



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Faculté des sciences

Département de Sciences Agronomiques

En Vue de l'obtention du Diplôme de Master

En Sciences Agronomiques

Spécialité : Sciences de sol

Thème



La conception de bio filtre pour la salinité du sols

Présenté par:

- Wafa Hamel
- Hadjer lezrak
- Ikram Madjmaj

Soutenu devant le jury :		
Président : BOUNAB Ouarda	M.C.B	UNIV SKIKDA
Encadreur : Hannachi Abd elhakim	M.C.A	UNIV SKIKDA
Examineur : Bala sahima	M.C.B	UNIV SKIKDA

Année Universitaire :2024-2025

Remerciements

remerciements

Avant toute chose, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant et le Miséricordieux, pour nous avoir accordé la santé, la force, le courage, la volonté et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au **Dr Hannachi Abdelhakim** pour nous avoir proposé ce sujet de recherche à la fois pertinent et passionnant. Nous avons grandement apprécié ses qualités scientifiques, humaines et son optimisme constant tout au long de ce parcours. Sa disponibilité, son encadrement bienveillant et ses conseils avisés ont été pour nous d'un soutien inestimable. Ce fut un réel privilège de travailler sous sa direction.*

*Nous remercions également **Dr Bala Sahima** et **Dr Bounab Ouarda** d'avoir accepté, malgré leurs nombreuses responsabilités, de faire partie du jury de soutenance. Leur implication et leur regard critique apportent une valeur ajoutée à ce travail, et nous leur en sommes sincèrement reconnaissants.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à mon père et à ma mère.

Je leur dis merci maman du fond du coeur pour ton éducation, ton sacrifice, ton assistance et pour ce tu m'as fait et qui m'a permis d'arriver à cette réussite et à ce bonheur, avec toute ma fidélité et tout mon amour pour mon père, je te dis merci mille fois mes parents.

Dédicaces *kram.M*

Dédicaces

A ma chere mere fadlla

Amon pere nouar

*Dons le merite, les sacrifices et les qualites humaines m'ont permis de
vivre ce jour.*

A mes freres et ma sœurs

Mohamed, Ahmed, Houcine, Sara

A tous les gens m'aiment

Dédicaces Hadjer.L

Dédicaces

*Merci Allah de m'avoir donne la capacité et de récrire et de réfléchi,
la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.*

*Je dedie ce modeste travail à celle qui ma donnée la vie le symbole de
tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite a*

ma mère.

***Amon père,** qui a été mon ombre durant tous les années des études et
qui a veillé au long de ma vie à m'encourager, me donner l'aide et a
me protéger.*

A qui je renforce ma résolution

à mon frères Ammar et achraf

à mon frères Mohamed et mostapha

*à tous mes frères et à ma famille, mes amis(Ikram,Hadjer,Sara) et tous
ceux que j'aime.*

Je dédis ce travail

Wafa.H

Remerciements	/
Dédicaces	/
Introduction Générale.....	1
Chapiter :1 La salinité du sols.....	4
I.1.Historique	4
I.2 Définitions La salinisation :	4
I.3 Causes de la salinisation :.....	4
I.3.1 Origine de la salinité :.....	5
I.3.1.1 La salinisation primaire :	5
I.3.1.2 La salinisation secondaire :.....	5
I.4 Méthodes d'estimation de la concentration en sel :.....	7
I.4.1 Conductivité électrique :	7
I.4.2 Quantité de sodium échangée :	7
I.4.3 Quelques sels solubles dans le sol :.....	7
I.5 Effet de la salinité sur les plantes :.....	7
I.5.1 Effet de la salinité sur la germination :	7
I.5.2 Effets de la salinité sur la croissance et la production des cultures :	8
I.5.3 Effets de l'irrigation avec une eau salée sur le sol :.....	8
I.5.4 Résistance des palmiers à la salinité :.....	9
I.6 Type de sols saline :	9
I.6.1 Sols saline de type solonjak :	9
I.6.2 Les sols solonites :	9
I.6.3 Réhabilitation des sols salins :	9
I.7 Classification du sols salin :	10
I.7.1 La salinité dans le monde	10
I.7.2 Dans l'Algérie :.....	11
Conclusion :	12
Chapitre 02 : Généralité sur le bio filtre du sol.....	14
Introduction	14
II.1 Histoire de la technologie.....	14
II.2 Sol Biofiltration contre. Technologies conventionnelles :.....	16

II.3 Comparaisons de coûts :	17
II.4 Mécanismes de dégradation des gaz traces dans Sols Biofiltration :	18
II.4.1 Paramètres d'ingénierie :	20
II 4.2. Limites de la biofiltration des sols :	23
II.5 Résultats de la purification de l'air pour les bio filtres de sol :.....	24
II.6 Espace vie Soutien Recherche: Combiner les plantes avec la biofiltration du sol :	25
II.7 Orientations futures des applications environnementales de la biofiltration des sols :.....	29
II.7.1. Intérieur Air Purification :.....	29
II.7.2. Industriel Odeur Élimination et Air Purification :	29
II.7.3. Réduction de Mondial Échauffement Contributions depuis Méthane (Biogaz) :	30
II.7.4 Prévention de Toxique Gaz Libérer Accidents :	30
Conclusions	32
Chapitre III :.....	34
Materiel	34
Objectif de l'étude	34
Site d'expérimentation	34
Conditions de travail et matériel de laboratoire	34
Les substrats utilisés	34
Matériel végétal.....	35
Méthodes	35
Analyse physico-chimique du sol.....	35
Conduite de l'expérience.....	37
.Facteurs étudiés	40
Analyse des données statistiques.	40
Résultats :.....	42
Résultats d'analyse d'échantillons de sol :.....	42
Impact de différentes concentrations de Nacl sur la conductivité électrique dans les cultures de pois et pois de chiche	45
Impact de différentes concentrations de Nacl sur le PH dans les cultures de pois et pois de chiche	50
Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tiges des cultures de pois et pois de chiche	56

Sommaire

Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles des cultures de pois et pois de chiche	62
Discussion.....	68
Conclusion.....	70
Référence et bibliographique :	72

Liste de figure :

Figure 1 : La salinité visible d'un sol	04
Figure 2 : Salinité secondaire	05
Figure 03 : La salinité dans le monde	11
Figure 04 : Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie (FAO, 2005).	11
Figure 05 : Schématique de un bio filtre.	17
Figure06 : photographier de aérateur tuyaux menant dans un sol ou biofiltre à compost (d mahtsen 2011)	17
Figure 07 : Un céramique perler bio filtre pour contrôle de phase aérienne benzène.	24
Figure 08 : Débit d'air motifs dans le Biosphère 2	28
Figure 09 : Le schématique diagramme de un décharge avec composte plus bio filtre pour contrôle de méthane émissions	31
Figure 10 :Graines de pois chiche après germination (photo personnelle ,2025)	38
Figure 11 :Graines de pois chiche après germination(photo personnelle ,2025)	38
Figure 12 : Semis des graines germés (photo personnelle ,2025)	38
Figure 13 : Plant de pois chiche traité avec NaCl +l'eau distillé +spirogyre(photo personnelle ,2025)	39
Figure 14 : Plant de pois chiche traité avec NaCl +l'eau distillé + gypse(photo personnelle ,2025)	39
Figure 15 : Échantillons de sol analysés et utilisés dans les cultures de pois et de pois chiche	44
Figure 16 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur la conductivité électrique dans la culture de pois	45
Figure 17 : Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche.	45
Figure 18 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois	50
Figure 19 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois de chiche.	50
Figure 20 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tiges de pois	56
Figure 21 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tiges de pois de chiche	56
Figure 22 :Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois	62
Figure 23 :Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois de chiche	62

Liste de tableau :

Tableau 01 : Répartition régional des sols salins et sodiques en million d'hectares.	06
Tableau 02 : Classification de la salinité des sols.	10
Tableau 03 : Coût comparaisons de différent méthodes de air purification à traiter 10^5 pieds cubes de air, aux États-Unis dollars.	18
Tableau 1 . Doses de NaCl appliquées aux plants de pois et de fèves	39
Tableau 2 . Résultats d'analyse des échantillons de sol	42
Tableau 3 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (spirogyre)	47
Tableau 4 .Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (spirogyre)	47
Tableau 5 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (spirogyre)	47
Tableau 6 .Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (spirogyre)	48
Tableau 7 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (gypse)	48
Tableau 8 .Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (gypse)	48
Tableau 9 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (gypse)	49
Tableau 10 .Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (gypse)	49
Tableau 11 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le ph dans la culture de pois (spirogyre)	53
Tableau 12 .Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le ph dans la culture de pois (spirogyre)	53
Tableau 13 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le ph dans la culture de pois (gypse)	54
Tableau 14 .Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le ph dans la culture de pois (gypse)	54
Tableau 15 .ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le ph dans la culture de pois de chiche (gypse)	55

Liste de tableau

Tableau 16. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois de chiche (gypse)	55
Tableau 17. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois (spirogyre)	58
Tableau 18. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois (spirogyre)	58
Tableau 19. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois (gypse)	59
Tableau 20. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois (gypse)	59
Tableau 21. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois de chiche (spirogyre)	60
Tableau 22. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois de chiche (spirogyre)	60
Tableau 23. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois de chiche (gypse)	61
Tableau 24. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois de chiche (gypse)	61
Tableau 25. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (spirogyre)	64
Tableau 26. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (spirogyre)	64
Tableau 27. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (gypse)	65
Tableau 28. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (gypse)	65
Tableau 29. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (spirogyre)	66
Tableau 30. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois de chiche (spirogyre)	66
Tableau 31. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois de chiche (gypse)	67
Tableau 32. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes	67

Liste de tableau

concentrations de NaCl sur le nombre de feuilles de pois de chichegypse)	
--	--

NaCl : Chlorure de sodium

CEC : Capacité d'échange cationique

Da : Densité apparente

Dr : Densité réelle

MO : Matière organique

RU : Réserve utile

C/N : Rapport carbone/azote

pH : Potentiel hydrogène

CaSO₄ : Sulfate de calcium (gypse)

ANOVA : Analyse de variance

HSD : Honest Significant Difference (test de Tukey)

XLSTAT : Logiciel d'analyse statistique

CE : Conductivité électrique

cmol(+)/kg : Centimoles de charge positive par kilogramme

V% : Taux de saturation en bases

pf : Point de flétrissement

USDA : United States Department of Agriculture

FAO : Food and Agriculture Organization

ملخص

يؤدي تطبيق كلوريد الصوديوم (1 و5 و9 جم/لتر) إلى زيادة التوصيل الكهربائي بشكل عام في نظامي الزراعة (البازلاء والحمص)، مع ملاحظة استجابة أكثر وضوحًا تعتمد على الجرعة في البازلاء العادية. من ناحية أخرى، يظهر الحمص تنظيمًا تناضحيًا أفضل، خاصة عند تركيز 1 جم/لتر (استقرار التوصيل الكهربائي). عند تركيز 5 جم/لتر، تصل كلا النوعين إلى ذروة حرجة في اليوم 21، مما يشير إلى إجهاد ملحي شديد. عندما يتجاوز التوصيل الكهربائي 1.5 مللي سيمينز/سم، فإنه يشير إلى إجهاد تناضحي شديد يتطلب تدخلًا زراعيًا

يلاحظ حدوث قلوية تدريجية مع زيادة الملوحة، خاصة بين اليومين 21 و30. يُحفز الجبس ارتفاعًا أكبر في درجة الحموضة (حتى 8.53)، بينما تُظهر سيبروجيرا اتجاهًا نحو التعادل في نهاية فترة الزراعة. ينظم الحمص درجة الحموضة بشكل أكثر فعالية، حتى عند تركيز 9 جم/لتر، مع عودة القيم إلى ما يقارب التعادل (≈ 7). قد تكون هذه القدرة التكيفية مرتبطة بآليات فسيولوجية محددة مثل إفراز مركبات متحركة أو الامتصاص الانتقائي للأيونات تحفز الملوحة نمو الساق في كلا النوعين. يثبت الجبس أنه أكثر فعالية قليلًا من سيبروجيرا، خاصة عند تركيز 9 جم/لتر (الطول الأقصى ≈ 26 سم لكلا النوعين). يُظهر الحمص استجابة أولية أقوى، بينما تلحق البازلاء العادية في نهاية فترة الزراعة. قد يكون هذا التأثير التحفيزي ناتجًا عن استجابة تكيفية للإجهاد، أو تعبئة الموارد، أو تأثيرات مفيدة لأيونات الصوديوم/الكلوريد على استقلاب النبات

يزيد كلوريد الصوديوم بشكل كبير من إنتاج الأوراق، خاصة في الحمص (حتى 74 ورقة عند 9 جم/لتر مع الجبس) مقارنة بحد أقصى 32 ورقة في البازلاء العادية. يعكس التسارع الآسي لتطور الأوراق في الحمص بين اليومين 21 و30 قابلية أيضًا فائقة. قد يكون هذا التأثير مرتبطًا بتحسين التمثيل الضوئي، أو زيادة انقسام الخلايا، أو آليات تعويضية استجابة للإجهاد

الكلمات المفتاحية: التوصيل الكهربائي، كلوريد الصوديوم، درجة الحموضة، القلوية، الجبس، سيبروجيرا، عدد الأوراق طول الساق

Abstract

The application of NaCl (1, 5, and 9 g/L) generally increases electrical conductivity (EC) in both cropping systems (pea and chickpea), with a more pronounced dose-dependent response observed in the standard pea. Chickpea, on the other hand, shows better osmotic regulation, particularly at 1 g/L (EC stabilization). At 5 g/L, both species reach a critical peak on day 21, indicating heightened salt stress. When EC exceeds 1.5 mS/cm, it signals severe osmotic stress requiring agronomic intervention.

A progressive alkalinization is observed with increasing salinity, especially between days 21 and 30. Gypsum induces a greater rise in pH (up to 8.53), while *Spirogyra* shows a trend toward neutralization at the end of the culture period. Chickpea regulates pH more effectively, even at 9 g/L, returning to near-neutral values (≈ 7). This adaptive capacity may be linked to specific physiological mechanisms such as the secretion of buffering compounds or the selective absorption of ions.

Salinity stimulates stem growth in both species. Gypsum proves slightly more effective than *Spirogyra*, especially at 9 g/L (maximum height ≈ 26 cm for both species). Chickpea shows a stronger initial response, while the standard pea catches up toward the end of the culture period. This stimulating effect could be due to an adaptive response to stress, resource mobilization, or beneficial effects of Na^+/Cl^- ions on plant metabolism.

Leaf production is significantly increased by NaCl, particularly in chickpea (up to 74 leaves at 9 g/L with gypsum), compared to a maximum of 32 leaves in the standard pea. The exponential acceleration of leaf development in chickpea between days 21 and 30 reflects superior metabolic adaptability. This effect may be linked to enhanced photosynthesis, increased cell division, or compensatory mechanisms in response to stress.

Keywords: electrical conductivity, NaCl, pH, alkalinization, gypsum, *Spirogyra*, number of leaves, stem height

Résumé

L'application de NaCl (1, 5 et 9 g/L) augmente globalement la conductivité dans les deux systèmes de culture (pois et pois chiche), avec une réponse dose-dépendante plus marquée chez le pois standard. Le pois chiche, en revanche, montre une meilleure régulation osmotique, notamment à 1 g/L (stabilisation de la CE). À 5 g/L, les deux espèces atteignent un pic critique au 21^e jour, indiquant un stress salin accru. Au-delà de 1,5 mS/cm, la CE signale un stress osmotique sévère nécessitant une intervention agronomique.

Une alcalinisation progressive est observée avec l'augmentation de la salinité, surtout entre le 21^e et le 30^e jour. Le gypse induit une élévation plus forte du pH (jusqu'à 8,53), tandis que la Spirogyre montre une tendance à la neutralisation en fin de culture. Le pois chiche régule plus efficacement le pH, même à 9 g/L, en revenant vers la neutralité (≈ 7). Cette capacité adaptative peut être liée à des mécanismes physiologiques spécifiques comme la sécrétion de composés tamponnants ou l'absorption sélective d'ions.

la salinité stimule la croissance en hauteur des deux espèces. Le gypse est légèrement plus efficace que la Spirogyre, surtout à 9 g/L (croissance maximale ≈ 26 cm pour les deux espèces). Le pois chiche montre une meilleure réponse initiale, tandis que le pois standard compense en fin de culture. L'effet stimulant pourrait être dû à une réponse adaptative au stress, à la mobilisation de ressources ou à des effets bénéfiques des ions Na^+/Cl^- sur le métabolisme.

La production de feuilles est fortement augmentée par le NaCl, en particulier chez le pois chiche (jusqu'à 74 feuilles à 9 g/L avec gypse), contre un maximum de 32 chez le pois standard. L'accélération exponentielle du développement foliaire chez le pois chiche entre les jours 21 et 30 reflète une adaptabilité métabolique supérieure. L'effet pourrait être lié à la stimulation de la photosynthèse, à une division cellulaire accrue ou à des mécanismes compensatoires face au stress.

Mots-clés : conductivité électrique, NaCl, , pH, alcalinisation, gypse, Spirogyre, nombre de feuilles , hauteur des tiges

Introduction Générale

La pollution des milieux aquatiques et terrestres par la salinité constitue aujourd'hui une problématique environnementale majeure. Elle affecte la biodiversité, dégrade la qualité des sols et de l'eau, et compromet fortement les activités humaines, notamment l'agriculture.

Ce phénomène peut résulter de plusieurs facteurs, tels que l'irrigation excessive, l'accumulation de sels minéraux (notamment le chlorure de sodium), la sécheresse, la remontée de la nappe phréatique, l'intrusion marine, ou encore certains processus naturels liés à la géomorphologie locale (Mermoud, 2006).

La salinisation des sols et des eaux entraîne une diminution de la fertilité, un stress osmotique chez les plantes et une baisse de productivité agricole. Dans ce contexte, les solutions de phytoremédiation apparaissent comme des alternatives écologiques, durables et économiquement viables pour la réhabilitation des milieux salinisés.

Parmi les organismes les plus prometteurs dans ce domaine, les microalgues, et en particulier *Spirogyra* sp. se distinguent par leur capacité à absorber et à fixer divers contaminants, notamment les sels, grâce à leur forte activité photosynthétique et à leur croissance rapide. Le potentiel de *Spirogyra* sp. dans la dépollution des milieux aqueux et terrestres fait aujourd'hui l'objet d'un intérêt croissant dans le cadre de l'agriculture durable et de la gestion intégrée des ressources en eau.

Par ailleurs, l'utilisation de certains amendements minéraux, tels que le gypse (sulfate de calcium), est également reconnue pour sa capacité à améliorer la structure des sols salins, favoriser la désorption des ions sodium (Na^+) et rétablir un équilibre ionique plus favorable à la croissance des plantes. L'association du gypse avec des stratégies biologiques comme la phytoremédiation pourrait ainsi représenter une approche synergique et novatrice pour la gestion de la salinité.

Dans cette optique, notre étude vise à évaluer l'efficacité combinée de *Spirogyra* sp. et du gypse dans la réduction de la salinité de l'eau et du sol, en mesurant des paramètres physicochimiques tels que le pH, la conductivité électrique et les caractéristiques morphologiques d'une culture témoin, en l'occurrence des plants de pois *Pisum sativum* L et de pois de chiche *Cicer arietinum* L.

Pour atteindre ces objectifs, notre travail est structuré en deux grandes parties :

La première partie est une synthèse bibliographique comprenant deux chapitres. Le chapitre I est consacré à la présentation des microalgues, en particulier *Spirogyra* sp., leurs caractéristiques biologiques et leur rôle en phytoremédiation.

Le chapitre II traite de la problématique de la salinité, ses origines, ses impacts sur les écosystèmes et les différentes approches de remédiation.

La deuxième partie détaille le matériel et les méthodes utilisés ainsi que les objectifs de l'étude, notamment

Enfin, la troisième partie expose et analyse les résultats des différentes expériences menées.



Chapitre I

La salinité du sol

Chapiter :1 La salinité du sols

I.1.Historique

Les zones arides et semi-arides couvrent une grande partie des pays de la frange méridionale du pourtour méditerranéen. Dans ces régions, la eau leur salinité et celle des sols sont parmi les principaux facteurs limitant la productivité végétale (Zid Grignon,1991)

La salinisation enregistrée dans les écosystèmes aride et semi-arides résulta de forte évaporation d'eau à partir du sol et d'une irrégulière et insuffisante pluviométrie. Cette salinisation peut aussi provenir d'une irrigation le plus souvent mal contrôlée (Ben Naceur et al.2001 ;Hassan et al. 2008).



Figure 1 : La salinité visible d'un sol

<https://images.app.goo.gl/oV5gWf2mvJJXj5tG8>

I.2 Définitions La salinisation :

La salinisation est une terme global caractérisé par l'augmentation progressive de la concentration des sols dans le sol sous l'influence de l'eau d'irrigation salée, d'un climat sec ou de condition hydrologiques particulières, d'un lessivage insuffisant, d'une eau proche de la couche libre..., de la concentration du le solution de sol entraine également des dépôts successifs de minéraux, qui modifient leurs composants et déterminent différents modes d'aménagement du sol en fonction de l'abondance des différents ions dans la solution de départ (Jean robert t et Alain v 2006) .

I.3 Causes de la salinisation :

Bien que l'altération des roches et les minéraux primaires soit la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels in situ. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène (Maillard, 2001).

I.3.1 Origine de la salinité :

La salinisation des terres est à 80% d'origine naturelle. On parle alors de salinisation « primaire », due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes (Bryssine, 1961). Alors que 20% des terres salinisées ont une origine « anthropiques ». On parle alors de la salinisation « secondaire », induite par l'activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation (FAO, 2008).

I.3.1.1 La salinisation primaire :

La formation de sols salés est liée à l'accumulation de sels dans le lit du sol et dans la plupart des cas, les sels de sodium sont facilement solubles, comme les chlorures de sulfate et le bicarbonates et il existe également une teneur élevée en chlorures de calcium et de magnésium, mais dans une moindre mesure, lorsque le sol se développe avec une teneur élevée en matériau parent, la salinisation du sol est primaire, et cela varie en fonction de la nature des processus de formation du sol.

