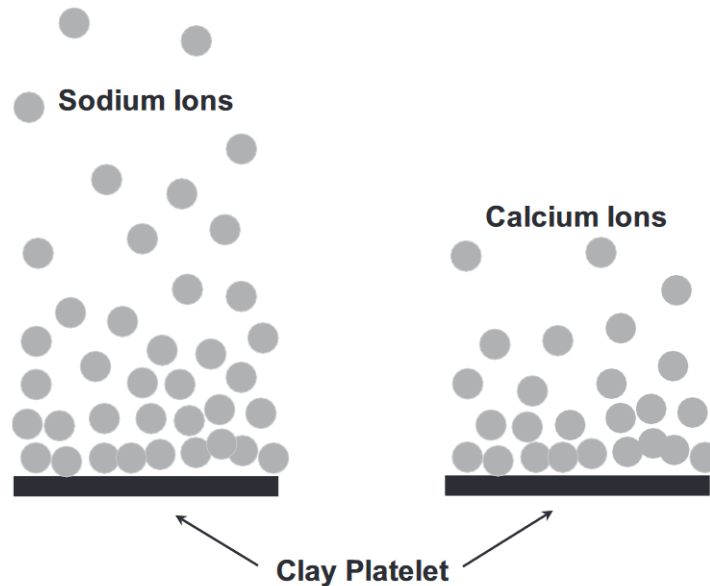


FIGURE 1 – Adsorption de sodium et magnésium par les surfaces à charge négative Hanson et al. (2006)

Au fur et à mesure que les ions s'éloignent des surfaces chargées négativement, telles que les feuillets argileux, la densité en cations diminue. Lorsque deux surfaces argileuses se rapprochent, les couches d'ions tendent à se superposer, mais les forces de répulsion agissent pour maintenir une certaine distance entre elles. Ces forces de répulsion sont responsables du phénomène de gonflement du sol, comme souligné dans une étude antérieure Hanson et al. (2006).

Il est crucial de noter que les ions sodium, en raison de leur moindre rétention dans le sol par rapport aux ions calcium, ont la capacité de s'étendre plus loin de la surface. Cette plus grande extension des ions sodium entraîne à son tour une distance de répulsion plus importante entre les particules d'argile. Ce processus, qui éloigne les particules d'argile les unes des autres, est couramment désigné sous le terme de dispersion, tel que discuté dans la littérature Farahani et al. (2018).

Une des conséquences directes de cette séparation des particules dans le sol, comme illustré dans la figure 2), est la réduction de la conductivité hydraulique relative. En effet, lorsque les particules d'argile se dispersent, leur petite taille a tendance à obstruer les pores du sol, créant ainsi des couches imperméables en surface. Cela compromet la circulation normale de l'eau dans le sol FAO (2022). Par conséquent, à mesure que la concentration en sodium augmente, son impact négatif sur la capacité hydrique du sol se manifeste, en particulier en réduisant sa conductivité hydraulique relative Marchuk (2013). La figure 3 illustre une augmentation de la dégradation des sols en fonction de l'ESP Weil and Brady (2017). Cette dégradation s'accroît avec l'augmentation de l'ESP, sauf pour un type de sol spécifique. Cela entraîne une réduction du flux d'eau, une diminution de la résilience du sol et donc une altération de la croissance des semis, qui dépendent d'un milieu aérobie non saturé Abrol et al. (1988).

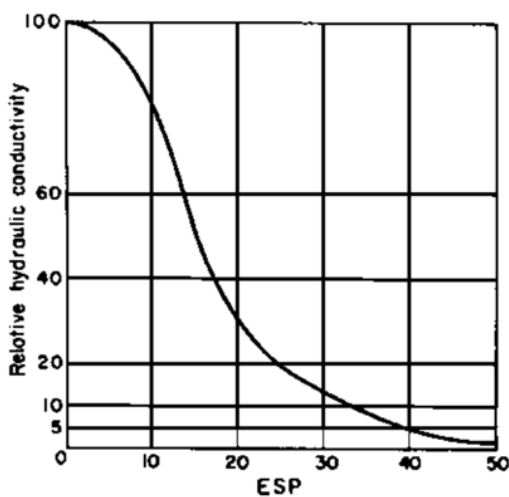


FIGURE 2 – Variation de la conductivité hydraulique relative en fonction de l'ESP Abrol et al. (1988)

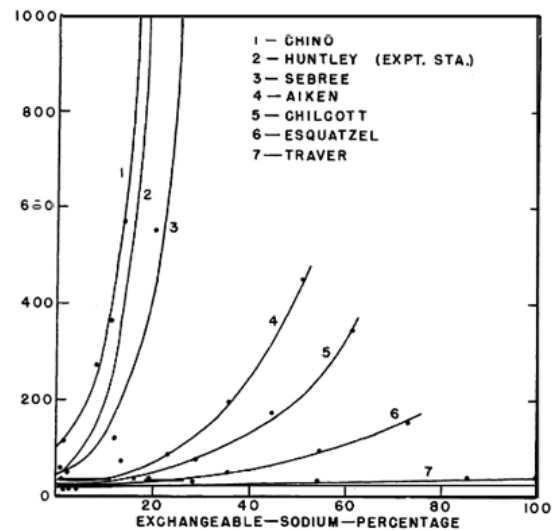


FIGURE 3 – Quantification de la détérioration du sol en fonction de l'ESP Abrol et al. (1988)

2.3.2 Impact de la salinité

La salinité des sols se manifeste par une concentration excessive de sels solubles dans la solution du sol, formés à partir de cations tels que le potassium, le sodium, le magnésium et le calcium. Cette concentration élevée perturbe l'équilibre osmotique du sol, modifiant ses propriétés et influençant la croissance des plantes qui y poussent Abrol et al. (1988). Contrairement aux problèmes engendrés par la sodicité et la prédominance du sodium, lorsque la concentration des ions est équilibrée dans la solution, les sels contribuent à maintenir le sol floculé grâce aux propriétés floculantes importantes des ions divalents mentionnés précédemment Gay et al. (2009).

Soil Salinity Class	Conductivity of the Saturation Extract (dS/m)	Effect on Crop Plants
Non saline	0 - 2	Salinity effects negligible
Slightly saline	2 - 4	Yields of sensitive crops may be restricted
Moderately saline	4 - 8	Yields of many crops are restricted
Strongly saline	8 - 16	Only tolerant crops yield satisfactorily
Very strongly saline	> 16	Only a few very tolerant crops yield satisfactorily

FIGURE 4 – Impact de la salinité sur le développement des plantes Gay et al. (2009)

Bien que les plantes puissent souffrir des concentrations excessives de sels dans le sol, la salinité peut également favoriser l'agrégation des particules fines, et ainsi engendrer des effets positifs tels que l'amélioration de l'aération

du sol, de sa conductivité hydraulique et de la pénétration des racines Hanson et al. (2006). Cependant, à des concentrations spécifiques dépendant du type de plantes, cela peut devenir plus préjudiciable que bénéfique.

2.4 Impact sur les plantes

La salinité du sol devient problématique pour les plantes lorsque la concentration en sels dans la rhizosphère compromet leur développement.

À des concentrations élevées de sels dans le sol, plusieurs conséquences se cumulent pour la plante. Tout d'abord, on observe une augmentation du potentiel hydrique de l'eau, ce qui oblige la plante à augmenter son potentiel osmotique pour équilibrer cette situation. Cela demande à la plante de fournir davantage d'énergie pour maintenir un flux d'eau équivalent.

Ensuite, les sels peuvent entraîner une augmentation du pH du sol, ce qui limite la biodisponibilité de nombreux éléments chimiques essentiels pour la plante.

Enfin, l'accumulation de composés toxiques pour la plante peut également contraindre son développement normal. Ces différents facteurs rendent la salinité nuisible à la croissance et la santé des plantes Hanson et al. (2006).

Cependant, les plantes réagissent différemment à la présence de sels dans le sol. Certaines espèces sont mieux adaptées à ces conditions et peuvent se développer même sous des concentrations élevées en sel. Ces plantes sont appelées des halophytes. Elles ont développé des mécanismes qui leur permettent de prospérer dans des environnements salins sans être trop affectées Flowers and Colmer (2008).

D'un autre côté, les glycophytes ne possèdent pas de stratégies adaptatives spécifiques, mais plutôt une tolérance légère à ces environnements. Au-delà d'une certaine limite, leur productivité diminue considérablement et elles ne parviennent plus à se développer correctement Flowers and Colmer (2008).

L'évaluation de la tolérance des plantes au stress salin doit être réalisée dans des conditions spécifiques, car elle dépend du stade de développement de la plante et de sa variété Xu and Mou (2015). De plus, ces sels causent des dommages plus importants aux parties directement exposées comme les racines, plutôt qu'aux parties aériennes, ce qui rend difficile la définition précise de leur impact Hanson et al. (2006).

Ainsi, pour évaluer la performance des plantes, une équation simple peut être envisagée.

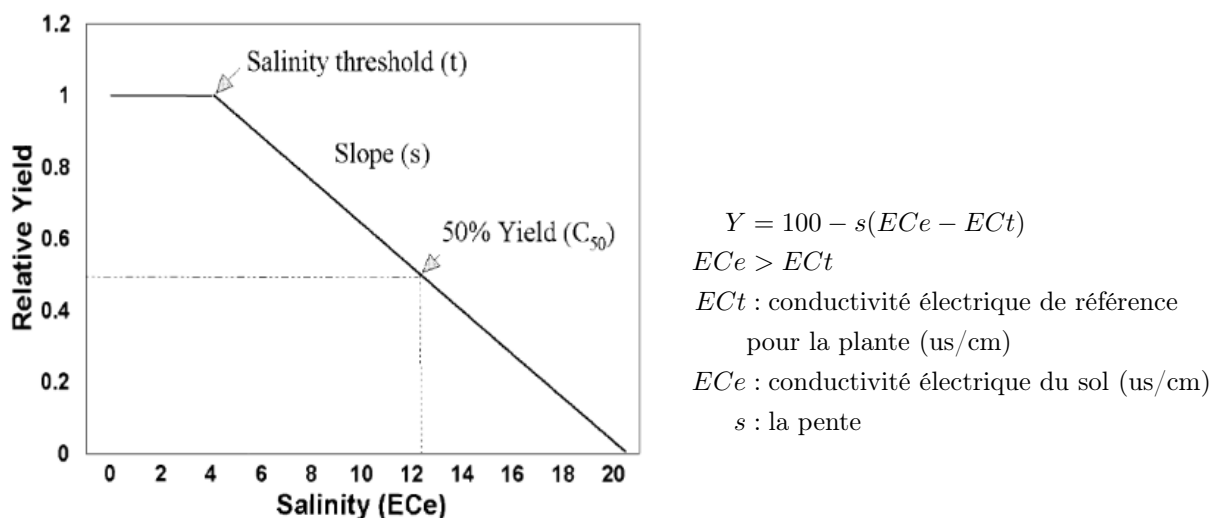


FIGURE 5 – Évolution du rendement en fonction de la salinité décrite par l'EC Shannon and Grieve (1998)

Ainsi, Shannon and Grieve (1998) a réussi à établir une relation générale, illustrée par la figure [5], mettant en lien la productivité agricole et la salinité du sol. Chaque espèce est caractérisée par une valeur seuil (ECt) à partir de laquelle la salinité du sol commence à impacter son développement, ainsi qu'une pente(s) qui met en évidence la dégradation des fonctions physiologiques en fonction de la teneur en sel.

Les plantes tolérantes résistent suffisamment longtemps avant de montrer une atténuation de leurs fonctions physiologiques. De plus, elles luttent efficacement contre l'augmentation de la salinité avec de faibles pentes.

Cependant, ces valeurs seuil et pentes dépendent des conditions météorologiques auxquelles les plantes sont exposées. Une température élevée et une faible humidité exacerberaient les effets négatifs de conditions salées Ahi and Powers (1938). Ceci est principalement dû à l'accumulation accrue de chlorure et de sodium, favorisée par la transpiration des plantes stressées Abrol et al. (1988).

Finalement, ces conditions peuvent également compromettre la germination des graines situées sous la surface alors recouverte de sel, puisqu'il se produit un déséquilibre osmotique et des conditions anoxiques [6].

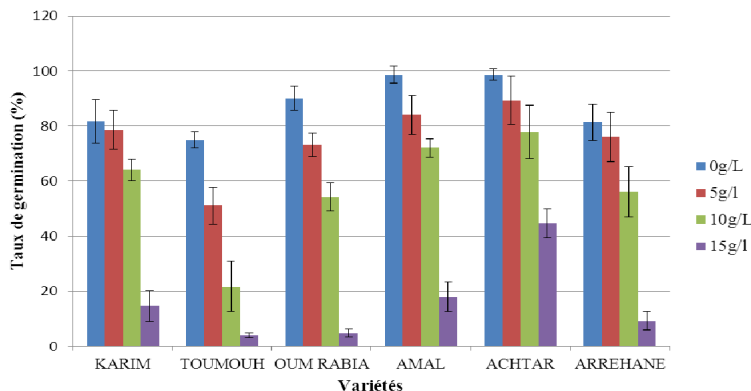


FIGURE 6 – Impact des concentrations en sel sur les performances des plantes Alaoui et al. (2013).

2.4.1 Accumulation de composés toxiques

Par la suite, la croissance des plantes peut également être impactée en raison de l'accumulation de composés toxiques dans la plante elle-même. Selon Niu et al. (2010), les retards de développement observés étaient principalement causés par l'accumulation d'ions Na^+ et Cl^- dans le sol. Cette accumulation limite d'une part l'absorption de cations essentiels tels que K^+ et Ca^{2+} , ce qui bloque les sites de fixation apoplasmique de Ca^{2+} et réduit ainsi la croissance de certaines espèces végétales. D'autre part, cette accumulation réduit la disponibilité de certains éléments nutritifs tels que le magnésium, l'azote, le phosphore, le potassium et le calcium dans la plante Haouala et al. (2007).

2.4.2 Réduction de la biodisponibilité des éléments

Sous certaines conditions, les sels peuvent altérer l'acidité du sol et, par conséquent, la biodisponibilité des éléments minéraux qui le composent. L'augmentation du pH conduit notamment (voir figure 7) à la diminution de la disponibilité des éléments essentiels nécessaires aux plantes, tels que les ions ferriques, les phosphates, les manganèses et les zincs. Ces éléments deviennent moins accessibles aux plantes dans un environnement à pH élevé Genot et al. (2009).

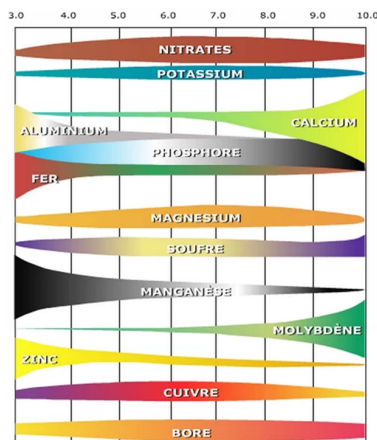


FIGURE 7 – Influence du pH sur la biodisponibilité des éléments Genot et al. (2009)

2.5 Processus qui contribuent à la salinité des sols

La salinité des sols peut résulter de processus d'origine naturelle ou anthropique. Dans le cas de la salinisation primaire, d'origine naturelle, elle est principalement due au transport de résidus issus de l'altération naturelle de roches mères riches en carbonates et/ou en feldspath. Des événements géologiques et des formations spécifiques peuvent également contribuer à des concentrations élevées de sels dans les eaux souterraines et les couches supérieures du sol. De plus, les processus de capillarité et d'évaporation entraînent la remontée d'eaux souterraines chargées en sels vers les horizons supérieurs du sol Chari et al. (2012) Xu et al. (2013).

En revanche, la salinisation secondaire est due à des facteurs anthropiques, tels que l'utilisation d'eau de mauvaise qualité pour l'irrigation des cultures ou la mise en place de systèmes de drainage inefficaces. Ces facteurs peuvent entraîner des apports excessifs de sel dans le sol Daliakopoulos et al. (2016).

Les sources exactes de la salinité dans la Haute Vallée de Cochabamba ne sont pas clairement définies, mais des études menées par Metternicht (1996) ont permis de mettre en évidence que les principales causes de la salinisation de ces sols sont les matériaux parentaux, le climat sec et la topographie du site.

Cependant, il est également important de souligner que la mauvaise gestion des pratiques agricoles antérieures peut également avoir eu un impact sur ces sols Singh (2015). Autrefois, la région était considérée comme l'une des principales zones de production céréalière de Bolivie. Malheureusement, en raison d'une mauvaise gestion des terres combinée à une réduction des projets agricoles dans la région, ces sols ont subi une dégradation importante Metternicht (1996).

2.6 Traitement des sols affectés par le sel

Il n'existe pas de solution unique pour remédier à ces sols, mais plutôt une combinaison de pratiques. Parmi celles-ci, la lixiviation, l'ajout d'amendements organiques et inorganiques Oster (1982), ainsi que la phytoremédiation, sont les plus souvent mentionnées Hanson et al. (2006).

En général, la lixiviation des sels est considérée comme la méthode la plus efficace pour traiter les sols affectés, à condition qu'elle soit réalisée avec une eau de qualité respectant certaines limites de rapport SAR, et qu'un drainage naturel ou artificiel adéquat soit présent pour éliminer les sels de la zone racinaire FAO (2022).

Cependant, la lixiviation seule peut malheureusement entraîner des problèmes tels qu'une augmentation du pH, une dispersion de la structure des particules d'argile du sol et une perturbation de la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes Gangwar et al. (2020).

C'est la raison pour laquelle elle est généralement associée au gypse, qui est l'amendement inorganique recommandé le plus efficace pour dissoudre ces substances Qadir et al. (1996). Le gypse, en introduisant des ions calcium, joue un rôle essentiel dans l'élimination des ions sodium et dans le maintien des caractéristiques hydrauliques du sol durant les phases de réhabilitation. Ce processus garantit une lixiviation efficace des ions sodium tout en évitant la dispersion du sol Oster (1982).

Certains chercheurs proposent de combiner divers types d'amendements pour exploiter les synergies potentielles. C'est notamment le cas des combinaisons impliquant le gypse et l'acide sulfurique, du gypse en association avec le fumier de bovins, ainsi que du fumier de bovins combiné à de l'acide sulfurique Mahmoodabadi et al. (2013). Les résultats de ces études sont particulièrement pertinents pour les sols calcaires. Dans ces contextes, l'utilisation de l'acide sulfurique a montré les meilleurs résultats, en raison de sa capacité de dissolution des roches calcaires, entraînant ainsi une réduction significative du SAR, dépassant les effets du gypse utilisé seul. Cependant, il est important de noter que ces conclusions sont étroitement liées à l'origine calcaire des sols, car d'autres études menées sur des sols salins-sodiques d'origines différentes suggèrent de n'utiliser l'acide sulfurique que lorsque la teneur en calcaire est élevée Froidmont (2018), Mace et al. (1999).

D'autre part, la combinaison de fumier et de gypse en l'absence d'acide sulfurique montre une synergie efficace dans l'élimination des cations monovalents tels que le sodium, ainsi que dans l'amélioration de la structure du sol Hussain et al. (2001). En revanche, l'utilisation conjointe d'amendements organiques avec de l'acide sulfurique semble moins recommandée.

3 Objectifs du TFE

Des études antérieures dans la région ont démontré que l'utilisation d'amendements inorganiques tels que le soufre et le gypse, ainsi que d'amendements organiques, avait un potentiel de réhabilitation des sols. L'objectif principal de cette étude est donc de déterminer la combinaison optimale d'amendements organiques et inorganiques permettant de maximiser le potentiel de réhabilitation des sols dans la Haute Vallée de Cochabamba, en vue de cultiver des plantes fourragères pour l'alimentation du bétail local.

De plus, une analyse environnementale des produits organiques et inorganiques utilisés dans le processus de remédiation sera également réalisée. En combinant les résultats de l'analyse agronomique et environnementale, des pratiques de remédiation pourront être recommandées afin d'améliorer la qualité des sols pour la culture des plantes fourragères tout en minimisant les impacts environnementaux liés à la production et l'utilisation des intrants nécessaires.

Pour répondre aux objectifs de ce projet, une question de recherche précise a été établie :

"Optimisation des amendements pour sols hautement salins-sodiques de la Haute Vallée de Cochabamba (Bolivie) en vue d'améliorer la production fourragère pour l'alimentation animale"

Pour répondre à cette question, quatre hypothèses ont été testées :

H1 : Il existe une combinaison idéale de gypse/fumier de bovins qui permet de remédier les sols salins-sodiques de la haute vallée de Cochabamba.

