

Introduction

Les radionucléides, comme le Cesium-137 (Cs-137), le Strontium-90 (Sr-90), ou encore les isotopes de l'uranium (U), sont des éléments émetteurs de rayonnements qui peuvent être libérés dans l'environnement à la suite d'activités industrielles et militaires, d'exploitations minières, d'accidents nucléaires, ou encore par apports naturels. Lorsqu'ils sont présents dans l'eau, eaux de surface, nappes phréatiques, ou encore lixiviats, ils posent deux types de problèmes principaux : i. un risque radiologique direct pour la santé humaine, dans le cas d'ingestion ou d'inhalation, et, ii. un impact environnemental durable dû à leur persistance et, pour certains isotopes, à leurs longues demi-vies. Parmi les différentes stratégies de dépollution des eaux, certaines approches cherchent à limiter l'impact environnemental tout en réduisant les coûts de traitement. La phytoremédiation fait partie de ces solutions dites « douces », puisqu'elle utilise la capacité naturelle des plantes à capter, accumuler ou transformer des contaminants. Elle ne constitue pas une solution miracle, mais offre une alternative intéressante pour traiter des eaux faiblement ou moyennement polluées, notamment lorsqu'une intervention lourde serait coûteuse ou écologiquement perturbatrice. **(1, 4, 5)**

La phytoremédiation, par la rhizofiltration, peut-elle réellement constituer une solution viable pour le traitement des eaux contaminées par des radionucléides ?

I. Phytoremédiation et Rhizofiltration

La phytoremédiation :

I- Utilisation des **plantes** et leurs micro-organismes associés pour extraire, immobiliser, transformer, ou contenir, des contaminants **(1,2)** de l'environnement.

II- Repose sur plusieurs mécanismes (I, II, III, IV, V), dont la **Rhizofiltration** (VI), qui sont effectués selon la nature du contaminant et la disponibilité biologique.

(Les différents mécanismes restent interconnectés (par exemple : rhizofiltration, phytostabilisation, bioaccumulation, etc.).