Exemple du bassin hydrographique de Murray-Darling (Australie). A gauche, le schéma illustre l'écosystème avant la déforestation où la forêt absorbe les précipitations ; ce qui empêche le remplissage des aquifères. Après la déforestation, les aquifères se remplissent et viennent à remonter entraînant du sel à la surface du sol (à droite). [Source : © Murray-Darling Basin Commission]

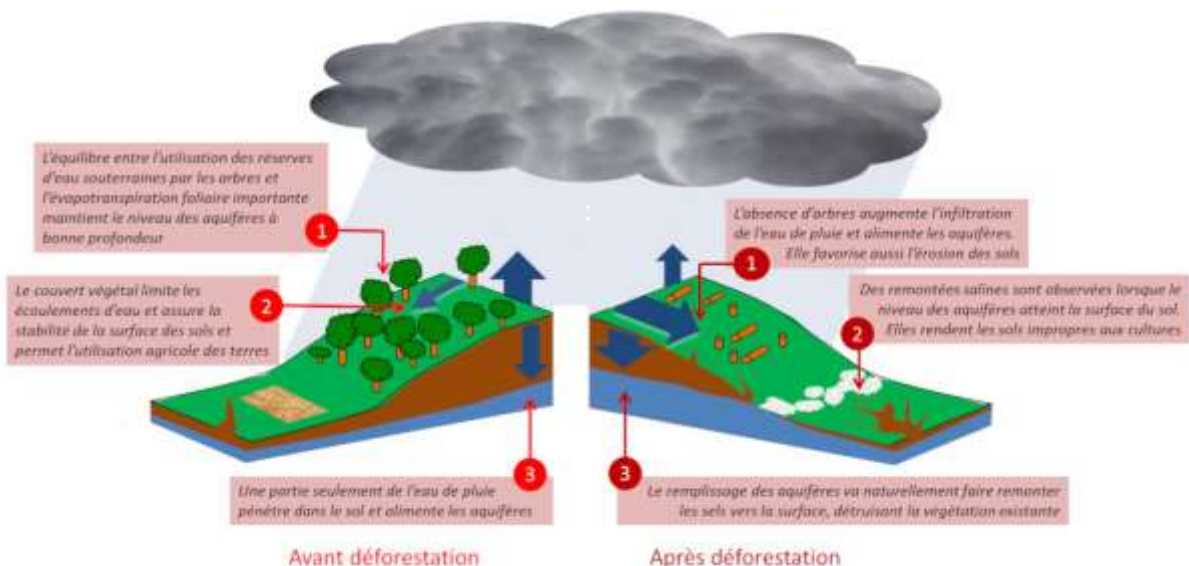


Figure 2 : Salinité secondaire

I.3.1.2 La salinisation secondaire :

La salinisation secondaire se produit dans les sols formés et développés en raison de la

forte salinisation, le niveau de salinité des eaux souterraines ou la topographie, qui joue un rôle important dans la salinisation des sols. De plus, les sels sont s'accumulent lorsqu'il existe une source pour eux et la possibilité de transporter ces sels vers la partie supérieure de la couche de sol. De même, les sels sont transférés des couches de sol directement ou indirectement. Le chemin de transfert direct se fait l'irrigation. L'eau certains engrais, machines et solutions salines à des concentrations élevée et autres, et l'accent mis sur la concentration en sel de la solution du sol est très clair lors de l'arrosage avec de l'eau hautement minéralisée ou en cas de pollution industrielle, etc. Le transfert direct des sels, est également liée à l'efficacité et aux activités des humains, comme pour la salinisation indirecte cela se produit par le transfert et la remontée des sels des couches plus profondes du sol et des eaux souterraines par action ca

Les zones affectées par la salinité ou le sodium atteignent 830 millions d'hectares, dont 6,5 millions d'hectares sont des terres inondées. Les sols saline sont principalement situés dans les zones sèches et leurs effets sont très élevée près de l'Egypte, de la Tunisie et de l'Est. Au Moyen-Orient (Iran, Pakistan, Bangladesh, en Asie central (Ouzbékistan)), dans le nord de la chine et en Argentine, les sols sodiques sont particulièrement répandue en Australie, mais dans certains endroits spécifiques comme la Hongrie ou Ouzbékistan, en comparaison, le développement de la salinité liée à l'activité humain ne concerne que 77 million d'hectare (Jean robert T et Alain V, 2006), En Algérie, les sols saline sont très répandus.

Tableau 01 : Répartition régional des sols salins et sodiques en million d'hectares.

Le coté	Superficie totale	Sol salin	%	Sols sodiques	%
Afrique	1899,1	38,7	2	33,5	1,8
Asie pacifique et	3107,2	195,1	6,3	248,6	8
Australie	2010,8	6,7	0,3	72,7	3,6
Europe	2038,6	60,5	3	50,9	2,5
L'Amérique latin Proche	1801,9	91,5	5,1	14,1	0,8
Orient	1923,7	4,6	0,2	14,5	0,8
Amérique du nord					
Le total	12781,3	397,1	3,1	434,3	3,4

I.4 Méthodes d'estimation de la concentration en sel :

I.4.1 Conductivité électrique :

L'une des méthodes les plus simples et les plus précises pour estimer la concentration de sels dissous consiste à mesurer la conductivité électrique de l'extrait de saturation, dont les unités sont les millimhos cm à 25°C. Le tableau 2 donne une expression de la culture aux niveaux de salinité.

I.4.2 Quantité de sodium échangée :

Cela dépend du calcul du pourcentage de sodium échangeable. ESP

$ESP = (\text{Teneur en sodium échangeable} / \text{Capacité d'échange de cations}) \cdot 100$

Où :

Teneur en sodium : Teneur en sodium échangeable

Capacité d'échange de cation

I.4.3 Quelques sels solubles dans le sol :

Les sels les plus fréquents, qu'on trouve dans le sol sont :

✓ *Les carbonates et les bicarbonates*

$CaCO_3$; $MgCO_3$; $Mg(HCO_3)_2$; Na_2CO_3 ; K_2CO_3 ; $2H_2O$

✓ *Les sulfates*

$(CaSO_4, 2H_2O)$ gypse; $CaSO_4$; $MgSO_4$; $NaHSO_4$; $NaSO_4$, $MgSO_4 \cdot 2H_2O$; K_2SO_4

✓ *Les chlorures*

$CaCl_2$; $MgCl_2 \cdot 6H_2O$; $NaCl$; KCl

Les sels dans les zones arides sont présents au sein de plusieurs phases :

- Dans la phase liquide du sol : c'est le cas principalement des sels solubles et de la garniture ionique du complexe adsorbant.
- Dans la phase saline solides représentées principalement par la calcite et le gypse (J.H.Durand, 1983).

I.5 Effet de la salinité sur les plantes :

I.5.1 Effet de la salinité sur la germination :

La germination des graines est le stade le plus sensible aux stress salin et hydrique (Boulaghlagh et al, 2006). Le stade germination est souvent limité par la salinité du sol et se montre le plus sensible que les autres stades (Bouda et Haddioui, 2011). Selon l'espèce, l'effet dépressif peut être de nature osmotique ou toxique (Ismail, 1990).

Les concentration élevées de sels dissous dans la solution du sol ont des effets indirects sur les plantes par leurs effets sur la structure du sol et le mouvement de l'eau et de l'oxygène en particulier, et ont des effets directe sur la croissance et le développement des plantes, dont certaines s'adaptent à cette concentration est affectée par divers mécanismes physiologiques, et inversement pour les plantes cultivée, qui sont sensibles mais pas résistantes milieux très salés, les effets nocifs des sels sur les planes ont plusieurs causes, parmi lesquelles(Mohamed nadjib abd Eladim ,1997)

- Une pression osmotique élevée à l'intérieur des cellules entraine l'absorption de sels, ce qui a des effets négatifs sur la croissance.
- Haute pression osmotique de la solution du sol, qui a détermine la possibilité d'obtenir de l'eau.
- Toxicité particulière de de certains éléments chimiques associée à leurs quantités excessives, comme le bore, en particulier l'ion chlorure (Calvrt ,2003).

1.5.2 Effets de la salinité sur la croissance et la production des cultures :

Le sel affecte l'alimentation hydrique, minérale les fonctions physiologiques des plantes suivant leur degré de tolérance. Il réduit aussi leur croissance et leur production en fonction de leur degré de sensibilité.

La baisse de la croissance touche aussi bien les racines que les parties aériennes, et se fait de sorte que souvent le rapport masse de matière sèche des racines sur la masse de matière sèche des parties aériennes reste à peu près constant (Radhouane ,1977 et Zid ,1983).

En plus de plusieurs effets causés par la salinité du sol, notamment :

- ***Préoccupations relatif à la qualité eaux souterraines*** : Une salinité élevée du sol peut entrainer une contamination des eaux souterraines.
- ***Effets sur les infrastructures*** : Une salinité élevée du sol peut entrainer une détérioration des infrastructures, telles que les routes et les ponts.
- ***Impact sur la santé publique*** : Une salinité élevée des sols peut entrainer un risque accru de maladies, notamment de maladies de la peau.(FAO ,2018)

1.5.3 Effets de l'irrigation avec une eau salée sur le sol :

L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation met en jeu, dans nos régions, des quantités considérables de sels, plusieurs tonnes, apportées chaque année au sol. Il est donc nécessaire d'étudier l'action de la salure de l'eau d'arrosage sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol, pour prendre connaissance des effets afin de bien contrôler les phénomènes et éviter des conséquences graves pouvant aller jusqu'à la stérilisation de la

terre cultivée (**F Slama 2004**).

1.5.4 Résistance des palmiers à la salinité :

Les palmiers poussent normalement dans un sol salin lorsque la concentration salin est une inférieure à 10 %. L'arbre le plus résistance au sel. La résistance des palmiers aux sels est fort et est liée à la nature des sels, à la présence d'une bonne qualité de drainage, à la profondeur de la couche d'une libre et à sa vibration saisonnière, et à l'abondance de l'eau d'irrigation. Cependant, la résistance au sel est liée au type de palmier. Les ghars et les deglet nour donnent un rendement et une quantité de dattes plus faibles lorsque le sol est sableux et que l'eau d'irrigation a une salinité de 5 g/l. La toxicité des sels est principalement constituée de chlorures, de sodium et de magnésium et est liée à la quantité d'humidité du sol (**Abbani b ,2005**).

I.6 Type de sols saline :

Les sols saline sont divisés en trois types : solungjak, Soloniets

1.6.1 Sols saline de type solonjak :

Ce sont des sols qui contiennent une grande quantité de sels dissous dans l'eau. Les sels que l'on retrouve dans ces sols sont :

a. Sels facilement solubles tels que les chlorures (CaCl, MgCl, NaCl) et les sulfates (MgSO₄, Na₂SO₄) et bicarbonates (CaCO₃)₂, NaHCO₃) et sels d'ammonium et nitrates

b. Sels moyennement solubles tels que (CaSO₄.2H₂O, NaCO₃). Les sols de solonjac sont divisés en sols neutres et sols basiques. Le facteur déterminant de cette division est généralement le sol (NaCO₃), et sa présence entraîne une forte augmentation du PH du sol

(**Benkov b ,1985**)

I.6.2 Les sols solonites :

sont des sols qui contiennent du sodium échangeable en quantité qui affecte négativement les propriétés du sol et affecte également la croissance et le développement des plantes.

Les sols de solonjak sont des sols contenant des sels hydrosolubles et du sodium échangeable, mais sont classés comme l'un ou l'autre en fonction du facteur dominant.

I.6.3 Réhabilitation des sols salins :

La réhabilitation des sols salins consiste à éliminer les causes de la dégradation des sols, qui sont directement liées à la détermination de la fertilité des sols. L'amélioration des propriétés des sols salins de type solonjak est associée à l'élimination des sels facilement solubles dans l'eau, et les sols saline de type solonite sont associés au déplacement du sodium échangeable sur le complexe échangeable du sol, tandis que pour les sols solutés, c'est par la neutralisation des cations hydrogène. Le moyen le plus efficace de ré habilitation du solonjak

est le processus de lavage, et ce processus est précédé par la mise en place de réseaux d'irrigation et de drainage adaptés à cet effet, en fonction des conditions météorologiques, de la composition du sol, de l'analyse chimique du sol, de l'eau d'irrigation et des eaux souterraines, et des calculs sont effectués pour le bilan salin et le bilan hydrique qui permettent de déterminer les lignes de base du système de lavage et de drainage(**Binkof b et joniniscu y, 1985**)

I.7 Classification du sols salin :

Basé sur la concentration en et le rapport : $(Ca + Mg)$, les sols ont été classifiés comme salin, sodique ou salin-sodique. La concentration total en sels est habituellement mesurée par la conductivité électrique. EC dans les unités de dS m⁻¹, où 1dS m⁻¹ est approximativement égal à une concentration de 10 mM du sel qui dissocie en deux ions monovalents quand ils sont en solution (par exemple NaCl). Les sols salins sont généralement définis en tant que ces sols ayant une EC de 4 dS m⁻¹ ou plus. Des sols sodiques sont définis en tant que ces sols qui ont un rapport d'adsorption de sodium (SAR) supérieur à 15. Le SAR est calculé comme suit :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{([Ca^{2+} + Mg^{2+})^{1/2}} \text{ (Cramer ,2002).}$$

Tableau 02: Classification de la salinité des sols.

Classe	Conductivité de l'extrait de sol saturé (dS/m)
None salins	0-2
L'égèrement salins	2-4
Modérément salins	4-8
Fortement salins	8-16
Très fortement salins	>16

I.7.1 La salinité dans le monde

Sur la superficie totale des terres mondiales, la zone hyper-aride couvre 4,2 %, la zone aride 14,6 % et la zone semi-aride 12,2 %. Ainsi, près d'un tiers des terres du monde est constitué de terres arides. Au nord du Sahara, celles-ci occupent plus de 600.000 Km² dont 34% en Algérie, 31% en Lybie, 19% au Maroc, 11% en Tunisie et 5% en Egypte (Le Houéroux, 1995 in Maalem et Rahmoune, 2009).

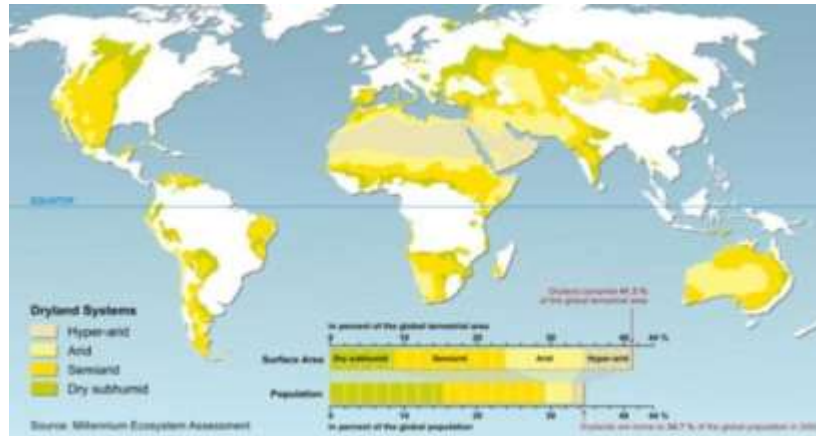


Figure 03 : La salinité dans le monde

<https://journals.openedition.org/vertigo/5356?lang=pt>

I.7.2 Dans l'Algérie :

La classification bioclimatique d'Emberger et sauvage a été largement adoptée en régions méditerranéennes. Cinq étages du bioclimat méditerranéen ont été définis pour l'Algérie :

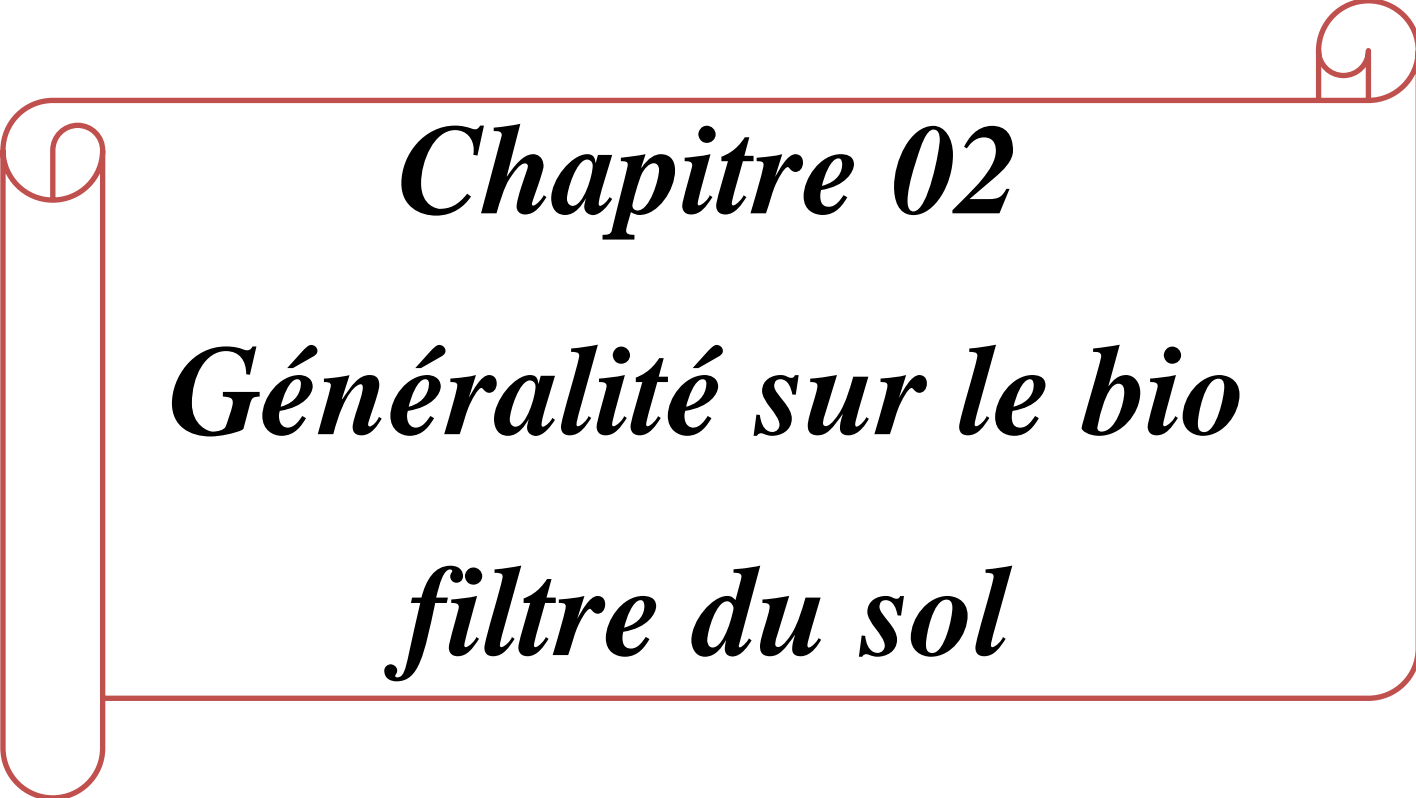
Saharien, aride, semi aride, sub- humide et humide (Figure 4).



Figure 04: Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie (FAO, 2005).

Conclusion :

La salinisation des sols est phénomène qui nuit considérablement à la productivité agricole l'environnement. Elle due à l'accumulation de sels dans le sol, souvent causée par une irrigation excessive ou un mauvais drainage. Les sols salinisés deviennent infertiles, ce qui affecte la croissance des plantes, la biodiversité et la qualité de l'eau .



Chapitre 02
Généralité sur le bio
filtre du sol

Chapitre 02 : Généralité sur le bio filtre du sol Introduction

Le passé peu décennies a vu croissant développement de sol et compost lits pour la purification de industriel décharge courants d'air. Ils avoir a été ciblé principalement pour le contrôle de répréhensible odeurs et réduction dans potentiellement toxique tracer gaz.