Une deuxième hypothèse est examinée concernant l'évolution des propriétés chimiques de ces sols en fonction de la profondeur d'échantillonnage. Étant donné que la lixiviation des sols est influencée par la gravité, l'observation des tendances permettrait de déterminer le moment où la réhabilitation du sol est suffisante pour que la zone racinaire ne soit plus exposée aux problèmes de salinité. Ainsi, l'hypothèse suivante est formulée :

H2 : Suite aux processus de lixiviation et à l'application des traitements, les sols révèlent des variations significatives dans leurs propriétés chimiques en fonction de leur profondeur.

Au-delà de la promotion de la réhabilitation des caractéristiques chimiques du sol, l'expérience s'est également intéressée à évaluer les performances agricoles des plantes fourragères. Ainsi, l'hypothèse suivante a été testée :

H3 : L'utilisation d'amendements permet d'améliorer les rendements agricoles des plantes fourragères.

En définitive, ces résultats permettront de susciter une réflexion sur le potentiel impact environnemental de la mise en place de ces pratiques. En effet, bien que ces amendements puissent engendrer une amélioration des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, ils peuvent aussi induire des répercussions environnementales négatives. Ces dernières résultent à la fois de leur processus de production, de leur transport et enfin de leur application sur le terrain. La prochaine hypothèse à tester est la suivante :

H4 : Au sein des amendements locaux tels que le gypse et le fumier de bovins, il est présumable que malgré une qualité de remédiation similaire, leurs impacts environnementaux diffèrent.

4 Matériels et Méthodes

4.1 Les sols et leurs conditions expérimentales

Le sol salin-sodique utilisé pour cette expérience a été prélevé dans la Haute Vallée de Cochabamba, avec principalement des échantillons récoltés en surface jusqu'à une profondeur maximale de 30 cm.

Le deuxième sol utilisé à des fins de comparaison avec le sol salin est un sol agricole tropical qui avait déjà été utilisé dans des travaux antérieurs menés au sein du laboratoire de physiques des sols salins de l'Universidad Mayor de San Simón. Ce sol a été sélectionné en raison de ses valeurs de référence en termes d'EC, de pH et de SAR, qui le qualifie comme un sol exempt de problèmes de salinité.

L'expérience a été réalisée dans une serre située à la Faculté Des Sciences Agronomiques et Animales de l'Université Mayor de San Simon à Cochabamba, en Bolivie. Pour assurer des conditions de contrôle précises, les paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité ambiante ont été régulés tout au long de l'expérience.

4.2 Les amendements organiques et inorganiques

Concernant le traitement des sols, pour garantir une homogénéisation des doses d'amendements, ces derniers ont été préalablement ajoutés et mélangés dans des sacs en plastique. Ensuite, ils ont été disposés dans des pots qui ont été préalablement perforés à leur extrémité inférieure, comme illustrés à la figure 8. Les perforations ont été réalisées à l'aide d'une foreuse équipée d'un foret de 2 cm de diamètre, créant ainsi un conduit reliant le sol à l'extérieur.



FIGURE 8 – Illustration du pot et du système de collecte des lixivats

Cette perforation traverse le pot de part en part et permet de collecter des solutions d'extraction dans des bouteilles en plastique numérotées et prévues à cet effet, à l'aide d'un tuyau en plastique souple de dimensions équivalentes. En plus de faciliter la collecte des solutions, cet orifice assure également un bon drainage de l'eau du sol.

Parmi les amendements organiques et inorganiques disponibles à la faculté ainsi que dans le lieu de prélèvement de ces sols, le gypse et le fumier de bovins ont été choisis en raison de leur efficacité avérée dans l'amélioration des sols salins en général.

4.2.1 Caractéristiques et dosages du gypse

TABLE 2 – Caractéristiques du gypse

pH	EC (ds/m)	Total Calcium Ca 2+ (%)	Total Magnésium Mg 2+ (%)	Ca2SO4.2 H2O (pureté) (%)
9.19	2,31	20,90	7,26	89,9

A partir des caractéristiques du gypse présentées dans le tableau 2, son dosage a pu être déterminé afin de réduire le pourcentage d'ESP (Exchangeable Sodium Percentage) à la limite de référence de salinité, 15%, en utilisant l'équation suivante Lebron et al. (2002) :

$$Gypse = CEC \times \frac{\%PSLi - \%PSIf}{100} \times 87 \times f$$

Avec :

- Gypse (g/kg sol) = la quantité de gypse nécessaire par kg de sol
- CEC (meq/100gr) = Complexe échange cationique en mille équivalents pour 100 gr de sol
- %PSLi = pourcentage de saturation en base initial.
- %PSIf = pourcentage de saturation en base final, souhaité
- f = facteur, équivalent à 1 lorsque le gypse est pur à 100%
- 87 Facteur de conversion pour convertir la quantité de gypse en unité de masse appropriée.

La mesure de la CEC a été réalisée en additionnant les ions présents sur le complexe d'échange. Pour cela, deux protocoles ont été utilisés pour connaître la fraction des ions solubles et échangeables extraits de la solution du sol. La somme totale des ions magnésium et calcium a été mesurée par une titrage complexométrique. La mesure des ions sodium a été effectuée à l'aide de l'appareil portable Laquatwin Na-11, qui avait été préalablement calibré à l'aide d'échantillons témoins. Afin d'obtenir la mesure de la CEC la plus précise, la somme des ions échangeables a été soustraite de la fraction soluble. Cette méthode a révélé une forte concentration en ions sodium dans la solution du sol.

En outre, l'ESP a été calculé selon la relation donnée par Hanson et al. (2006), qui traite de la relation entre le SAR et l'ESP. Le SAR a été préalablement calculé à partir de l'équation représentant le rapport entre la concentration des ions sodium et les ions majoritaires de la solution, tels que le calcium et le magnésium.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

$$ESP = \frac{100 \times (-0.0126 + 0.01475 \times SAR)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 \times SAR)}$$

4.2.2 Caractéristiques et dosages du fumier

Le fumier utilisé a été sélectionné pour sa richesse en éléments minéraux ainsi que les propriétés structurantes qu'il était capable d'apporter au sol.

TABLE 3 – Caractéristiques du fumier

pH	EC (ds/m)	N (%)	P (%)	K+ (%)	Ca 2+ (%)	Mg 2+ (%)	Matière organique (%)	Carbone organique (%)
9.29	13,18	0,9	0,3	0,8	2,75	0,33	28,1	13,2

Son dosage avait pour finalité de poursuivre une expérience précédente qui démontrait l'efficacité du fumier pour la remédiation des sols salins, où une dose de 2% de la masse du sol était utilisée Foronda (2022). Le choix a donc été posé de tester un dosage maximal en amendements organiques de 3% de la masse de sols afin d'évaluer les effets du sous-dosage et du surdosage dans cette nouvelle expérience.

$$Masse \text{ de fumiers par pots} = Masse \text{ du pot} \times 3\% \times dosage \text{ recommande}$$

4.3 Expérimentation

Pour cette expérience, nous avons testé deux types d'amendements à 4 concentrations différentes, correspondant à 0%, 50%, 75%, et 100% du dosage maximal recommandé, soit un total de 16 modalités différentes, englobant toutes les combinaisons possibles.

Les dosages ont été choisis de manière progressive pour étudier la relation entre les amendements, la remédiation du sol, le développement des plantes et les interactions entre les différents amendements. Chaque combinaison a été répétée cinq fois pour assurer une approche statistiquement solide dans l'analyse des résultats.

Les deux types de sols utilisés ont été soumis aux mêmes procédures de prétraitement afin de standardiser les conditions expérimentales. Ils ont été séchés à l'air sur des tables exposées au vent et au soleil, puis tamisés à 4 mm. La densité du sol utilisée pour l'expérience correspond à celle des sols salins mesurés sur place, soit une densité de 1,4 g/cm³. Pour remplir les pots, nous les avons considérés comme des cylindres et nous les avons progressivement remplis en commençant par une couche de gravier de 2 cm d'épaisseur, afin d'éviter la stagnation de l'eau et de faciliter la circulation de l'eau vers le bas à travers le système de drainage préalablement installé.

Le second sol a été utilisé comme témoin agricole, sans ajout d'amendement organique ou inorganique.

Chaque pot contenait ainsi les compositions suivantes :

- Une couche de gravier de 2 cm d'épaisseur.
- 4 kg de sol mélangé avec les 16 combinaisons possibles des 2 amendements.
- Un volume de 800 ml d'eau, représentant 75% du volume poreux.

Pour illustrer de manière plus explicite la génération de chaque modalité, les 16 combinaisons sont résumées dans la table suivante.

TABLE 4 – Dosage des amendements

Modalités	G1	G2	G3	F1	F2	F3	G1 F1	G1 F2	G1 F3	G2 F1	G2 F2	G2 F3	G3 F1	G3 F2	G3 F3
Quantité de Gypse(G) g/pots	18.8	28.1	37.5	0	0	0	18.8	18.8	18.8	28.1	28.1	28.1	37.5	37.5	37.5
Quantité de Fumier(F) g/pots	0	0	0	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120

La quantité initiale d'eau ajoutée, équivalente à 800 ml, a été calculée pour atteindre une saturation de 75% de la porosité du sol. Étant donné que les pots étaient approximativement cylindriques, le volume des 4 kg de sol a été déterminé en mesurant la masse d'eau nécessaire pour remplir l'espace occupé par le sol dans chaque pot, ce qui a permis d'obtenir une mesure plus précise du volume réel.

Au cours des deux premières semaines, aucune lixiviation n'a été effectuée. L'humidité a été maintenue en apportant de l'eau de manière ponctuelle et abondante, évitant ainsi la lixiviation du sol et la formation de croûtes de sel.

Pendant la période de lixiviation et de croissance des plantes, la méthode d'irrigation utilisée pour ce projet a été l'irrigation par immersion répétée. Cette méthode consiste à appliquer un volume d'eau de manière répétée pour immerger le sol pendant quelques heures. Elle permet de lixivier les sels présents dans le sol tout en évitant des conditions anoxiques prolongées pour les plantes.

Pour calculer la quantité totale d'eau nécessaire pour corriger ces sols, deux équations ont été utilisées. La première équation permet de définir la quantité totale d'eau nécessaire pour réduire la conductivité électrique (EC) initiale du sol à la limite de détermination des sols affectés par des problèmes de salinité Hanson et al. (2006) :

$$D_w = \frac{k \times D_s \times EC_{ei}}{EC_{ef(ref)}}$$

D w = Hauteur d'eau totale nécessaire pour remédier le sol

D s = Epaisseur de sol à réclamer

k = 0.10

EC_{ef} = Electro-conductivité de la solution du sol désirée (4ds/m)

EC_{ei} = Electro-conductivité initiale de la solution du sol.

EC_{ef} de la solution désirée a été fixé à 4ds/m afin que la solution du sol ne soit plus considérée comme un sol salin.

La première équation énonce donc qu'un volume de 6 litres d'eau minimal est exigé par pot.

La seconde équation a permis de déterminer la quantité maximale d'eau qu'il était possible d'ajouter par semaine.

$$\text{volume poral maximal} = \text{volume de sol} \times \text{porosité}$$

Ainsi, un volume de 1070 ml d'eau a été ajouté à chaque pot chaque semaine afin de saturer 100% de la porosité du sol. Cette action a été répétée 6 fois afin que la quantité d'eau minimale pour réclamer le sol soit atteinte.

Tout comme le sol salin-sodique, le second sol a été préparé de la même manière que les autres modalités, en utilisant la même quantité de sols, avec une densité similaire et les mêmes volumes d'irrigation. Cela facilite leur comparaison pour l'évaluation de la croissance des plantes fourragères.



FIGURE 9 – Illustration de la disposition du système

Une fois les pots préparés, ils ont été disposés de manière aléatoire sur trois tables servant de supports, comme illustrés dans la figure 9. Chaque pot et son contenant a été numéroté de 1 à 85 en fonction de sa modalité. De plus, un support en plastique a été utilisé pour indiquer la composition de chaque pot afin d'en garantir le contenu.

4.4 La culture fourragère

La culture fourragère utilisée dans cette expérience est l'orge commun (*Hordeum vulgare*), plus précisément l'espèce IBTA-80 Monalisa. Cette espèce est largement cultivée dans la région par les agriculteurs en raison de sa résilience et de sa tolérance aux conditions difficiles du climat et des sols boliviens. De plus, cette variété présente une croissance rapide et est précoce.

La densité de semis utilisée est conforme aux recommandations du fabricant, soit de 90 à 100 kg/ha. En tenant compte de la surface représentative de chaque pot, huit grains d'orge ont été disposés de manière aléatoire dans chaque pot, à une profondeur de 1 à 2 cm, conformément aux pratiques recommandées pour les céréales (voir Figure [10]). Les grains utilisés pour l'expérience étaient récemment récoltés afin de garantir un taux de germination maximal Asma (2017).



(a) Exemple d'un semis aléatoire



(b) Exemple de la croissance dans un pot

FIGURE 10 – Disposition et croissance des plants d'orge

4.5 Analyse statistique

Pour l'analyse des résultats obtenus, c'est le logiciel Rstudio qui a été utilisé. Pour mettre en évidence l'effet des facteurs et de leur concentration, les résultats ont été analysés selon un modèle AV2 fixe croisé à 4 concentrations pour le gypse et le fumier.

4.6 Analyse de l'impact environnemental des amendements Gypse, Fumier et Eau

L'impact de l'application de plusieurs produits, tels que le gypse, le fumier de bovins et l'eau pour la remédiation d'un sol salin-sodique sur une superficie d'un hectare, a été évalué.

L'objectif de cette analyse est de mettre en lumière l'ensemble des impacts environnementaux associés à la production, le transport et l'application de ces amendements organiques et inorganiques.

De plus, cette étude a pour objectif de sensibiliser la communauté scientifique aux conséquences découlant de l'utilisation de ces produits. Afin d'y parvenir, une unité fonctionnelle (UF) a été prise en considération, servant d'unité de mesure utilisée pour évaluer le service fourni par ce produit.

5 Mesures et analyses réalisées

5.1 Analyse des solutions extractions

Chaque semaine, après les lixiviations, nous avons procédé à l'analyse du pH et de la conductivité électrique des solutions d'extraction récoltées dans les bouteilles.

Le pH a été mesuré à l'aide du MP 220 basic pH Meter, préalablement étalonné avec des solutions tampons connues avant chaque session de mesures hebdomadaires. Quant à l'électro-conductivité, elle a été mesurée en laboratoire à l'aide du PC 700 OAKTON, dans des conditions de température contrôlées, car cette mesure est sensible à la température de la solution.

Au besoin, les résultats ont été corrigés en utilisant la relation suivante Hanson et al. (2006) :

$$EC_{25} = EC_t - 0.02 \times (T - 25) \times EC_t$$

Avec :

EC_{25} : Electro-conductivité à 25°C(us/cm)

EC_t : Electro-conductivité à la température mesurée (us/cm)

T : Température mesurée (°C)

L'eau utilisée pour la lixiviation des pots a également été soumise aux analyses du pH et de la conductivité électrique. La mesure récurrente de ces paramètres nous permet d'illustrer la dynamique de réhabilitation de ces sols au fil du temps.

5.2 Analyse du sol

Au terme des 6 semaines d'expérimentations, deux échantillons de 100 g chacun ont été prélevés dans chaque pot, en effectuant des sondages à deux profondeurs différentes du sol.

Le premier échantillon a été prélevé dans la partie supérieure, à une profondeur de 0 à 10 cm, tandis que le deuxième échantillon a été prélevé dans la partie la plus inférieure, à une profondeur de 10 à 20 cm. Cette segmentation permet de mesurer l'évolution des paramètres du sol à différentes profondeurs.

Par la suite, ces échantillons ont été séchés à l'ombre pendant 3 jours avant d'être complètement séchés dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.

Les analyses et les méthodes utilisées pour analyser ces échantillons de sol sont résumées dans le tableau 5.

TABLE 5 – Analyses réalisées et méthodes référencées

Analyses réalisées	Méthodes référencées
pH	1 :5 extraction sol/eau
Electro-conductivité	1 :5 extraction sol/eau
Capacité échange cationique	distillation à H3B03 4% et titrage à NaOH 0.1N
Calcium, Magnésium, Potassium, Sodium	Méthode de Metson à pH 7(eau distillée +acétate d'ammonium + éthanol)

pH et EC

La mesure du pH ainsi que de l'EC a été effectuée simultanément avec un rapport d'extraction de 1 :5. Pour y parvenir, 5 grammes de sol tamisé à 2 mm ont été mélangés avec 25 ml d'eau distillée dans un tube à essai fermé. Les tubes ont ensuite été agités pendant 2 heures avant d'être centrifugés pendant 10 minutes à 3000 tours/min. Le surnageant a ensuite été récupéré pour être analysé au laboratoire de pédologie à la Faculté de Gembloux, Université de Liège, à l'aide d'un conductimètre et d'un pH-mètre. Avant son utilisation, chaque instrument a été calibré afin de garantir des résultats valides.

Méthode Metson

La méthode de Metson utilisée pour les sols salins diffère de la méthode habituelle en réalisant deux extractions au lieu d'une. La première extraction est effectuée en utilisant de l'eau distillée bouillie et refroidie. 5 grammes de sol tamisé à 2 mm sont mélangés avec 25 ml d'eau distillée dans un tube pH. Les tubes sont ensuite agités pendant 10 minutes, puis centrifugés pendant 10 minutes à 3000 tours/min. Le premier surnageant est transféré dans un ballon jaugé de 50 ml, et le culot est de nouveau mélangé avec de l'eau distillée, centrifugé, et le second surnageant est ajouté dans le même ballon jaugé. Enfin, le ballon est complété avec la même eau distillée.

Ensuite, le même culot est mélangé avec 25 ml d'acétate d'ammonium 1 N et agité pendant 2 heures. Trois extractions successives sont réalisées en centrifugeant les tubes pH pendant 10 minutes à chaque fois, puis le surnageant est récupéré dans un ballon jaugé de 100 ml. À chaque nouvelle extraction, 25 ml d'acétate d'ammonium sont à nouveau ajoutés. Le ballon est ensuite complété avec l'acétate d'ammonium.

Les solutions récoltées sont filtrées à l'aide de papier-filtre 602 H1/2 et stockées dans des contenants de volumes identiques. Une solution d'acide nitrique 0,1 M est ajoutée dans les contenants avant leur stockage en chambre froide à 4°C.

Mesure de la CEC

Après les extractions, le culot obtenu subit un processus de nettoyage complet. Il est mis en contact avec 4 fois 25 ml d'éthanol, puis à chaque répétition, il est mélangé avec l'éthanol, centrifugé et le liquide est vidé dans un récipient de déchets. Après les 4 répétitions, le culot est désinfecté et récupéré. Ensuite, le culot est transféré dans un ballon jaugé de 200 ml avec de l'eau distillée, et 50 ml de NaOH 0,1 M sont ajoutés. Le ballon est finalement complété avec de l'eau distillée. Le mélange est laissé à décantation pendant plusieurs heures jusqu'à ce qu'une séparation de phase apparaisse.

Enfin, 50 ml du surnageant sont prélevés et distillés à l'aide d'H₃BO₃ 4%. Le résultat de cette distillation est ensuite titré en utilisant du NaOH 0,1 M dans une réaction colorimétrique.

5.3 Matériel végétal

Après une période de 42 jours, toutes les plantes d'orge des différents pots ont été sectionnées à la base pour conserver leur matériel végétatif. Aucun prélèvement n'a été réalisé avant cette date finale, car le développement du matériel végétatif était limité sous les fortes conditions salines.

Ensuite, la masse fraîche totale de chaque pot a été pesée, puis le matériel végétatif a été nettoyé à l'eau distillée et séché dans une étuve à 65 °C pendant 24 heures. Une fois sec, le matériel végétatif a été pesé pour obtenir sa masse sèche.

6 Résultats

6.1 Propriétés des sols avant réhabilitation et lixiviation

TABLE 6 – Caractéristiques du sol utilisé pour l'expérience

Soil	pH	EC (ds/cm)	CEC (cmol/kg)	Ca 2+ (cmol/kg)	Mg 2+ (cmol/kg)	K+ (cmol/kg)	Na+ (cmol/kg)	ESP %
Salin-sodique	8,81	71	13.04	0.006	0.006	0	13.04	83,8

Les analyses de laboratoire en Bolivie ont permis d'identifier le sol témoin comme étant salin-sodique, avec des caractéristiques peu favorables à la culture. Ce sol présente une salinité extrême, avec une conductivité électrique de 71 dS/m, une ESP de 83,8 % et un déficit important en éléments minéraux essentiels.

Cependant, des doutes ont été soulevés quant à cette mesure en raison des résultats surprenants obtenus, malgré trois répétitions effectuées pour chaque analyse. Par conséquent, la discussion des résultats se concentrera sur la comparaison entre les différentes modalités et non sur l'amélioration réelle apportée.