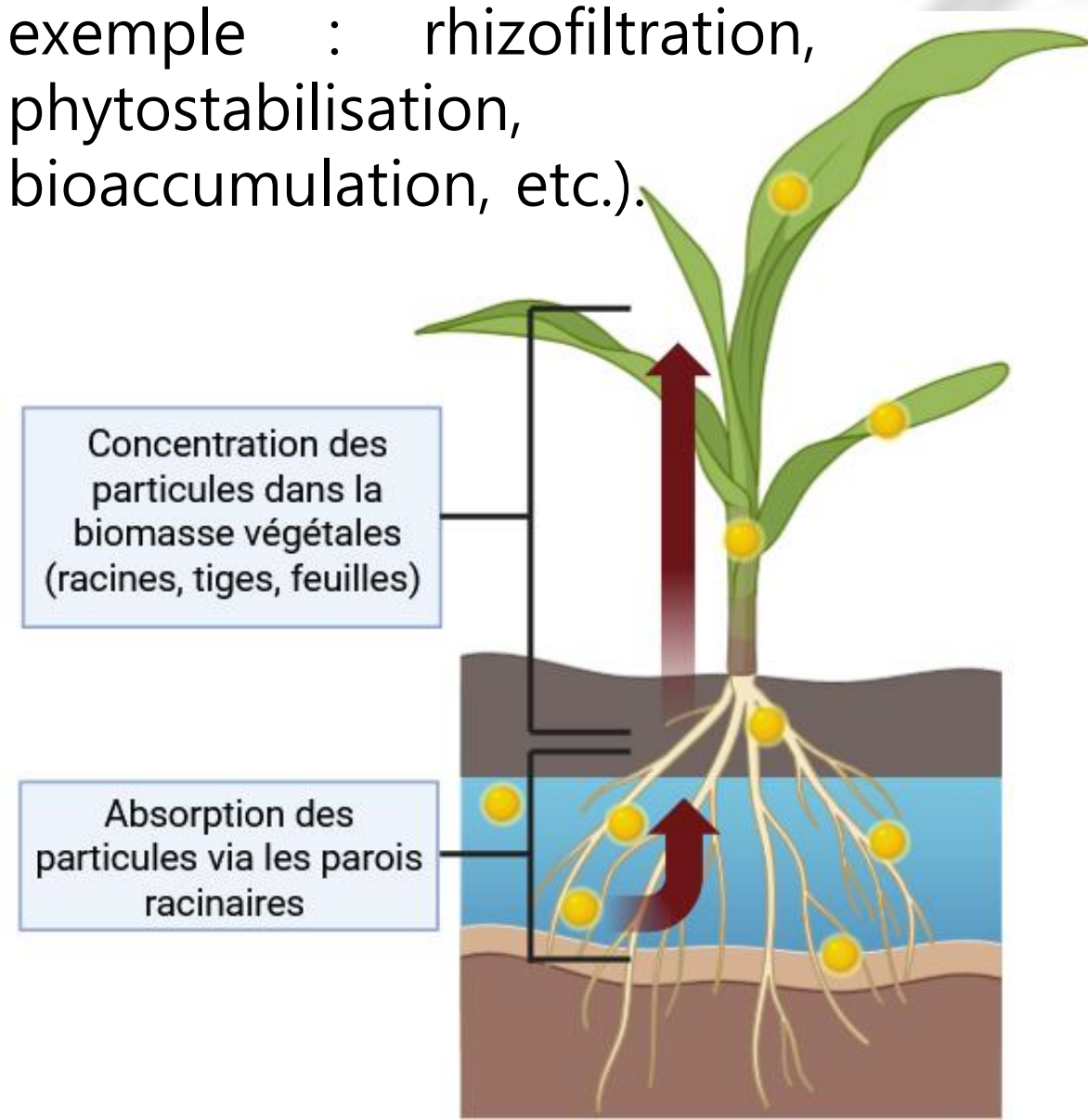


Figure 2 : schéma explicatif du mécanisme de rhizofiltration des eaux (création personnelle).