Le systèmes employer soit un enrichi sol moyen ou compost dans un conçu système lequel fait utiliser de naturel sol processus pour le adsorption, dissolution et microbien métabolisme de le volatil organique et inorganique gaz contenu dans le effluent air. Le présent papier volonté brièvement revoir le développement de le technologie, le mécanismes lequel compte pour c'est efficacité et considérer quelques de le avenir potentiel et limites de c'est utiliser comme un méthode de air purification pour les deux environnemental applications et dans le contexte de bio régénératif vie soutien systèmes

II.1 Histoire de la technologie

La diversité de métabolisme de sol vie biote a a été compris pour un long temps. Là sont un formidable nombre- ber de biologique agents dans sols (par exemple un milliard bactéries et 100 000 champignons par gramme de sol (h l bohn.1992) Ces sol orga- Nîmes inclure champignons, lequel souvent compte pour un majorité de le poids de sol vie biomasse, actinomycètes et Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Demande 1085 bactéries, les deux procaryotes et eucaryotes. Tous connu microbes sont trouvé dans sol et leur métabolique efficacité est assisté par le présence de quelques 50 types de enzymes lequel catalyser une grande variété de réactions chimiques(w j mtsch.1999)

Le pratique utilisation de ce microbien pouvoir dans air purification technologies n'a que vraiment développé dans le passé cinquante années. Ce est assez différent depuis le situation dans eaux usées traitement et régénération où micro- labial action a long a été employé dans systèmes comme divers comme oxydation tranchées, septique chars, filet filtre, activé boue oxydation, aéré étangs etc. en utilisant les deux un- aérobique et aérobique microbien digestion de eaux usées et autre organique et inorganique composants de eau depuis industriel et Résidentiel sources(M.GANDOLLA et M.ARAGNO.1992) Le hétérogénéité de bactéries présent et capable à métaboliser le eaux usées impuretés est un avantage et ingénieurs de tel systèmes chercher à fournir optimal conditions pour leur performance (D.A.carlcon ET C P LEISER 1996)

Parmi le plus ancien littérature références à le possibilité de en utilisant sol biofiltration

pour contrôle de mauvaise odeur depuis eaux usées traitement était dans 1923 par Bach. Là étaient publiés comptes de tels eaux usées systèmes dans les années 1950 dans les deux Allemagne et les États-Unis. Carlson et Leiser (D A CARLSON ET C P LEISER 1996) ont développé des sols biofiltres pour les émissions de gaz depuis une usine d'eaux usées et leur recherche a établi la biodégradabilité plutôt que l'adsorption comme le causal mécanisme. Mais la grande acceptation de cette approche comme un je suis- important air pollution contrôle technologie le long de avec de- développement de pratique ingénierie systèmes a pris lieu principalement dans l'Allemagne et les Pays-Bas pendant les années 1970 et années 1980

(H L BOHN ET G K PROSOSKI ET ALL 2008) Quelques recherches et applications sont en cours dans les États-Unis comme la technologie a été- vus plus largement connus, Mais NOUS systèmes sont toujours assez peu en contraste à l'Europe où les sols et composts sont maintenant acceptés comme très efficaces et relativement peu coûteux moyens de purification pour beaucoup de purifications, souvent être classés comme le meilleur choix pratique parmi les technologies en compétition pour beaucoup d'applications (H L BOHN 1992 ET J M LYNCH 1993)

L'intérêt dans l'utilisation de terre/compost réacteurs pour la purification de l'air est partie d'une coopération croissante entre ingénieurs et écologistes/écologistes à développer plus naturels systèmes. UN nouveau champ, l'écologie ingénierie-ant, est d'explorer une gamme de nouveaux, hybrides approches lequel exigent moins d'intrusion dépendance sur les ressources dans- y compris sophistiquées technologies avec haute énergie de- commandes. Parce qu'ils emploient des méthodes naturelles de bio- logique fonction ces approches sont fréquemment plus adaptables et inférieures en coût que les technologies conventionnelles de pointe alternatives (C ETNIER ET B GUTRERSTAM 1991)

L'écologie ingénierie englobe une variété d'échelles et de fonctions depuis la restauration des écosystèmes endommagés, la création de "synthétiques écologies" pour la solution de problèmes de pollution, ou le harnais de l'écologie pro- processus dans des systèmes conçus pour la régénération ou la biorestauration (w j.mitsch.1991). Donc, depuis ce point de vue, l'ingénierie de sol et composts représente un taper de l'écologie ingénierie, dans que il prend un fondement écologique approche à la purification de l'air (biofiltration). Ce devient plus clair quand la biofiltration de sol est comparée à une alternative conventionnelle.

II.2 Sol Biofiltration contre. Technologies conventionnelles :

Terre/compost réacteurs (désormais référé à comme sol bio- filtration) sont systèmes où lits de le matériel sont ensemble en haut donc que perforé tuyaux peut livrer le décharge air donc que il passes à travers le humide, aéré biologique matériel, où c'est polluant gaz adhérer à le sol par- articles, dissolution les transformer en le sol solution et exposer eux à microbien digestion.

Après c'est résidence temps dans les lits, le air est dis- chargé à l'atmosphère. L'entrant air est activement pompé contre la résistance tête des lits. Dépendre- ing sur le substrat utilisé, environnemental conditions lequel affecter tarifs de réaction (en particulier température et humidité contenu), le nature et concentration de le air impuretés et voulu degré de suppression, le lits sont conçu pour requis taille et volume, infiltration taux et courant d'air temps de séjour avant la sortie(a .w.busch.1971)

La primaire alternative technologie actuellement dans utiliser pour air purification sont haut température incinérateurs et chimique lavage lequel utiliser chimique capturer ou oxidation à éliminer polluants, et eau lavage et adsorption en utilisant activé charbon de bois lequel sépare les impuretés depuis le air. Incinérateurs fonctionner rapidement (dans secondes) mais produire sous-produits tel comme azote et soufre oxydes et exiger très grand énergie entrées. Utiliser de très réactif produits chimiques tel comme ozone, hypochlorite et permanganate est très efficace pour beaucoup volatil organique et inorganique composés, mais pas pour hydro car- bons et autre moins réactif polluants. Dans ajout, le produits chimiques sont cher et par nature assez corrosif et ainsi exiger plus sécurité précautions dans la conception et opération de le traitement facilité. Eau lavage fait pas impliquer le danger de corrosifs produits chimiques mais est inefficace si le polluants sont pas eau soluble. Dans annonce- édition, grand quantités de eau sont requis et doit être sans risque disposé de, poser problèmes et croissant frais. Activé charbon de bois filtres supprimer 90% de volatil organique composés, mais leur efficacité déclin comme le filtres âge. Depuis le composés sont inchangé chimiquement par le filtration, dans quelques cas le volatil composés peut être rétabli quand ce est économiquement souhaitable, ainsi faible- ering frais. Supplémentaire problèmes sont que activé voiture- Bon's performance est abaissé quand humide, mais le copain- Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Application.

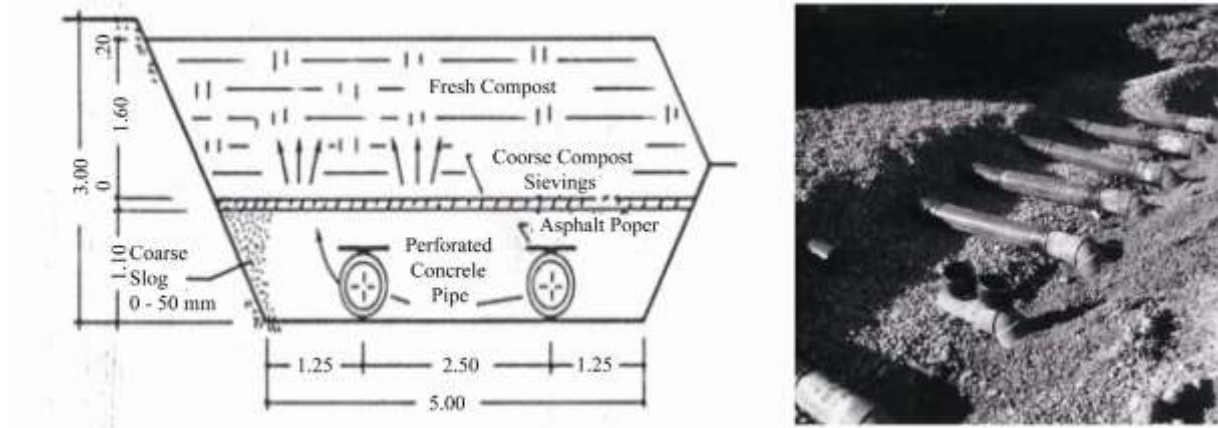


Figure 05: Schématique de un bio filtre en utilisant compost et compost tamisage Figure06: photographier de aérateur tuyaux menant dans un sol ou biofiltre à compost (d mahtsen 2011)

Rial est inflammable une fois sec (h l bohn 1992)

Sol biofiltration remplaçants c'est propre adsorption sur terre/compost particules pour quoi est réalisé par activé charbon de bois ou autre fabriqué sorption médias, accompagnement plis eau lavage à travers le dissolution de le je suis- puretés dans le sol solution et oxydation est accompagnement fini à ambient ou beaucoup inférieur températures par le biote du sol (h l bohn.1992).

II.3 Comparaisons de coûts :

Le coût de sol biofiltration est presque toujours moins que conventionnel alternatives et parfois de façon spectaculaire donc. Bohn (h.l.bohn.1992) présente les données comparatives.

Fonctionnement frais sont extrêmement faible pour sol biofiltration dans termes de carburant/produit chimique consommation comme tous que est ni- mally requis est périodique renouvellement de le terre/compost matériels et énergie pour mobile le air. Pour l'incinération, en fonctionnement frais peut total 15 \$ par 10^5 cubique pieds par mi- noix (cfm), alors que chimique oxydation frais autour 8 \$ par 10^5 cubique pieds (tous au-dessus de prix dans 1991 NOUS dollars) (h.l.bohn.1992).

Tableau 03 : Coût comparaisons de différent méthodes de air purification à traiter 10⁵ pieds cubes de air, aux États-Unis dollars.

Méthode de air purification	Total coût par 10 ⁵ cubique pieds de air (NOUS dollars)
Incinération	130 \$
Chloration	60 \$
Ozonation	60 \$
Activé charbon de bois avec régénération	20 \$
Sol biofiltration	8 \$

II.4 Mécanismes de dégradation des gaz traces dans Sols Biofiltration :

Le sous-jacent mécanismes lequel activer biofiltration à fonctionner sont assez similaire à ceux opératoire dans naturel sol, mais dans le conçu système environnemental conditions sont contrôlé à essayer optimiser tarifs de réaction.

Sol bio filtres utiliser sol, tourbe ou compost comme cassé vers le bas organique matière, souvent 50% - 80% par poids(h.l.b o h n 1992). Un autre avantage de compost médias est c'est nettement plus haut microbien densités et par conséquent plus haut tarifs de polluant dégradation (g .leson et a.m.winer .1991)

Cependant, autre chercheurs et ingénieurs mettre en œuvre- ING à l'échelle industrielle systèmes avoir préféré sol comme plus long- durable et inférieur coût; et pour particulier applications inférieur-N et organique matériel médias avoir démontré plus grand efficacité. Inférieur N et organique sol médias pro- produire moins biomasse production lequel peut contribuer à raccourci durées de vie et bio filtre colmatage (j nikiema eet all.2004)

Modélisation a a été fait de le mesures impliqué dans le opération de un biofiltre, par exemple Lyncher (j m lynch.1993). Air polluants sont médias en utilisant leur haut porosité et sorption capacité à commencer le dégradation processus. sols utilisé typiquement avoir un porosité de quelques 40% - 50%, surface zone depuis 1 - 100 m² / gramme et sont enrichi à contenir 1% - 5% sol organique matière (SOM). Compost a a été préféré dans beaucoup applications parce que il tend à avoir un quelque peu plus haut porosité (50% - 80%) et loin plus partiellement transporté à travers un phase limite depuis le solide partielles lequel fonctionner comme un taper de filtre à le humide, biolo- giquement réactif biofilm couche où micro-organismes peut métaboliquement utiliser et transformer eux. Oxygène est fourni depuis le entrant air couler et nutriments depuis le lits substrat.

Dégradation est réalisé par hétérotrophe organismes (bactéries, actinomycètes et champignons) alors que autotrophe bactéries (par exemple nitrifiant bactéria) sont aussi impliqué selon sur le composition de le déchets gaz. Le biologique réactions résultat dans le polluant gaz être oxydé principalement à CO₂ et eau mais avec quelques sulfate, N₂ ou nitrate être produit Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Demande 1087 si azote et soufre composés sont être traité (h l bohn.1992) avec un augmenter de microbien biomasse et énergie utilisation se produisant pendant le processus. Le biologique dégradation de polluants peut être limité par les deux biologique activité de le microbiote ou diffusion tarifs à travers le médias à le biofilm à inférieure polluant concentrations (j m lynch.1993)

Il est en général accepté que biofiltration suit d'abord commande cinétique. Un exception est Otten Graf (cité dans (g leson et a m winer1991) dont théorique modélisation de le processus de dégradation suppose que dégradation est indépendant de polluant concentrations, c'est à dire zéro commande cinétique pour T- trations ci-dessous un critique niveau pour le composé. Brad- gué et Krishnamoorthy[(m l bradford .1980) indiquer dehors que le réaction devrait être considéré comme $WDR = KC_w * C_o * C_p * C_n$ où WDR est le déchets destruction taux, K est le réaction taux constante, C_w est le concentration de l déchets (polluant gaz), et C_o, C_p et C_n représenter concentration de oxygène, phosphore et azote dans le sol lits. Ces dernier trois sont clé exigences pour biologique gigue activité et sont optimal à BOD:N:P ratios de à propos 100:5:1. Si ces sont disponible et non limitatif, le réaction taux simplifie à $WDR = KC_w$, un d'abord commande cinétique réaction (m l bradford .1980)

Déterminants de K, le réaction taux constante, inclure solubilité de le polluant, facilité de biologique dégradation, environnemental paramètres de le bio filtre y compris température, nutritif statut et oxygène disponibilité, mois- ture contenu et le pH.

Solubilité de le cible polluant et c'est biologique dégradation sont primaire facteurs déterminer si sol biofiltration est un possible technologie pour un particulier application comme tous autre facteurs peut être manipulé et maintenu à satisfaisant niveaux si le système est correctement conçu. Faible solubilité volonté limite le transfert de le polluant à le biofilm où il est exposé à biologique activité. Tracer gaz aussi varient considérablement dans le taux et facilité avec lequel ils peut être biologiquement métabolisé. Nu- mères études avoir montré que comme un règle simple hydro- carbones sont rapidement décomposé comme sont la plupart simple structuré inorganique techno génique gaz. Rétention temps augmente avec croissant poids de le hydrocarbure et pour égal carbone composés adsorption augmente avec

un augmenter dans carbone chaîne ramification et présence de insaturés obligations (h l bohn et all.2008)] Eau insoluble molécules étaient plus facilement adsorbé sur eau absorbant médias tel comme sol organique matière que sur le particules de minéral sols. Alors que sol organique matière est le majeur adsorbant de orga- Nic tracer gaz, argile sol particules sont efficace comme Bien. Mais le interaction entre sol organique matière et argile particules peut limite adsorption de supplémentaire organique polluants (h l bohn et all 2008)

Biodégradabilité de air polluants est en général haut pour alcools, éthers, aldéhydes, cétones, la plupart commun moi- néocyclique aromatiques, amines et sulfures. Mais là sont Ralentissez tarifs de réaction pour complexe chloré organiques(a w busch .1971) . Bradford et Krishnamoorthy (m l bradford et all 1980) rapport que réa- cation tarifs sont faible pour polynucléaire aromatique hydro car- bons (PNA) avec quatre ou plus aromatique anneaux, comme Bien comme pour halogéné composés. Mais ces dernier sont plus sensible à biologique dégradation dans anaérobie escroquer- conditions. Le influence de co- métabolisme où le simul- ltané présence de deux composés volonté augmenter les deux leur tarifs de microbien réaction, et aussi signalé dans- positions de inhibition exigible à le interaction de deux tracer gaz plus loin compliquer prédictif modélisation de le efficacité de sol biofiltration (d a carlson.1996)] Pour ces raisons, la plupart sol biofiltration applications sont précédé par un pilote usine ou banc échelle procès où tarifs de réaction pour le spécifique déchets courant d'air peut être déterminé avant à conception et construction de le opérationnel unité (h l bohn et all 2008)

II.4.1 Paramètres d'ingénierie :

Le final conception de le conçu sol bio filtre volonté refléter considérations unique à le courant d'air et voulu niveau de contaminant suppression mais en général actions beaucoup caractéristiques et opère dans comparable gammes comme un réfléchir- cation de le besoin à optimiser environnemental conditions pour le biote.

Entretien de adéquat humidité est essentiel pour le optimal transport de le polluants à le biofilm et pour microbien activité. En général, humidité contenu est gardé à 10% - 25% pour sol basé filtres et 20% - 40% pour com- poste. Depuis déshydratation de la entrant air flux est un potentiel problème, biofiltration systèmes fréquemment dans- inclure un humidificateur sur ce flux et aussi inclure facilité- liens pour irrigation de le lits et drainage de excès eau. Bohn rapports que compost bio filtres sont plus difficile à maintenir à satisfaisant humidité niveaux, depuis ils fonction plus médiocrement quand trop mouillé et être quelque peu hydrophobe sont Plus fort à réhumidifier mais- à peu près si autorisé à sec dehors. Pour de plein air installations traiter faible couler taux air décharges naturel précipitations est fréquemment

suffisant pour maintenir humidité dans humide zones (h l bohn .1992)

Oxygène doit être maintenu à adéquat niveaux depuis il est requis comme un électron accepteur pendant l' aérobie réa- fonctions lequel en général prédominer dans actuel biofiltration systèmes. Ce est généralement pas un problème comme le lits sont réapprovisionné par le entrant air flux. Mais com- paction est évité et mélanger/tourner et réapprovisionnement de compost lits est requis à périodique intervalles exigible à le humidification/dégradation de c'est original constituants (g leson .1991)

Là sont contradictoire rapports de optimal en fonctionnement 1088 Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Application température gammes. Bohn (h l bohn 1992) indique que là est petit changement dans réaction tarifs entre un large gamme de température, 10 - 60 degré C. À faible températures, micro- bial activité est diminué, mais ce est compensé pour par quelque peu plus haut tarifs de adsorption. Supérieur température limites refléter un pointu déclin dans microbien activité au-dessus de 65 degré C. [1]. Dans contraste, Leçon et Gagnant (g leson 1991) rapport un température gamme entre 20 - 40 degré C. comme optimal, citant diminué eau solubilité comme Bien comme un diminution de activité de mésophile bactéries lequel sont le primaire classe de responsable bactéries dans biofiltration réactions à plus haut températures (g lesson 1991) Toujours autre comptes affirmer que dans l'ensemble bactérien activité ralentit au-dessus de 32 degré C. bien que quelques thermophile bactéries peut survivre en haut à 60 degré C (a w busch.1971) Dans n'importe lequel cas, performance caractéristiques peut être déterminé à le pilote usine phase et est fréquemment conçu pour refroidissement/chauffage de' entrant courant d'air ou le système fait plus grand à accommoder réaction tarifs à anticipé en fonctionnement températures. pH niveaux sont normally maintenu entre 7 - 8. Ce est normalement pas un problème sauf dans le cas où inorganique gaz dégras- datation résultats dans le formation de acides. Dans ces cas, périodique chaulage de le bio filtre est porté dehors à maintenir plus haut pH niveaux (g leson 1991)

Un de le avantages de biofiltration est le flexibilité de réponse à changement polluant caractéristiques parce que de le large variété de microbien métabolique chemins. Le polluants devenir "nourriture" pour le taper de microbiote lequel peut digérer eux. Ce moyens opérationnellement que un période de "acclimatation" est souvent requis pour pollu- tantes lequel sont rare. Pendant ce période (souvent signalé à être à propos dix jours) populations de microbiote construire en haut jusqu'à un écurie taux de réaction de le polluant est atteint. Ce a dirigé à quelques expérimentation avec dans- introduction de particulier types de microbes à

accélérer ce processus. Là est Non consensus sur le nécessité ou à long terme succès de tel présentations, comme le introduction- produit bactéries doit rivaliser avec existant populations et la plupart indigène bactéries volonté adapter à poignée synthétique polluants (h l bohn.1992). Mais ce approche est utilisé dans un nombre de actuellement en fonctionnement européen systèmes (g leson 1991). Un analogue préoccupation est le viabilité de microbien activité si le opéra- tion de le bio filtre est interrompu (par exemple parce que de entre- moufle communiqués depuis le source, ou temps d'arrêt pendant entretien/réparation opérations). Indications sont que - périodes de en haut à deux semaines peut être toléré sans déclin dans microbien populations et peut-être comme long comme deux mois comme long comme le filtre contient adéquat alternative sources de nutriments (g leson 1991)

Résidence temps est un clé ingénierie système paramètre et est dépendant sur couler pression et taux, lit porosité, humidité contenu et taille. Généralement des lits de terre ou de compost sont autour 1 m profond et dans l'ensemble filtre zones gamme depuis 10 - 2000 carré m, avec air saisir tarifs entre 1000 à 150 000 cu m/h. Un important sécurité considération est à taille lits donc que "percée" de décharge air fait pas se produire pendant culminer chargement, et donc que dos pressions ne le faites pas devenir aussi haut. En général bio filtres sont conçu avec charges en haut à 300 Cu m de entrant air par carré m par jour de filtre lit, bien que pour mélanges avec très bien porosité (par exemple compost/écorce) charges de en haut à 500 cu m/carré m/jour ont joué de manière satisfaisante (g leson 1991)

Recommandé règle de pouce résidence fois sont 30 secondes pour 90 pour cent suppression de organique polluants dans compost bio filtres et un minute dans sol bio filtres (être- cause de leur inférieur microbien populations) particulièrement si inorganique gaz tel comme SO₂ et NON x sont à être traité comme Bien (m l bradford 1980) Un avantage de terre/compost médias est que volatil gaz tendre à rester dans contact avec le lit pour loin plus long périodes que le transport air parce que de leur partition dehors sur le pore surfaces de le sol particules (h l bohn .1992)

La plupart sol bio filtres sont construit comme un célibataire lit, mais dans circonstances où espace est limité un empilé lit configuration peut être utilisé. Depuis particule taille et pore structure est clé à maintenir voulu couler tarifs et adsorption de polluants, quelques conçu systèmes ajouter poreux argile ou polystyrène sphères à augmenter surface zone, réduire dos pression et augmenter durée de vie de ma- matériaux. Autres ajouter activé carbone à réduire requis système taille et augmenter efficacité et mise en mémoire tampon capacité de le système en particulier si polluant chargement est intermittente (g leson 1991)

Présence de polluants toxique à le microbiote dans le concentrations trouvé dans le

décharge air volenté résultat dans pauvre performance de le bio filtre. Ainsi, chimique analyse de le polluant couler avant à système conception est je suis- important les deux à évaluer faisabilité de sol biofiltration et à faire nécessaire correctif mesures tel comme un filtration de le particulier toxique composant, ou dilution de c'est concentration dans le entrée air. Bio filtres tendre à être en particulier efficace et peu coûteux pour le traitement ou faible escroquer- concentrations de polluants dans décharge air, et comme un règle sont approprié technologies où maximum COV escroquer- centration est ci-dessous 3000 - 5000 ppm (g leson 1991)

Un autre important avantage de biofiltration sur en compétition air purification technologies est le facilité et faible coût de élimination de lit matériels. Dans la plupart des cas, là est petit résiduel polluant et matériels peut être utilisé pour nursery, ferme ou jardin sols ou décharge couvertures. Pour ce raison, prudent dépistage de original sol ou com- poste matériels à exclure le présence de dangereux ma- matériaux tel comme lourd métaux, ou pesticide résidus est souhaitable depuis il volenté faire élimination après utiliser loin moins cher. De la même manière, depuis drainage de eau est occasionnellement requis, approprié entretien de pH dans le lits volenté pas seulement résultat dans mieux système performance, mais aussi réduire Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Demande 1089 le problème de excessivement acide décharge eau lequel volenté être plus difficile et cher à disposer (h l bohn 1992). Pouvoir consommation pour biofiltration systèmes tendre à être loin inférieur que que requis pour alternative technologies. Moyenne pouvoir exigences sont à partir de 1,8 - 2,5 kWh par 1000 cu m de traité flux d'air. Ce est à propos 1/6 ceux requis pour chimique nettoyage (g leson 1991)

II 4.2. Limites de la biofiltration des sols :

Dans principe bio filtre microbes peut dégrader/oxyder n'importe lequel composé que est thermodynamiquement instable dans air. Le règle de pouce est que si il brûlures dans air, il dégrade dans un bio filtre. Poly halogénés hydrocarbures sont donc ONU- traitable, et mono- et d'halogéné et aliphatique hydrocarbures dégrader de manière significative seulement lentement couler tarifs à travers bio filtres. Le dégradation taux augmente avec le nombre de double obligations et le Oh, N, et S contenu de la molécule. Le deuxième règle de pouce est que le dégradation taux augmente avec eau solubilité de le molécule.