En revanche, un deuxième sol tropical a été utilisé, car il ne présentait aucun problème de salinité ou de sodicité. Ce sol est plus propice à la culture des plantes, car il ne présente pas les caractéristiques extrêmes du sol témoin en termes de salinité et de présence de sodium.

TABLE 7 – Caractéristiques moyennes de l'eau utilisée pour l'irrigation par submersion discontinue des sols

EC (us/cm)	pH	Na (mg/l)
231 ± 45	8,1 ± 0,2	23 ± 6

Chaque semaine, les paramètres de qualité de l'eau d'irrigation tels que l'(EC), le pH et la concentration en sodium ont été mesurés (voir le tableau [7]). Ces mesures précises ont permis de réaliser une irrigation de qualité, avec un pH légèrement basique et une faible EC, conforme aux recommandations qui encouragent l'utilisation d'une eau dont l'EC est inférieure à 0,7 dS/cm (Ayers et al. (1985)).

6.2 Analyse du pH et de l'EC des lixiviats récoltés

Les schémas 11, 12, et 13 illustrent les tendances temporelles des valeurs de l'EC et du pH des lixiviats recueillis pour différentes modalités, à savoir celles contenant exclusivement du gypse, du fumier, et une partie des amendements combinés. Ce dernier choix a été pris pour faciliter la lecture de la figure. Dans chacun de ces schémas, la modalité témoin, ne comprenant ni gypse ni fumier, est également incluse pour en faciliter la comparaison.

Gypse

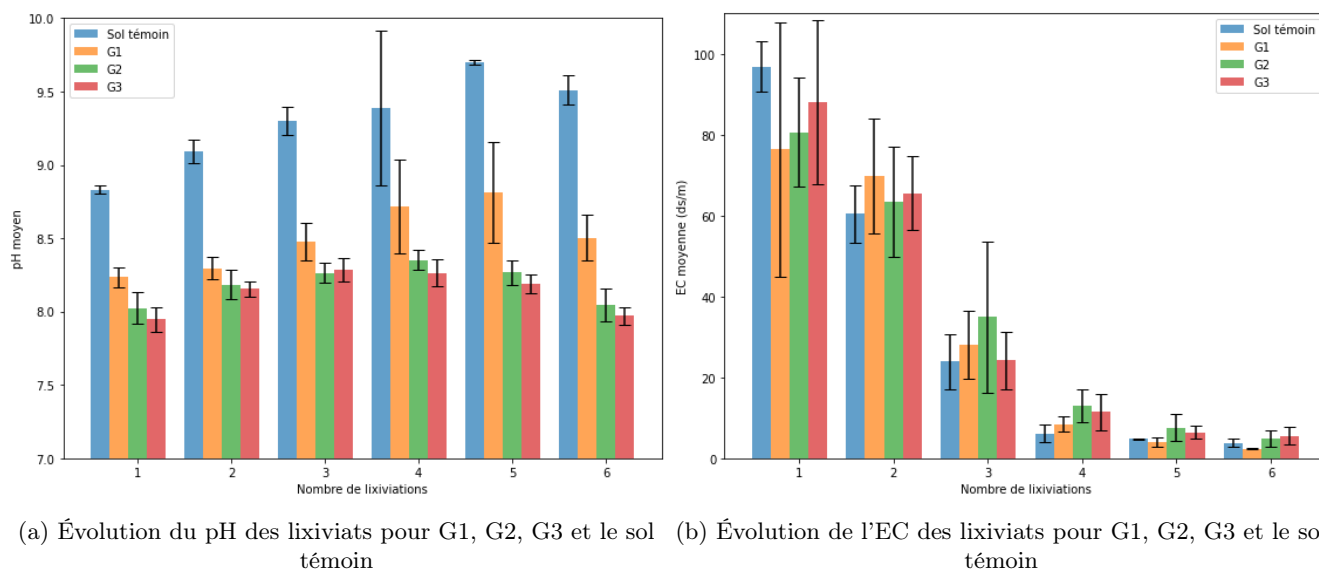


FIGURE 11 – Comparaison de l'évolution du pH et de l'EC des lixiviats : Gypse

La figure 11a met en évidence l'augmentation rapide du pH de la modalité témoin par rapport aux modalités amendées G1, G2 et G3. Cette augmentation du pH au cours de la lixiviation laisse penser que le sol témoin se transforme en sol sodique, s'enrichissant en sodium et augmentant à terme son pH (Montoroi (2018)). En revanche, les sols amendés avec du gypse (G1, G2 et G3) montrent un pH plus stable, légèrement à la hausse, se situant entre 8 et 8,5. De plus, les pH de G1, G2 et G3 sont significativement plus faibles que celui du témoin, et G2-3 sont significativement plus faibles que le pH mesuré en G1 (voir la table 29). Cette tendance à augmenter à mesure des épisodes de lixiviation, où le pH des modalités G2-3 semble diminuer progressivement par rapport à la modalité G1, moins amendée, indique que celle-ci résiste moins longtemps à l'augmentation du pH. Dans la figure 11b, les modalités amendées évoluent de manière similaire. Initialement, l'EC de G3 > G2 > G1 en raison de la concentration

plus élevée d'amendements. Cependant, cette légère tendance évolue au fil des épisodes de lixiviation, et les trois modalités montrent des résultats comparables à la modalité témoin.

En revanche, la modalité G1 affiche une diminution significativement plus prononcée de son EC. Dans l'ensemble, toutes les modalités présentent une diminution drastique de leur EC au cours des épisodes de lixiviation.

Les trois modalités semblent avoir généré des résultats concluants en contrant l'augmentation du pH tout en parvenant à réduire efficacement l'EC.

Fumier

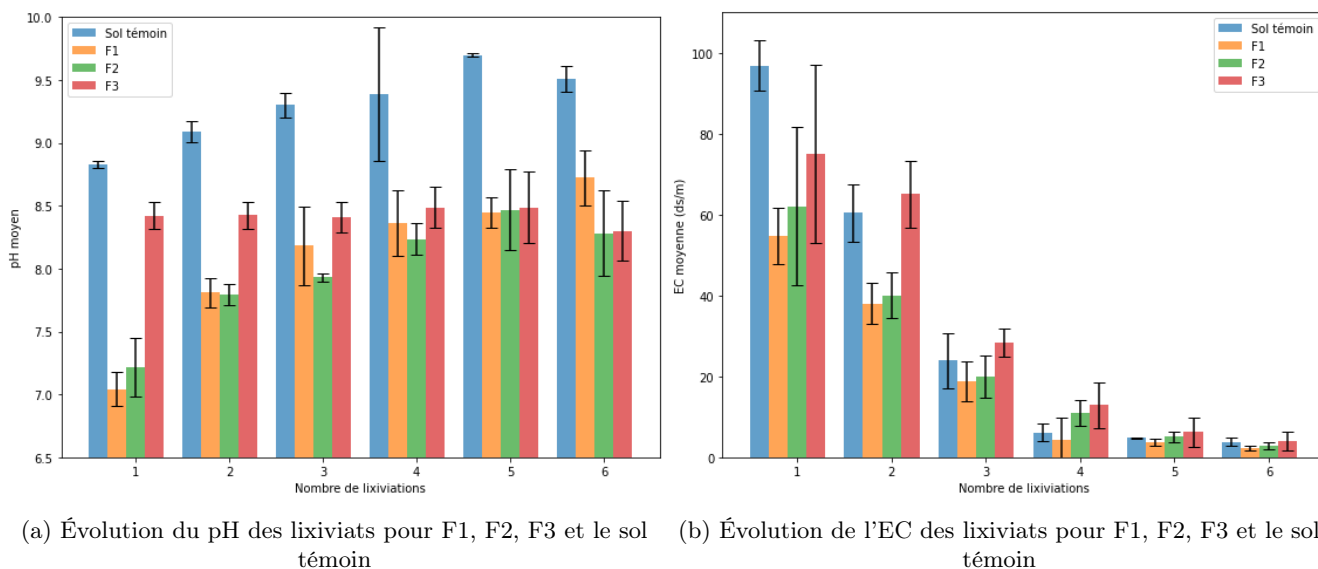


FIGURE 12 – Comparaison de l'évolution du pH et de l'EC des lixiviats : Fumier

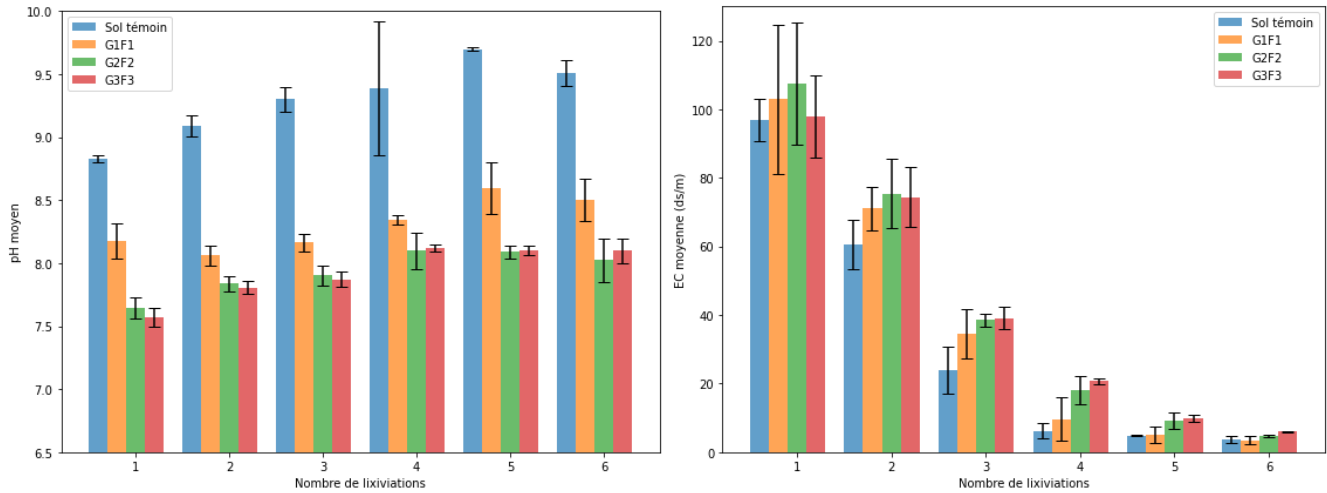
La figure 12a met en évidence la différence notable entre les modalités amendées et le sol témoin. Les modalités F1, F2 et F3, tout comme la figure 11a, présentent un pH final significativement plus faible que le sol témoin, suggérant que les amendements pourraient limiter l'augmentation progressive du pH dans le sol. Cependant, en fonction de leur concentration, les modalités ont évolué différemment. Lors de la première lixiviation, les modalités F1 et F2 étaient équivalentes avec un pH neutre, tandis que la modalité F3 montrait un pH plus basique, probablement dû au pH élevé du fumier utilisé.

Néanmoins, cette tendance a évolué au fil du temps. Le sol de la modalité F1, moins amendée, a subi une augmentation progressive de son pH. Cette modalité a évolué avec une constance analogue à celle du sol témoin, montrant ainsi un pH final significativement plus élevé que F2 et F3. En revanche, les modalités F2 et F3 sont restées relativement stables.

En ce qui concerne la figure 12b, l'évolution des modalités est distincte. En effet, les modalités F1 et F2 ont permis de faire diminuer significativement l'EC final, tandis que la F3 a offert des résultats bas mais, similaires au sol témoin. Au cours des 6 épisodes de lixiviation, la modalité F3 a présenté des résultats similaires à ceux du témoin, voire les a surpassés. Il est probable que la concentration importante de fumier a apporté des éléments mesurables supplémentaires justifiant cette augmentation.

Finalement, la modalité F2 semble être un bon compromis avec un pH stable et une EC qui a bien diminué au fil du temps.

Amendements combinés



(a) Évolution du pH des lixiviats pour G1F1, G2F2, G3F3 et le sol témoin (b) Évolution de l'EC des lixiviats pour G1F1, G2F2, G3F3 et le sol témoin

FIGURE 13 – Comparaison de l'évolution du pH et de l'EC des lixiviats : Amendements combinés

Dans la figure [13a], une fois de plus, les amendements ont démontré leur efficacité pour contrôler l'élévation du pH dans le sol. Cependant, en ce qui concerne les amendements combinés, le constat demeure le même : les modalités les plus concentrées résistent plus longtemps à l'augmentation du pH.

Par ailleurs, parmi les modalités d'amendements combinés, les modalités G2F1-2-3 et G3F1-2-3 présentent des pH significativement plus bas que la modalité G1F1-2-3. Il semble que l'utilisation d'une dose importante de gypse soit réellement efficace pour mieux contrôler l'élévation du pH.

En ce qui concerne les autres résultats, il est difficile d'établir des tendances claires pour le maintien du pH, à part le fait que la combinaison d'amendements semble être une mesure efficace.

Cependant, en ce qui concerne la figure [13a], il n'est pas optimal de combiner les amendements, car des doses importantes des deux amendements utilisés entraînent à leur tour une augmentation de l'EC. Néanmoins, les concentrations finales sont assez similaires et ne présentent pas de tendances significatives, à l'exception de la modalité G2F3 non représentée, qui affiche une concentration significativement plus élevée.

En conclusion, tous les amendements ont réussi à maintenir le pH de manière efficace par rapport à la modalité témoin. Cependant, les sols fortement amendés, légèrement amendés et le sol témoin arrivent à la même conclusion : c'est l'ajout d'une quantité importante d'eau qui permet de mobiliser des sels hors du sol. Les amendements jouent un rôle crucial pour éliminer spécifiquement certains sels problématiques et rétablir l'équilibre du sol.

6.3 Evolution de la croissance des plantes d'orge durant la mise en place durant la lixiviation

La masse fraîche et sèche produite montre une interaction significative entre le fumier et le gypse (voir la table [8]) tant pour la masse fraîche que pour la masse sèche finale. La figure [17] et la figure [18] permettent d'illustrer davantage l'interaction significative entre le gypse et le fumier.

TABLE 8 – Résultats AV2 croisée fixe pour la masse fraîche/sèche des plantes fourragères.

Facteurs	Pr(>F) Fraiche	Pr(>F) Sèche
Gypse	0.1820	0.2653
Fumier	0.2432	0.2197
Gypse :Fumiers	0.0041 **	0.0145 *

En outre, dans le cadre de conditions de croissance et de lixiviation uniformes, des semences d'orge ont été implantées dans un sol dont le pH était neutre et exempt de problèmes de salinité. Cette approche a été adoptée pour maintenir une référence véritablement comparable en vue d'évaluer le développement des plantes.

Encore une fois, les 16 modalités n'ont pas été regroupées dans un seul graphique, mais plutôt réparties sur quatre graphiques distincts.

Les figures 9, 15 et 16 illustrent l'évolution au fil du temps des hauteurs moyennes mesurées pour les différentes modalités : celles contenant exclusivement du gypse, du fumier, ainsi qu'une partie des amendements combinés. Dans chaque schéma, la modalité témoin, dépourvue de gypse et de fumier, est également intégrée pour faciliter la comparaison entre les diverses conditions.

Gypse

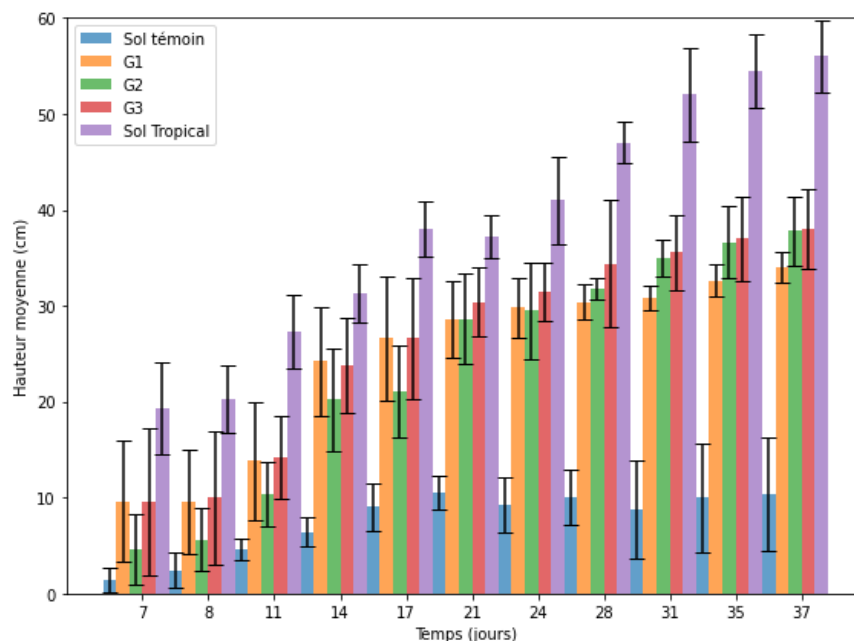


FIGURE 14 – Évolution de la hauteur moyenne des plants pour G1, G2, G3 et le sol témoin

L'évolution de l'orge cultivée dans le sol tropical révèle une croissance rapide et quasiment linéaire au fil des jours. La culture parvient à obtenir des rendements finaux en masse fraîche nettement supérieurs à ceux des modalités avec les sols en cours de remédiation.

En ce qui concerne les sols salins-sodiques, les plantes affichent une croissance moins vigoureuse mais parviennent à se développer lorsque le sol est amendé. Les résultats se révèlent prometteurs pour les modalités G1, G2 et G3, avec G3 offrant les rendements finaux les plus élevés. Cependant, aucune différence significative n'est observée entre ces trois modalités. En revanche, le sol témoin présente des résultats médiocres, avec une croissance qui décline presque à mi-parcours de l'expérience, se stabilisant ensuite pour finalement diminuer légèrement vers la fin de l'expérience. Plusieurs observations ont contribué à ce déclin de productivité du sol témoin. Tout d'abord, le sol était pauvre en éléments minéraux et contenait une quantité significative de sodium. De plus, comme l'ont démontré les constatations antérieures, le sol témoin a évolué vers un état sodique avec un pH élevé, limitant davantage la disponibilité des éléments minéraux résiduels. Enfin, la dégradation de la structure du sol a également joué un rôle. Au fil de l'expérience, le sol est devenu de plus en plus dispersé et l'eau n'a pas été correctement évacuée, créant ainsi des conditions anoxiques.

TABLE 9 – Comparaison des masses fraîches et sèches moyennes finales récoltées pour G1, G2, G3 et le sol témoin avec un test de Tukey ($p < 0.05$) indiquant les différences significatives entre les valeurs marquées par des lettres distinctes

Modalités	Masse fraîche (gr)	σ	Groupes	Masse sèche (gr)	σ	Groupes
Témoin	0,35	0,06	b	0,06	0,03	a
G1	3,42	1,11	ab	0,54	0,22	a
G2	3,36	0,82	ab	0,59	0,14	a
G3	4,03	0,92	ab	0,63	0,14	a

Fumier

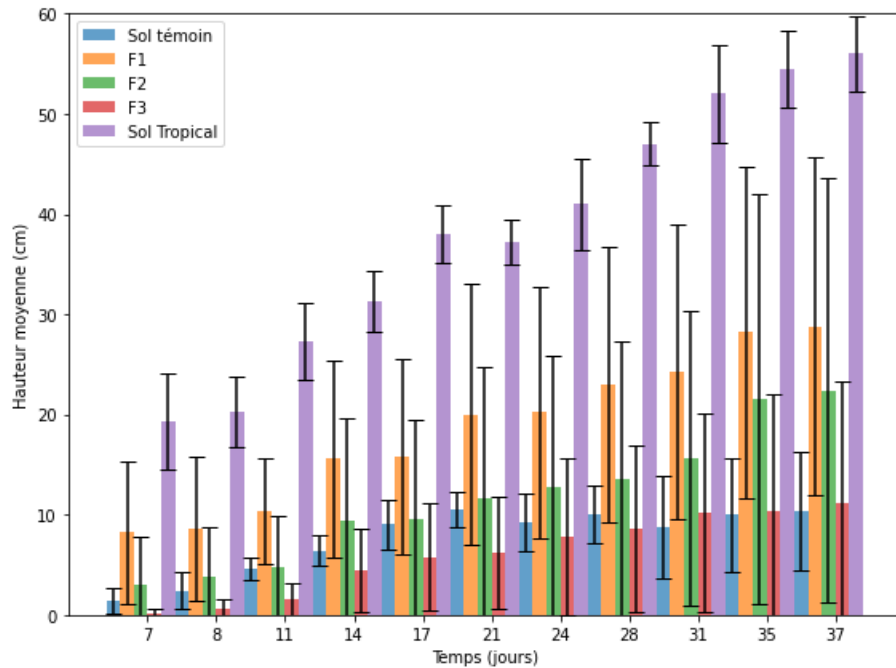


FIGURE 15 – Évolution de la hauteur moyenne des plants pour F1, F2, F3 et le sol témoin

La concentration de fumier a joué un rôle crucial dans le développement des plantes. À mesure que la concentration de fumier dans le sol augmente, les plantes ont démontré une capacité réduite à se développer de manière optimale. En fait, la modalité F3 a donné des résultats similaires au sol non amendé, affichant une performance médiocre et peu satisfaisante. Un excès de fumier peut entraîner une surabondance de certains éléments, perturbant potentiellement la lixiviation appropriée des cations. En empêchant une évacuation adéquate, les conditions stagnent et les résultats sont comparables à ceux du sol témoin.