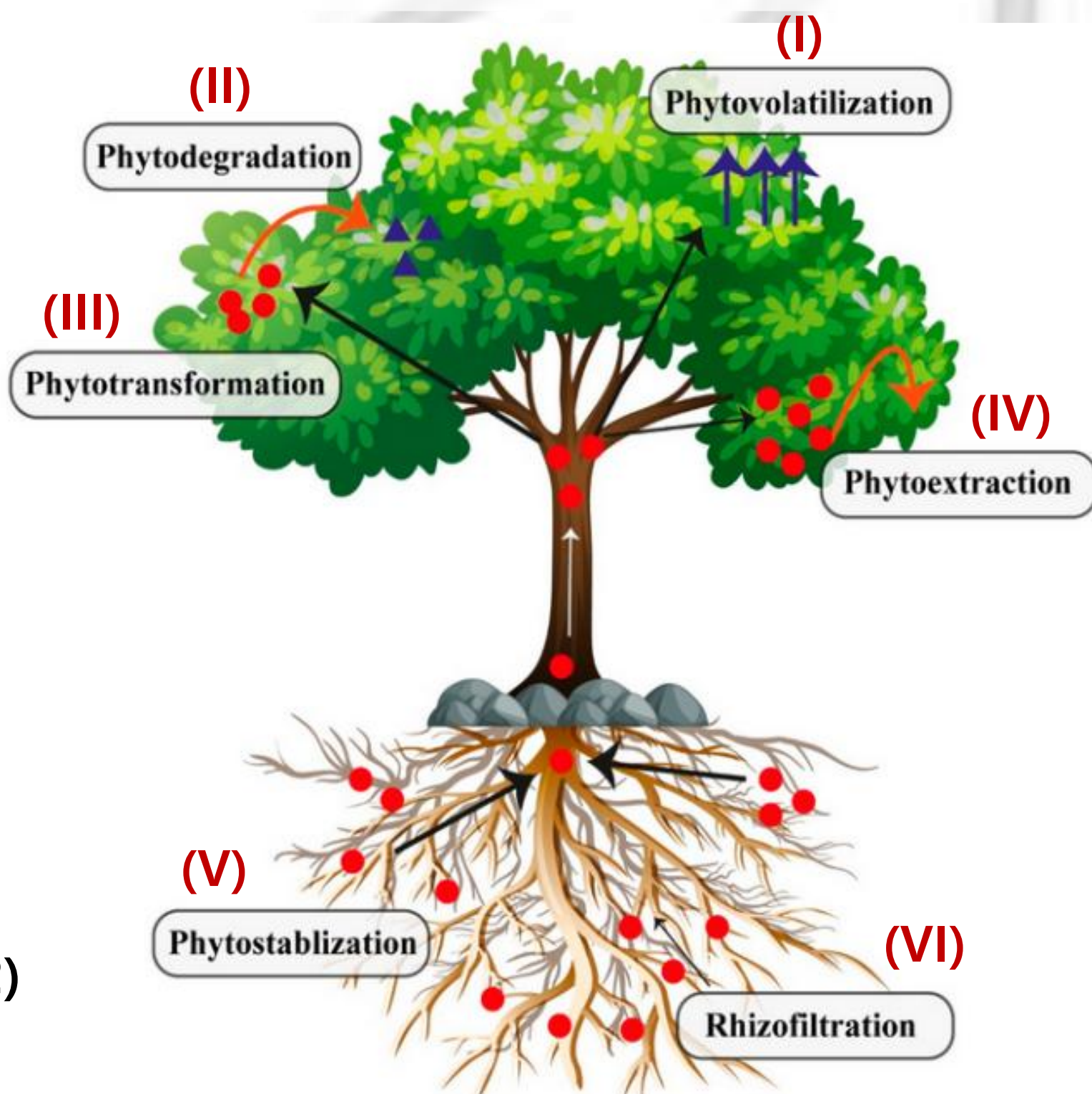


Figure 1 : schéma explicatif des différents mécanismes de la phytoremédiation (création personnelle). **(1)**

La rhizofiltration :

- Contact prolongé eau–racine.
- Précipitation des ions dans la rhizosphère.
- Sorption des radionucléides via les parois racinaires.
- Accumulation des contaminants dans la biomasse racinaire.
- Adaptation aux eaux faiblement à modérément contaminées.
- Efficacité élevée en conditions contrôlées (sensibilité pH et ions).

(2, 3)

(2, 3)