Bio filtres sont basse température catalytique oxydants,

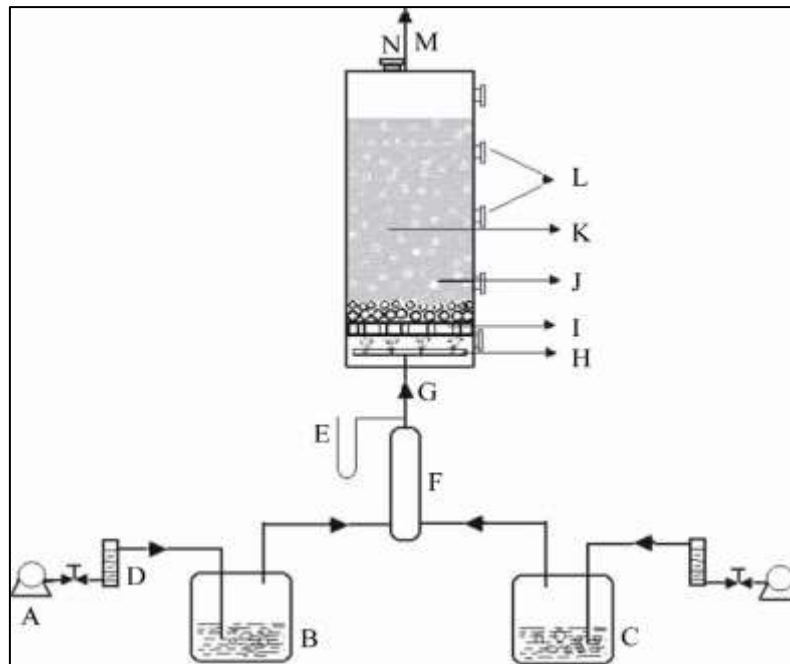


Figure 07: Un céramique perler bio filtre pour contrôle de phase aérienne benzène.

❖ Par exemple :

lequel comprend humidificateur à assurer ad- quater humidité à le bio filtre (UN) Pompe (B) Humidification unité (C) Liquide benzène (D) Air couler mètre (E) tube en U ma- nomètre (F) Mélange chambre (G) Benzène entrée (H) Distribu- tor (JE) Perforé soutien (J) Céramique perles (K) Filtre lit (L) Gaz échantillonnage ports (M) Traité air (N) Port pour printemps milieux frais kling (e r rene et all .2009)

catalyseurs être de cours le microbien enzymes. Le faible coût et autorégénératif capacité de ces cata- lystes est quelque peu compenser par leur moléculaire sélectivité et leur température dépendance. Le augmenter de enzyme- mastique taux avec température est contrebalancé par le en baisse solubilité de gaz à croissant température. Le filet effet est que dégradation tarifs changement petit sur le gamme de 10 - 40 C, et dégradation se produit sur le gamme de 1 - 55 C. Gel inactive le microbes et 60+ C stérilise tous mais quelques- uns thermophile microbes. Plus chaud air doit cool et sec air doit être eau saturé dans commande pour biofiltration être efficace.

II.5 Résultats de la purification de l'air pour les bio filtres de sol :

Expérimental résultats en général montrer réaction tarifs de 10 - 100 g/cu m par heure pour beaucoup commun air polluants. Dans européen installations, polluant réductions à distance depuis 50 - 94 pour cent pour organique carbone composés, avec comme- associé odeur réductions de 82 - 99 pour cent. Dans la plupart fac- lités avec approprié système conception, réductions de sur 90 pour cent sont réalisable. UN large gamme de industriel

applications avoir avait efficace utiliser de sol biofiltration: adh- sive production, revêtement opérations, chimique fabrication tournant, fer fonderies, imprimer magasins, café grillage, à-bacco traitement, poisson friture et rendu, saveurs et parfums, animal de compagnie nourriture fabrication, abattage maisons, dans- industriel et Résidentiel eaux usées traitement, gaz extrait- tion, huile usagée traitement.

Séquentiel suppression de polluants par microbes a a été observé évidemment comme un résultat de le variable structures et biodégradabilité de le composés (a w busch .1971). Bohn (h l bohn 1992) rapports résultats depuis installations où 100 mg de mais- éthanol/kg de compost étaient supprimé par heure, un Arizona facilité où rendu usine odeurs étaient 99% supprimé à 100% relatif humidité, et un Texas installation de- pendant uniquement sur incident précipitations¹ où extrêmement odorant décharge air a 95% suppression quand lit est aussi mouillé, et 99% à modéré humidité niveaux.

II.6 Espace vie Soutien Recherche: Combiner les plantes avec la biofiltration du sol :

Bio régénératif vie soutien systèmes affronter particulièrement aigu préoccupations à propos le s'accumuler de tracer gaz parce que ils volonté intrinsèquement être fermement scellé à prévenir perte de précieux atmosphère. Ce fait le problème, aussi vu dans économe en énergie fermement scellé résidences et de- bureaux, de quoi a viens à être appelé "malade bâtiment syn.- Drôme". Ce abaissé ventilation combiné avec le dehors gazage depuis synthétique matériels (synthétique matériels tel comme tapis, produits d'étanchéité, solvants, peintures, électronique et électrique équipement etc.) crée un renforcement dans escroquer- centration de beaucoup volatil organique et inorganique com- livres que peut être en haut à un ou deux ordres de ampleur Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Application supérieur à ceux dans le environnement extérieur (d h kambell .1987)

Quelques chercheurs, en particulier Wolverton à le NASA Stennis Espace Centre, avoir démontré le efficacité de certain plantes, par exemple les plantes araignées, pour éliminer les espèces techno géniques et COV tracer gaz (b c wolverton1983) Ces capacités sont amélioré quand couplé avec biofiltration du sol (d h kambell.1987)

Biosphère 2 dans du sud Arizona, USA, est le plus grand fermé écologique système jamais construit, avec forêt tropicale, sa- Vannah, désert, marais et océan corail récif écosystèmes comme Bien comme un agricole zone et ateliers/laboratoires construit à soutien équipages de 8 - 10 personnes (m nelson.1994). Dans concernant- recherche pendant le installations développement, un nouveau système lequel intègre sol biofiltration avec le

croissance de plantes était développé. Le intention était à fournir un moyens de biologique purification sans le utiliser de escroquer- sommes à payer. Préparatoire recherche pour Biosphère 2 escroquer- conduit à le Environnement Recherche Laboratoire à le Université de Arizona confirmé les deux le efficacité de sol biofiltration pour suppression de potentiellement dangereux gaz tel comme CO, CH 4 et éthylène et le compatibilité avec le sol aussi justificatif nourriture recadrer production. Il était trouvé que recadrer production était essentiellement inchangé avec ou sans le opération de le sous-jacent sol comme un sol biofiltration. Le léger augmenter dans recadrer rendements, pendant- ing un à long terme expérience avec 72 un mètre diamètre sol biofiltration jardinières était attribué à entretien de bien aérobique conditions dans le sols depuis le opération de la système de pompage d'air (r frye 1990)

Donc le choix de en cours d'exécution Biosphère 2 agriculture avec sol plutôt que hydroponique ouvert le chemin à un fondamental solution à un de le la plupart vexant de espace vie soutien problèmes—le entretien de air qualité. Le super diversité de dehors gazage produits depuis anthropo- pogene, biogénique et technogénique sources combiné avec le petit volumes et rapide vélo fois de l'atmosphère sphérique composants dans fermement scellé fermé systèmes cré- a mangé un significatif danger pour toxique gaz accumulations (m nelson 1994)

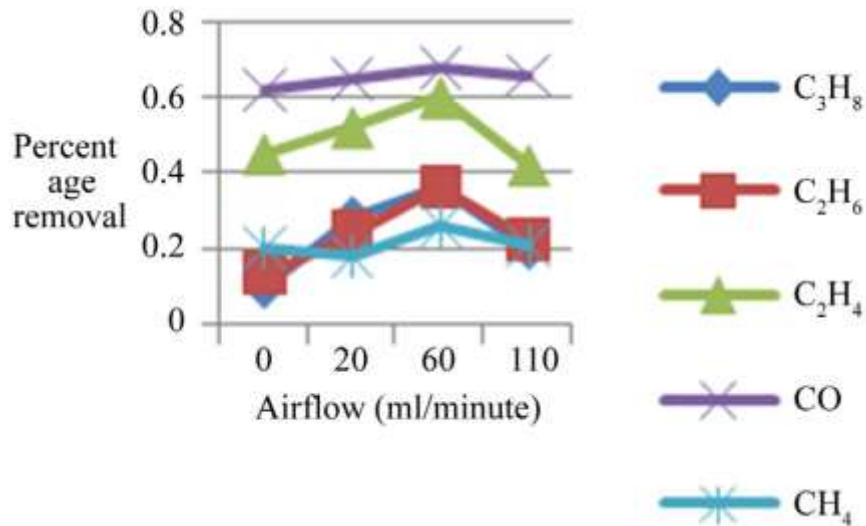
Dans Apollon, Skylab et Espace Navette cabines, pour exemple, plusieurs cent tracer gaz étaient identifié dans cabine air lequel soulève préoccupations à propos imprévu secondaire réactions (w j rippstein 1977). Ces air contamination préoccupations oc- caillé dans dépit de rinçage de le air volume à travers le carbone dioxyde suppression système, et autre mesures tel comme exclusion de certain matériels connu à être problème- atique pour dehors gazage, équipement isolement, absorption technologie- nologies en utilisant charbon de bois, et absorption de soluble sous- positions sur le condensat dans contrôle de l'humidité appareils. Le conventionnel solutions à ce problème inclure fil- tering méthodes en utilisant charbon de bois ou catalytique oxydation lequel volonté exiger substantiel énergie frais et/ou ex- dépendant parties, tel comme filtres, les deux de sont très cher dans application hors planète (r m hord .1985)

Le Biosphère 2 recherche avec sol biofiltration dans- inclus essai dans spécial fermé chambres à simuler le proportions de ouvrir eau (océan et marais), désert sols et agricole sols comme Bien comme atmosphère. Dans tel études, le capacité de le sol biofiltration technologie à contrôle un variété de potentiellement toxique gaz était démon- établi. Spécial

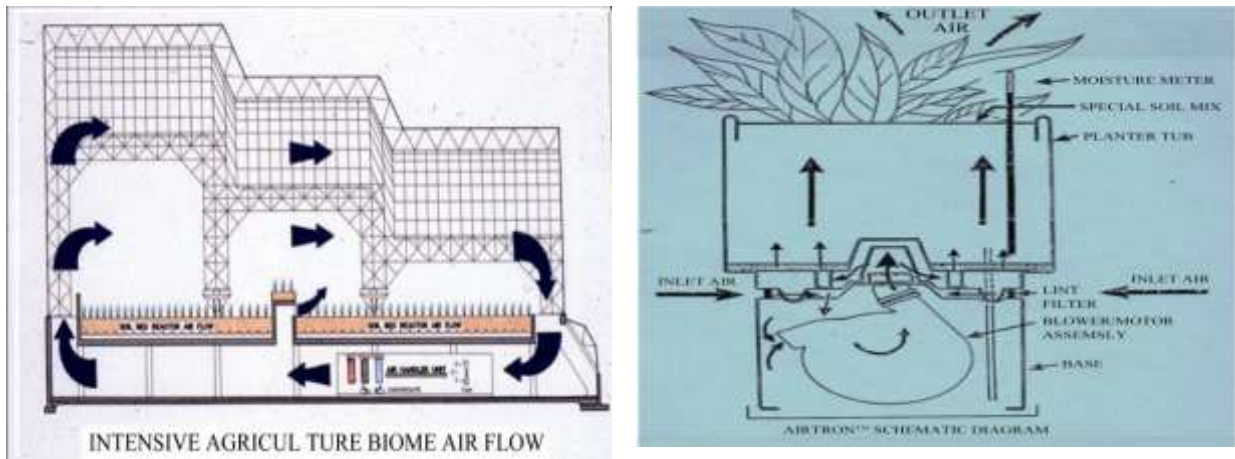
fermé chambres étaient construit pour tel étudiant- meurt, et sol biofiltration était aussi étudié dans vert- maisons et dans le Biosphère 2 Test Module. Tel études confirmé qu'une période de « conditionnement » (avant exposition à le tracer gaz dans question) conduit à plus grand contrôle, pré- vraisemblablement à travers le augmenter dans leur métaboliseurs; que plus haut niveaux de organique matière augmente efficacité; et que suppression tarifs varier avec humidité contenu de le sols et flux d'air taux. Un autre problème de préoccupation est libérer de carbone dioxyde: initialement là est un filet sortir de carbone dioxyde depuis le rinçage de le sol lit zone comme sols typiquement avoir loin plus haut CO₂ niveaux (typiquement 5 - 10 fois plus grand) que le atmosphère, mais sur temps carbone dioxyde est pas amélioré par opération de le sol biofiltra tion unité. Chiffre 3 spectacles tarifs de l' enlèvement de quelques de le tracer gaz testé dans préparation pour Biosphère 2 (r frye.1990)

Après ce préparatoire recherche, le entier agricole zone de Biosphère 2 était équipé avec un tuyauterie système donc que le interne atmosphère de le structure pourrait être pompé depuis le sous-sol en haut à travers le sol dans un pe- période de 24 heures (Figure 4).

Biosphère 2, depuis il comprend grand sol lits dans tous le terrestre biomes comme Bien comme le agricole zone, avait un grand montant de passif sol biofiltration se produisant à travers normale atmosphérique interactions avec c'est sols. Biosphère 2 expérimenté bien contrôle de tracer gaz avec le un exception de nitreux oxyde lequel est gardé sous contrôle par processus que se produire dans le stratosphère de le mondial biosphère (m nelson.1996). Depuis initial expériences avec le sol bio filtres compris essais que a montré filet métabolisme de protoxyde d' azote oxyde (r frye .1990) ce gaz, lequel est croissant dans Chiffre 3. Suppression pourcentage comme un fonction de flux d'air pour choisi tracer gaz composés CO, carbone monoxyde, CH₄, méthane, C₂H₄, éthane, C₂H₆, éthylène, C₃H₈, propane) à le Université de Arizona sol biofiltration essai installations dans préparation pour le Biosphère 2 expérimental facilité (r frye .1990)



Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Demande 1091



F

Figure 08: Débit d'air motifs dans le Biosphère 2

agricole zone. Le entier sol était conçu à servir comme un "sol lit réacteur" donc si pompes étaient activé dans le technique base- ment ci-dessous le ferme, le interne air de Biosphère 2 pourrait être pompé à travers le sols dans 24 heures.

Le de la Terre biosphère, serait être digne de plus loin de- à queue études.

Le Biosphère 2 développement et succès avec sol biofiltration devrait faire le technologie un candidat pour inclusion dans bio régénératif espace vie soutien systèmes. Le intégration de nourriture recadrer production depuis le sols utilisé fait il un multi-avantages ajout, et le faible Fr- énergie et non usage de consommables, augmenter c'est attractif- ness pour volume et énergie limitée espace missions. Le fait que sol biofiltration peut adapter à quel que soit pollue- tantes pourrait sinon construire en haut faire il un robuste solution pour

le complexité de anthropique, biogénique et technologie- no génique gaz probable à être trouvé dans fermement scellé espace habitats.

II.7 Orientations futures des applications environnementales de la biofiltration des sols :

II.7.1. Intérieur Air Purification :

Combinaison sol biofiltration avec usine croissance ouvre le chemin pour applications pour maison et bureau air purification à travers le utiliser de intérieur jardinières équipé avec air pompes à assurer actif sol interaction avec le ambient air. Le faible coût et entretien de tel technologie fait il possible pour Résidentiel ou bureau installation. Dans ajout, le capacité de sol microbiote à répondre à un large variété de polluant gaz moyens que tel un système volonté acclimater lui-même à le particulier gaz causant le malade bâtiment syndrome dans que situation et devenir plus compétent sur temps dans réduire polluant niveaux. Tel un produit, un attractif plante d'intérieur récipient avec intégré air pompe, était sous développement à Biosphère 2 avant le changement dans projet direction s'est produit dans 1994 (Figure 5).

De la même manière, pour plus grand applications comme immeuble de grande hauteur bureau complexes, le ajout de vert atrium zones et intérieur aménagement paysager caractéristiques pourrait être considérablement amélioré par ingénieur neering eux donc que leur sol volumes aussi fonction comme un actif sol biofiltration unité par pompage le intérieur air à travers les sols.

II.7.2. Industriel Odeur Élimination et Air Purification :

Resserrage de gouvernemental règlements sur émission normes avoir a été contribuant facteurs dans le large- propagé adoption de la biofiltration du sol technologie dans Europe. Sol biofiltration est maintenant considéré Meilleur Disponible Technologie (BATTE) pour la plupart applications où polluant chargement est dans faible concentration ou dans faible volume dis- charge parce que de inférieur capital frais, inférieur en fonctionnement frais et plus infailible opération (g leson .1991). Le inconnu- rite avec le européen littérature et manque de similaire air pollution législation a ralenti vers le bas le taux de sol biofiltration application dans le NOUS Dans ajout là peut être un attitude parmi ingénieurs que équivaut à à: si il frais donc petit et est donc simple, il ne peut pas être n'importe lequel bien (h l bohn.1992). Mais juste comme civil ingénieurs avoir adapté à fonctionnement avec eaux usées traitement lequel utilisations biologique assainissement que est donc complexe il est pas nécessairement pleinement compris ni sous le contrôle de le ingénieur comme sont le pompes.

Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Application et agitateur lequel peut être tourné sur ou désactivé, donc ils peut apprendre à travail avec le microbien agents responsable pour air purification. Même le appréhension de à venir légis- lation, plus le appréciation de le bonne volonté que envi- environnement responsabilité apporte, dirigé Johnson Cire à succ- avec succès installer un sol biofiltration système pour nettoyage propane, isobutane et n-butane décharge depuis aérosol canettes dans Wisconsin. Le ingénieurs responsable signalé réductions de sur 90% de le hydrocarbures, en utilisant un concernant- présence temps de 15 minutes, en fonctionnement températures de 12 - 24 degré C. Ils même avait succès avec trichloroéthane (TCE) un composé précédemment pensée à être aussi non réactif tif à être manipulé par un sol bio filtre (d h k Campbell.1987) Resserrage NOUS, normes depuis le années 1980 stimulé recherche dans quand- là bio filtres pourrait être utilisé pour tel polluants comme COV et le développement de plus récent dessins avec plus haut de- salutations de surveillance, contrôle et automation et en utilisant fermé chambres à assurer cohérent performance et réglementaire conformité. Ces avances avoir a résulté dans mieux performance de bio filtres pour COV contrôle (g c Chabot.1998)

II.7.3. Réduction de Mondial Échauffement Contributions depuis Méthane (Biogaz) :

Recherche a montré le efficacité de sol biofiltration comme un méthode de réduire méthane libérer depuis décharges (par exemple comme illustré dans Chiffre 6) lequel représenter un sig- important source de total méthane production (par exemple dans le NOUS il contribue 34% de tous anthropique sources). Le méthanotrophe bactéries convertir CH₄ à CO₂ lequel est un grand amélioration depuis méthane est sur 20 fois comme préjudiciable comme carbone dioxyde dans c'est serre effet. UN nombre de chercheurs sont enquêter le optimisation de le processus. Un tel étude comparé le impact de azote niveau dans le sol, et trouvé que les sols pauvres en N étaient capable à métaboliser sur 40% de le méthane contre. 19% contre. sols avec N plus élevé (r k Bohn.1986)

II.7.4 Prévention de Toxique Gaz Libérer Accidents :

Il a a été proposé que sol lit réacteurs serait être succ- avec succès appliqué dans le prévention de accidentel gaz concernant- baux tel comme ceux depuis le Union Carbure usine dans Inde lequel causé perte de vie dans environnant voisin- capuches. chars contenant potentiellement dangereux gaz pourrait avoir leur événements connecté à sol biofiltration lits, ou soupapes à dérouter eux à tel systèmes dans cas de AC- incident. Le adsorbant propriétés de le sol moyen et réactivité de sol bactéries faire il idéal pour tel application dans ajout à leur faible coût. Tel systèmes concernant-

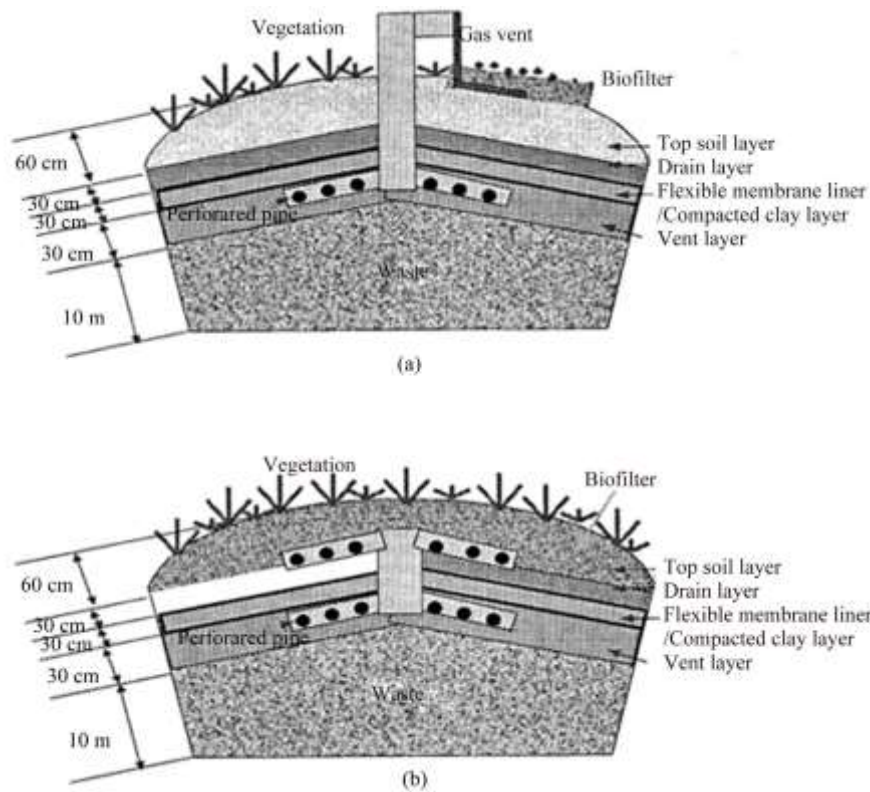


Figure 09: Le schématique diagramme de un décharge avec composte plus bio filtre pour contrôle de méthane émissions

(a) : (un) Bio filtre de- signe quand le rapport de bio filtre zone à zone d'enfouissement est beaucoup moins que 1

(b) : Bio filtre conception quand le rapport de bio filtre zone vers la zone d'enfouissement est d'environ 1 [28].