Cependant, il est également important de noter que la croissance des plantes uniquement amendées avec du fumier n'était pas uniforme, montrant des écarts-types importants, que ce soit pour les modalités F1 ou F2. Malgré cela, la croissance des plantes sous les modalités F1 et F2 a présenté des résultats significativement supérieurs à la modalité témoin. Par conséquent, privilégier l'utilisation d'amendements tels que le fumier est crucial pour contrecarrer la dégradation des propriétés hydrauliques du sol et la dispersion des particules d'argile dans le sol.

TABLE 10 – Comparaison des masses fraîches et sèches moyennes finales récoltées pour F1, F2, F3 et le sol témoin avec un test de Tukey ($p < 0.05$) indiquant les différences significatives entre les valeurs marquées par des lettres distinctes

Modalités	Masse fraîche (gr)	σ	Groupes	Masse sèche (gr)	σ	Groupes
Témoin	0,35	0,06	b	0,06	0,03	a
F1	4,2	2,1	a	0,61	0,33	a
F2	4,57	4,8	a	0,62	0,67	a
F3	0,63	0,31	ab	0,09	0,05	a

Amendements combinés

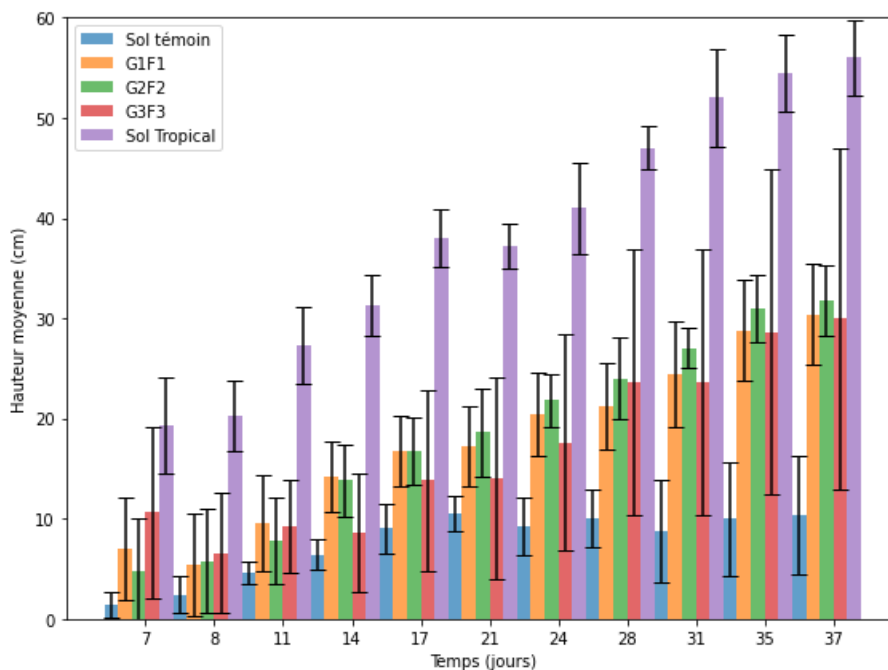


FIGURE 16 – Évolution de la hauteur moyenne des plants pour G1F1, G2F2, G3F3 et le sol témoin

Les résultats des amendements combinés sont plus nuancés et présentent une interprétation moins évidente. Outre l'amélioration des rendements agricoles par rapport au sol non amendé, il n'y a pas de différence significative entre les différentes modalités combinées testées. Toutes présentent une croissance linéaire et stable au fil du temps. Bien que les données soient plus dispersées, les modalités plus riches en gypse, à l'exception de G1F2, offrent des résultats plus performants.

En conclusion, les résultats obtenus pour les amendements combinés sont légèrement moins encourageants que ceux obtenus pour les modalités uniques.

TABLE 11 – Comparaison des masses fraîches et sèches moyennes finales récoltées pour G1F1, G1F2, G1F3, G2F1, G2F2, G2F3, G3F1, G3F2, G3F3 et le sol témoin avec un test de Tukey ($p < 0.05$) indiquant les différences significatives entre les valeurs marquées par des lettres distinctes.

Modalités	Masse fraîche (gr)	σ	groupes	Masse sèche (gr)	σ	groupes
G1F1	2,18	1,04	ab	0,39	0,18	a
G1F2	3,40	1,33	ab	0,49	0,17	a
G1F3	2,68	1,30	ab	0,40	0,17	a
G2F1	1,58	0,48	ab	0,36	0,11	a
G2F2	2,30	0,95	ab	0,35	0,15	a
G2F3	1,85	1,53	ab	0,29	0,29	a
G3F1	2,80	1,35	ab	0,40	0,22	a
G3F2	3,26	1,42	ab	0,50	0,23	a
G3F3	3,23	0,68	ab	0,46	0,17	a

Récapitulatif

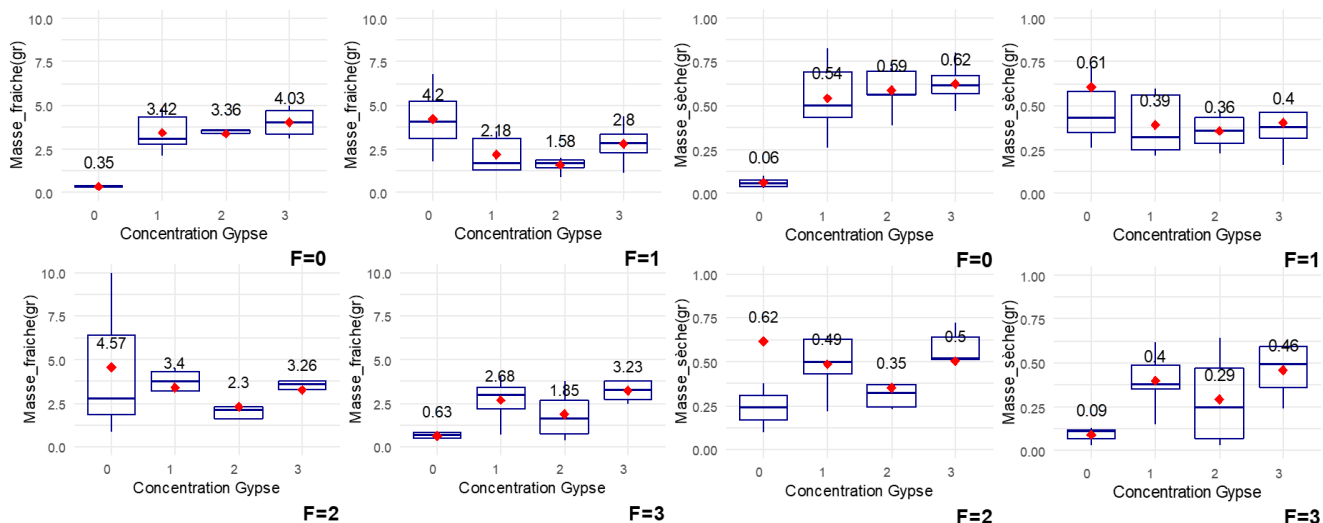


FIGURE 17 – Boxplot masse fraîche

FIGURE 18 – Boxplot masse sèche

En conclusion, l'hypothèse H3 doit être nuancée :

H3 : L'utilisation d'amendements permet d'améliorer les rendements agricoles des plantes fourragères

L'analyse des résultats de l'expérience met en évidence des rendements modestes pour le sol témoin non amendé ainsi que pour la modalité F3. Toutefois, des combinaisons spécifiques d'amendements ont produit des résultats plus positifs.

Les modalités F1 et F2 se sont distinguées en affichant les rendements les plus élevés. Cependant, la dispersion des données limite la solidité des conclusions, et il semble que l'utilisation d'une concentration plus faible de fumier aurait favorisé la croissance des plantes. Les sols fortement enrichis en gypse seul, à l'instar de la modalité G3, ont également présenté des résultats encourageants.

Dans le cas des autres combinaisons d'amendements, il semble judicieux de privilégier l'utilisation de la dose maximale de gypse, quelle que soit la concentration de fumier. En ce qui concerne la matière sèche, les résultats ne sont pas suffisamment concluants pour établir des différences significatives entre les divers amendements, en raison de la grande dispersion observée dans les résultats.

Cependant, malgré l'utilisation d'amendements, aucun des traitements n'a réussi à atteindre des rendements d'orge satisfaisants. En comparaison, les rendements agricoles dans un sol non affecté par des problèmes de salinité étaient nettement supérieurs.

Cette différence substantielle dans les rendements peut en partie s'expliquer par la méthodologie de l'expérience, où les sols ont été progressivement remédiés alors que les graines ont été semées dans un sol initialement salin-sodique. Pour obtenir des résultats plus comparables aux conditions d'un sol tropical, il aurait été plus adéquat de semer les graines après la remédiation complète du sol. Cependant, les contraintes temporelles de l'expérience ont limité cette approche.

Une durée d'expérience plus longue aurait également permis aux plantes de présenter des variations de développement plus marquées, facilitant ainsi leur interprétation.

6.4 Analyse des échantillons de sol

6.4.1 Analyse du pH

TABLE 12 – Résultats statistiques de l’AV2 croisée fixe pour le pH

Facteurs	Pr(>F)surface	Pr(>F)profondeur
Gypse	<2e-16 ***	<2e-16 ***
Fumiers	5.46e-06 ***	8.27e-14 ***
Gypse :Fumiers	0.00086 ***	0.00014 ***

Les résultats de l’analyse de variance à deux facteurs (AV2) présentés dans la table [12] révèlent une interaction hautement significative entre le gypse et le fumier pour la mesure du pH, aussi bien pour les échantillons de surface que pour ceux de profondeur. Pour mieux interpréter ces résultats, une analyse de variance à un facteur (AV1) a été réalisée en fixant le fumier comme le facteur le moins impactant. Afin de faciliter la visualisation et l’interprétation des données, les résultats ont été présentés sous forme de box-plot.

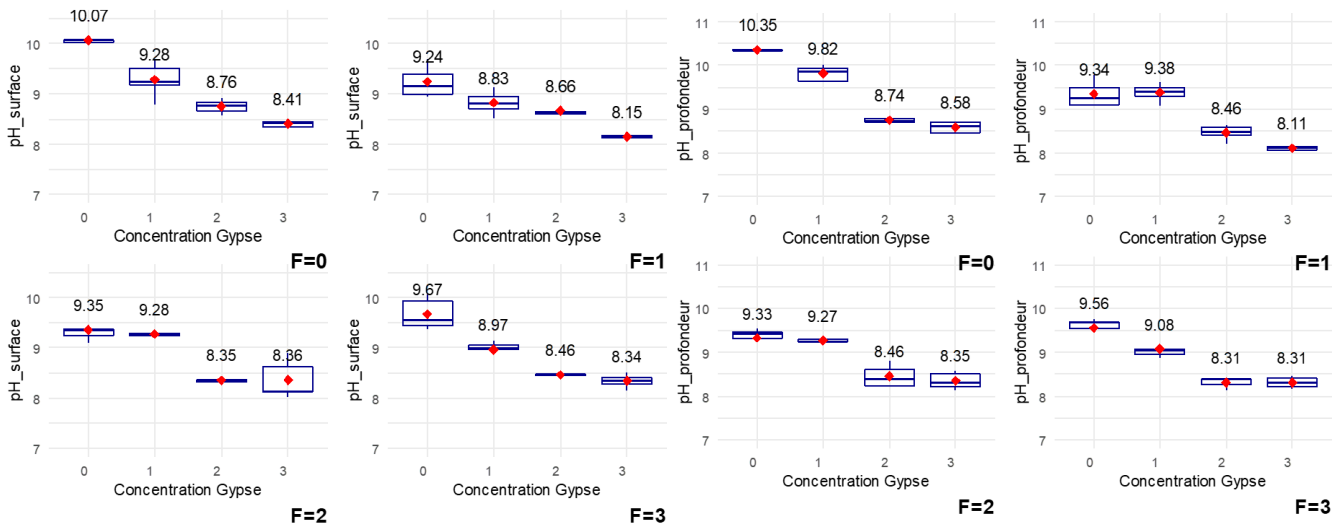


FIGURE 19 – Boxplot pH surface

FIGURE 20 – Boxplot pH profondeur

Ainsi, les figures 19 et 20 permettent de mettre en évidence l’évolution du pH en fonction de la concentration en gypse utilisée pour une concentration en fumier désignée.

Ne montrant pas de différence significative entre la surface et la profondeur, les résultats peuvent être interprétés ensemble. Tout d’abord, l’effet du gypse est fortement accentué en cas d’absence ou d’excès de fumier (F=0 et F=3). En effet, plus la concentration en gypse est importante, plus les valeurs du pH sont basses par rapport à la valeur témoin à 10,07 en surface. Cette tendance n’est pas linéaire car il n’existe pas de différence significative entre G2 et G3 mais bien entre G1 et G2-3, ce sont principalement les premières concentrations en gypse qui permettent d’apporter des différences relativement importantes.

Cependant, pour les résultats où les concentrations en fumier sont intermédiaires (F=1 et F=2), l’influence du gypse est différente.

Pour F=1, en surface et en profondeur, des comportements différents sont observés, mais ils atteignent tous le pH le plus bas pour la concentration 3 en gypse.

Pour F=2, il semble que la première concentration de gypse, tant en surface qu’en profondeur, n’ait pas entraîné de différence significative notable.

Dans ce cas, l’utilisation de fumier seul ou avec une petite quantité de gypse ne présente pas de réelle différence. Cependant, pour les doses plus élevées de gypse 2 et 3, les résultats sont plus bas et similaires entre eux.

Finalement, une dernière table[13] permet de résumer les valeurs moyennes des pH mesurés accompagnées de leur écart type et leur groupe de valeurs significatives auxquelles ils sont attribués.

En conclusion, pour la réduction du pH, il serait souhaitable de privilégier l'utilisation de la 3-ème dose de gypse et une légère dose de fumier comme la modalité G3F1.

TABLE 13 – Analyse comparative des pH moyens avec écart-type et regroupements issus du test de Tukey

Modalités	pH moyen surface	σ	Groupes	pH moyen profondeur	σ	Groupes
Témoin	10,07	0,05	a	10,35	0,05	a
G1	9,28	0,33	bcd	9,82	0,17	b
G2	8,76	0,14	efg	8,74	0,07	ef
G3	8,41	0,06	gh	8,58	0,13	f
F1	9,24	0,34	bcde	9,34	0,33	cd
F2	9,35	0,22	bc	9,33	0,25	cd
F3	9,67	0,31	ab	9,56	0,26	bc
G1F1	8,83	0,25	defg	9,38	0,23	bcd
G1F2	9,28	0,07	bcd	9,27	0,06	cd
G1F3	8,97	0,16	cdef	9,08	0,21	de
G2F1	8,66	0,22	fgh	8,46	0,16	fg
G2F2	8,35	0,05	gh	8,46	0,28	fg
G2F3	8,46	0,01	fgh	8,31	0,15	fg
G3F1	8,15	0,04	h	8,11	0,04	g
G3F2	8,36	0,38	gh	8,35	0,19	fg
G3F3	8,34	0,16	gh	8,31	0,15	fg

6.4.2 Analyse EC

TABLE 14 – Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour l'EC

Facteurs	Pr(>F) surface	Pr(>F) profondeur
Gypse	4.02e-11 ***	<2e-16 ***
Fumier	0.068	0.0372 *
Gypse :Fumier	0.0358 *	0.0244 *

Les résultats de l'analyse de variance à deux facteurs (AV2) présentés dans la table [14] mettent en évidence une interaction significative entre le fumier et le gypse sur la conductivité électrique (EC), aussi bien pour les échantillons de profondeur que pour ceux de surface. De manière analogue, l'analyse a été séparée en quatre analyses de la variance à un facteur (AV1) en fixant le fumier comme le facteur le moins impactant.

Dans cette analyse, une différence significative entre l'EC en surface et en profondeur a été observée. En moyenne, les résultats en surface étaient de 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis qu'en profondeur, ils étaient de 517 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cependant, les liens entre la profondeur et la surface doivent être interprétés avec prudence. Concernant les modalités avec différentes concentrations de gypse (F=0, 2, 3), il a été observé que les modalités G1F1-2-3 présentaient des EC en surface comme en profondeur significativement plus faibles que les modalités G3F1-2-3. Ce résultat peut être compréhensible car le gypse a une action ambivalente : il évacue les ions problématiques des sols salins, comme le sodium, ce qui peut contribuer à réduire la concentration en sels et donc l'EC du sol. Cependant, étant lui-même un produit soluble, sa concentration croissante peut également augmenter l'EC du sol.

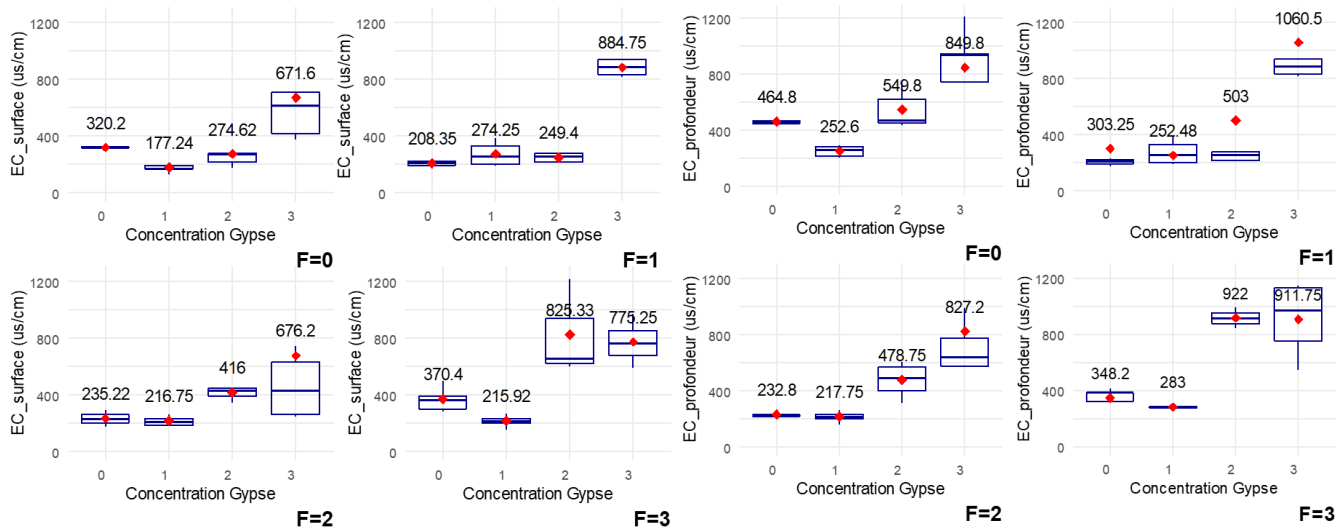


FIGURE 21 – Boxplot EC surface

FIGURE 22 – Boxplot EC profondeur

Les modalités avec des concentrations nulles en gypse ont montré que les concentrations en fumier F1 et F2 permettaient d'obtenir les valeurs d'EC les plus faibles. Le fumier, malgré sa capacité à augmenter l'EC du sol en libérant des éléments disponibles, a également permis de réduire la concentration en sels de manière similaire au gypse. Cependant, ces valeurs d'EC n'étaient pas significativement différentes des valeurs du témoin. l'addition de fumier dans le sol permet de lier les particules de sols entre elles, d'augmenter la porosité du sol et éliminer plus efficacement les sels Srivastava et al. (2016).

En conclusion, aucune modalité n'a réussi à obtenir des résultats significativement plus faibles que les valeurs du témoin en termes d'EC. Pour obtenir des valeurs d'EC plus basses, il semble préférable de privilégier des concentrations faibles en gypse ou en fumier.