II. Application de la rhizofiltration, par utilisation du tournesol

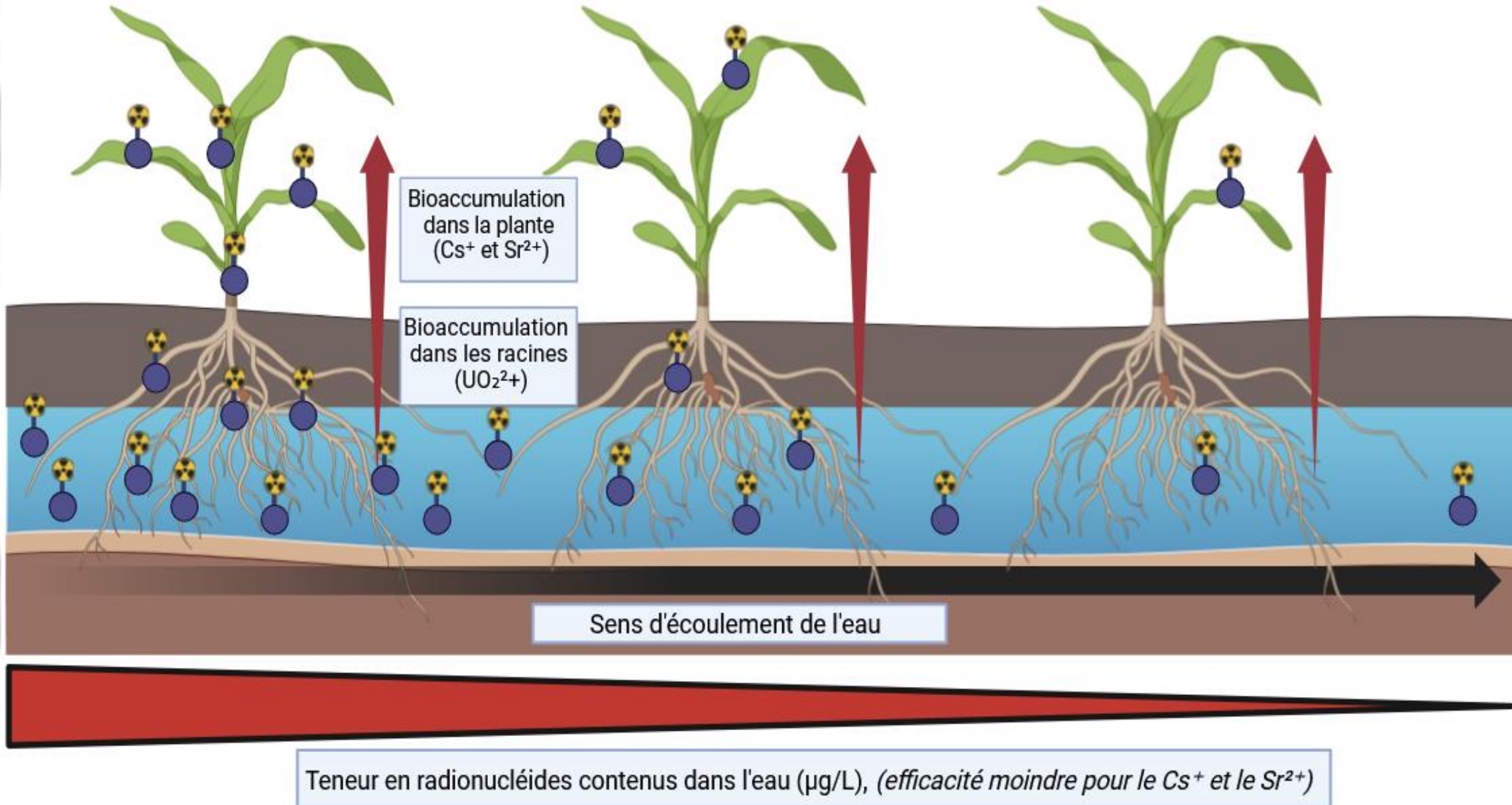


Figure 3 : schéma explicatif du système continu de rhizofiltration en série, en présence d'eau riche en radioéléments (création personnelle). **(4, 5)**

Conditions nécessaires :

Idéalement, le pH doit rester entre 4 et 7, l'oxygénation être continue, et les ions compétiteurs limités. L'U nécessite un traitement court (h/j), tandis que Cs et Sr demandent une exposition plus longue (plusieurs j). **(4, 5)**