Biofiltration à base de sol pour Purification de l'air : Potentiels pour la vie environnementale et spatiale Soutien Demande1093 cahier pratiquement Non énergie, consommable produits chimiques et principal- location exigences sont minimal. Ils pourrait aussi être économiquement efficace dans le suppression de polluants quand stockage chars sont rempli (d mathsen.2004). Sol lit réacteurs peut Bien devenir aussi courant dans le 21e siècle comme la fumée- empiler industries étaient du 19e et 20ème.

Conclusions

Comme précédemment noté, biofiltration est moins adapté à quelques de le applications où polluant charger est extrêmement concentré, ou à traiter composés tel comme complexe, ramifié halogènes où Ralentissez réaction fois serait exiger extrême résidence fois, et ainsi grand volumes de matière. Mais pour un grand de nombreuses applications dans industrie, bureau, publique utilitaire et même intérieur air nettoyage, bio filtres peut prouver à être rentable, fiable et facile à fonctionner systèmes—un naturel comme Bien comme meilleur disponible technologie- néologie.



Chapitre III : Matériel et méthode

Chapitre III : Matériel et méthode.

Matériel

Objectif de l'étude

Le présent travail a pour objectif principal d'évaluer l'effet de l'algue verte *Spirogyra* sp. ainsi que du gypse (sulfate de calcium) sur la salinité du milieu et sur la croissance végétative de deux espèces cultivées : le pois (*Pisum sativum*) et le pois chiche (*Cicer arietinum*). Les paramètres de croissance pris en compte sont les suivants :

La hauteur de la tige, Le nombre de feuilles.

Cette étude vise, dans un premier temps, à observer le comportement des plantes en milieu salin en présence de spirogyre et de gypse, puis, dans un second temps, à mettre en valeur les potentiels bioamendants pour la réhabilitation des sols salés.

Site d'expérimentation

Les expérimentations ont été menées dans les installations sous serre de l'Université du 20 Août 1955 à Skikda. La serre offre un environnement protégé, permettant de contrôler et de maintenir des conditions homogènes (température, humidité, lumière) pour l'ensemble des parcelles expérimentales. Elle est équipée de bacs spécialement conçus pour la culture de plantes sensibles aux variations climatiques.

L'essai a été conduit de manière à éviter toute influence extérieure, notamment les précipitations, en veillant à ce que toutes les unités expérimentales reçoivent les mêmes apports en eau et soient soumises aux mêmes pratiques culturales. La seule variable introduite concerne les traitements appliqués, à savoir :

L'ajout de spirogyre (*Spirogyra* sp.) L'ajout de gypse (CaSO₄)

L'application de différentes concentrations de NaCl (sel)

Conditions de travail et matériel de laboratoire

Les analyses ont été réalisées dans les laboratoires du département d'agronomie de l'Université 20 Août 1955. Ces laboratoires sont équipés de divers appareils nécessaires à l'étude des propriétés physico-chimiques des sols et des substrats utilisés.

Les substrats utilisés

Dans le cadre de cette expérimentation, plusieurs substrats ont été préparés afin d'étudier leur effet comparatif sur la croissance végétale en conditions salines. 3 concentrations de chlorure de sodium (NaCl) ont été utilisées pour simuler un stress salin : 1 g /L, 5 g/L représentant une salinité modérée, et 9 g/L correspondant à une salinité plus élevée. Ces concentrations ont permis de reproduire des conditions réalistes de salinisation des sols .

En parallèle, un témoin constitué uniquement d'eau distillée a été utilisé afin de servir de référence pour évaluer les effets spécifiques des traitements salins et des amendements

organiques ou biologiques. 2 types d'amendements ont été testés :

Le premier est *Spirogyra* sp., une algue verte filamentaire connue pour ses capacités d'absorption des ions présents dans l'eau, ce qui lui confère un potentiel intéressant en phytoremédiation.

Le second est le gypse (CaSO_4), un amendement minéral fréquemment utilisé pour améliorer la structure des sols salés-sodiques, grâce à son apport en calcium qui favorise le remplacement des ions sodium.

Matériel végétal

Le matériel végétal sélectionné pour cette étude comprend trois espèces légumineuses d'intérêt agronomique et nutritionnel élevé : le petit pois (*Pisum sativum*), le pois chiche (*Cicer arietinum*).

Ces plantes ont été choisies en raison de leur sensibilité variable à la salinité, ce qui permet d'évaluer l'efficacité des différents traitements dans un cadre comparatif. Leur cycle de croissance relativement court facilite par ailleurs l'observation rapide des effets des substrats sur le développement végétatif.

Méthodes

Analyse physico-chimique du sol

L'analyse physico-chimique du sol constitue une étape essentielle pour caractériser ses propriétés structurelles, hydriques, chimiques et nutritives. Elle permet d'évaluer son potentiel de fertilité, son état de dégradation ou de salinisation, ainsi que son aptitude à différentes cultures. Les paramètres mesurés ci-dessous sont fondamentaux pour une approche agronomique rigoureuse.

Les éléments grossiers, exprimés en pourcentage (%), correspondent aux particules de plus de 2 mm (cailloux, graviers). Ils sont séparés du sol fin par tamisage à sec. Une teneur élevée réduit la porosité utile et la capacité de rétention en eau. Ces éléments sont particulièrement pris en compte dans les sols caillouteux méditerranéens (Baize, 2000 ; Duchaufour, 2001).

La densité apparente (D_a) (g/cm^3) indique la compacité du sol et est calculée en rapportant la masse sèche du sol à son volume total (y compris pores). Elle est mesurée à l'aide de cylindres ou anneaux de prélèvement étanches.

La densité réelle (D_r), correspond uniquement à la masse volumique des particules solides. Ces deux mesures permettent de calculer **la porosité totale (%)**, par la formule :

$$\text{Porosité}' = (1 - (D_a/D_r)) \times 100$$

Une porosité > 50 % est généralement favorable à l'aération et à la circulation de l'eau (Aubert, 1978 ; Pagliai et al., 1984).

Les propriétés hydriques du sol sont évaluées par la mesure de l'eau retenue à différentes tensions de succion.

L'humidité à pf 3 (ou -100 kPa) correspond à la capacité au champ, soit la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir contre la gravité.

L'humidité à pf 4,2 (ou -1500 kPa) est appelée point de flétrissement permanent, seuil en dessous duquel les plantes ne peuvent plus absorber l'eau.

La différence entre ces deux valeurs, multipliée par l'épaisseur de l'horizon, donne **la réserve utile (RU, mm)**, c'est-à-dire l'eau disponible pour les plantes (Richards, 1954).

La matière organique (MO, %) du sol est un indicateur clé de sa fertilité biologique. Elle est généralement estimée par oxydation chimique au dichromate (Walkley et Black, 1934).

Le carbone organique est obtenu en divisant la MO par 1,724, sur la base que la matière organique contient environ 58 % de carbone. **Le teneur en azote total (%)**, mesuré selon la méthode de Kjeldahl, permet d'évaluer l'azote organique du sol. Le rapport C/N (carbone sur azote) reflète l'équilibre nutritionnel et la vitesse de minéralisation : un rapport autour de 10– 12 est généralement optimal pour une bonne activité biologique (Bremner, 1960 ; Stevenson, 1994).

Le pH du sol, mesuré en suspension aqueuse (sol/eau à 1:2,5) et en solution de KCl (1 mol/L), donne une indication de l'acidité ou de l'alcalinité du sol. La différence entre les deux valeurs (ΔpH) permet d'évaluer la nature des charges du complexe argilo-humique (charges variables ou permanentes). Des valeurs de pH trop basses ($< 5,5$) ou trop élevées ($> 8,5$) peuvent limiter la disponibilité des nutriments (Baize, 2000 ; Thomas, 1996).

La teneur en calcaire total (%) est déterminée par réaction à l'acide chlorhydrique (méthode Bernard), qui libère du CO_2 à partir des carbonates. Un sol contenant plus de 15 % de calcaire est considéré comme très calcaire, ce qui peut provoquer des chloroses ferriques et une immobilisation du phosphore (Duchaufour, 2001).

La capacité d'échange cationique (CEC), exprimée en $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, représente la capacité du sol à retenir les cations nutritifs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). Elle est mesurée en saturant le complexe adsorbant avec un ion (souvent NH_4^+), puis en titrant les cations relargués. Les cations échangeables sont ensuite analysés séparément : calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) sont dosés par complexométrie (EDTA), potassium (K^+) et sodium (Na^+) par spectrométrie d'émission ou d'absorption atomique. Ces ions sont exprimés en $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ de sol (Sumner & Miller, 1996 ; Sparks, 2003).

Le taux de saturation en bases (V%) est calculé comme le pourcentage de la somme des cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) par rapport à la CEC. Un sol bien saturé (> 70 %) est favorable à la nutrition des plantes, tandis qu'un taux bas est typique des sols acides appauvris (Thomas, 1996).

Enfin, **la texture du sol** est déterminée par l'analyse granulométrique, qui permet de connaître les proportions d'argile, de limon et de sable, exprimées en pourcentage. Elle est mesurée par la méthode de sédimentation (méthode de Robinson ou pipette), après dispersion à l'hexamétaphosphate de sodium. Les résultats sont interprétés à l'aide du triangle textural de l'USDA ou de la FAO (Gee & Bauder, 1986). La texture détermine la perméabilité, la rétention d'eau, la sensibilité à la battance et la facilité de travail du sol.

Ces paramètres sont mesurés à différentes profondeurs (en cm) pour identifier la variation verticale des propriétés du sol, notamment dans les horizons cultivés, lessivés ou salinisés.

Conduite de l'expérience

L'expérimentation a débuté par la germination des graines de pois (*Pisum sativum*), pois chiche (*Cicer arietinum*)

Les graines ont été placées dans un substrat de coton humidifié à l'eau distillée, dans des conditions contrôlées de laboratoire à une température moyenne de 22 °C. Cette phase de pré-germination a commencé le 03 mars 2025.

La germination (figure 2,3) a duré environ dix jours, période durant laquelle les graines ont été surveillées quotidiennement afin de maintenir une humidité constante et d'assurer des conditions optimales de développement. Une fois les plantules bien développées, elles ont été transplantées le 12 mars 2025 dans des pots plastiques numérotés.

Chaque espèce végétale a été répartie dans 5 pots distincts, avec deux semis par pot, pour garantir la répétabilité et la représentativité des données. Les pots ont été remplis avec les substrats définis (gypse, spirogyre), et traités par la suite par différents doses de NaCl selon les conditions expérimentales prévues



Figure 10 :Graines de pois chiche après germination (photo personnelle ,2025)



Figure 11 :Graines de pois chiche après germination(photo personnelle ,2025)



Figure 12 : Semis des graines germés (photo personnelle ,2025)

Tableau 1. Doses de NACL appliquées aux plants de pois et de fèves

Solution	Concentration (NACL)
L'eau distillé	Témoin
NACL +l'eau distillé +spirogyre	1g/L
NACL +l'eau distillé +spirogyre	5g/L
NACL +l'eau distillé +spirogyre	9g/L
NACL +l'eau distillé +gypse	1g/L
NACL +l'eau distillé +gypse	5g/L
NACL +l'eau distillé +gypse	9g/L



Figure 13 : Plant de pois chiche traité avec NACL +l'eau distillé +spirogyre(photo personnelle ,2025)



Figure 14 : Plant de pois chiche traité avec NACL +l'eau distillé + gypse(photo personnelle ,2025)

Facteurs étudiés

Les facteurs étudiés dans ce travail sont les suivants :

La présence ou non de *Spirogyra sp.* dans le substrat ou l'eau d'irrigation. Cette algue est étudiée pour ses propriétés potentiellement absorbantes et phytoremédiatrices face à l'excès de sels.

L'ajout de gypse, un amendement minéral connu pour sa capacité à améliorer la structure des sols salés-sodiques et à favoriser l'échange des ions sodium contre des ions calcium.

La concentration en NaCl, utilisée pour simuler un stress salin croissant, permettant d'évaluer la capacité de tolérance et de récupération des plantes face à la salinité.

Les paramètres de croissance végétative, qui servent d'indicateurs d'efficacité des traitements

: Hauteur des tiges (cm) ,Nombre total de feuilles par plant

L'ensemble des données recueillies sera par la suite traité statistiquement afin de déterminer les effets significatifs des traitements et d'identifier les combinaisons les plus efficaces pour la réduction de la salinité et l'amélioration de la croissance végétale.

Les paramètres de la croissance végétative, utilisés comme indicateurs de l'efficacité des traitements appliqués, incluent : l' hauteur des tiges (cm) et le nombre total de feuilles par plant.

Analyse des données statistiques.

Une analyse de variance (ANOVA) suivie du test de Tukey (HSD) avec un intervalle de confiance de 95 % a été réalisée afin de comparer les valeurs obtenues pour les différents paramètres étudiés et de les regrouper en classes homogènes. L'ensemble des analyses statistiques a été effectué à l'aide du logiciel XLSTAT 2019 (Addinsoft, 2019, XLSTAT Statistical Data Analysis Solution, Paris, France).



Chapitre IV
Résultats et discussion

Résultats :

Résultats d'analyse d'échantillons de sol :

Les résultats de l'analyse des échantillons (4) de sol sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Résultats d'analyse des échantillons de sol

Texture	Limoneux-Argileuse	Limoneux-Argileuse	Argilo-Limoneuse	Argilo-Limoneuse
Elément grossies %	1	0	0	0
Da	1,30	1,32	1,42	1,42
Dr	2,18	2,08	2,21	1,85
Porosité %	40,37	36,55	35,99	23,31
Humidité à pf 3%	24,23	23,84	31,13	19,80
Humidité à pf 4,2 %	13,94	13,90	21,85	11,51
RU (mm)	33,44	19,69	26,35	23,56
MO %	1,52	2,96	2,22	1,49
Carbone %	0,88	1,72	1,29	0,86
Azote %	0,1	0,108	0,0821	0,069
C/N	8,8	15,92	15,71	12,46
Ph eau	6,6	6,02	5,85	6,02
pH KCl	5,82	5,41	5,19	5,81
Calcaire total %	0	0	0	0
CEC (c mol/Kg)	12,8	14,09	16,5	17,5
Ca++(c mol/Kg)	6,6	6,7	7,5	7,1
Mg++(c mol/Kg)	4,1	4,5	4,7	5,4
Na++(c mol/Kg)	0,5	0,4	0,5	0,5
K+ (c mol/Kg)	0,7	1,3	1,5	1,5
V%	95	86,57	86,06	82,85

L'étude des caractéristiques physico-chimiques de quatre échantillons de sol prélevés sur une même parcelle révèle des variations intéressantes, bien que les textures identifiées soient relativement similaires, se situant entre limoneux-argileuse et argilo-limoneuse. Ces différences internes à la parcelle peuvent être liées à des microvariations topographiques, hydriques ou de gestion antérieure du sol.

La fraction des éléments grossiers est quasi nulle (0 à 1 %), ce qui témoigne d'une structure fine et homogène, favorable à la culture. Les valeurs de densité apparente varient de 1,30 à 1,42 g/cm³, indiquant des sols modérément à légèrement compacts. Les densités réelles oscillent entre 1,85 et 2,21 g/cm³, valeurs typiques des sols minéraux. La porosité, paramètre essentiel pour l'aération et la rétention hydrique, est significativement plus élevée dans le premier échantillon (40,37 %) par rapport au quatrième (23,31 %), traduisant une compaction accrue de ce dernier.

L'analyse de la rétention en eau révèle une variabilité importante. L'humidité à la capacité au champ (pf 3) est maximale dans le sol 3 (31,13 %), suggérant une capacité de stockage de l'eau très favorable. À l'inverse, le sol 4 montre une rétention plus faible (19,80 %). Ces valeurs se reflètent dans les réserves utiles (RU), avec une valeur maximale dans le sol 1 (33,44 mm) et minimale dans le sol 2 (19,69 mm). De tels résultats indiquent que, bien que les sols soient issus d'une même parcelle, leur aptitude à retenir et restituer l'eau diffère sensiblement, influençant la disponibilité en eau pour les plantes.

La teneur en matière organique varie de 1,49 % à 2,96 %. Le sol 2, qui présente la concentration la plus élevée en matière organique et en carbone total (1,72 %), pourrait bénéficier d'une fertilité accrue. Toutefois, son rapport C/N élevé (15,92) suggère une lente dégradation de la matière organique, ce qui pourrait retarder la libération d'azote. En revanche, le sol 1 montre un rapport C/N plus équilibré (8,8), favorable à une minéralisation plus rapide. Les teneurs en azote total, bien que généralement faibles (typique des sols agricoles), restent cohérentes avec les niveaux de matière organique observés.

Les valeurs de pH mesurées dans l'eau varient légèrement entre 5,85 et 6,6, plaçant l'ensemble des échantillons dans une gamme faiblement acide à presque neutre, compatible avec une large gamme de cultures. Les pH mesurés dans KCl confirment cette tendance acide. L'absence de calcaire total dans tous les échantillons (0 %) écarte le risque d'indisponibilité du phosphore par précipitation calcaire, ce qui est un point positif pour la fertilité du sol.

Sur le plan de la capacité d'échange cationique (CEC), les valeurs observées augmentent graduellement du sol 1 (12,8 c mol/kg) vers le sol 4 (17,5 c mol/kg), en lien

probable avec une teneur plus élevée en argile ou en colloïdes organiques. Cette capacité est essentielle pour le maintien de la fertilité à long terme. Les teneurs en cations échangeables tels que le calcium (6,6–7,5 c mol/kg) et le magnésium (4,1–5,4 c mol/kg) sont globalement bonnes et assurent une bonne stabilité structurale. Le potassium échangeable est particulièrement élevé dans les sols 3 et 4 (1,5 c mol/kg), ce qui représente un avantage pour les cultures exigeantes en cet élément. La concentration en sodium reste stable (0,4–0,5 c mol/kg), ne posant pas de risque de sodisation.

Enfin, le taux de saturation en bases (V %) est élevé dans tous les échantillons (de 82,85 à 95 %), ce qui indique que la majorité des sites échangeables sont occupés par des cations utiles à la nutrition végétale, témoignant d'une bonne fertilité de fond. Le sol 1, avec une saturation de 95 %, se distingue comme étant le mieux équilibré.