TABLE 15 – Analyse comparative des EC moyennes avec écart-type et regroupements issus du test de Tukey

Modalités	EC moyenne surface(us/cm)	σ	Groupes	EC moyenne profondeur(us/cm)	σ	Groupes
Témoin	320.2	12,46	cd	464.8	16,05	e
G1	177.2	28,67	d	252.6	37,82	e
G2	274.6	94,17	cd	549.8	134,64	bcde
G3	671.6	342,82	abc	849.8	303,97	abc
F1	208.3	25,17	d	303.2	105,59	e
F2	235.2	46,06	d	232.8	20,22	e
F3	370.4	88,1	bcd	348.2	74,79	e
G1F1	274.2	89,77	cd	252.5	66,13	e
G1F2	216.7	37,64	d	217.7	39,85	e
G1F3	215.9	42,98	d	283	15,05	e
G2F1	249.4	32,35	cd	503	96,59	cde
G2F2	416	48,05	abcd	478.7	131,46	de
G2F3	825.3	342,03	ab	922	75,08	ab
G3F1	884.7	69,53	a	1060.5	175,21	a
G3F2	676.2	514,85	abc	827.2	304,05	abcd
G3F3	775,2	0,16	ab	911,7	282,79	ab

6.4.3 Analyse des éléments disponibles

Dans le but d'approfondir l'interprétation des résultats obtenus lors de l'analyse de l'EC et du pH, une étude plus détaillée des concentrations des quatre cations : le sodium, le magnésium, le calcium et le potassium a été réalisée. Ces concentrations en éléments ont été résumées dans la table 16. Elles jouent un rôle crucial dans la détermination de deux indicateurs importants pour évaluer les conditions salines du sol : le SAR et l'ESP. Ces indicateurs permettent une meilleure compréhension des propriétés chimiques du sol et de leur impact sur l'EC et le pH observés.

TABLE 16 – Résultats de l'AV2 croisée fixe pour les éléments disponibles

	Gypse	Fumiers	Gypse :Fumier
Ca_surf	<2e-16 ***	0.015179 *	0.000278 ***
Ca_prof	<2e-16 ***	1.85e-06 ***	0.000109 ***
K_surf	<2e-16 ***	<2e-16 ***	4.59e-05 ***
K_prof	<2e-16 ***	6.7e-16 ***	0.00119 **
Mg_surf	5.26e-15 ***	5.46e-16 ***	0.00671 **
Mg_prof	3.64e-13 ***	1.32e-12 ***	0.0011 **
Na_surf	1.46e-15 ***	1.82e-09 ***	5.67e-08 ***
Na_prof	<2e-16 ***	1.85e-06 ***	0.000109 ***

Les résultats de l'analyse des éléments en surface et en profondeur mettent en évidence des interactions significatives entre le gypse et le fumier pour tous les cations étudiés. Ces interactions sont claires et sans ambiguïté, soulignant l'impact conjoint de ces deux facteurs sur les concentrations en éléments du sol.

Analyse du calcium

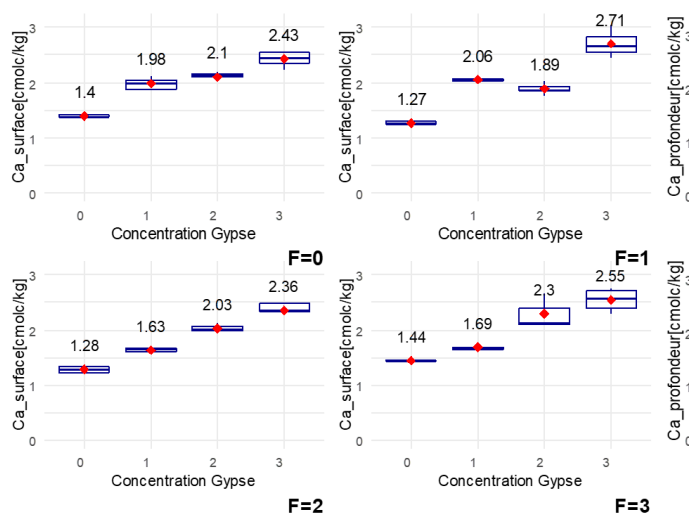


FIGURE 23 – Boxplot Ca en surface

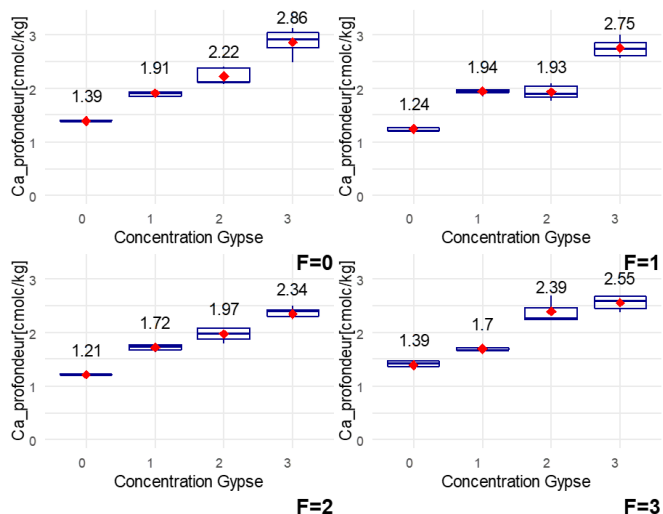


FIGURE 24 – Boxplot Ca en profondeur

Les résultats obtenus en surface et en profondeur sont très similaires. Pour toutes les concentrations de fumier, il existe une relation linéairement proportionnelle entre la concentration en gypse et la concentration en calcium. D'ailleurs, les modalités G3/G3F1-2-3 qu'elles soient combinées ou non avec n'importe quelles concentrations de fumiers sont significativement plus importantes que les modalités G1F1-2-3, le sol témoin et les modalités F1,F2,F3.

TABLE 17 – Variation moyenne des concentrations en calcium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey

Modalités	Ca_surf (cmolc/kg)	σ	Groupes	Ca_prof (cmolc/kg)	σ	Groupes
Témoin	1,4	0,05	fg	1,39	0,02	gh
G1	1,98	0,11	cde	1,91	0,04	ef
G2	2,1	0,12	bc	2,22	0,15	de
G3	2,43	0,15	ab	2,86	0,28	a
F1	1,27	0,05	g	1,24	0,1	h
F2	1,28	0,07	g	1,21	0,02	h
F3	1,44	0,02	fg	1,39	0,11	gh
G1F1	2,06	0,05	bcd	1,94	0,07	ef
G1F2	1,63	0,05	efg	1,72	0,08	fg
G1F3	1,69	0,13	def	1,7	0,04	fg
G2F1	1,89	0,1	cde	1,93	0,14	ef
G2F2	2,03	0,07	bcde	1,97	0,14	ef
G2F3	2,3	0,32	abc	2,39	0,25	bcd
G3F1	2,71	0,26	a	2,75	0,19	ab
G3F2	2,36	0,35	ab	2,34	0,17	cd
G3F3	2,55	0,22	a	2,55	0,15	abc

Analyse du potassium

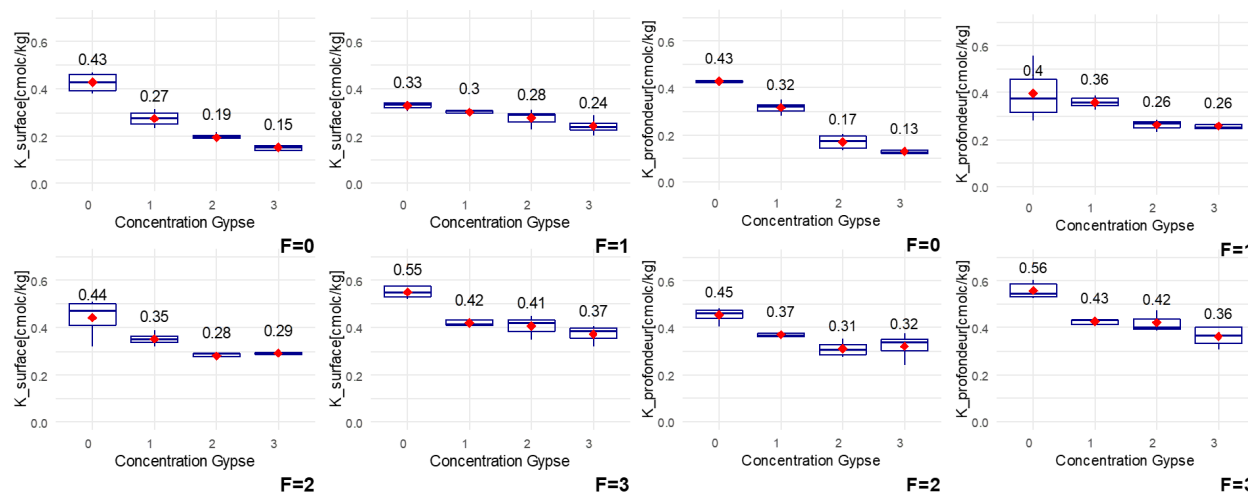


FIGURE 25 – Boxplot K en surface

FIGURE 26 – Boxplot K en profondeur

Les résultats dévoilent une convergence entre les échantillons prélevés en surface et en profondeur : à mesure que la concentration en gypse augmente, la concentration en potassium diminue, indépendamment de la concentration en fumier. Cette constatation peut être expliquée par le fait que les ions calcium introduits par les amendements inorganiques graduellement remplacent les ions potassium présents dans le sol. En effet, la modalité G3 se distingue par une concentration en potassium significativement moindre que celle observée dans la modalité G1 ainsi que dans le sol témoin. Cependant, l'apport de fumier permet de compenser cette diminution du potassium en fournissant ses propres nutriments par sa composition, tout en limitant la lixiviation, même en présence d'une augmentation du gypse. Par ailleurs, la concentration en potassium dans la modalité G2F3 se révèle significativement supérieure à celle de la modalité G2F1, à la fois en surface et en profondeur. Cette tendance est également observée entre G1F3 et G1F1, mais uniquement en surface cette fois. En fin de compte, parmi toutes les modalités, seule la modalité F3 a réussi à générer une augmentation significative de la concentration en potassium par rapport au sol non amendé. Cette observation met en avant l'importance de combiner divers types d'amendements pour favoriser la rétention du potassium dans le sol, même en présence de l'ajout de gypse.

TABLE 18 – Variation moyenne des concentrations en potassium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey

Modalités	K_surf (cmolc/kg)	σ	Groupes	K_prof (cmolc/kg)	σ	Groupes
Témoin	0,43	0,04	bc	0,43	0,01	b
G1	0,27	0,03	fg	0,32	0,03	cd
G2	0,19	0,02	hi	0,17	0,03	ef
G3	0,15	0,02	i	0,13	0,01	f
F1	0,33	0,02	def	0,4	0,12	bc
F2	0,44	0,09	b	0,45	0,04	b
F3	0,55	0,02	a	0,56	0,04	a
G1F1	0,3	0,02	efg	0,36	0,03	bcd
G1F2	0,35	0,03	cdef	0,37	0,01	bc
G1F3	0,42	0,01	bc	0,43	0,04	b
G2F1	0,28	0,03	fg	0,26	0,02	de
G2F2	0,28	0,02	fg	0,31	0,03	cd
G2F3	0,41	0,05	bcd	0,42	0,05	bc
G3F1	0,24	0,04	gh	0,26	0,02	de
G3F2	0,29	0,01	efg	0,32	0,05	cd
G3F3	0,37	0,04	bcde	0,36	0,05	bcd

Analyse du magnésium

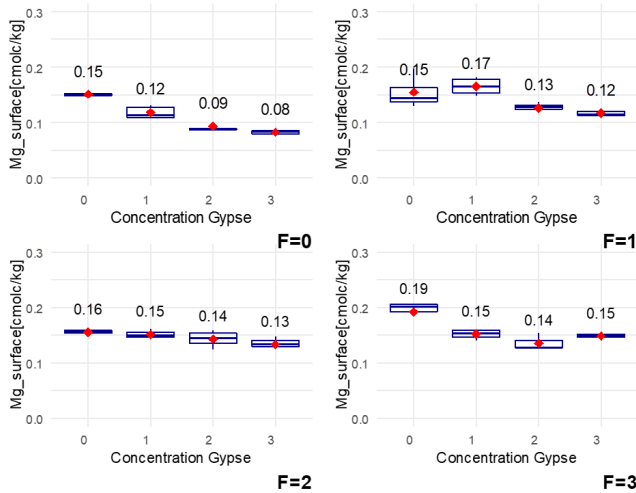


FIGURE 27 – Boxplot Mg en surface

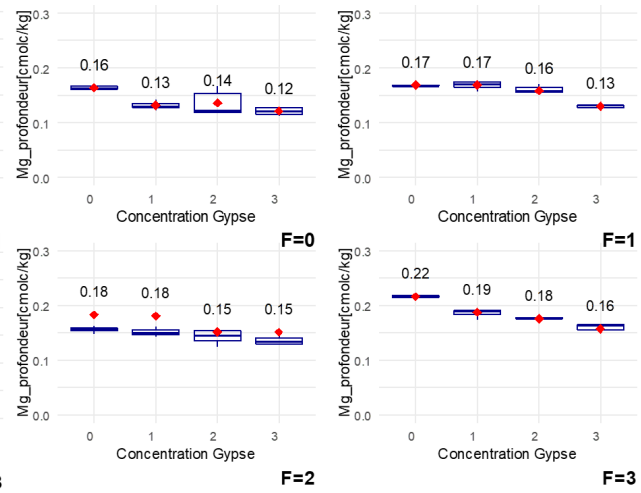


FIGURE 28 – Boxplot Mg en profondeur

Malgré l'augmentation de la concentration en magnésium en profondeur, les mêmes observations que pour le potassium sont relevées pour le magnésium : à mesure que la concentration de gypse augmente, la concentration de magnésium diminue. En surface, les modalités G2 et G3 affichent des concentrations significativement plus basses que le sol témoin. Notamment, la modalité G3 présente une concentration nettement plus faible que toutes les autres modalités, excepté G2. Cette tendance se retrouve en profondeur, où toutes les modalités amendées en gypse uniquement affichent des concentrations significativement inférieures à celles du sol témoin.

L'augmentation du gypse, et donc du calcium, dans le sol réduit la concentration des cations magnésiens.

Toutefois, l'emploi du fumier s'avère une stratégie efficace pour limiter la perte de magnésium due à la lixiviation et à l'impact du gypse. La modalité F3 se démarque par des résultats particulièrement positifs en matière de concentration en magnésium. Par sa composition, le fumier constitue une source de magnésium et joue un rôle dans la préservation de la concentration, notamment dans les modalités G1F2, G2F2 et G3F3, où malgré l'accroissement du gypse, la concentration en magnésium reste stable. Ceci se confirme encore davantage avec les modalités G1F3, G2F3 et G3F3.

TABLE 19 – Variation moyenne des concentrations en magnésium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey

Modalités	Mg_surf (cmolc/kg)	σ	Groupes	Mg_prof (cmolc/kg)	σ	Groupes
Témoin	0,15	0	bcd	0,16	0	bcd
G1	0,12	0,01	de	0,13	0,01	fg
G2	0,09	0,02	ef	0,14	0,02	efg
G3	0,08	0	f	0,12	0,01	g
F1	0,15	0,03	bc	0,17	0,01	bcd
F2	0,16	0,01	bc	0,18	0,02	bc
F3	0,19	0,02	a	0,22	0,01	a
G1F1	0,17	0,02	ab	0,17	0,01	bcd
G1F2	0,15	0,01	bcd	0,18	0,01	bc
G1F3	0,15	0,01	bc	0,19	0,01	b
G2F1	0,13	0,01	cd	0,16	0,01	cde
G2F2	0,14	0,02	bcd	0,15	0,01	def
G2F3	0,14	0,01	bcd	0,18	0	bcd
G3F1	0,12	0,01	def	0,13	0	fg
G3F2	0,13	0,01	bcd	0,15	0,01	def
G3F3	0,15	0,01	bcd	0,16	0,01	cdef

Analyse du sodium

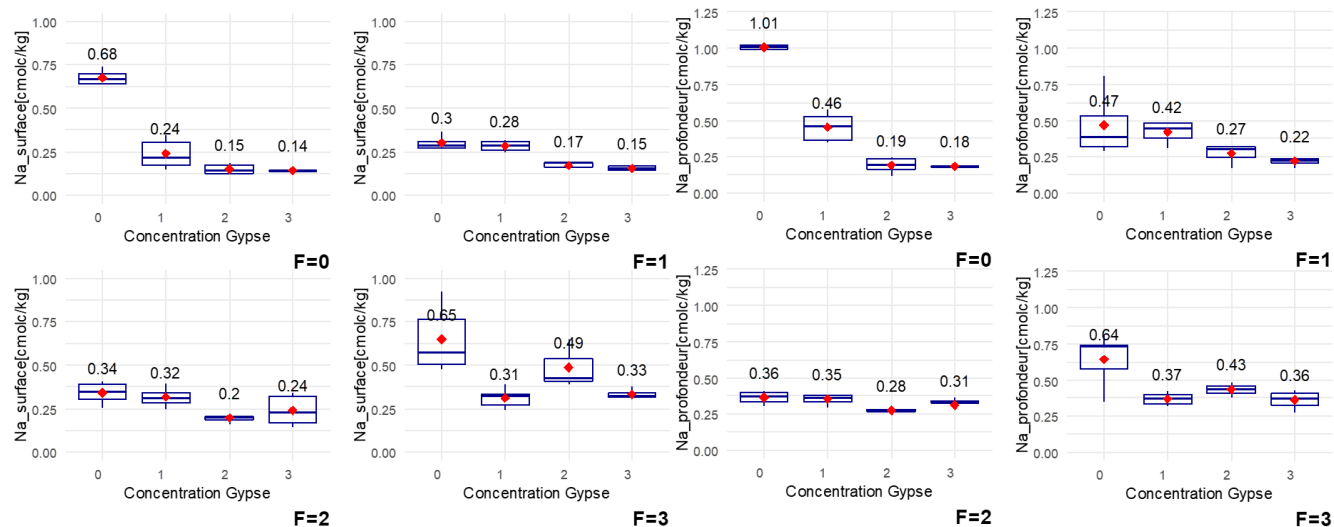


FIGURE 29 – Boxplot Na en surface

FIGURE 30 – Boxplot Na en profondeur

Malgré les différences significatives observées en surface et en profondeur, les constatations restent cohérentes : la modalité témoin présente une concentration en sodium significativement plus élevée que les modalités amendées, à l'exception de F3 en surface. L'utilisation exclusive du gypse en tant qu'amendement permet de réduire efficacement la concentration en sodium. En revanche, l'ajout de fumier a un effet opposé, introduisant du sodium dans le sol par le biais de sa composition. En surface, la modalité F3 montre même une concentration en sodium proche de celle du sol témoin. En ce qui concerne les amendements combinés, il est difficile de tirer des conclusions concrètes, à l'exception de la relation observée : à mesure que la concentration en gypse augmente, l'ajout de fumier conduit à une augmentation de la concentration en sodium. Par conséquent, l'ajout de concentrations élevées de fumier, tel que F3, semble peu opportun, car il est associé à une augmentation de la concentration en sodium. Pour réduire la concentration en sodium, il est plutôt recommandé d'opter pour l'utilisation exclusive du gypse à une concentration maximale, tout en limitant si nécessaire l'ajout de fumier.

TABLE 20 – Variation moyenne des concentrations en sodium selon les modalités, avec écart-type et groupement selon le test de Tukey

Modalités	Na_surf (cmolc/kg)	σ	Groupes	Na_prof (cmolc/kg)	σ	Groupes
Témoin	0,68	0,05	a	1,01	0,02	a
G1	0,24	0,08	cd	0,46	0,1	bc
G2	0,15	0,03	d	0,19	0,05	e
G3	0,14	0	d	0,18	0,01	e
F1	0,3	0,05	bcd	0,47	0,24	bc
F2	0,34	0,07	bc	0,36	0,05	cde
F3	0,65	0,19	a	0,64	0,19	b
G1F1	0,28	0,03	bcd	0,42	0,08	cd
G1F2	0,32	0,06	bcd	0,35	0,04	cde
G1F3	0,31	0,06	bcd	0,37	0,04	cde
G2F1	0,17	0,03	cd	0,27	0,07	cde
G2F2	0,2	0,03	cd	0,28	0,02	cde
G2F3	0,49	0,14	ab	0,43	0,05	bcd
G3F1	0,15	0,02	cd	0,22	0,03	de
G3F2	0,24	0,09	cd	0,31	0,06	cde
G3F3	0,33	0,03	bcd	0,36	0,07	cde

6.4.4 Résumé des paramètres de la salinité des sols

À partir des concentrations en éléments disponibles, le SAR et l'ESP peuvent être déterminés, ajoutant deux indicateurs importants dans la détermination des sols affectés par des problèmes de salinité. Ainsi, en disposant d'une connaissance approfondie de la remédiation des sols, il est possible de tester la première hypothèse de départ :

H1 : Il existe une combinaison idéale de gypse/fumier de bovins qui permet de remédier aux sols salins-sodiques de la haute vallée de Cochabamba.