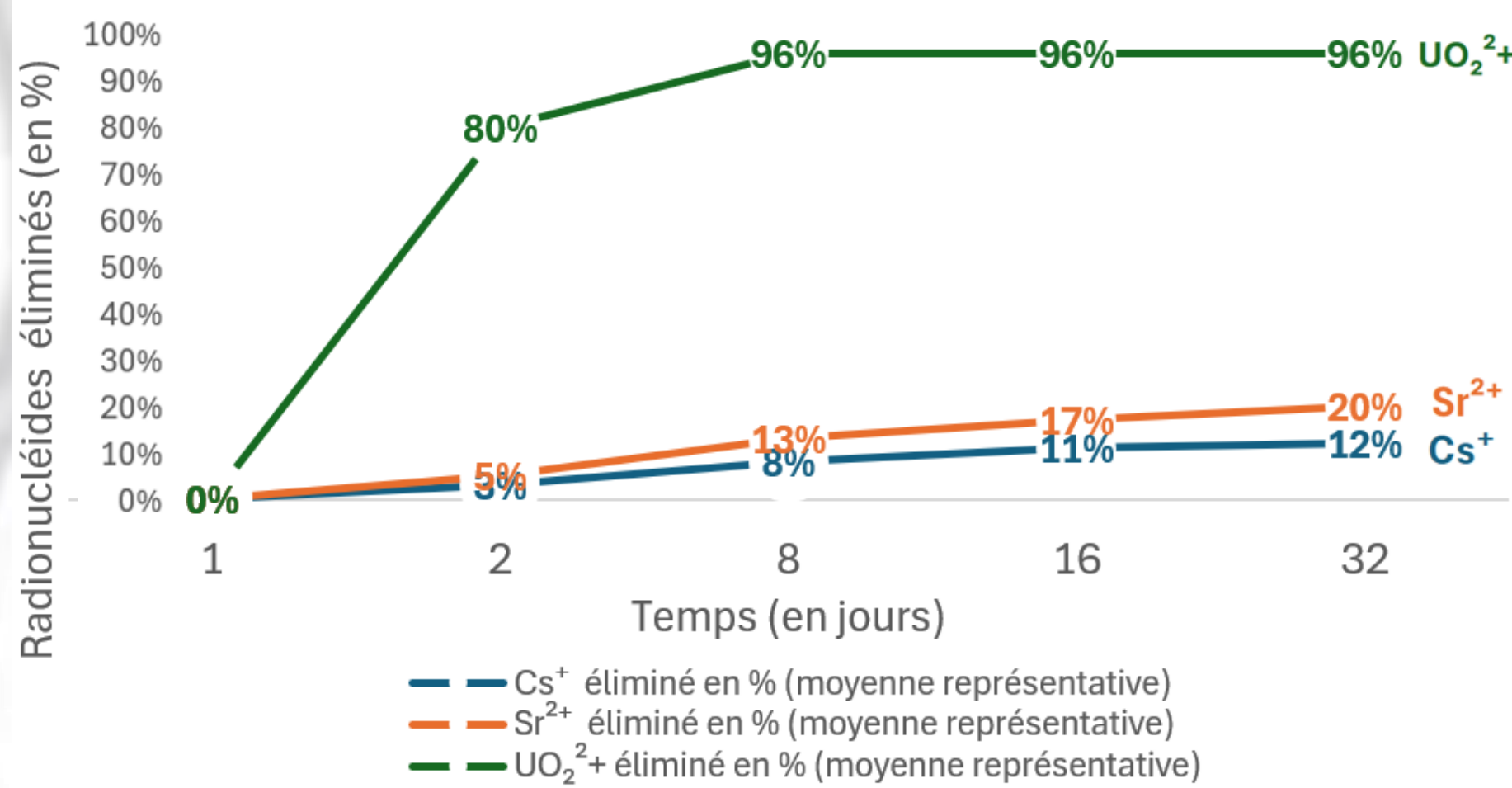


Figure 4 : graphique en nuage de points du pourcentage de radionucléides éliminés, par rhizofiltration, au cours du temps (création personnelle). **(4, 5)**

Principe général :

Le tournesol (ici, *Helianthus annuus*) est choisi afin d'appliquer la rhizofiltration en raison de sa croissance rapide, de sa forte biomasse et de son aptitude démontrée à accumuler des métaux et radionucléides. **(4)**

Dispositif expérimental optimal :

Les plants de tournesol sont placés en hydroponie dans des bacs remplis d'une solution contaminée (fonctionne aussi en système continu). L'oxygénation, la lumière (16 h/8 h) et la température (20–25 °C) sont contrôlées. Concentration initiale en radionucléides : U (242–543 µg/L), Cs et Sr (≈ 50 µg/L).

(4, 5)

Comportement des radionucléides :

L'U est rapidement adsorbé sur les racines (83–97 % en 24 h). Le Cs est absorbé puis transporté vers les feuilles (≈12 % en 32 jours). Le Sr s'accumule dans les tiges (≈20 % en 32 jours).

La rhizofiltration montre une très forte efficacité d'élimination de l'uranium : en 24–48 h, les concentrations résiduelles chutent à 5–18 µg/L, même avec une eau initialement à 543 µg/L. Toutes les valeurs finales de l'U restent inférieures au seuil de potabilité de l'U.S. EPA (30 µg/L). Cependant, une efficacité bien moindre est observée pour le Césium et le Strontium. **(4, 5)**

III – Comparaison, points forts et limites

Tableau 1 : Tableau comparatif, Rhizofiltration – tournesol, et Ion-exchange – résines (= méthode de dépollution couramment utilisée), (création personnelle).

(5, 6, 7)

Critère	Rhizofiltration (tournesol)	Ion-exchange (résines / sorbants)
Efficacité typique	Uranium : 97–99 % ; Cs/Sr : 10–25 %	Uranium, Cs, Sr : 90–99 %
Temps de traitement	6–48 h (U) ; 1–30 jours (Cs/Sr)	Traitement continu en temps réel
Coût d'installation	≈ 5 000 à 20 000 € pour une unité de 1–5 m³/j	≈ 50 000 à 200 000 € selon capacité et résines
Coût d'exploitation	Très faible : 0,5 à 2 €/m³ (énergie + nutriments)	Élevé : 5 à 20 €/m³ (résines + régénération)
Déchets générés	Biomasse contaminée : TFA (<100 Bq/g)	Résines saturées + effluents chimiques de régénération
Besoins techniques	Système hydroponique, éclairage, pompage	Colonne pressurisée, pompes, résines hautement sélectives
Contraintes	Dépend du pH (optimale 4–7), ions compétiteurs, croissance des plantes	Dépend fortement de la chimie de l'eau ; risque de colmatage
Volume traitable	Petite → moyenne échelle (jusqu'à 10–50 m³/j)	Petite → très grande échelle (10 à >1 000 m³/j)
Avantages	Très économique ; écologique ; excellente adsorption de l'U ; installation simple	Très performant, stable, industrialisable, très sélectif pour Cs/Sr
Limites	Biomasse radioactive à gérer ; méthode lente pour Cs/Sr ; sensible à l'environnement	Coûteuse ; production d'effluents de régénération ; dépendance au pH