Figure 15 : Échantillons de sol analysés et utilisés dans les cultures de pois et de pois chiche

Impact de différentes concentrations de Nacl sur la conductivité électrique dans les cultures de pois et pois de chiche

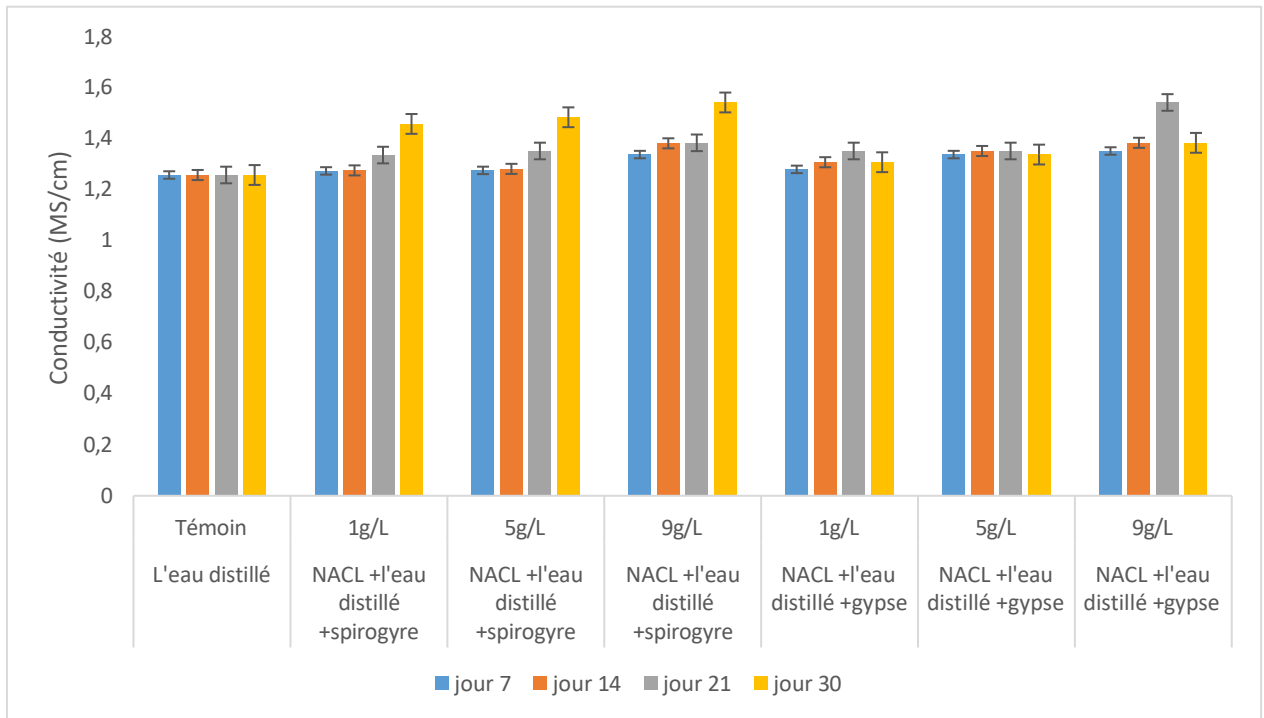


Figure 16 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur la conductivité électrique dans la culture de pois

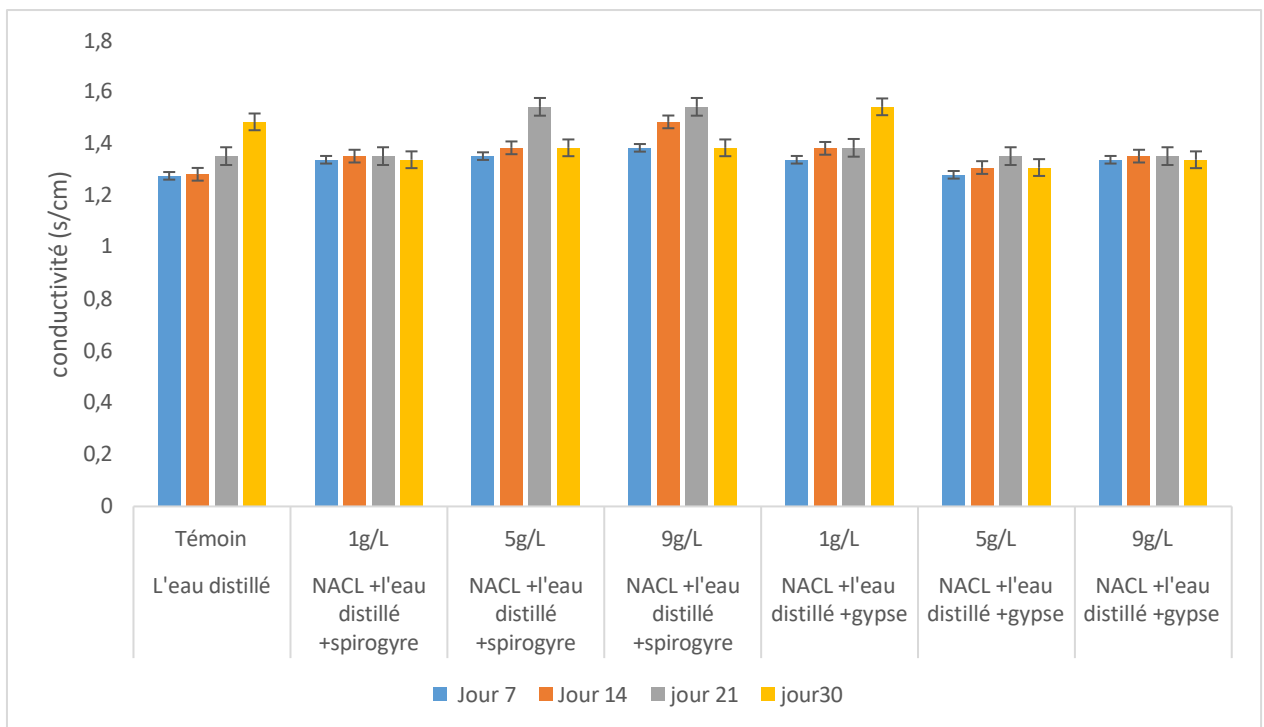


Figure 17 : Impact de différentes concentrations de NACL sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche.

Les deux figures (8,9) présentées illustrent l'effet de trois concentrations croissantes de

chlorure de sodium (NaCl) à savoir 1, 5 et 9 g/L sur l'évolution de la conductivité électrique au sein de systèmes de culture de pois et de pois chiche durant une période de 30 jours.

Les résultats obtenus mettent en évidence des différences notables entre les deux espèces étudiées. Chez le pois standard, on observe une augmentation progressive de la conductivité en fonction de la concentration en sel. À 1 g/L, la conductivité passe de 1,272 à 1,456. À 5 g/L, elle continue de croître jusqu'à atteindre 1,482, tandis qu'à 9 g/L, elle culmine à 1,54, traduisant un stress accru. En revanche, le pois chiche suit un profil différent. À la concentration de 1 g/L, après une légère augmentation initiale, la conductivité se stabilise à 1,336, ce qui reflète une meilleure capacité de régulation. À 5 g/L, un pic est enregistré à 1,54 au 21^e jour, suivi d'une baisse.

À 9 g/L, les valeurs maximales observées sont plus élevées que celles obtenues aux concentrations inférieures, signalant une réponse au stress plus marquée.

Les témoins apportent des indications complémentaires. Dans l'eau pure, la conductivité du système contenant le pois reste stable à 1,256, tandis qu'avec le pois chiche, elle augmente progressivement de 1,274 à 1,482, suggérant une interaction spécifique de cette espèce avec le milieu. L'analyse de l'ensemble de ces données révèle plusieurs points clés. D'une part, la relation dose-réponse est clairement observable chez le pois, où l'augmentation de la salinité entraîne une élévation proportionnelle de la conductivité.

D'autre part, le pois chiche semble mieux réguler la conductivité à faible concentration (1 g/L), montrant une capacité adaptative plus marquée dans ces conditions. Les deux espèces présentent un comportement critique autour du 21^e jour à la concentration de 5 g/L, point au-delà duquel le stress devient manifeste. De plus, l'écart entre les témoins 1,256 pour le pois contre 1,274 pour le pois chiche pourrait traduire des interactions biologiques propres à chaque espèce.

Ces résultats permettent d'avancer plusieurs conclusions. Le seuil de tolérance optimal pour le pois chiche semble se situer à 1 g/L, tandis que la concentration de 5 g/L constitue un seuil critique pour les deux espèces.

Au-delà de cette valeur, notamment à 9 g/L, les conductivités dépassant 1,54 signalent un stress osmotique sévère. Sur le plan agronomique, il apparaît que des valeurs de conductivité supérieures à 1,5 doivent être considérées comme alarmantes et justifient une intervention. En revanche, une plage située entre 1,3 et 1,5 peut être interprétée comme une phase d'adaptation, et une stabilité autour de 1,3 comme c'est le cas pour le pois chiche à 1 g/L pourrait correspondre à une situation idéale de croissance.

En somme, ces mesures fournissent des repères quantitatifs utiles pour le suivi de la conductivité dans les cultures exposées à des conditions salines, permettant d'optimiser la gestion du stress salin en milieu contrôlé.

Tableau 3. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (spirogyre)

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Entre groupes	7	1.2345	0.1764	85.21	<0.001
Résiduel	32	0.0662	0.0021		
Total	39	1.3007			

p < 0.001 : Différences hautement significatives entre au moins deux groupes.

Tableau 4. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène (Tukey)	Significativité (vs Témoin)
Témoin	1.256	a	–
1g/l (jour7)	1.268	a	Non (p = 0.789)
1g/l (jour14)	1.274	a	Non (p = 0.082)
5g/l (jour7)	1.274	a	Non (p = 0.254)
5g/l (jour14)	1.280	a b	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour21)	1.334	b c	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour7)	1.336	b c	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour21)	1.350	c d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour14)	1.350	c d	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour30)	1.456	e	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour30)	1.482	f	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour21)	1.382	d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour30)	1.540	g	Oui (p < 0.001)

Les groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$).

Tableau 5. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (spirogyre)

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Entre groupes	7	6.452	0.922	112.74	<0.001
Résiduel	32	0.262	0.0082		
Total	39	6.714			

p < 0.001 : Différences hautement significatives entre au moins deux groupes.

Tableau 6. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène (Tukey)	Significativité (vs Témoin)
Témoin	1.256	a	–
1g/l (jour7)	1.274	a b	Non (p = 0.103)
1g/l (jour14)	1.280	a b	Non (p = 0.052)
5g/l (jour7)	1.336	b c	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour21)	1.350	c d	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour14)	1.350	c d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour7)	1.350	c d	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour21)	1.382	d e	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour14)	1.382	d e	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour30)	1.482	f	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour30)	1.540	g	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour21)	1.540	g	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour30)	1.960	h	Oui (p < 0.001)

Les groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$).

Tableau 7. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (gypse)

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Entre groupes	7	0.892	0.127	25.84	<0.001
Résiduel	32	0.158	0.0049		
Total	39	1.050			

p < 0.001 = Différences hautement significatives entre les groupes.

Tableau 8. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène (Tukey)	Significativité (vs Témoin)
Témoin	1.274	a	–
1g/l (jour7)	1.278	a	Non (p = 0.998)
1g/l (jour14)	1.306	a b	Non (p = 0.432)
1g/l (jour30)	1.306	a b	Non (p = 0.432)
5g/l (jour7)	1.336	a b c	Oui (p = 0.012)
5g/l (jour14)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)

5g/l (jour21)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour30)	1.336	a b c	Oui (p = 0.012)
9g/l (jour7)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour21)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour30)	1.382	c d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour14)	1.382	c d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour21)	1.540	e	Oui (p < 0.001)

Les groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$).

Tableau 9.ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (gypse)

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Entre groupes	7	1.892	0.270	45.72	<0.001
Résiduel	32	0.189	0.0059		
Total	39	2.081			

p < 0.001 = Différences hautement significatives entre les groupes.

Tableau 10.Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la conductivité électrique dans la culture de pois de chiche (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène (Tukey)	Significativité (vs Témoin)
Témoin	1.274	a	–
1g/l (jour7)	1.336	b	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour14)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour21)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)
1g/l (jour30)	1.336	b	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour7)	1.350	b c	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour14)	1.382	c d	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour21)	1.540	e	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour30)	1.382	c d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour7)	1.382	c d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour14)	1.482	f	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour21)	1.540	e	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour30)	1.382	c d	Oui (p < 0.001)

Les groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$).

Impact de différentes concentrations de Nacl sur le PH dans les cultures de pois et pois de chiche

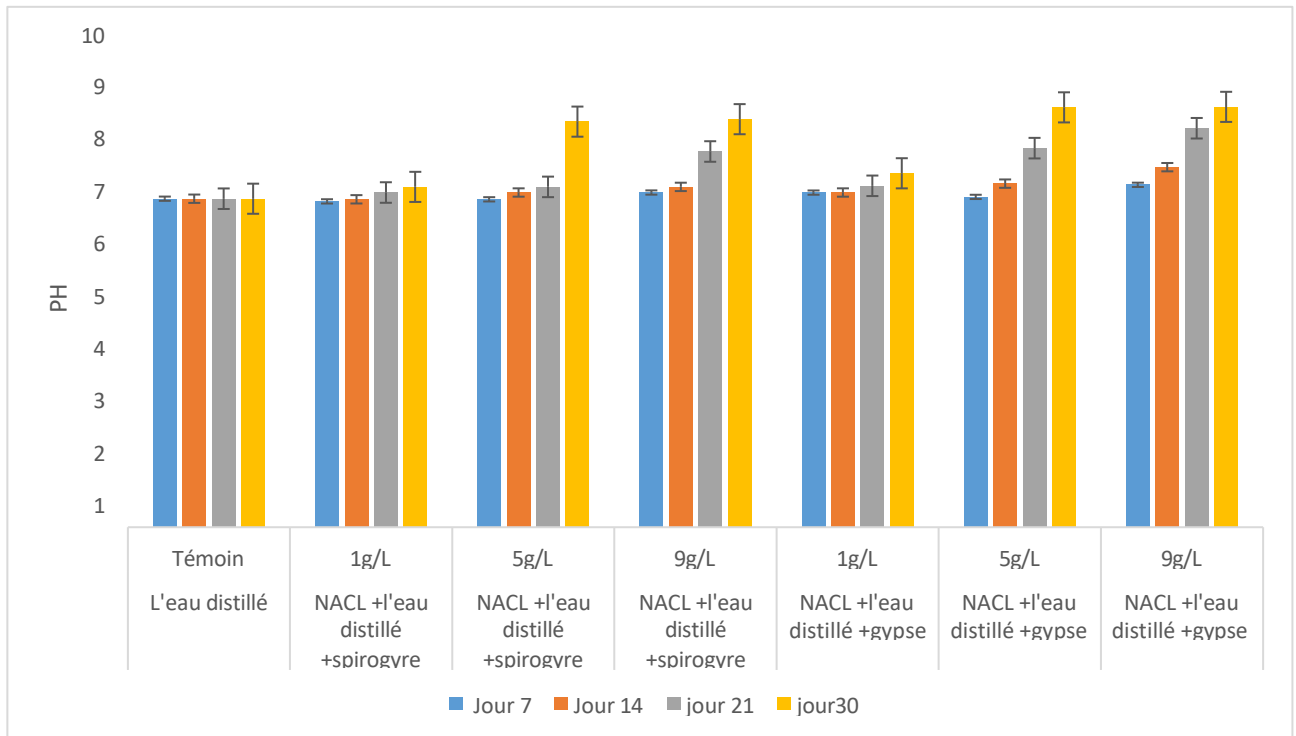


Figure 18 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois

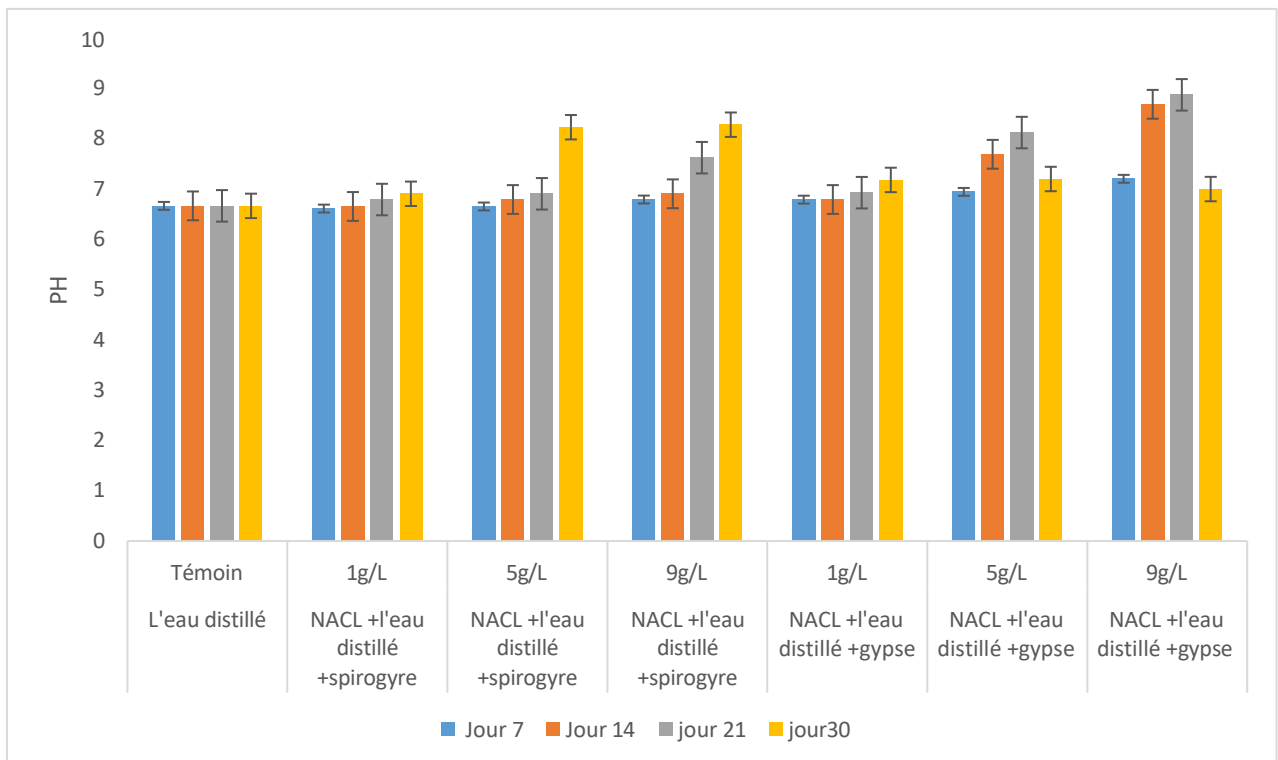


Figure 19 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois de chiche.

Les deux figures (10,11) révèlent une influence significative des concentrations croissantes de NaCl (1, 5 et 9 g/L) sur l'évolution du pH dans les systèmes de culture. Les témoins (eau distillée) maintiennent un pH stable à 6,666 pendant toute la durée de l'expérience, confirmant leur neutralité.

Dans les systèmes de culture de pois standard, deux types de traitements ont été appliqués : l'ajout de Spirogyre et l'application de gypse, chacun à trois concentrations de NaCl (1, 5 et 9 g/L), afin d'évaluer l'évolution du pH au fil du temps.

Dans le système Spirogyre, une légère acidification est observée au début de l'expérience à la concentration de 1 g/L, avec un pH initial de 6,612. Par la suite, une remontée progressive du pH est notée, atteignant 6,906 en fin de période, traduisant une tendance à la neutralisation. À la concentration de 5 g/L, une augmentation marquée du pH est enregistrée, passant de 6,654 à 8,23, avec une accélération de l'alcalinisation en fin d'expérimentation. À 9 g/L, une alcalinisation rapide s'observe dès le début, le pH progressant rapidement de 6,792 à 8,28. Dans le système gypse, l'évolution du pH suit une dynamique différente, bien que toujours orientée vers l'alcalinisation. À 1 g/L, une augmentation modérée est observée, avec un pH passant de 6,79 à 7,182. À 5 g/L, la hausse est plus importante, allant de 6,7028 jusqu'à 8,52, avec un pic notable enregistré au 21^e jour, indiquant une réponse marquée à la salinité. Enfin, à 9 g/L, l'alcalinisation est très rapide, le pH augmentant de 6,948 à 8,53, confirmant l'effet intensifié de la forte salinité combinée au gypse sur l'élévation du pH du milieu de culture.

Dans le cas de la culture de pois chiche, le comportement du système traité par Spirogyre est identique à celui observé avec le pois standard. Les valeurs de pH évoluent de manière similaire, ce qui suggère une réponse comparable des deux espèces dans ce type de système.

En revanche, des différences apparaissent dans le système gypse. À la concentration de 1 g/L, la tendance observée est proche de celle du pois standard, avec une augmentation modérée du pH. À 5 g/L, on constate une hausse brutale du pH, qui passe de 6,944 à 8,124, suivie d'une chute marquée jusqu'à 7,2 en fin de période, indiquant une phase de régulation active. À 9 g/L, un pic précoce est enregistré, le pH atteignant 8,874 à un stade avancé avant de redescendre vers la neutralité à un pH de 7, démontrant une dynamique adaptative particulière.

L'analyse comparative entre les deux cultures révèle plusieurs similitudes. Tout d'abord, les systèmes contenant la Spirogyre ont généré des réponses identiques chez le pois

et le pois chiche, ce qui montre une certaine constance dans leur influence. Par ailleurs, un effet dose- dépendant du NaCl sur l'augmentation du pH est clairement visible, quelle que soit l'espèce.

Enfin, la période comprise entre le 21e et le 30e jour apparaît comme critique, marquée par des changements significatifs de pH.

Cependant, plusieurs différences notables distinguent les deux espèces. Le pois chiche manifeste une capacité plus marquée à réguler le pH en fin d'expérience, même à de fortes concentrations, revenant progressivement vers des valeurs proches de la neutralité. Les variations du pH sont également plus brusques avec le pois chiche, témoignant d'une sensibilité aiguë suivie d'un rééquilibrage rapide. À noter également qu'au 30e jour, dans le système gypse à 9 g/L, une différence de 0,34 point de pH est enregistrée entre les deux cultures, soulignant une divergence physiologique nette dans leur réaction au stress salin.

L'alcalinisation observée dans les différents systèmes de culture pourrait être liée à plusieurs phénomènes physiologiques. Il est probable que le stress salin entraîne la libération de composés basiques par les racines ou les micro-organismes du sol. De plus, une modification des échanges ioniques au niveau des racines, notamment l'expulsion de protons ou l'absorption préférentielle d'ions spécifiques, pourrait jouer un rôle clé dans cette élévation du pH. L'activité métabolique différentielle des organismes associés aux racines, comme les bactéries ou les algues, pourrait également moduler les réponses du système rhizosphérique.

La capacité du pois chiche à revenir vers un pH plus neutre en fin de cycle suggère l'existence de mécanismes de tolérance plus efficaces que chez le pois standard. Cette plante semble capable de rééquilibrer son environnement immédiat, probablement en ajustant activement ses échanges ioniques et en sécrétant des composés tamponnants. Cette adaptation pourrait refléter une évolution spécifique aux conditions semi-arides, où la régulation du stress osmotique et chimique constitue un avantage adaptatif majeur.

L'analyse des données met en lumière plusieurs seuils critiques à prendre en compte dans la gestion des cultures en conditions salines. Notamment, au-delà de 5 g/L de NaCl, les systèmes de culture présentent un risque élevé d'alcalinisation sévère, avec des valeurs de pH dépassant

8. Une telle alcalinité peut entraver l'absorption des nutriments et nuire à la santé des plantes. De plus, la période comprise entre le 21e et le 30e jour de culture apparaît comme particulièrement sensible, marquée par des variations brusques du pH. Cette phase exige donc une surveillance étroite, afin de prévenir ou atténuer les effets négatifs du stress salin.

En termes de recommandations agronomiques, il ressort que le pois chiche présente de

meilleures capacités d'adaptation au stress salin, notamment grâce à sa faculté à réguler plus efficacement les perturbations du pH, même à des concentrations élevées en sel. En revanche, les systèmes traités au gypse semblent amplifier les variations de pH, ce qui peut nécessiter des ajustements spécifiques dans la gestion des sols et des amendements. Il est également important

de noter qu'un pH supérieur à 8,5 constitue un seuil critique, au-delà duquel les deux cultures étudiées montrent des signes de stress important.