TABLE 21 – Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour le SAR

Facteurs	Pr(>F) surface	Pr(>F) profondeur
Gypse	<2e-16 ***	<2e-16 ***
Fumier	0.000233 ***	4.87e-10 ***
Gypse :Fumier	1.65e-11 ***	1.94e-07 ***

TABLE 22 – Résultats statistiques de l'AV2 croisée fixe pour l'ESP

Facteurs	Pr(>F) surface	Pr(>F) profondeur
Gypse	<2e-16 ***	<2e-16 ***
Fumier	4.87e-10 ***	0.00892 **
Gypse :Fumiers	1.94e-07 ***	4.31e-09 ***

Les résultats obtenus pour le SAR (voir Table 21) et l'ESP (voir Table 22) sont assez similaires, que ce soit en profondeur ou en surface. Ils montrent une interaction significative entre le gypse et le fumier. L'analyse peut donc être décomposée afin d'étudier davantage l'interaction entre ces facteurs.

Analyse du SAR

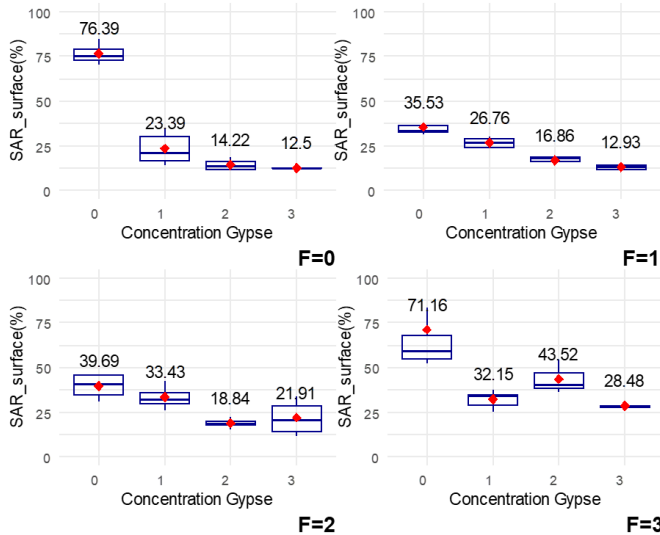


FIGURE 31 – Boxplot SAR surface

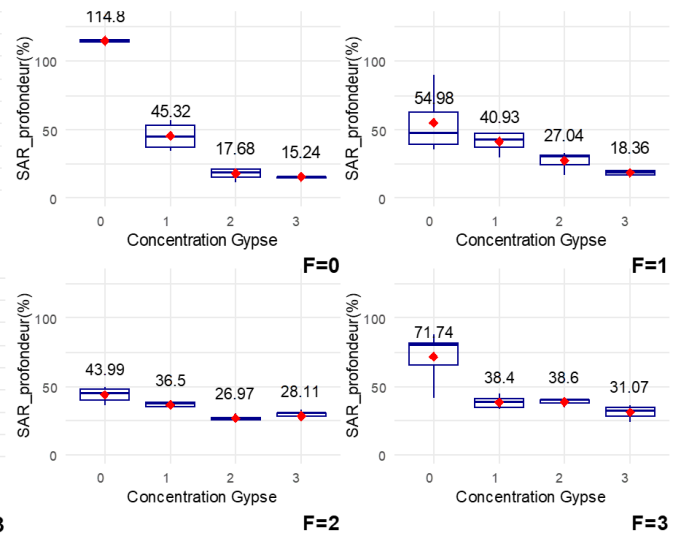


FIGURE 32 – Boxplot SAR profondeur

Les résultats obtenus mettent en évidence une différence significative entre la conductivité électrique (EC) en surface et en profondeur, avec une moyenne de 31,4% en surface comparée à 40,4% en profondeur. Cette observation est cohérente avec les tendances observées pour l'EC ainsi que pour certains éléments présents dans le sol.

En ce qui concerne les effets des concentrations de fumier et de gypse : les résultats les moins favorables ont été obtenus en l'absence de gypse, quelle que soit la concentration de fumier (de F=0 à F=3). De plus, les ESP et de rapport de SAR les plus élevés ont été relevés dans le sol témoin et dans la modalité F=3. Cette constatation était prévisible étant donné que la modalité F=3 avait atteint des concentrations finales en sodium équivalentes à celles du sol témoin.

Indépendamment de la concentration de fumier, on observe une décroissance des pourcentages de SAR à mesure que la concentration en gypse augmente. Cependant, aucune différence significative entre les différentes concentrations n'a été mise en évidence. Parmi, toutes les modalités testées, c'est G2, G3 et G3F1 qui présentent les pourcentages de SAR les plus bas.

En récapitulant, toutes les modalités ont montré des résultats significativement inférieurs à ceux du sol témoin en ce qui concerne le SAR. Néanmoins, pour choisir la combinaison d'amendements la plus appropriée, d'autres paramètres mesurés dans cette étude doivent être également pris en considération. Une synthèse détaillée des résultats est présentée dans la table 23.

Analyse de l'ESP

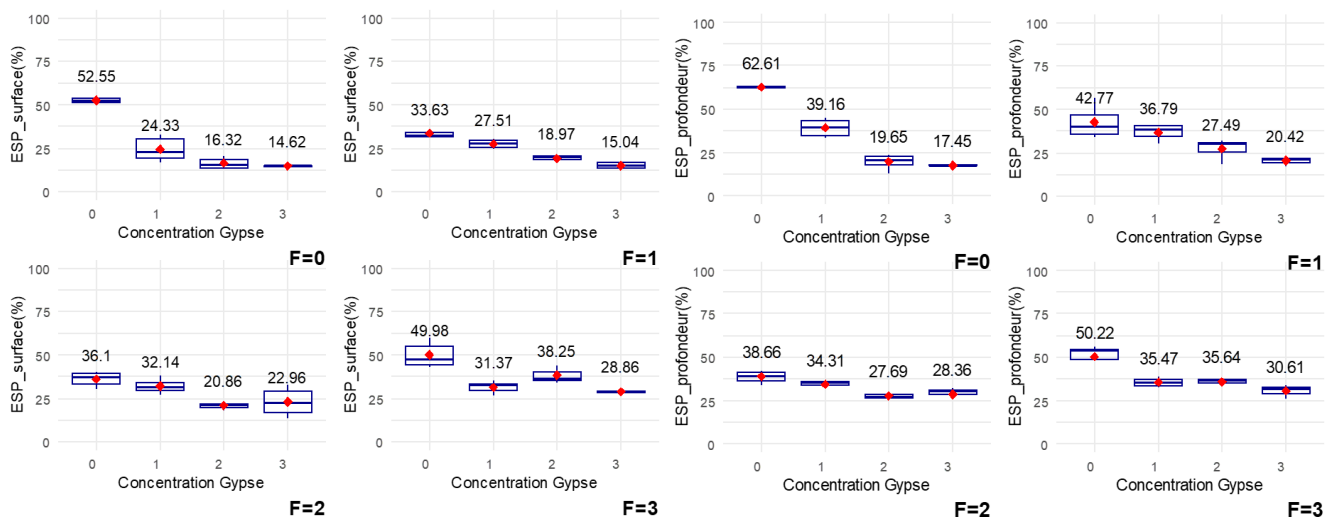


FIGURE 33 – Boxplot ESP profond

FIGURE 34 – Boxplot ESP surface

Il est important de souligner en premier lieu que la différence significative entre les données collectées en surface et en profondeur reflète une tendance similaire à celle observée pour le rapport d'adsorption de sodium (SAR). Les valeurs moyennes sont de 28,7% en surface et de 34,1% en profondeur. Cependant, la dispersion des résultats entre les différentes modalités est moins marquée que pour le SAR, avec des valeurs variant de 15% à 63%.

Une fois encore, quelle que soit la concentration en fumier, les pourcentages les plus bas sont obtenus pour les modalités non amendées en fumier et riches en gypse. En général, c'est la modalité G3 ou G3F1-2-3 qui affiche les pourcentages les plus bas, à l'exception de la concentration F=2, qui présente de meilleures performances avec une concentration en gypse de niveau 2. La concentration en fumier F=1 se distingue à nouveau comme celle qui répond le mieux à l'ajout progressif de gypse et qui permet d'obtenir les pourcentages les plus bas pour les modalités soumises aux deux types d'amendements (F>0).

En somme, les mesures du SAR et de l'ESP concordent et fournissent des conclusions similaires. Une concentration de gypse élevée (comme dans G2 ou G3) semble être la plus efficace pour réduire ces deux indicateurs à des niveaux proches des références des sols non salins. Lorsqu'il est utilisé seul, le gypse parvient même à atteindre presque ces valeurs de référence. Une autre constatation importante est que la pratique de la lixiviation de ce sol sans l'amender s'avère peu judicieuse.

TABLE 23 – Synthèse des pH, EC, SAR, ESP, masses fraîches et sèches moyennes en relation avec les différentes modalités employées

Modalités	SAR (%)	ESP (%)	pH	EC (us/cm)	Masse fraîche (gr)	Masse sèche (gr)
Témoin	95,6	57,6	10,21	392,5	0,35	0,06
G1	34,3	32,1	9,55	214,9	3,4	0,54
G2	16,0	18,1	8,75	412,2	3,4	0,59
G3	13,9	16,0	8,49	760,7	4	0,62
F1	45,6	39,2	9,29	255,8	4,2	0,6
F2	41,9	37,6	9,34	234,0	4,56	0,62
F3	71,8	51,0	9,61	359,3	0,63	0,09
G1F1	33,8	32,3	9,1	263,4	2,18	0,39
G1F2	34,9	33,4	9,28	217,3	3,4	0,49
G1F3	35,3	33,6	9,02	249,5	2,68	0,4
G2F1	21,9	23,4	8,56	376,2	1,57	0,35
G2F2	22,9	24,3	8,41	447,4	2,3	0,35
G2F3	41,2	37,2	8,38	873,7	1,85	0,29
G3F1	15,6	17,8	8,13	972,6	2,8	0,4
G3F2	24,7	25,9	8,36	751,7	3,26	0,5
G3F3	29,8	29,9	8,33	843,5	3,22	0,46

Il est important de rappeler qu'un sol est considéré comme non affecté par des problèmes de salinité lorsque le SAR est inférieur à 13, l'ESP est inférieur à 15, le pH est inférieur à 8,5 et l'EC est inférieur à 4 ds/m.

Cependant, aucune des modalités testées n'a permis d'affirmer strictement l'hypothèse de départ :

H1 : Il existe une combinaison idéale de gypse/fumier de bovins qui permet de remédier aux sols salins-sodiques de la haute vallée de Cochabamba.

Néanmoins, ces résultats sont à nuancer, car certaines modalités sont parvenues à remédier au sol en se rapprochant des niveaux fixés pour les sols salins-sodiques.

En analysant les différentes modalités, nous pouvons noter les points suivants :

G3

Cette modalité présente les résultats les plus bas, proches des valeurs de référence, pour le SAR (13,8%) et l'ESP (16,0%). De plus, le pH est également inférieur à la limite de référence, avec une valeur de 8,49. Cependant, cette modalité présente une conductivité électrique (EC) élevée en raison de la dose plus importante de gypse utilisée. Néanmoins, au niveau des éléments disponibles, elle participe à l'élimination du magnésium et du potassium dans le sol, ce qui peut à terme présenter des problèmes de disponibilité en éléments minéraux pour la plante.

Au-delà de remédier les sols, cette modalité permet également aux plantes de se développer, présentant le 3^{ème} rendement le plus élevé en matière fraîche et le premier rendement en matière sèche.

Cette modalité a pleinement répondu aux deux objectifs de l'étude en remédiant efficacement le sol tout en favorisant une croissance végétale satisfaisante.

G3F1

La seconde modalité intéressante, G3F1, similaire à G3, présente également des résultats proches des limites de détermination des sols salins, avec des valeurs de référence de 15,6% pour le SAR et 17,7% pour l'ESP. Son pH est également proche de l'optimum agricole, avec une valeur de 8,13.

Cependant, malgré l'amélioration du statut du sol en termes de salinité, les rendements agricoles mesurés n'ont pas été très importants. Même si la présence de fumier à cette faible dose a contribué à réduire la salinité du sol, il semble que cela n'ait pas été suffisant pour stimuler une croissance végétale significative.

En ce qui concerne les autres modalités, il est indubitable que l'ajout d'amendements, quelle que soit leur nature, a un impact bénéfique sur le sol. Les résultats du sol témoin sont peu satisfaisants, avec des conditions qui rendent la culture dans ces sols pratiquement impossible.

Cependant, parmi les sols amendés, certains affichent des résultats bien moins probants. Les sols contenant exclusivement du fumier présentent certes de faibles valeurs de conductivité électrique (EC), mais ils affichent des valeurs de pH élevées ainsi que des valeurs problématiques en SAR et d'excès de sodium. Ces sols n'ont pas réussi à éliminer de manière efficace les ions sodium du sol.

En ce qui concerne les modalités comportant des amendements combinés, il est évident que l'augmentation de la concentration en gypse a eu un effet positif sur les résultats globaux. À l'exception de G2F3, les modalités combinant les deux types d'amendements montrent que les concentrations en gypse de niveau 2 et 3 produisent des résultats très prometteurs, notamment les modalités G3F1 et G2F1.

6.5 Synthèse des moyennes des résultats obtenus entre les échantillons en surface et en profondeur

A travers la table [24], il est possible de tester la seconde hypothèse de ce travail :

H2 : Il existe une différence significative de certaines caractéristiques chimiques du sol entre la couche supérieure et la couche inférieure des sols remédiés avec les amendements.

Pour cela, un test de Student de comparaison de moyenne a été réalisé afin de comparer l'ensemble des résultats obtenus en surface et ceux obtenus en profondeur.

TABLE 24 – Résultat de l'analyse statistique entre les horizons de surface et de profondeur

Caractéristiques	Surface	Profondeur	p-value
pH	8.91	9.00	0.4137
EC(us/cm)	410	517	0.0330*
Ca(cmolc/kg)	1.94	1.96	0.7923
K(cmolc/kg)	0.33	0.34	0.4378
Mg(cmolc/kg)	0.16	0.14	5.24e-06***
Na(cmolc/kg)	0.31	0.39	0.01007*
SAR(%)	31.4	40.4	0.02081*
ESP(%)	28.7	34.1	0.008464**

Les résultats de cette recherche mettent en lumière une variation d'importance au niveau de l'EC entre les échantillons collectés en surface et ceux prélevés en profondeur du sol. En effet, les processus de dissolution, de dilution et de lixiviation contribuent à l'enrichissement en minéraux des couches inférieures et, par conséquent, à une augmentation indirecte de la mesure de l'EC dans les strates plus profondes (Montoroi (2018)). Afin de mieux illustrer cette disparité, une analyse de Student a été réalisée entre chaque combinaison de modalités, comme présentées dans le tableau 30. Les résultats révèlent que 12 des 16 configurations suivent cette tendance et que 5 d'entre elles affichent une différence significative.

Au vu de la dispersion des valeurs de l'EC, plus de répétitions auraient permis de conclure davantage sur ce point. En ce qui concerne les éléments présents dans le sol, la mobilité des ions est principalement influencée par leur taille, leur charge et les caractéristiques du milieu environnant. Les ions de taille réduite et à faible charge, tels que le sodium, ont tendance à être plus mobiles que le calcium. Cependant, l'ion magnésium, malgré sa charge double, demeure de petite taille et affiche une mobilité 2 à 2,5 fois supérieures à celle de l'ion calcium, en fonction des propriétés du sol Fallavier and Olivin (1988).

C'est pourquoi les cations sodium et magnésium présentent une augmentation significative dans les horizons plus profonds du sol, influencée par le déplacement de l'eau lors du processus de lixiviation.

Encore une fois, une analyse de type Student a été effectuée pour chaque combinaison de modalités, comme exposé dans le tableau 32. Les résultats sont concluants : pour toutes les configurations, la concentration en magnésium s'avère plus élevée en profondeur qu'en surface, avec une différence qui est significative dans 10 des 16 cas. Pour le sodium, la situation est similaire, avec 14 des 16 configurations montrant une concentration supérieure en profondeur, dont 7 de manière significative.

Les ions potassium et calcium, moins mobiles de nature, demeurent présents dans le sol sans afficher de variation significative entre les deux horizons. Dans l'ensemble, ces constatations sont positives, car elles indiquent que le sodium

s'éloigne des zones racinaires alors que le potassium et le calcium s'y maintiennent. Cependant, il convient de noter que la diminution du magnésium peut progressivement entraîner des carences en éléments essentiels pour les plantes. Par conséquent, il serait recommandé de fournir un apport en magnésium dans le sol afin de garantir le développement des plantes fourragères qui poussent dans ces conditions.

Concernant les indicateurs SAR et ESP, il est logique d'observer une différence significative entre la surface et la profondeur en raison de la manière dont ils sont calculés et des concentrations en ions dans les différentes couches du sol.

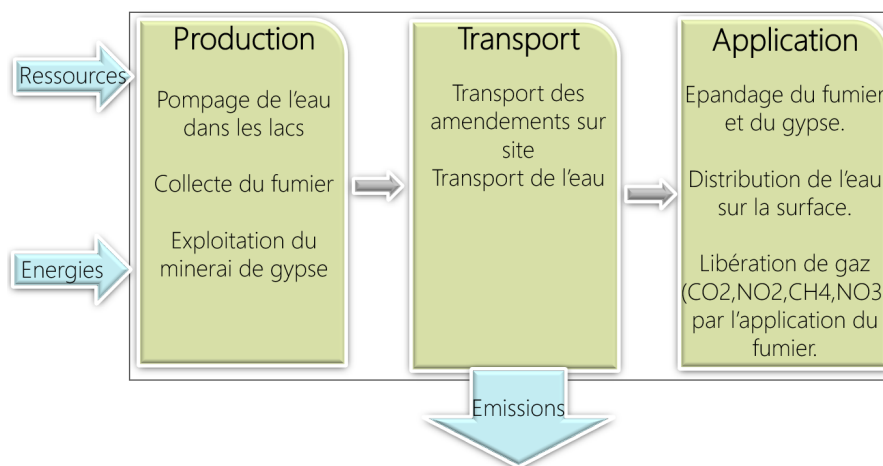
En ce qui concerne le pH, aucune conclusion significative n'a pu être tirée.

En résumé, en considérant la profondeur des échantillons, il est clair que les sols soumis à la lixiviation présentent des variations significatives pour certaines propriétés chimiques, telles que le sodium, le magnésium, le SAR et l'ESP. Cependant, aucune différence significative n'a été relevée en ce qui concerne le pH, le calcium et le potassium.

6.6 Evaluation de l'impact environnemental des 2 scénarios

AU sein de cette étude, l'UF choisie est la remédiation d'une parcelle de 1 hectare en Bolivie présentant initialement des conditions salins-sodiques, réalisée à l'aide d'amendements organiques et inorganiques, dont les caractéristiques sont détaillées dans la Figure 6.

FIGURE 35 – Frontières du système



Les frontières du système (voir Figure 35) ont été définies en tenant compte des informations disponibles sur la production des produits, leur transport depuis la zone de fabrication jusqu'à la zone d'épandage, ainsi que les conséquences environnementales associées à leur application.

Pour analyser les impacts, une analyse du cycle de vie (ACV) a été effectuée à l'aide du logiciel SimaPro 9.4.0.2, en utilisant les bases de données Ecoinvent 3 et Agri footprint. La méthode EF 3.0 a été retenue pour évaluer les impacts environnementaux en raison de son efficacité et de sa pertinence pour cette étude.

Il est important de noter que, bien que la production proprement dite du fumier ne soit pas prise en compte dans cette analyse, ce sous-produit bénéfique pour le sol peut également avoir des conséquences notables pour l'environnement, notamment en termes de libération de gaz tels que le méthane, le dioxyde d'azote et l'ammoniac Aguirre-Villegas et al. (2022).