Tableau 2 : Tableau comparatif des avantages et inconvénients de l'application de la rhizofiltration (création personnelle). **(5, 6, 7)**

Avantages de la rhizofiltration	Inconvénients de la rhizofiltration
Très efficace pour l'uranium - abaisse les concentrations sous les normes de potabilité	Dépend fortement du pH, oxygénation, température, nutriments
Coût faible	Sensible aux ions compétiteurs (K ⁺ , Ca ²⁺ , etc.)
Fonctionne en batch ou en continu	Nécessite un système hydroponique complet
Adaptée aux stations temporaires ou volumes faibles/intermédiaires	Dépollue uniquement l'eau, pas les sols
Silencieuse et peu énergivore	Difficile à appliquer à très grande échelle
Mise en place simple	Besoin de beaucoup d'espace pour gros volumes
Méthode plus respectueuse de l'environnement	Renouvellement fréquent des plantes nécessaire
Déchets produits (généralement TFA), mais faciles à gérer	Génère de nouveaux déchets (même si TFA)

Conclusion

La rhizofiltration est une méthode **écologique** et **économique** pour dépolluer des eaux faiblement à modérément contaminées en radionucléides. En utilisant les racines de plantes, comme celles du tournesol, en hydroponie, elle permet d'adsorber ou d'absorber rapidement et efficacement des éléments comme l'uranium, et ce jusqu'aux normes de potabilité. Son faible coût, sa simplicité et son faible impact environnemental en font une option intéressante pour des installations modulaires ou temporaires. Cependant, la technique reste **limitée** par la dépendance aux conditions physico-chimiques (pH, oxygénation, ions compétiteurs), la lenteur pour certains radionucléides (comme le Cs, et le Sr), la variabilité biologique et la nécessité de gérer une biomasse radioactive. Ces contraintes rendent difficile son déploiement à grande échelle et pourraient expliquer pourquoi elle est surtout testée en laboratoire ou en pilote.

Néanmoins, la rhizofiltration demeure **prometteuse**, notamment intégrée à d'autre approche (comme la résine échangeuse d'ions) peuvent compléter le procédé pour obtenir des effluents conformes aux exigences réglementaires. Cette combinaison réduit les coûts, améliore la durabilité et permet de pallier les limites techniques actuelles, en attendant la maturation scientifique et opérationnelle de cette méthode.

Bibliographie

- (1) CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). (s.d.). *Les défis du CEA : Phytoremédiation*. Lien : <https://www.cea.fr/multimedia/documents/infographies/posters/defis-du-cea-infographie-phytoremédiation.pdf>
- (2) Hafeez, F. Y., Safdar, A., Asad, S. A., & Malik, K. A. (2023). *Phytoremediation: A sustainable and eco-friendly strategy for environmental cleanup*. Frontiers in Plant Science, 14, 1076876. Lien : <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
- (3) Société québécoise de phytotechnologie. (2018, avril). *Fiches Phytoremediation*. Phytotechno. Lien : <https://www.phytotechno.com/wp-content/uploads/2018/04/fiches-Phytoremediation.pdf>

- (4) Lee, M., & Yang, M. (2010). *Rhizofiltration using sunflower (Helianthus annuus L.) and bean (Phaseolus vulgaris L. var. vulgaris) to remediate uranium-contaminated groundwater*. Journal of Hazardous Materials, 173(1–3), 589–596. Lien : <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.127>
- (5) Soudek, P., Valenová, Š., Vavříková, Z., & Vaněk, T. (2006). *137Cs and 90Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions*. Journal of Environmental Radioactivity, 88(3), 236–250. Lien : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.02.005>
- (6) International Atomic Energy Agency. (2001). *Radiological protection principles for the management of radioactive waste and residues*. IAEA Technical Reports Series No. 408. IAEA Lien : https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS408_scr.pdf
- (7) ANDRA. (2023). *Classification des déchets radioactifs et filières de gestion*. Par l'ANDRA. Lien : <https://inventaire.andra.fr/les-matieres-et-dechets-radioactifs/classification-des-dechets-radioactifs-et-filières-de-gestion>