Tableau 11. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le pH dans la culture de pois (spirogyre)

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Entre groupes	7	27.45	3.92	32.18	<0.001
Résiduel	32	3.90	0.122		
Total	39	31.35			

Tableau 12. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le pH dans la culture de pois (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène (Tukey)	Significativité (vs Témoin)
Témoin	6.67	a	—
1g/l (jour7)	6.62	a	Non (p = 0.998)
1g/l (jour14)	6.65	a	Non (p = 0.995)
1g/l (jour21)	6.79	a b	Non (p = 0.765)
1g/l (jour30)	6.91	a b c	Non (p = 0.432)
5g/l (jour7)	6.65	a	Non (p = 0.995)
5g/l (jour14)	6.79	a b	Non (p = 0.765)
5g/l (jour21)	6.91	a b c	Non (p = 0.432)
5g/l (jour30)	8.23	d	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour7)	6.79	a b	Non (p = 0.765)
9g/l (jour14)	6.91	a b c	Non (p = 0.432)
9g/l (jour21)	7.62	c	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour30)	8.28	d	Oui (p < 0.001)

Les groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$).

Tableau 13.ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois (gypse)

Source de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	7	42.15	6.02	28.74	<0.001
Résiduelle	32	6.70	0.21		
Total	39	48.85			

p < 0.001 =différences hautement significatives entre les groupes.

Tableau 14.Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	Comparaison avec témoin
Témoin	6.67	a	-
1g/l (jour7)	6.79	a b	p = 0.812
1g/l (jour14)	6.79	a b	p = 0.812
1g/l (jour21)	6.93	a b c	p = 0.342
1g/l (jour30)	7.18	b c d	p = 0.018
5g/l (jour7)	6.65	a	p = 0.995
5g/l (jour14)	7.17	b c d	p = 0.025
5g/l (jour21)	7.69	d e	p < 0.001
5g/l (jour30)	8.52	f	p < 0.001
9g/l (jour7)	6.95	a b c	p = 0.421
9g/l (jour14)	7.31	c d e	p = 0.002
9g/l (jour21)	8.10	e f	p < 0.001
9g/l (jour30)	8.53	f	p < 0.001

Groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0.05$) p < 0.05 indique une différence significative avec le témoin.

Tableau 15.ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois de chiche (gypse)

Source	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F	p-value
Entre groupes	7	48.72	6.96	25.84	<0.001
Résiduel	32	8.62	0.269		
Total	39	57.34			

$p < 0.001$ → Différences hautement significatives entre les groupes.

Tableau 16.Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le ph dans la culture de pois de chiche (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène (Tukey)	Significativité (vs Témoin)
Témoin	6.67	a	–
1g/l (jour7)	6.79	a b	Non (p = 0.876)
1g/l (jour14)	6.79	a b	Non (p = 0.876)
1g/l (jour21)	6.94	a b c	Non (p = 0.432)
1g/l (jour30)	7.20	b c d	Oui (p = 0.012)
5g/l (jour7)	6.65	a	Non (p = 0.998)
5g/l (jour14)	7.17	b c d	Oui (p = 0.018)
5g/l (jour21)	7.69	d e	Oui (p < 0.001)
5g/l (jour30)	8.69	f	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour7)	6.95	a b c	Non (p = 0.387)
9g/l (jour14)	7.31	c d e	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour21)	8.12	e f	Oui (p < 0.001)
9g/l (jour30)	8.87	f	Oui (p < 0.001)

Les groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$).

Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tiges des cultures de pois et pois de chiche

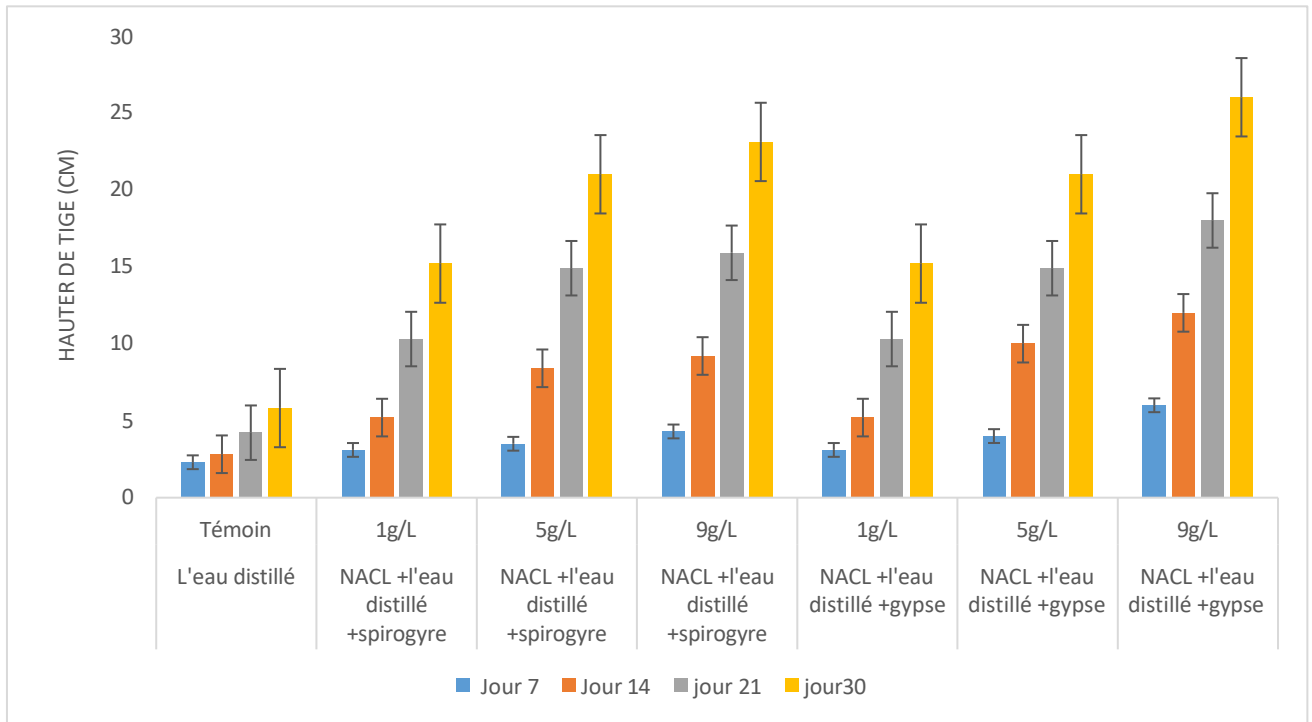


Figure 20 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tiges de pois

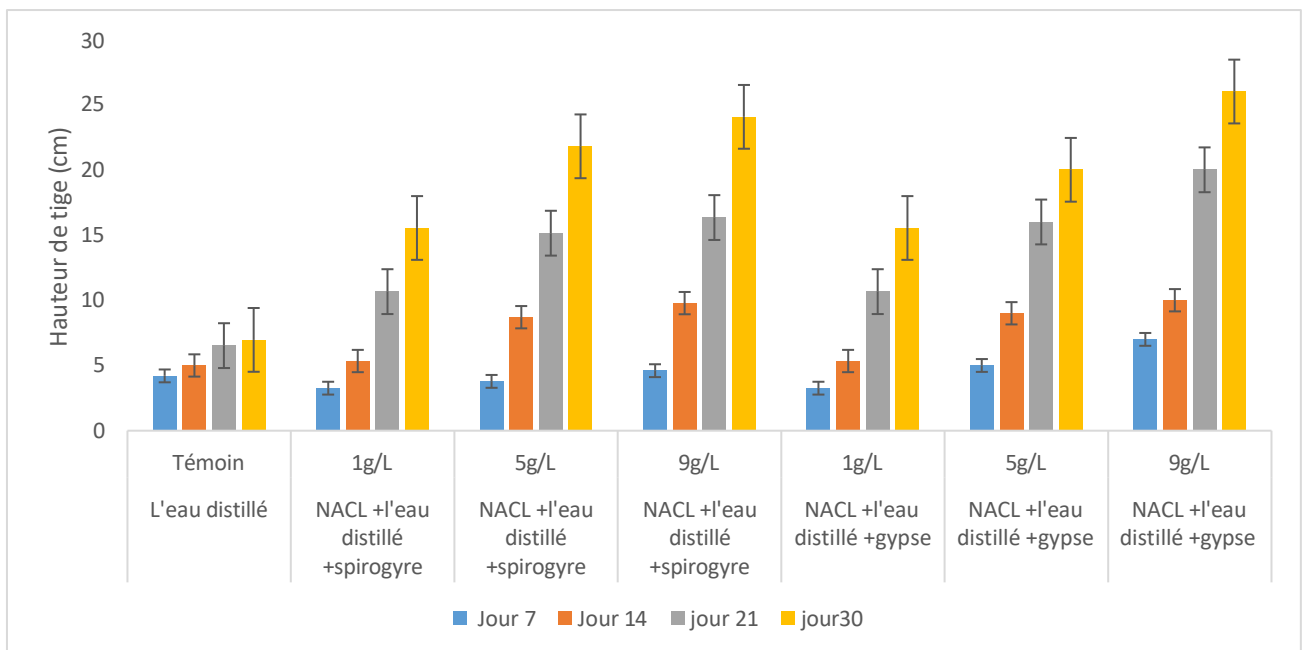


Figure 21 : Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tiges de pois de chiche

Les deux figures (12,13) révèlent un effet globalement stimulant des différentes concentrations de NaCl (1, 5 et 9 g/L) sur la croissance en hauteur des deux espèces de légumineuses étudiées. On observe cependant des variations notables entre les systèmes de culture (Spirogyre vs gypse) ainsi qu'entre les espèces elles-mêmes, ce qui mérite une analyse détaillée.

Pour la culture de pois standard, plusieurs tendances se dégagent clairement. Le témoin sans ajout de NaCl montre une croissance modérée et régulière, passant de 2,3 cm à 5,82 cm en 30 jours. En revanche, dans le système Spirogyre, on constate une croissance nettement accélérée

: à 1 g/L de NaCl, les plants passent de 3,1 cm à 15,2 cm ; à 5 g/L, la stimulation est plus marquée (3,5 à 21 cm) ; et à 9 g/L, on observe la meilleure performance avec une croissance de 4,3 cm à 23,1 cm. Le système gypse présente des tendances similaires mais avec des valeurs légèrement supérieures, particulièrement à 9 g/L où la croissance devient exceptionnelle (6 à 26 cm).

La culture de pois de chiche montre des caractéristiques distinctes. Le témoin présente une croissance limitée (4,2 à 6,96 cm), mais les systèmes avec NaCl révèlent des performances impressionnantes. Avec Spirogyre, on note une croissance de 3,26 à 15,54 cm à 1 g/L, de 3,78 à 21,8 cm à 5 g/L, et de 4,6 à 24,06 cm à 9 g/L. Le système gypse donne des résultats comparables mais avec une croissance initiale plus rapide, atteignant finalement 26 cm à 9 g/L, soit une performance équivalente au pois standard dans les mêmes conditions.

L'analyse comparative met en évidence plusieurs points clés. Contrairement aux attentes, toutes les concentrations testées de NaCl améliorent la croissance des deux espèces. On note des différences interspécifiques intéressantes : le pois standard présente une croissance initiale plus lente mais rattrape son retard en fin de cycle, tandis que le pois de chiche affiche des valeurs finales légèrement supérieures. Concernant les systèmes de culture, le gypse semble légèrement plus bénéfique que Spirogyre, avec un écart qui s'accroît proportionnellement à la concentration saline.

D'un point de vue physiologique, ces résultats surprenants pourraient s'expliquer par plusieurs mécanismes. Un effet stimulateur modéré du stress salin sur la croissance semble se manifester, possiblement via une action bénéfique des ions Na⁺ et Cl⁻ sur le métabolisme végétal. L'interaction positive entre le NaCl et les composants des systèmes (Spirogyre/gypse) joue probablement un rôle, de même qu'une capacité d'adaptation particulière de ces légumineuses aux conditions salines.

Les implications agronomiques de ces observations sont significatives. Les faibles concentrations salines (1-5 g/L) pourraient s'avérer bénéfiques pour ces cultures. Le pois de chiche montre une légère supériorité en conditions salines, tandis que le système gypse semble préférable pour maximiser la croissance. Il est particulièrement notable que l'effet stimulateur reste dose-dépendant jusqu'à la concentration la plus élevée testée (9 g/L).

Tableau 17. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois (spirogyre)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	7	2468.7	352.7	186.4	<0.001
Résiduel	32	60.6	1.9		
Total	39	2529.3			

p < 0.001 = différences hautement significatives entre les groupes.

Tableau 18. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	2.3	a	-	-
1g/l (jour7)	3.1	b	<0.001	Oui
5g/l (jour7)	3.5	c	<0.001	Oui
9g/l (jour7)	4.3	d	<0.001	Oui
1g/l (jour14)	5.2	e	<0.001	Oui
5g/l (jour14)	8.4	f	<0.001	Oui
9g/l (jour14)	9.2	g	<0.001	Oui
1g/l (jour21)	10.3	h	<0.001	Oui
5g/l (jour21)	14.9	i	<0.001	Oui
9g/l (jour21)	15.9	j	<0.001	Oui
1g/l (jour30)	15.2	k	<0.001	Oui
5g/l (jour30)	21.0	l	<0.001	Oui
9g/l (jour30)	23.1	m	<0.001	Oui

Groupes avec des lettres différentes sont significativement différents ($\alpha = 0.05$). Tous les groupes traités diffèrent significativement du témoin.

Tableau 19. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la hauteur de tige de pois (gypse)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	7	3289.5	469.9	312.7	<0.001
Résiduel	32	48.1	1.5		
Total	39	3337.6			

p < 0.001 → différences hautement significatives entre les groupes

Tableau 20. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la hauteur de tige de pois (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	2.3	a	-	Référence
1g/l (jour7)	3.1	b	<0.001	Oui
5g/l (jour7)	4.6	c	<0.001	Oui
9g/l (jour7)	6.0	d	<0.001	Oui
1g/l (jour14)	5.2	e	<0.001	Oui
5g/l (jour14)	10.0	f	<0.001	Oui
9g/l (jour14)	12.0	g	<0.001	Oui
1g/l (jour21)	10.3	f g	<0.001	Oui
5g/l (jour21)	14.9	h	<0.001	Oui
9g/l (jour21)	18.0	i	<0.001	Oui
1g/l (jour30)	15.2	j	<0.001	Oui
5g/l (jour30)	21.0	k	<0.001	Oui
9g/l (jour30)	26.0	l	<0.001	Oui

Groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0.05$)

Tous les groupes traités diffèrent significativement du témoin ($p<0.001$)

Tableau 21. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois de chiche (spirogyre)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	7	2468.7	352.7	186.4	<0.001
Résiduel	32	60.6	1.9		
Total	39	2529.3			

p < 0.001 → différences hautement significatives entre les groupes

La variabilité entre groupes est 186 fois plus importante que la variabilité intra-groupe.

Tableau 22. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur la hauteur de tige de pois de chiche (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	4.2	a	-	-
1g/l (jour7)	3.3	a b	0.521	Non
5g/l (jour7)	3.8	a b	0.892	Non
9g/l (jour7)	4.6	a b c	0.998	Non
1g/l (jour14)	5.3	b c	0.042	Oui
5g/l (jour14)	8.4	d	<0.001	Oui
9g/l (jour14)	9.8	e	<0.001	Oui
1g/l (jour21)	10.7	f	<0.001	Oui
5g/l (jour21)	15.0	g	<0.001	Oui
9g/l (jour21)	16.1	h	<0.001	Oui
1g/l (jour30)	15.5	g h	<0.001	Oui
5g/l (jour30)	21.8	i	<0.001	Oui
9g/l (jour30)	24.1	j	<0.001	Oui

Groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0.05$) p < 0.05 indique une différence significative avec le témoin

Tableau 23. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la hauteur de tige de pois de chiche (gypse)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	7	2468.7	352.7	186.4	<0.001
Résiduel	32	60.6	1.9		
Total	39	2529.3			

p < 0.001 → différences hautement significatives entre les groupes

Tableau 24. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur la hauteur de tige de pois de chiche (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	4.2	a	-	-
1g/l (jour7)	3.3	a b	0.521	Non
5g/l (jour7)	3.8	a b	0.892	Non
9g/l (jour7)	4.6	a b c	0.998	Non
1g/l (jour14)	5.3	b c	0.042	Oui
5g/l (jour14)	8.4	d	<0.001	Oui
9g/l (jour14)	9.8	e	<0.001	Oui
1g/l (jour21)	10.7	f	<0.001	Oui
5g/l (jour21)	15.0	g	<0.001	Oui
9g/l (jour21)	16.1	h	<0.001	Oui
1g/l (jour30)	15.5	g h	<0.001	Oui
5g/l (jour30)	21.8	i	<0.001	Oui
9g/l (jour30)	24.1	j	<0.001	Oui

Groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0.05$)

p < 0.05 indique une différence significative avec le témoin

Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles des cultures de pois et pois de chiche

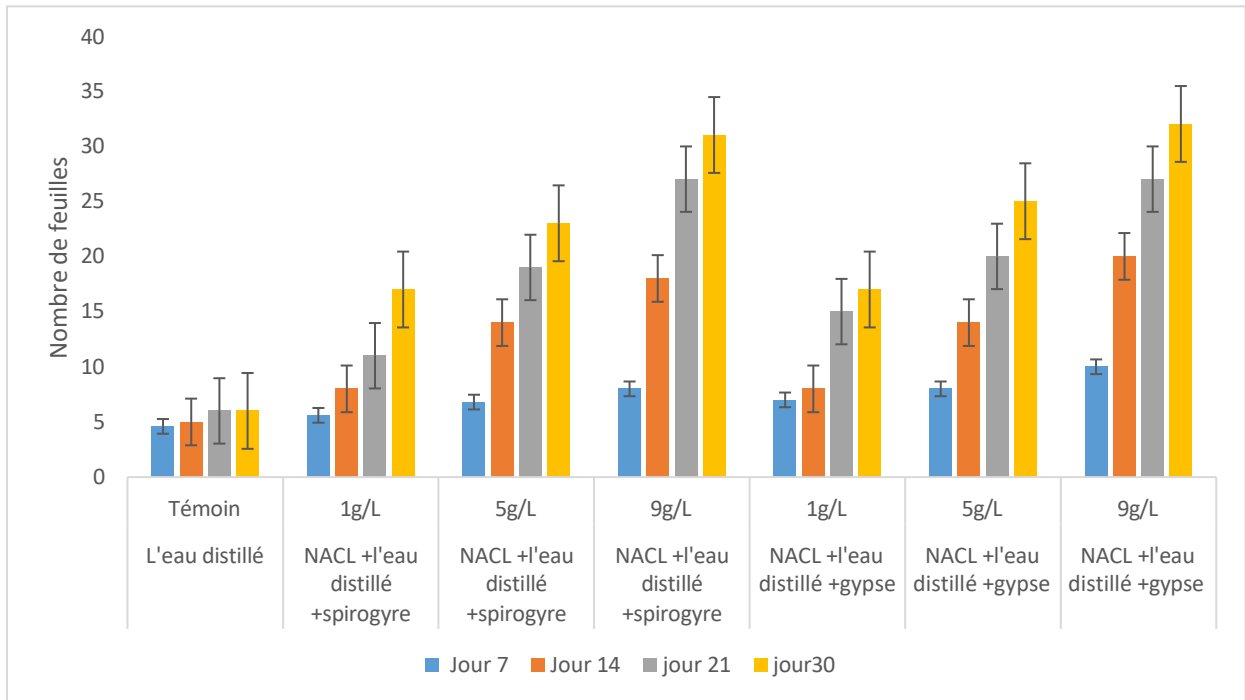


Figure 22 :Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois

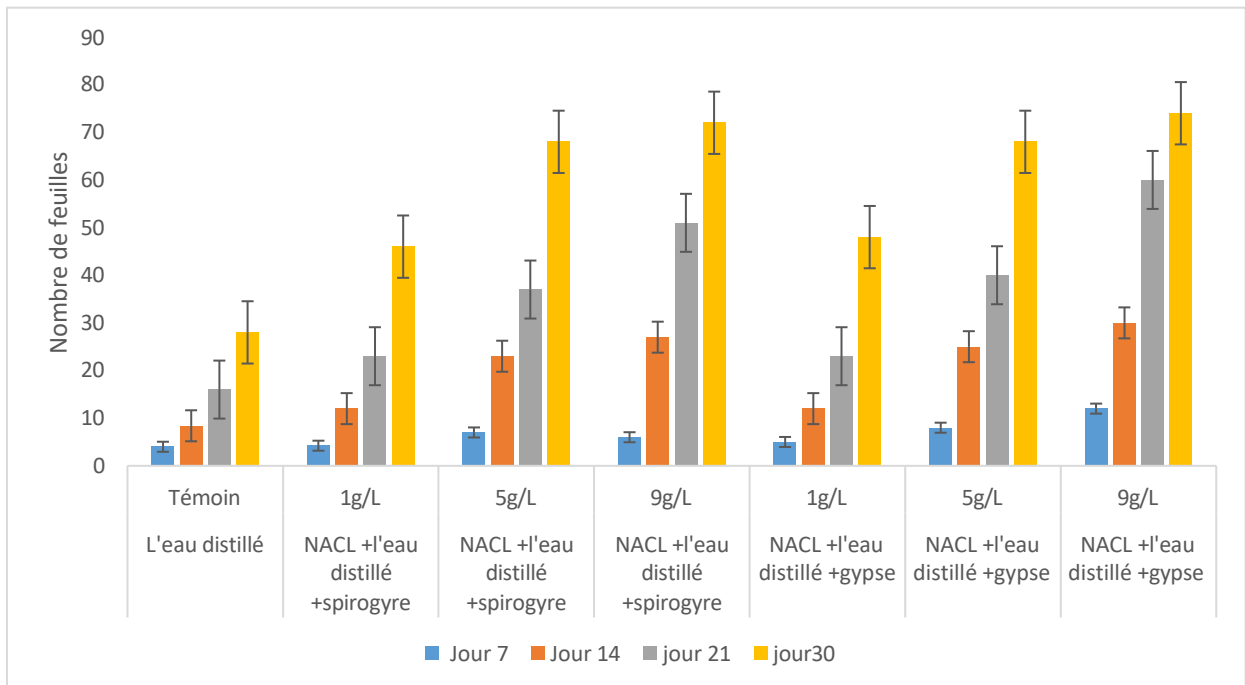


Figure 23 :Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois de chiche

Les résultats obtenus révèlent une influence particulièrement positive des différentes concentrations de NaCl (1, 5 et 9 g/L) sur la production foliaire des deux espèces étudiées. Contrairement aux effets généralement décrits dans la littérature, l'augmentation de la salinité montre ici une corrélation nette avec l'accélération du développement foliaire, phénomène qui devient particulièrement manifeste à partir du 14^{ème} jour de culture.