Afin de les inclure dans cette analyse, d'autres caractéristiques du fumier telles que son pourcentage d'azote, son pourcentage de matière sèche, sa quantité d'acides gras volatils (l'acide acétique, l'acide butyrique et l'acide propanoïque) ainsi que le nombre de jours d'incorporation du produit, doivent être pris en compte dans les équations spécifiques. Ces données sont résumées dans la table suivante :

TABLE 25 – Caractéristiques spécifiques du fumier

Masse de fumier total (kg)	Concentration en acides gras volatils (mmol/kg fumier)	Concentration en azote (%)	Taux matière sèche (%)	Surface appliquée (Ha)
60000	23	0,9	100	1

Pour la production de CH₄(Aguirre-Villegas et al. (2022)) :

$$\text{CH}_4 = ((0.17 \cdot \text{Fvfa}) + 0.026) \cdot \text{Acrop} \cdot 0.032$$

Avec :

CH₄ : Nombre de kilogrammes de méthane produit par jour(kg CH₄/jour)

FVFA : concentration en acide gras volatils dans le fumier(mmol/kg de fumier)

Acrop : Surface d'application (Ha)

Pour la production directe de N₂O (Aguirre-Villegas et al. (2022)) :

$$\text{N}_2\text{O} = 0.01 \text{ kg d'azote de fumier}$$

Pour la production de NH₃(Aguirre-Villegas et al. (2022)) :

$$\text{NH}_3 = \left(\frac{\text{TAN} \cdot ((20 + 5 \cdot \text{TS}) \cdot \frac{\text{jours}}{\text{jours}+0.3} \cdot \frac{17}{14})}{100} \right)$$

Avec :

NH₃ : Emissions après application(kg NH₃)

TAN : Quantité totale ammonium dans le fumier (kg NH₃-N)

TS : Quantité matière sèche de fumier (%)

days : nombre de jours à l'incorporation du fumier dans le sol (si ce n'est pas incorporé , on considère que days >7)

Le gypse présente principalement des conséquences environnementales liées à son processus de production, incluant l'extraction et la transformation minières, mais il ne montre pas de dégradation significative dans la nature. Il ne libère a priori pas d'émissions de gaz nocifs pour l'environnement et n'affecte pas de manière négativement les sols ni les eaux souterraines.

Parmi les diverses combinaisons conçues pour traiter les problèmes de sols salins-sodiques, seulement deux d'entre elles ont réussi à produire des résultats comparables aux conditions d'un sol non affecté par la salinité.

Le premier scénario consiste en l'utilisation exclusive de gypse, sans l'ajout d'amendements organiques. Dans cette configuration, la concentration maximale de gypse est appliquée, notée G3.

Dans le deuxième scénario, une combinaison de fumier de bovins et de gypse est étudiée. Dans cette configuration, la même quantité de gypse que dans le premier scénario est utilisée, mais elle est associée à une dose de fumier équivalente à G3F1.

De plus, pour les deux scénarios, la même quantité d'eau de lixiviations est utilisée.

Ainsi, les scénarios suivants peuvent être établis : - Scénario 1 : Impact environnemental de l'utilisation de la modalité G3 - Scénario 2 : Impact environnemental de l'utilisation de la modalité G3F1

TABLE 26 – Description des différents scénarios

Scénarios	Masse de gypse par hectare (kg)	Masse de fumiers par hectare (kg)	Hauteur d'eau à l'hectare par hectare (m)
1	40000	0	0,53
2	40000	60000	0,53

Il est à noter que les quantités de gypse, de fumier et d'eau mentionnées dans la table 26 varient en fonction du niveau de salinité du sol, de la profondeur de remédiation souhaitée et des pratiques de lessivage adoptées. Ces quantités sont spécifiques à une remédiation de 30 cm de profondeur par hectare de sol, avec une densité apparente de 1,39 g/cm³ mesurée sur place, en utilisant la technique de lixiviation par submersion continue.

Il convient de noter que la méthode de submersion continue se distingue des conditions expérimentales employées, du fait qu'en pratique, il peut être ardu de mettre en œuvre une submersion discontinue qui, par nature, s'étend sur plusieurs semaines. En outre, les conditions d'évaporation sur le terrain sont susceptibles de présenter des variations qui peuvent influencer les approches d'irrigation mises en œuvre.

Il est primordial de considérer ces informations lors de la généralisation des résultats pour une exploitation agricole typique, car chaque sol salin possède ses caractéristiques uniques et peut exiger des ajustements spécifiques.

6.6.1 Analyse de l'inventaire

Dans cette étude, l'inventaire prend en compte les diverses étapes liées à l'utilisation du gypse, débutant par son extraction minière et se poursuivant avec son transport en tracteur, suivi de son épandage sur le champ au moyen d'engins agricoles.

En ce qui concerne l'irrigation, les agriculteurs acheminent via des pompes l'eau depuis les lacs situés à proximité, jusqu'à la zone d'intérêt.

TABLE 27 – Inventaire scénario 1

Produit	Unité	Quantité
Extraction minière du gypse	Kg	40000
Transport en tracteur du gypse	tkm	600
Epandage en tracteur du gypse	ha	7,27
Irrigation de surface	m3	5300

L'analyse du Scénario 2 suit une structure similaire à celle du Scénario 1, la seule différence étant l'ajout de fumier sur le champ. Ceci induit la prise en compte d'une nouvelle composante et l'évaluation de ses potentiels impacts. Même si la production de fumier en tant que matière première n'est pas prise en compte dans cette analyse, il est crucial de noter que ce sous-produit, qui apporte des avantages pour la qualité du sol, peut aussi entraîner des conséquences environnementales significatives. Cela s'applique particulièrement aux émissions de gaz tels que le méthane, le dioxyde d'azote et l'ammoniac, ainsi qu'aux aspects liés à son transport et à son épandage sur le champ.

Pour une quantification plus approfondie de ces impacts, il est nécessaire d'intégrer d'autres caractéristiques du fumier, telles que son taux d'azote, son taux de matière sèche, sa concentration en acides gras volatils (tels que l'acide acétique, l'acide butyrique, et l'acide propanoïque), ainsi que la durée pendant laquelle le produit est incorporé.

TABLE 28 – Inventaire scénario 2

Produit	Unité	Quantité
Extraction minière du gypse	Kg	40000
Transport en tracteur du gypse	tkm	600
Epandage en tracteur du gypse	ha	7,27
Irrigation de surface	m3	5300
Transport en tracteur du fumier	Tkm	900
Epandage du fumier	kg	60000
Emissions du fumier en CH4	kg	27,5
Emissions du fumier en NO2	kg	5,4
Emissions du fumier en NH3	kg	363,3

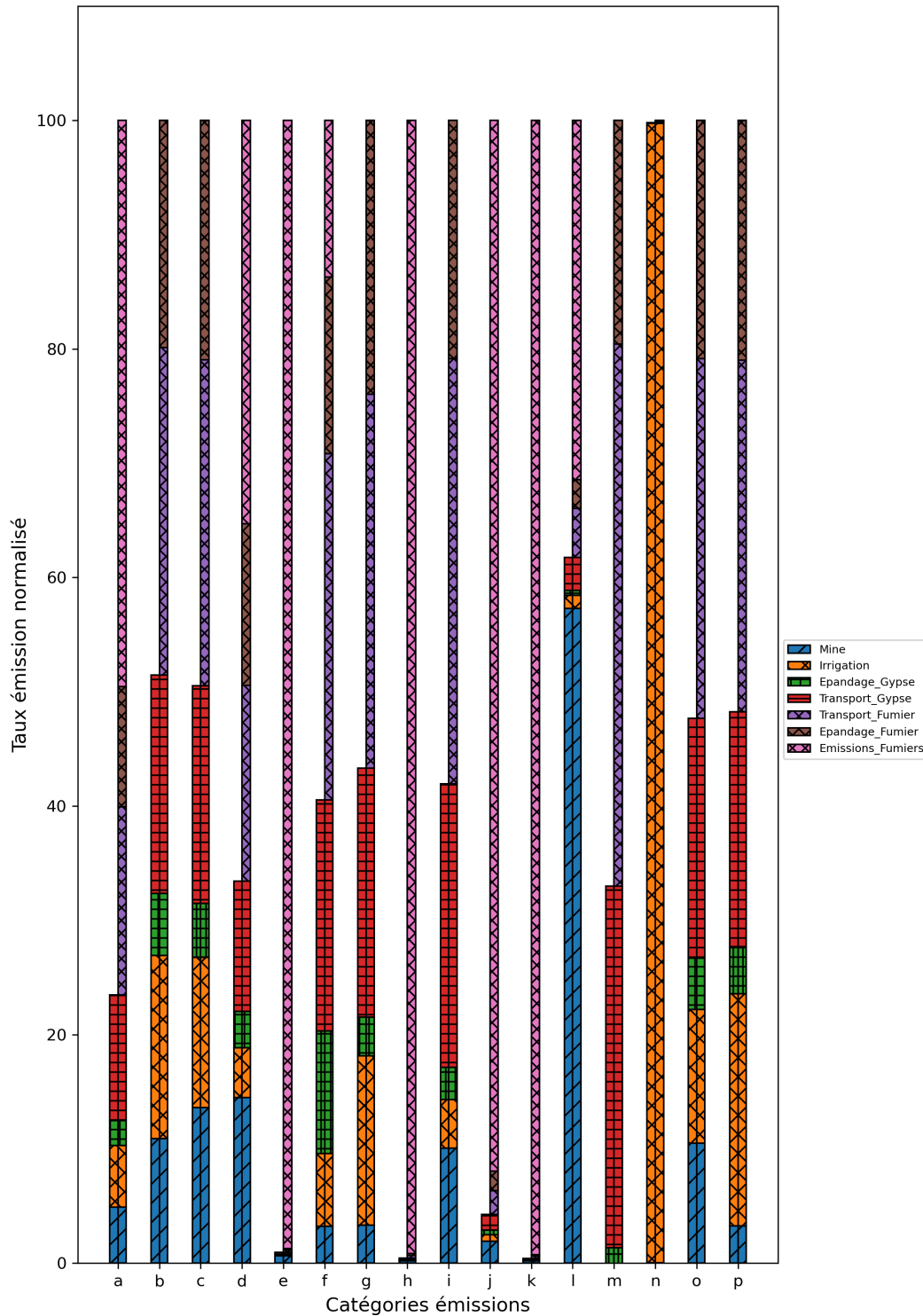


FIGURE 36 – Évaluation des impacts pour les 2 scénarios : a = Changement climatique(kg CO2 eq), b = Appauvrissement de la couche d’ozone : (kg CFC11 eq), c = Radiation ionisante : (kBq U-235 eq), d = Formation d’ozone photochimique(kg NMVOC),e = Incidence des maladies liées aux particules en suspension(inc), f = Toxicité humaine, non cancérigène(CTUh), g = Toxicité humaine, cancérigène(CTUh), h = Acidification(mol H+ eq), i = Eutrophisation, eau douce(kg P eq), j = Eutrophisation, marine(kg N eq), k = Eutrophisation, terrestre (mol N eq), l = Écotoxicité, eau douce(CTUe), m = Utilisation des terres(Pt),n = Utilisation de l’eau (m3 depriv),o = Utilisation des ressources, combustibles fossiles(MJ) et p = Utilisation des ressources, minéraux et métaux(kg Sb eq)

6.6.2 Résultats de l'analyse des 2 scénarios

Les résultats liés à chacun des 2 scénarios sont présentés dans les tableaux 40 et 41.

Dans le premier scénario, comme le montrent les barres cumulatives de gauche, chaque activité doit être prise en compte, car en fonction de la catégorie d'impact examinée, certaines activités se distinguent plus ou moins nettement. Pour les catégories d'impact a, b, c, d, f, g, i, o et p, regroupées sous le terme "groupe 1", tous les processus (exploitation minière, transport, épandage, irrigation) présentent des impacts significatifs. En revanche, pour les catégories l et n, ce sont principalement les opérations minières et l'irrigation qui exercent une influence majeure. Les catégories e, h, j et k ont des impacts négligeables dans le Scénario 1.

Dans ce premier scénario, le transport se distingue des autres activités en raison de la consommation énergétique nécessaire pour transporter les amendements, représentant à lui seul entre 34 % et 59 % des impacts du groupe 1.

En abordant le scénario 2, des observations similaires émergent. Le transport des amendements demeure un élément crucial, mais dans cette configuration, ce sont les émissions de gaz issues du fumier qui deviennent le facteur prédominant. Cette constatation découle de la composition chimique des gaz émis, lesquels dominent nettement les catégories "e", "h", "j" et "k".

Puisque les proportions de fumier utilisées sont supérieures à celles du gypse, le transport et l'épandage du fumier ont un impact encore plus significatif, que ce qui a été constaté avec le gypse.

Avec l'ajout d'un élément supplémentaire dans le scénario 2, la disparité des impacts n'est pas surprenante. L'introduction du fumier entraîne de nouveaux déplacements, le fonctionnement de machines agricoles ainsi que des émissions de gaz.

Par conséquent, l'utilisation du fumier ne peut être ignorée, car ses émissions dépassent même celles générées par le gypse lors des phases d'exploitation minière. Cependant, l'analyse ne permet pas de dégager une tendance claire, car il est constaté que les émissions n'ont pas d'impact sur 8 des 16 catégories d'émissions.

Ainsi, il est possible d'aborder la dernière hypothèse initiale :

H4 : Au sein des amendements locaux tels que le gypse et le fumier de bovins, il est présumable que malgré une qualité de remédiation similaire, leurs impacts environnementaux diffèrent.

Les deux amendements montrent des résultats distincts et significatifs, reflétant les différences inhérentes à leur utilisation. En considérant les actions entreprises et les déplacements impliqués, il est indéniable que l'adoption de ces deux scénarios génère des répercussions environnementales substantielles. Cependant, établir une hiérarchie entre ces deux amendements à travers ces scénarios se révèle complexe.

Il est cohérent de constater qu'introduire un amendement supplémentaire engendre des conséquences environnementales accrues. Toutefois, l'application du fumier suit un schéma semblable à celui du gypse, à l'exception de la répartition plus importante du fumier sur le champ.

La comparaison entre l'impact de l'exploitation minière liée au gypse et les émissions de gaz produites par le fumier reste délicate. Bien que le fumier provoque des émissions plus importantes dans huit catégories d'impact, il n'a aucune incidence sur huit autres catégories. Ainsi, établir une hiérarchie entre les deux amendements s'avère difficile. En ce qui concerne les scénarios, la différence réside simplement dans l'introduction d'un produit supplémentaire, ce qui entraîne une augmentation globale des impacts.

En fin de compte, pour améliorer ces scénarios, il serait opportun d'examiner en détail les aspects spécifiques de cette analyse. En ce qui concerne les scénarios, la conclusion la plus marquante concerne l'étendue des mesures potentielles à mettre en œuvre. Comme expliqué précédemment, à l'exception de quatre catégories d'impact, l'ensemble des processus impliqués dans la remédiation engendre des conséquences significatives pour l'évaluation finale. Par conséquent, cibler des améliorations dans plusieurs domaines et les encourager est envisageable.

7 Conclusions et Recommandations

Pour conclure cette étude, revenons aux objectifs principaux énoncés précédemment :

- **H1 : Il existe une combinaison idéale de gypse et de fumier de bovins qui permet de remédier aux sols salins-sodiques de la haute vallée de Cochabamba.**
- **H2 : Après lixiviations et applications des traitements les sols, montrent certaines caractéristiques chimiques significativement différentes en fonction de leur profondeur**
- **H3 : L'utilisation d'amendements et de la combinaison optimale permet d'améliorer les rendements agricoles des plantes fourragères**
- **H4 : Au sein des amendements locaux tels que le gypse et le fumier de bovins, il est présumable que malgré une qualité de remédiation similaire, leurs impacts environnementaux diffèrent.**

Les résultats liés aux deux premières hypothèses ont clairement montré que toutes les modalités utilisées ont permis d'améliorer considérablement les conditions du sol par rapport au sol témoin non amendé.

L'utilisation d'amendements organiques et inorganiques pour remédier les sols salins-sodiques est donc essentiel pour éviter la transformation de ces sols en sols sodiques aux propriétés agronomiques moins intéressantes.

Certains scénarios, tels que G3 et G3F1, ont donné des résultats satisfaisants, se rapprochant des limites de référence fixées pour l'ESP et le SAR.

Les résultats indiquent que la dose de gypse initialement recommandée (G3) est la plus efficace pour remédier à ce sol. Cependant, la dose G3 diminue significativement la concentration des éléments potassium et magnésium, qui sont importants pour l'équilibre du sol et la plante. Par conséquent, l'apport de gypse devrait idéalement être combiné avec une fertigation en magnésium et potassium, même si cette solution s'avère onéreuse.

Ces constatations sont cohérentes avec les conclusions d'une étude antérieure menée sur des sols de la Haute vallée Froidmont (2018). Cette étude avait révélé l'efficacité du gypse lorsqu'il était utilisé à une concentration équivalente à G3. Dans cette recherche antérieure, l'application du gypse avait permis de réduire l'ESP à 27%, ainsi que de diminuer significativement le pH et l'EC par rapport à la modalité non traitée.

Toutefois, les résultats obtenus dans notre étude sont légèrement plus favorables, ce qui peut être attribué à divers facteurs. Tout d'abord, les sols utilisés dans notre expérience présentaient des conditions moins difficiles, et les modalités de lixiviation et les quantités d'eau utilisées n'étaient pas identiques. L'intervalle de lixiviation choisi dans l'étude précédente était sans doute trop important, entraînant un assèchement du sol et réduisant sa perméabilité ainsi que sa tolérance à la lixiviation.

Le fumier est également efficace, avec des coûts de production largement inférieurs à ceux du gypse Chaganti et al. (2015). Utiliser une faible dose de fumiers permet de conserver davantage de potassium et magnésium tout en assurant une lixiviation correcte du sodium.

Cette observation trouve également un écho dans une étude similaire menée par Foronda (2022). Dans cette recherche, différentes combinaisons d'amendements organiques ont été étudiées en conjonction avec l'ajout de fumier. Plusieurs conclusions similaires peuvent être soulignées. Tout d'abord, elle confirme le phénomène de dispersion observé dans les sols non amendés, ce qui entraîne un ralentissement de la percolation de l'eau à travers la colonne du sol et la migration des sels.

Cependant, dans cette étude, l'équivalent de la modalité G3F2 a été identifié comme générant l'amélioration des propriétés les plus élevées. Toutefois, comme l'indiquent les conclusions de l'étude Foronda and Colinet (2022), ce résultat est étroitement lié aux propriétés spécifiques du sol et du fumier utilisés. Dans leur expérience, l'association du gypse et du fumier semble agir en synergie pour améliorer l'élimination des ions sodium par le processus de lixiviation. Les résultats obtenus sont encore meilleurs et permettent d'atteindre des niveaux de SAR aussi bas que 5%.

Concernant les différences de certaines caractéristiques chimiques entre les échantillons de surface et de profondeur, il a été constaté que l'EC est significativement plus élevée en profondeur qu'en surface, ce qui reste cohérent avec le principe de la lixiviation et de la répartition des ions en fonction de la profondeur du profil Askri et al. (2022).

Pour le pH, la répartition des résultats est uniforme et ne montre pas de tendance à une acidification significative en profondeur. La répartition spécifique des ions dans le sol suscite une attention particulière. En effet, en fonction de leur nature, ils ne se mobilisent pas de manière identique : certains ions semblent plus mobiles, tels que le

magnésium et le sodium, tandis que d'autres, comme le calcium ou le potassium, ont tendance à se répartir de façon plus homogène dans le sol, malgré les passages répétés d'eau.

Ces observations permettent de conclure qu'il existe des différences significatives de certaines caractéristiques chimiques entre les horizons de surface et de profondeur du sol. Ces différences ne concernent pas toutes les caractéristiques chimiques du sol, mais elles sont suffisamment marquées pour identifier ces deux échantillons comme étant distincts. Cela souligne l'importance d'effectuer des sondages à différentes profondeurs lors de la remédiation des sols salins-sodiques, afin d'adapter les traitements en fonction des utilisations agronomiques futures.

Les résultats concernant le troisième objectif ont montré que l'utilisation d'amendements améliore les rendements agricoles par rapport au sol témoin non amendé. La plupart des modalités ont montré un gain de rendement, à l'exception de celle utilisant uniquement une forte dose de fumier, qui a entravé le développement des plantes. Il est intéressant de noter que cette amélioration des rendements agricoles n'est pas spécifiquement liée à la remédiation du sol, car certaines modalités ont montré de bons rendements malgré des résultats moins concluants en termes d'analyses chimiques du sol.

Enfin, la dernière hypothèse permet de mettre en évidence une distinction claire entre les deux configurations les plus performantes. Le deuxième scénario, G3F1, qui fait appel à davantage d'amendements, demeure plus impactant que le scénario initial, car toutes les étapes contribuant à l'introduction du fumier depuis sa production jusqu'à son incorporation dans le sol présentent des impacts significatifs. Néanmoins, il n'est pas possible d'établir une hiérarchie entre les divers amendements. Ces observations offrent une piste pour des investigations futures visant à optimiser la remédiation des sols salins-sodiques tout en minimisant leur empreinte environnementale.