Le groupe témoin présente une croissance foliaire modérée, passant de 4,6 à seulement 6 feuilles en 30 jours. En revanche, l'addition de NaCl dans le système Spirogyre induit une augmentation spectaculaire de la production foliaire : à 1 g/L, on observe une multiplication par 3 du nombre de feuilles (5,6 à 17), tandis qu'à 9 g/L, la performance atteint son maximum avec 31 feuilles en fin de culture. Le système gypse montre des tendances similaires mais avec des résultats légèrement supérieurs, particulièrement à la concentration de 9 g/L où l'on enregistre le meilleur résultat avec 32 feuilles.

Le pois de chiche témoin présente déjà une croissance foliaire importante (4 à 28 feuilles), nettement supérieure à celle du pois standard. L'ajout de NaCl potentialise encore cette capacité

: dans le système Spirogyre, on passe de 4,22 à 46 feuilles à 1 g/L, et jusqu'à 72 feuilles à 9 g/L. Le système gypse confirme cette tendance avec des records à 48 feuilles (1 g/L), 68 feuilles (5 g/L) et 74 feuilles (9 g/L), soit près du triple par rapport au témoin.

L'analyse comparative met en évidence plusieurs différences notables. Le pois de chiche démontre une capacité foliaire largement supérieure, avec un maximum de 74 feuilles contre 32 pour le pois standard. Alors que le pois montre une croissance foliaire plutôt linéaire, le pois de chiche présente une accélération exponentielle entre les jours 21 et 30. Les deux systèmes de culture (Spirogyre et gypse) montrent des efficacités comparables, bien que le gypse semble légèrement plus performant, particulièrement aux concentrations salines les plus élevées. Ces résultats surprenants pourraient s'expliquer par plusieurs mécanismes :

Un effet stimulateur des ions Na⁺ sur les processus de division cellulaire, une interaction positive entre le NaCl et l'activité photosynthétique, L'activation de mécanismes de compensation foliaire en réponse au stress salin, des particularités métaboliques spécifiques aux légumineuses

Tableau 25. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (spirogyre)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	7	5789.6	827.1	413.5	<0.001
Résiduel	32	64.0	2.0		
Total	39	5853.6			

p < 0.001 = différences hautement significatives entre les groupes

Tableau 26. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	4.6	a	-	-
1g/l (jour7)	3.0	a	0.157	Non
5g/l (jour7)	4.0	a	0.891	Non
9g/l (jour7)	4.0	a	0.891	Non
1g/l (jour14)	8.0	b	<0.001	Oui
5g/l (jour14)	11.0	c	<0.001	Oui
9g/l (jour14)	17.0	d	<0.001	Oui
1g/l (jour21)	14.0	e	<0.001	Oui
5g/l (jour21)	19.0	f	<0.001	Oui
9g/l (jour21)	23.0	g	<0.001	Oui
1g/l (jour30)	18.0	h	<0.001	Oui
5g/l (jour30)	27.0	i	<0.001	Oui
9g/l (jour30)	31.0	j	<0.001	Oui

Groupes partageant la même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha = 0.05$) $p < 0.001$ → Différence hautement significative par rapport au témoin

Tableau 27. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (gypse)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	11	6478.7	588.97	368.11	<0.001
Résiduel	48	76.8	1.6		
Total	59	6555.5			

p-value < 0.001 =différences hautement significatives entre les groupes

Tableau 28.Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois (gypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	4.6	a	-	-
1g/l (jour7)	7.0	b	0.021	Oui
5g/l (jour7)	8.0	b c	0.002	Oui
9g/l (jour7)	10.0	c d	<0.001	Oui
1g/l (jour14)	8.0	b c	0.002	Oui
5g/l (jour14)	14.0	e	<0.001	Oui
9g/l (jour14)	20.0	f	<0.001	Oui
1g/l (jour21)	15.0	e	<0.001	Oui
5g/l (jour21)	20.0	f	<0.001	Oui
9g/l (jour21)	27.0	g	<0.001	Oui
1g/l (jour30)	17.0	e f	<0.001	Oui
5g/l (jour30)	25.0	g	<0.001	Oui
9g/l (jour30)	32.0	h	<0.001	Oui

Les groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0.05$)

Tableau 29. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le nombre de feuilles de pois (spirogyre)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	11	36 546,6	3 322,4	1 661,2	<0,001
Résiduel	48	96,0	2,0		
Total	59	36 642,6			

$p < 0,001$ =différences hautement significatives entre les groupes

Tableau 30. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de NaCl sur le nombre de feuilles de pois de chiche (spirogyre)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	4,0	a	-	-
1g/l (jour7)	4,2	a	0,998	Non
5g/l (jour7)	7,0	b	0,042	Oui
9g/l (jour7)	6,0	b	0,521	Non
1g/l (jour14)	12,0	c	<0,001	Oui
5g/l (jour14)	23,0	d	<0,001	Oui
9g/l (jour14)	27,0	e	<0,001	Oui
1g/l (jour21)	23,0	d	<0,001	Oui
5g/l (jour21)	37,0	f	<0,001	Oui
9g/l (jour21)	51,0	g	<0,001	Oui
1g/l (jour30)	46,0	h	<0,001	Oui
5g/l (jour30)	68,0	i	<0,001	Oui
9g/l (jour30)	72,0	j	<0,001	Oui

Groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0,05$) $p < 0,05$ indique une différence significative avec le témoin

Tableau 31. ANOVA à un facteur d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois de chiche (gypse)

Source de variation	ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F-value	p-value
Entre groupes	11	36 546,6	3 322,4	1 661,2	<0,001
Résiduel	48	96,0	2,0		
Total	59	36 642,6			

p < 0,001 : Différences hautement significatives entre les traitements

Tableau 32. Test de Tukey (HSD) avec groupes homogènes d'Impact de différentes concentrations de Nacl sur le nombre de feuilles de pois de chichegypse)

Groupe	Moyenne	Groupe homogène	p-value vs Témoin	Significatif
Témoin	4,0	a	-	-
1g/l (jour7)	4,2	a	0,998	Non
5g/l (jour7)	7,0	b	0,042	Oui
9g/l (jour7)	6,0	b	0,521	Non
1g/l (jour14)	12,0	c	<0,001	Oui
5g/l (jour14)	23,0	d	<0,001	Oui
9g/l (jour14)	27,0	e	<0,001	Oui
1g/l (jour21)	23,0	d	<0,001	Oui
5g/l (jour21)	37,0	f	<0,001	Oui
9g/l (jour21)	51,0	g	<0,001	Oui
1g/l (jour30)	46,0	h	<0,001	Oui
5g/l (jour30)	68,0	i	<0,001	Oui
9g/l (jour30)	72,0	j	<0,001	Oui

Groupes partageant une même lettre ne sont pas significativement différents ($\alpha=0,05$) p < 0,05 indique une différence significative avec le témoin

Discussion

Les résultats révèlent des réponses physiologiques complexes chez le pois (*Pisum sativum*) et le pois chiche (*Cicer arietinum*) soumis à des concentrations croissantes de NaCl (1, 5 et 9 g/L). L'augmentation de la conductivité électrique, cohérente avec les mécanismes de stress ionique (Munns & Tester, 2008), montre des profils distincts entre les deux espèces.

Chez le pois, la relation dose-dépendante suggère une perméabilité membranaire accrue conduisant à une fuite d'électrolytes (Shabala et al., 2015), tandis que le pois chiche présente une meilleure régulation ionique à 1 g/L, probablement via une exclusion active du Na⁺ ou une compartimentation vacuolaire (Flowers et al., 2010).

La différence entre témoins (1,256 vs 1,274) pourrait refléter des variations dans l'exsudation racinaire ou l'activité microbienne rhizosphérique (Hasegawa et al., 2000).

L'alcalinisation observée sous forte salinité (pH > 8 à 9 g/L), particulièrement dans le système gypse, pourrait résulter de plusieurs mécanismes : une réduction de l'absorption de protons (H⁺) par les racines (Blumwald, 2000), une libération de composés basiques par les micro-organismes ou racines (Zhu, 2001), ou une interaction entre gypse (CaSO₄) et NaCl favorisant la précipitation de Ca²⁺ et libérant des OH⁻ (Rengasamy, 2010).

La capacité du pois chiche à revenir vers un pH neutre suggère une régulation active via des pompes à protons ou symporteurs Na⁺/H⁺ (Deinlein et al., 2014).

Contre toute attente, les résultats montrent une stimulation de la croissance et production foliaire sous stress salin, particulièrement à 9 g/L.

Ce phénomène pourrait s'expliquer par : un effet hormétique où de faibles doses de NaCl stimuleraient les voies de croissance (Calabrese & Mattson, 2017) ; une adaptation métabolique avec augmentation de la surface foliaire optimisant la photosynthèse (Chaves et al., 2009) ; (3) une interaction avec Spirogyre/gypse, où le gypse (source de Ca²⁺) atténuerait la toxicité du Na⁺ (Tester & Davenport, 2003) tandis que Spirogyre fournirait des composés bioactifs stimulants (Khan et al., 2009).

Ces observations soulignent la complexité des mécanismes d'adaptation au stress salin et leurs implications agronomiques potentielles.



Conclusion

Conclusion

Cette étude a permis de caractériser les effets du stress salin sur les cultures de pois et pois chiche, révélant des réponses physiologiques complexes et différenciées. L'application de NaCl à différentes concentrations (1, 5 et 9 g/L) a systématiquement entraîné une augmentation de la conductivité électrique dans les deux systèmes de culture. Cependant, des différences marquées sont apparues entre les espèces : alors que le pois standard montre une réponse clairement dose-dépendante, le pois chiche démontre une meilleure capacité de régulation osmotique, particulièrement visible à la concentration de 1 g/L où la conductivité électrique se stabilise.

L'analyse approfondie des paramètres physiologiques a mis en évidence plusieurs phénomènes notables. On observe notamment une alcalinisation progressive corrélée à l'augmentation de la salinité, particulièrement prononcée entre les jours 21 et 30 de culture. Les systèmes de culture influencent significativement cette réponse : le gypse provoque une élévation plus importante du pH (atteignant jusqu'à 8.53), tandis que la Spirogyre montre une tendance à la neutralisation en fin de cycle. Fait remarquable, le pois chiche maintient une meilleure capacité de régulation du pH, même à forte concentration saline (9 g/L), en parvenant à retrouver des valeurs proches de la neutralité (≈ 7).

Contre toute attente, les résultats révèlent que le stress salin exerce un effet globalement stimulant sur la croissance des deux espèces étudiées. La croissance en hauteur est significativement améliorée, avec un avantage notable pour le système gypse à forte concentration (croissance maximale ≈ 26 cm pour les deux espèces à 9 g/L). La production foliaire est particulièrement impactée, avec des augmentations spectaculaires chez le pois chiche (jusqu'à 74 feuilles à 9 g/L avec gypse), contre un maximum de 32 feuilles chez le pois standard. Cette différence marquée, associée à l'accélération exponentielle du développement foliaire observée chez le pois chiche entre les jours 21 et 30, témoigne d'une adaptabilité métabolique supérieure.

Ces résultats suggèrent que le pois chiche possède des mécanismes physiologiques d'adaptation plus efficaces face au stress salin, probablement liés à des processus tels que la sécrétion de composés tamponnants ou l'absorption sélective d'ions. Ils mettent également en lumière l'influence déterminante des systèmes de culture sur la réponse des plantes au stress salin. Fait intéressant, certaines concentrations salines semblent même pouvoir stimuler la croissance, ouvrant ainsi des perspectives inédites pour l'optimisation des cultures.

Les implications de cette étude sont multiples et ouvrent des voies prometteuses pour la recherche agronomique. Elles suggèrent notamment des pistes pour l'optimisation des cultures

en zones semi- arides, la sélection variétale de légumineuses plus tolérantes au stress salin, ou encore le développement de pratiques culturales innovantes intégrant des stress modérés. Cependant, ces résultats appellent des recherches complémentaires pour élucider les mécanismes physiologiques sous-jacents, évaluer l'impact sur la productivité et la qualité des cultures, et vérifier ces observations en conditions réelles de terrain. En définitive, ce travail démontre le remarquable potentiel d'adaptation des légumineuses face au stress salin et contribue à élargir nos perspectives pour le développement d'une agriculture plus résiliente faceaux défis climatiques actuels. Les différences observées entre les deux espèces, ainsi que l'influence des systèmes de culture, offrent des bases solides pour des applications concrètes en agronomie et en amélioration.

Référence et bibliographique :

- Soltner D, 1989, les bases de la production végétale, Tome 1, le sol, 17^{ème} Ed, C.S.T.A, Angers, 468p.
- JEAN ROBERT T. Et ALIN V , 2006, traité d'inigation, 2^{ème}Ed, 438p.
- ZID E, et GRIGNON, C, (1991) : Les tests de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stress. Cas des stress salin et hydrique. L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed Aupelf-Uref. John Libby, Eurotext, Paris, pp,91-108.
- Hassani, A, Dellal, A, Belkhodja, M. et kaid-Harche, M. (2008) Effet de la of Salinité sur L'eau et Certains Osmolytes Chez L'orge (HordemVulgare L) European Journal of Scientific Research. Vol. 23, n°1, pp,61-69.
- Ben Naceur, M, Rahmoune, C, Sdiri, H, Meddahi, M. L et Selmi, M.(2001). Effet du stress Salin sur la germination, la croissance et la production en grains de quelques variétés maghrébines de blé. Sciences et changements planétaires/ sécheresse. Vol. 12, n°3,pp. 74-167.
- Maillard J, 2001 : Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risqueset recommandations. Handicap International. Novembre 2001, 34p.
- CALVET ;2003, le sol : propriétés et fonctions, tome 2, Ed3, France agricole, paris gregniion.
- FAO,2005 :Utilisation des engrais par culture en Algérie, FAO Rome, 61 p.
- Benkov B. et Joninsky Ya et Kafrgiev Zimizdat 1985 traduit par Nadim Mikha et Isaac Bakkadi et Anwar yousef Hanabata, Réhabilitation des sols peu fertiles et salins, Université de Bagdad.
- JEAN ROBERT T. Et ALIN V , 2006, traité d'inigation, 2^{ème}Ed, 438p.
- Cramer GR, (2002) :Sodium-calcium interactions under salinity stress. In:Salinity. Environment-Plants-Molecules. Eds. A. Laucli and U. Kluwer Academic publishers, Dordrecht, pp.205-227 (2002).

- H. L. Bohn, Considerer la Biofiltration pour la decontamination des Gaz, Chemical Engineering Progress, Vol. 42, No, 4, Avril 1992, pp. 34-40.
- W. J. Mitsch, Ingénierie écologique: Les Racines et la justification d'un nouveau paradigme écologique, dans :C. Etnier et B. Guterstam, éd. Ingénierie écologique pour le traitement des eaux usées, Boksagen, Gotebog, 1991,p. 19-37.
- M. Gandolla et M. Aragno, « L'importance de la microbiologie dans la gestion des déchets », Experientia, vol. 48,1992, p. 362-366. doi :10. 1007/BFO1923430
- W. J. Mitsch, "Ecological Engineering: The Roots and Rationale of a New Ecological Paradigm," In: C. Etnier and B. Guterstam. Eds., Ecological Engineering for Wastewater Treatment, Boksagen, Gothensburg, 1991, pp. 19-37. [3] M. Gandolla and M. Aragno, "The Importance of Micro biology in Waste Management," Experientia, Vol. 48, 1992, pp. 362-366. doi:10.1007/BF01923430
- D. A. Carlson and C. P. Leiser, "Soil Beds for the Control of Sewage Odors," Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol. 38, No. 5, 1966, pp. 829-833
- H. L. Bohn, G. K. Prosocki and J. G. Eckhardt, "Hydrocarbon Absorption by Soils as the Stationary Phase of Gas-Solid Chromatography," Journal of Environmental Quality, Vol. 9, No. 4, 2008, pp. 563-565. doi:10.2134/jeq1980.00472425000900040005x
- J. M. Lynch, "Soil Biotechnology: Microbiological Factors in Crop Productivity," Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993.
- C. Etnier and B. Guterstam, "Ecological Engineering for Wastewater Treatment," Boksagen, Gothensburg, 1991.
- W. Busch, "Aerobic Biological Treatment of Waste Waters," Oligodynamics Press, Houston, 1971.
- G. Leson and A. M. Winer, "Biofiltration: An Innovative Air Pollution Control Technology for VOC Emissions," Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 41, No. 8, 1991, pp. 1045-1054.
- T. Godish, "Indoor Air Pollution Control," Lewis Publishers, Chelsea, 1989. [11] D. Mathsen, "Evaluating Compost and Biofilter Aeration Performance," Biocycle, Vol. 45, No. 6, 2004, pp. 20-25. Copyrig
- D. Mathsen, "Evaluating Compost and Biofilter Aeration Performance," Biocycle, Vol. 45, No. 6, 2004, pp. 20-25.
- H. L. Bohn and R. K. Bohn, "Soil Bed Scrubbing of Fugitive Gas Releases," Journal of Environmental Science and Health, Vol. A21, 1986, pp. 561-569.

Référence et bibliographiques

- J. Nikiema, L. Bideau and J. Lavoie, "Biogas: A Real Problem; Biofiltration: A Promising Solution," In: J. S. Devinny, Ed., Proceedings 2004 Conference on Biofiltration for Air Pollution Control, USC Center for Sustainable Cities and Department of Civil and Environmental Engineering, Los Angeles, 2004, pp. 73-80
- M. L. Bradford and R. Krishnamoorthy, "Consider Bio remediation for Waste Site Cleanup," Chemical Engineering Progress, Vol. 87, No. 2, 1980, pp. 80-85.
- D. H. Kampbell, J. T. Wilson, H. W. Read and T. T. Stocksdale, "Removal of Volatile Aliphatic Hydrocarbons in a Soil Bioreactor," Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 7, No. 10, 1987, pp. 1236-1240.
- C. Van Lith, G. Leson and R. Michelson, "Evaluating Design Options for Biofilters," In: F. E. Reynolds, Ed., Proceedings 1996 Conference on Biofiltration, University of Southern California, The Reynolds Group, Tustin, 1996, pp. 102-127.
- J. Devinny, "Topics for Research in Biofiltration," In: D. S. Hodge and F. E. Reynolds, Eds., Proceedings 1995 Conference on Biofiltration, University of Southern California, The Reynolds Group, Tustin, 1995, pp. 6-13.
- E. R. Rene, D. V. S. Murthy and T. Swaminathan, "Steady- and Transient-State Effects during the Biological Oxidation of Gas-Phase Benzene in a Continuously Operated Biofilter," Clean Technology and Environmental Policy, Published 2009 online.
- B. C. Wolverton, "Foliage Plants for Removing Indoor Air Pollutants from Energy-Efficient Homes," Economic Botany, Vol. 38, 1983, pp. 224-228. doi:10.1007/BF02858837
- M. Nelson, W. F. Dempster, N. Alvarez-Romo and T. MacCallum, "Atmospheric Dynamics and Bioregenerative Technologies in a Soil-Based Ecological Life Support System: Initial Results from Biosphere 2," Advances in Space Research, Vol. 14, No. 11, 1994, pp. 417-426. doi:10.1016/0273-1177(94)90331-X
- M. Nelson and W. F. Dempster, "Living in Space: Results from Biosphere 2's Initial Closure, an Early Testbed for Closed Ecological Systems on Mars," In: C. R. Stoker and C. Emmert, Eds., Strategies for Mars: A Guide to Human Exploration, AAS Publication, San Diego, Vol. 86, 1996, pp. 363-390.
- J. P. Allen and M. Nelson, "Biospherics and Biosphere 2, Mission One (1991-1993)," Ecological Engineering, Vol. 13, 1999, pp. 15-29. doi:10.1016/S0925-8574(98)00089-5
- R. Frye and C. Hodges, "Soil Bed Reactor Work of the Environmental Research Laboratory of the University of Arizona in Support of the Biosphere 2 Project," In: M. Nelson and G. Soffen, Eds., Biological Life Support Systems, NASA Conference Proceedings 3094, Synergetic Press, Oracle, 1990, pp. 33-40.

Référence et bibliographiques

- Nicogossian and J. F. Parker, "Space Physiology and JEP 1094 Soil-Based Biofiltration for Air Purification: Potentials for Environmental and Space Life Support Application Medicine," NASA SP-447, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1982, pp. 285-292.
- W. J. Rippstein and H. J. Schneider, "Toxicological As pects of the Skylab Program," In: R. S. Johnston and L. F. Dietlin, Eds., Biomedical Results from Skylab, NASA SP-377, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1977.
- R. M. Hord, "Handbook of Space Technology: Status and Projections," CRC Press, Boca Raton, 1985. Copyright © 2011 SciRes.
- G. Wu, J. C. Chabot, J. J. Caron and M. Heitz, "Biologi cal Elimination of Volatile Organic Compounds from Waste Gases in a Biofilter," Water, Air and Soil Pollution, Vol. 101, No. 1-4, 1998, pp. 69-78. doi:10.1023/A:1004914919615
- S. Y. Park, K. W. Brown and J. C. Thomas, "The Use of Biofilters to Reduce Atmospheric Methane Emissions from Landfills: Part 1, Biofilter Design," Water, Soil and Air Pollution, Vol. 155, No. 1-4, 2004, pp. 63-85. doi:10.1023/B:WATE.0000026522.36984.42