8 Bibliographie

Références

- Abrol, I. P., Yadav, J. S. P., and Massoud, F. I. (1988). *Salt-Affected Soils and Their Management*. FAO.
- Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A., Rakobitsch, N., Wattiaux, M. A., and Silva, E. (2022). Farm level environmental assessment of organic dairy systems in the u.s. *Journal of Cleaner Production*, 363 :132390.
- Ahi, S. M. and Powers, W. L. (1938). Salt tolerance of plants at various temperatures. *Plant Physiology*, 13 :767–789.
- AHMED, S., SWINDALE, L. D., and EL-SWAIFY, S. A. (1969). Effects of adsorbed cations on physical properties of tropical red earths and tropical black earths. *Journal of Soil Science*, 20 :255–268.
- Alaoui, M., Alaoui, M. M., Jourmi, L. E., Ouazane, A., Lazar, S., Antri, S. E., Zahouily, M., and Hmyene, A. (2013). Effet du stress salin sur la germination et la croissance de six variétés marocaines de blé (effect of salt stress on germination and growth of six moroccan wheat varieties). *J. Mater. Environ. Sci*, 4 :997–1004.
- Askri, B., Khodmi, S., and Bouhlila, R. (2022). Impact of subsurface drainage system on waterlogged and saline soils in a saharan palm grove. *CATENA*, 212 :106070.
- Asma, N. (2017). etude de la viabilité et vigueur des semences de blé pendant le stockage.
- Aubert, G. (1976). Les sols sodiques en afrique du nord. *Annales de l'Institut National Agronomique - El Harrach*, 7 :185–196.
- Ayers, R. S., Westcot, D. W., Food, and of the United Nations., A. O. (1985). *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bourque, A. (2000). Les changements climatiques et leurs impacts. *Vertigo*.
- Chaganti, V. N., Crohn, D. M., and Šimůnek, J. (2015). Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate sar reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158 :255–265.
- Chari, M. M., Nemati, F., Afrasiab, P., Kakhkhmoghaddam, P., and Davari, A. (2012). Prediction of evaporation from shallow water table using regression and artificial neural networks. *Journal of Agricultural Science*, 5.
- Daliakopoulos, I., Tsanis, I., Koutroulis, A., Kourgialas, N., Varouchakis, A., Karatzas, G., and Ritsema, C. (2016). The threat of soil salinity : A european scale review. *Science of The Total Environment*, 573 :727–739.
- Dörfliger, N., Schombrugk, S., Bouzit, M., Petit, V., Caballero, Y., Durst, P., and Douez, O. (2010). Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en métropole. 82 ill., 2 ann.
- Fallavier, P. and Olivin, J. (1988). Etude expérimentale de la dynamique du potassium et du magnésium dans quelques sols tropicaux représentatifs des zones de culture du palmier à huile. *Oléagineux*, 43 :93–105.
- FAO (2022). *Halt soil salinization, boost soil productivity*. FAO.
- Farahani, E., Emami, H., Keller, T., Fotovat, A., and Khorassani, R. (2018). Impact of monovalent cations on soil structure. part i. results of an iranian soil. *International Agrophysics*, 32 :57–67.
- Flowers, T. J. and Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes*. *New Phytologist*, 179 :945–963.
- Foronda, D. A. (2022). Reclamation of a saline-sodic soil with organic amendments and leaching. page 56. MDPI.
- Foronda, D. A. and Colinet, G. (2022). Combined application of organic amendments and gypsum to reclaim saline-alkali soil. *Agriculture*, 12 :1049.
- Froidmont, C. (2018). Contribution to the identification of solutions for the remediation of salt-affected soils of the high valley of cochabamba in bolivia : use of gypsum, sulphur and suaeda foliosa.
- Gangwar, P., Singh, R., Trivedi, M., and Tiwari, R. K. (2020). *Sodic Soil : Management and Reclamation Strategies*, pages 175–190. Springer Singapore.

- Gay, S., Louwagie, G., Sammeth, F., Ratering, T., Marechal, B., Prosperi, P., Rusco, E., Terres, J.-M., Velde, M. V. D., Baldock, D., Bowyer, C., Cooper, T., Fenn, I., Hagemann, N., Prager, K., Heyn, N., and Schuler, J. (2009). Final report on the project 'sustainable agriculture and soil conservation (soco)'. JRC51775.
- Genot, V., Colinet, G., Brahy, V., and Bock, L. (2009). L'état de fertilité des terres agricoles et forestières en région wallonne (adapté du chapitre 4 - sol 1 de « l'État de l'environnement wallon 2006–2007 »). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13.
- Hanson, B. R., Grattan, S. R., and Fulton, A. (2006). Irrigation and drainage specialist plant-water relations specialist.
- Haouala, F., Hanen, F., and Hadj, S. (2007). Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na^+ , K^+ et Ca^{2+}) et du chlore (Cl^-) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais et du chiendent. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 11.
- Hussain, N., Hassan, G., Arshadullah, M., and Mujeeb, F. (2001). Evaluation of amendments for the improvement of physical properties of sodic soil.
- Lebron, I., Suarez, D. L., and Yoshida, T. (2002). Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Science Society of America Journal*, 66 :92–98.
- Mace, J. E., Amrhein, C., and Oster, J. D. (1999). Comparison of gypsum and sulfuric acid for sodic soil reclamation. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 13 :171–188.
- Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L. R., Pazira, E., and Neshat, A. (2013). Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (i) : Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural Water Management*, 120 :30–38.
- Marchuk, A. (2013). Effect of cations on structural stability of salt-affected soils.
- Metternicht, G. (1996). Detecting and monitoring land degradation features and processes in the cochabamba valleys, bolivia : a synergistic approach.
- Montoroi, J.-P. (1993). Cours "les sols salés".
- Montoroi, J.-P. (1997). Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol : application à un sol sulfaté acide salé de basse-casamance (sénégal). *Etude et Gestion des Sols*, 4 :279–298.
- Montoroi, J.-P. (2017). La salinisation des écosystèmes : de la dégradation insidieuse à la remédiation continue par les hommes. *Liaison Energie Francophonie*, 105 :67–69.
- Montoroi, J.-P. (2018). *Salinisation des sols et gestion des sols salés*, pages 112–139. ISTE.
- Niu, G., Rodriguez, D. S., and Starman, T. (2010). Response of bedding plants to saline water irrigation. *HortScience*, 45 :628–636.
- Oster, J. (1982). Gypsum usage in irrigated agriculture : A review. *Fertilizer Research*, 3 :73–89.
- Qadir, M., Qureshi, R. H., and Ahmad, N. (1996). Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and leptochloa fusca. *Geoderma*, 74 :207–217.
- Rochard, J. (2023). Arido-viticulture dans le contexte de changement climatique : concept, bases pratiques et exemples des vignobles de lanzarote et santorin. *BIO Web of Conferences*, 56 :01001.
- Saidi, D., Bissonais, Y. L., Duval, O., Daoud, Y., and Halitim, A. (2004). Effect of exchangeable sodium and saline concentration on soil physics properties of cheliff plain (algeria) resumen efecto del sodio intercambiable y de la concentración salina sobre las propiedades físicas de los suelos de la planicie del cheliff (argelia).
- Shannon, M. C. and Grieve, C. M. (1998). Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78 :5–38.
- Singh, A. (2015). Soil salinization and waterlogging : A threat to environment and agricultural sustainability. *Ecological Indicators*, 57 :128–130.

- Srivastava, P. K., Gupta, M., Shikha, Singh, N., and Tewari, S. K. (2016). Amelioration of sodic soil for wheat cultivation using bioaugmented organic soil amendment. *Land Degradation Development*, 27 :1245–1254.
- Trung, L. D., Zhou, J., Hmidi, D., Madani, I., Zhour, Houssein, and et al. (2022). Tolérance des plantes à la salinité des sols.
- Tóth, G., Adhikari, K., Varallyay, G. Y., Toth, T., Bódis, K., and Stolbovoy, V. (2008). Updated map of salt affected soils in the european union. *Threats to Soil Quality in Europe*, pages 65–77.
- Valles, V., Valles, A.-M., and Dosso, M. (1983). Irrigation des sols salés et doses de lessivage. *Cahier de l'ORSTOM série Pédologie*, 22.
- Weil, R. R. and Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. Pearson Education, 15th edition.
- Xu, C. and Mou, B. (2015). Evaluation of lettuce genotypes for salinity tolerance. *HortScience*, 50 :1441–1446.
- Xu, X., Huang, G., Sun, C., Pereira, L. S., Ramos, T. B., Huang, Q., and Hao, Y. (2013). Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield : Searching for a target depth for irrigated areas in the upper yellow river basin. *Agricultural Water Management*, 125 :46–60.

9 Annexes

9.1 Annexes A : Analyse complémentaire pour la mesure du pH et EC final des lixiviations

TABLE 29 – "Résultats de l'analyse statistique complémentaire : Moyennes des pH et EC des lixiviats finaux, avec test de Tukey"

Modalités	pH	Groupes	EC	Groupes
Temoin	9,51	a	3,81	ab
G1	8,50	bc	2,36	b
G2	8,05	ef	4,88	ab
G3	7,97	ef	5,50	ab
F1	8,73	b	2,39	b
F2	8,28	cdef	2,80	b
F3	8,30	cde	4,01	ab
G1F1	8,50	bcd	3,48	ab
G1F2	8,22	cdef	3,40	ab
G1F3	8,25	cdef	4,78	ab
G2F1	7,96	ef	5,47	ab
G2F2	8,02	ef	4,82	ab
G2F3	7,86	f	7,39	a
G3F1	7,89	ef	6,29	ab
G3F2	7,95	ef	5,34	ab
G3F3	8,10	def	5,98	ab

9.2 Annexes B : Analyse complémentaire entre les échantillons de surface et de profondeur

TABLE 30 – Résultats de l'analyse statistique complémentaire des pH et des EC moyens en fonction de la profondeur

Caractéristiques	pH Surface	pH Profondeur	p-value	EC Surface	Ec Profondeur	p-value
Temoin	10.07	10.35	0,000019***	320.2	464.8	0,0000005***
G1	9.28	9.82	0,019*	177.2	252.6	0,008**
G2	8.75	8.74	0,87	274.6	549.8	0,007**
G3	8.41	8.58	0,04*	671.6	849.8	0,41
F1	9.24	9.34	0,67	208.3	303.2	0,17
F2	9.35	9.33	0,89	235.2	232.8	0,92
F3	9.67	9.56	0,57	370.4	348.2	0,68
G1F1	8.83	9.38	0,018*	274.2	252.5	0,71
G1F2	9.28	9.27	0,93	216.7	217.7	0,97
G1F3	8.97	9.08	0,392	215.9	283	0,02*
G2F1	8.66	8.46	0,15	249.4	503	0,003**
G2F2	8.35	8.46	0,5	416	478.7	0,42
G2F3	8.46	8.31	0,22	825.3	922	0,68
G3F1	8.15	8.11	0,21	884.7	1060.5	0,14
G3F2	8.36	8.35	0,96	676.2	827.2	0,59
G3F3	8.34	8.31	0,83	775.2	911.7	0,44

TABLE 31 – "Résultats de l'analyse statistique complémentaire des moyennes de Ca et K en relation avec la profondeur"

Caractéristiques	Ca Surface	Ca Profondeur	p-value	K Surface	K Profondeur	p-value
Temoin	1.40	1.39	0.63	0.43	0.43	0.98
G1	1.98	1.91	0.22	0.27	0.32	0.06
G2	2.10	2.22	0.20	0.19	0.17	0.18
G3	2.43	2.86	0.047*	0.15	0.13	0.082
F1	1.27	1.24	0.71	0.33	0.40	0.35
F2	1.28	1.21	0.14	0.44	0.45	0.82
F3	1.44	1.39	0.31	0.55	0.56	0.67
G1F1	2.05	1.94	0.04	0.30	0.36	0.014*
G1F2	1.63	1.72	0.13	0.35	0.37	0.31
G1F3	1.69	1.69	0.90	0.42	0.43	0.63
G2F1	1.89	1.93	0.61	0.27	0.26	0.42
G2F2	2.03	1.97	0.48	0.28	0.31	0.20
G2F3	2.30	2.39	0.71	0.41	0.42	0.71
G3F1	2.71	2.75	0.80	0.24	0.26	0.47
G3F2	2.36	2.34	0.93	0.29	0.32	0.25
G3F3	2.54	2.55	0.95	0.37	0.36	0.77

TABLE 32 – Résultats de l'analyse statistique complémentaire des moyennes de Mg et Na en relation avec la profondeur

Caractéristiques	Mg Surface	Mg Porfondeur	p-value	Na Surface	Na Profondeur	p-value
Temoin	0.16	0.15	0.0019**	0.67	1.01	0.0020***
G1	0.13	0.12	0.048*	0.24	0.46	0.0056**
G2	0.13	0.09	0.011*	0.15	0.19	0.17
G3	0.12	0.08	0.00046***	0.14	0.18	9.88e-05***
F1	0.17	0.15	0.44	0.30	0.47	0.25
F2	0.18	0.15	0.048*	0.34	0.36	0.61
F3	0.22	0.19	0.073	0.65	0.64	0.96
G1F1	0.17	0.16	0.70	0.28	0.42	0.035*
G1F2	0.18	0.15	0.012*	0.32	0.35	0.37
G1F3	0.19	0.15	0.00055***	0.31	0.37	0.11
G2F1	0.16	0.13	0.0016**	0.17	0.27	0.02*
G2F2	0.15	0.14	0.41	0.20	0.28	0.003**
G2F3	0.18	0.14	0.04*	0.49	0.43	0.58
G3F1	0.13	0.12	0.011*	0.15	0.22	0.022*
G3F2	0.15	0.13	0.05	0.24	0.31	0.18
G3F3	0.16	0.15	0.29	0.33	0.36	0.45

TABLE 33 – Résultats de l'analyse statistique complémentaire des moyennes du SAR et ESP en relation avec la profondeur

Modalités	SAR surface	SAR profondeur	p-value	ESP surface	ESP profondeur	p-value
Temoin	76,39	114,80	0,0005***	52,55	62,61	0,0016**
G1	23,39	45,32	0,0058**	24,33	39,16	0,0066**
G2	14,22	17,68	0,1934	16,32	19,65	0,2034
G3	12,50	15,24	0,0038**	14,62	17,45	0,0032**
F1	35,53	54,98	0,2138	33,63	42,77	0,1716
F2	39,69	43,99	0,4127	36,10	38,66	0,4095
F3	71,16	71,74	0,9637	49,98	50,22	0,9592
G1F1	26,76	40,93	0,0337*	27,51	36,79	0,0251*
G1F2	33,43	36,50	0,4755	32,14	34,31	0,4442
G1F3	32,15	38,40	0,0699	31,37	35,47	0,0733
G2F1	16,86	27,04	0,0230*	18,97	27,49	0,0204*
G2F2	18,84	26,97	0,0047**	20,86	27,69	0,0049**
G2F3	43,52	38,60	0,4710	38,25	35,64	0,4787
G3F1	12,93	18,36	0,0140*	15,04	20,42	0,0124*
G3F2	21,91	28,11	0,2567	22,96	28,36	0,2419
G3F3	28,48	31,07	0,3939	28,86	30,61	0,4224

9.3 Annexe C : Analyse statistique complémentaire pour les AV1 étudiées

TABLE 34 – Résultats statistiques additionnels des moyennes de pH

Facteurs	Pr(>F)surface	Pr(>F)profondeur
Gypse : Fumiers==0	9.82e-17***	1.54e-22***
Gypse : Fumiers==1	4.54e-08***	3.31e-15***
Gypse : Fumiers==2	1.3e-11***	9.04e-13***
Gypse : Fumiers==3	1.21e-12***	9.22e-15***

TABLE 35 – Résultats statistiques additionnels des moyennes de l'EC

Facteurs	Pr(>F) surface	Pr(>F) surface
Gypse : Fumiers==0	0.00071***	1.58e-06***
Gypse : Fumiers==1	3.98e-06***	7.31e-10***
Gypse : Fumiers==2	0.0011**	9.056e-08***
Gypse : Fumiers==3	1.51e-05***	2.97e-09***

TABLE 36 – Résultats statistiques additionnels des moyennes du Ca

Facteurs	Pr(>F)surface	Pr(>F)profondeur
Gypse : Fumiers==0	4.36e-11***	1.12e-19***
Gypse : Fumiers==1	3.96e-16***	1.22e-19***
Gypse : Fumiers==2	4.90e-13***	8.34e-16***
Gypse : Fumiers==3	2.48e-14***	5.41e-17***

TABLE 37 – Résultats statistiques additionnels des moyennes du K

Facteurs	Pr(>F)surface	Pr(>F)profondeur
Gypse : Fumiers==0	1.08e-15***	3.35e-14***
Gypse : Fumiers==1	0.0056**	8.26e-06***
Gypse : Fumiers==2	1.12e-08***	3.78e-05***
Gypse : Fumiers==3	6.30e-10***	7.23e-08***

TABLE 38 – Résultats statistiques additionnels des moyennes du Mg

Facteurs	Pr(>F)surface	Pr(>F)profondeur
Gypse : Fumiers==0	1.69e-05***	1.18e-08***
Gypse : Fumiers==1	1.87e-05***	1.13e-05***
Gypse : Fumiers==2	2.25e-05***	0.097
Gypse : Fumiers==3	4.40e-09***	2.07e-06***

TABLE 39 – Résultats statistiques additionnels des moyennes du Na

Facteurs	Pr(>F)surface	Pr(>F)profondeur
Gypse : Fumiers==0	1.32e-14***	4.32e-12***
Gypse : Fumiers==1	0.011*	0.48
Gypse : Fumiers==2	0.03*	0.80
Gypse : Fumiers==3	8.16e-09***	0.0081**

9.4 Annexe D : Résultats des scénarios

TABLE 40 – Résultats de l'impact environnemental pour le scénario 1

	Unités	Irrigation	Epandage du gypse	Transport du gypse	Processus minier
A	kg CO2 eq	110,68	44,55	224,83	100,29
B	kg CFC11 eq	2,37E-05	7,99E-06	2,82E-05	1,61E-05
C	kBq U-235 eq	6,36	2,29	9,21	6,59
D	kg NMVOC	0,67	0,49	1,75	2,22
E	inc	9,11E-06	1,79E-06	1,13E-05	5,01E-05
F	CTUh	2,24E-06	3,78E-06	7,10E-06	1,13E-06
G	CTUh	1,92E-07	4,37E-08	2,83E-07	4,30E-08
H	(mol H+ eq)	0,66	0,41	1,69	2,17
I	(kg P eq)	8,52E-04	5,58E-04	4,94E-03	2,00E-03
J	(kg N eq)	0,22	0,16	0,53	0,75
K	mol N eq	2,39	1,75	5,88	10,52
L	CTUe	1749,28	687,13	4455,18	89010,84
M	Pt	247,16	798,71	2915,86	-921,02
N	m3 depriv	35090,41	3,55	27,07	11,96
O	MJ	1501,22	576,08	2692,11	1345,27
P	kg Sb eq	2,58E-03	5,22E-04	2,60E-03	4,15E-04

TABLE 41 – Résultats de l'impact environnemental pour le scénario 2

	Unités	Irrigation	Epandage du gypse	Transport du gypse	Processus minier	Transport du fumier	Epandage du fumier	Emissions du fumier
A	kg CO2 eq	110,68	44,55	224,83	100,29	337,24	215,05	1013,91
B	kg CFC11 eq	2,37E-05	7,99E-06	2,82E-05	1,61E-05	4,24E-05	2,94E-05	0
C	kBq U-235 eq	6,36	2,29	9,21	6,59	13,81	10,13	0
D	kg NMVOC	0,67	0,49	1,75	2,22	2,62	2,17	5,40
E	inc	9,11E-06	1,79E-06	1,13E-05	5,01E-05	1,69E-05	8,82E-06	7,64E-03
F	CTUh	2,24E-06	3,78E-06	7,10E-06	1,13E-06	1,06E-05	5,43E-06	4,82E-06
G	CTUh	1,92E-07	4,37E-08	2,83E-07	4,30E-08	4,24E-07	3,11E-07	0
H	(mol H+ eq)	0,66	0,41	1,69	2,17	2,53	1,81	1101,12
I	(kg P eq)	8,52E-04	5,58E-04	4,94E-03	2,00E-03	7,41E-03	4,15E-03	0
J	(kg N eq)	0,22	0,16	0,53	0,75	0,80	0,66	35,52
K	mol N eq	2,39	1,75	5,88	10,52	8,82	7,31	4916,48
L	CTUe	1749,28	687,13	4455,18	89010,84	6682,78	3906,71	48833,04
M	Pt	247,16	798,71	2915,86	-921,02	4373,79	1804,41	0
N	m3 depriv	35090,41	3,55	27,07	11,96	40,60	23,34	0
O	MJ	1501,22	576,08	2692,11	1345,27	4038,17	2672,21	0
P	kg Sb eq	2,58E-03	5,22E-04	2,60E-03	4,15E-04	3,91E-03	2,66E-03	0