

Introduction

La technologie nucléaire est en pleine croissance, notamment en médecine pour le diagnostic et le traitement du cancer de la thyroïde, ce qui implique l'utilisation de l'iode radioactif (^{131}I), un isotope qui émet des rayons γ et β de haute énergie. L'augmentation de ces traitements entraîne une augmentation substantielle des eaux usées contaminées. La méthode de traitement actuelle est le stockage pour la décroissance naturelle, ce qui impose de stocker les eaux usées pour plus de 10 demi-vies (soit plus de 80 jours). A long terme, ce stockage mène à une restriction sévère de l'espace et à un risque potentiel de fuites [1],[2].

Peut-on éliminer ^{131}I dès la sortie d'hôpital pour garantir un rejet inférieur à $10 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$, de manière rapide et fiable ?

I – Etat de l'art

La gestion de l' ^{131}I , effluent majeur de la médecine nucléaire, est critique en raison du coût et de la durée du stockage en bassin de décroissance. En milieu atmosphérique, les techniques industrielles reposent sur le lavage caustique et l'adsorption sur la silice imprégnée d'argent, tandis que la filtration des gaz s'appuie principalement sur des filtres à charbon actif et des zéolithes à l'argent. Pour les effluents aqueux, l'échange d'ions via des résines polyamines ou des minéraux naturels est généralement privilégié par rapport aux systèmes membranaires [2],[3],[4].

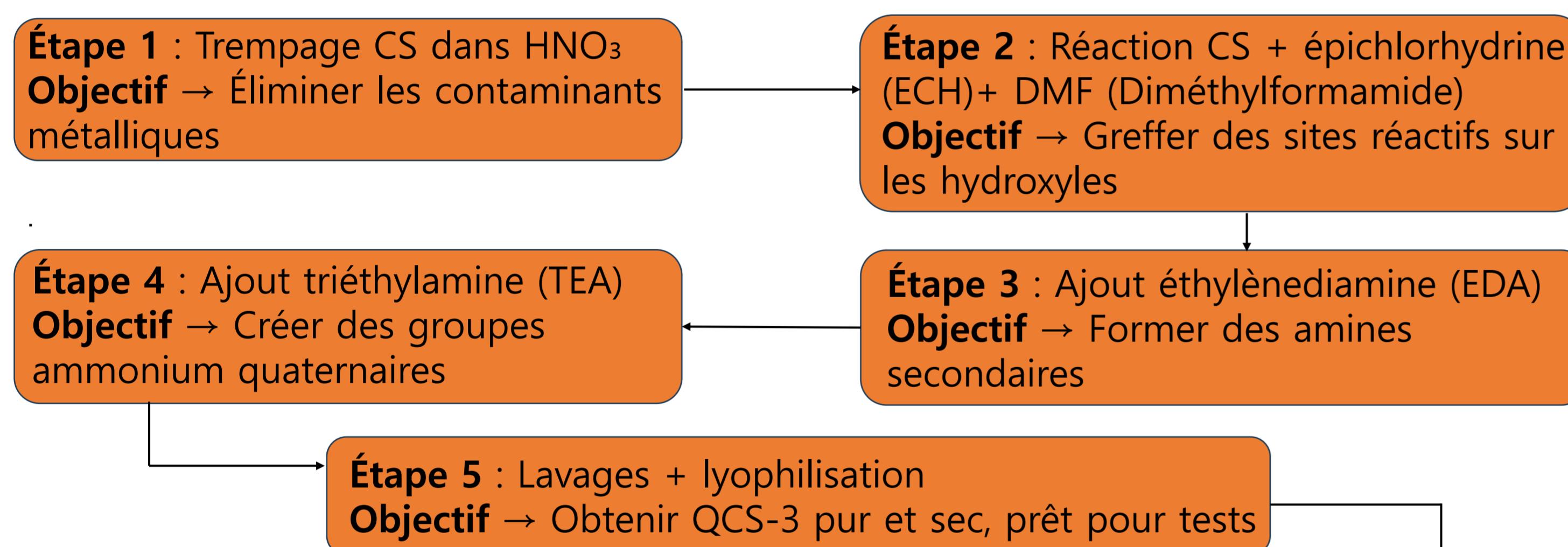
Des approches innovantes, telles que les éponges en oxyde de graphène, de chitosane et les nanoparticules magnétiques, permettent la capture sélective et réutilisable de l'iode. En cas d'accident nucléaire grave, le piégeage des espèces volatiles, en particulier des formes gazeuses de l'iode, repose principalement sur des adsorbants poreux inorganiques (zéolithes, supports argentés) intégrés aux systèmes de filtration des gaz, mais ces solutions restent coûteuses ou limitées par une cinétique lente [5]. Le procédé QCS-3 constitue une alternative économique et efficace.

II – Méthode

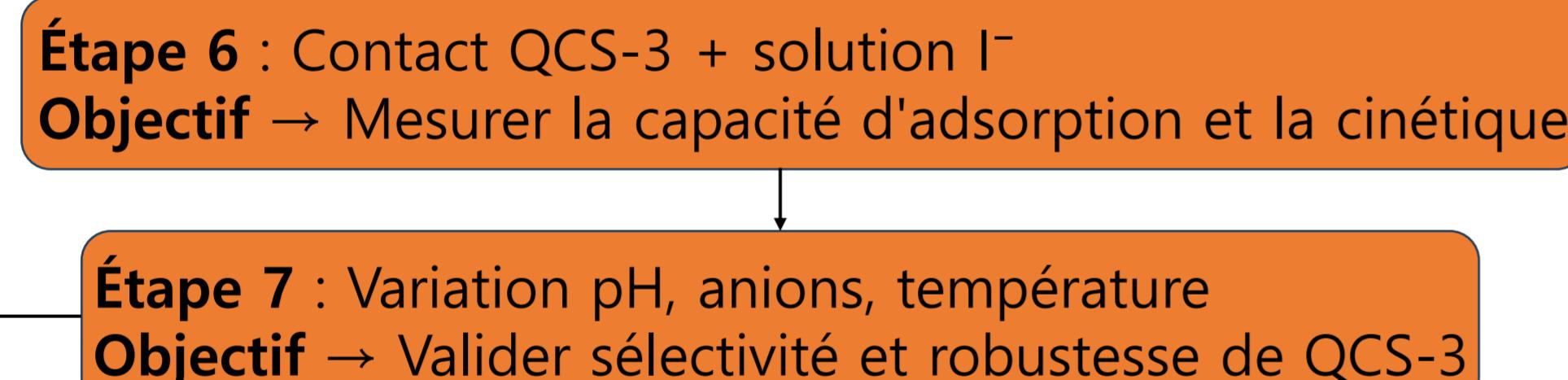
A. Le Procédé QCS-3 (= Quaternized Corn Silk - 3)

Le procédé QCS-3 a pour objectif de produire, à partir de la soie de maïs brute (CS), un matériau fibreux multi-sites capable de retenir efficacement ^{131}I présent dans les effluents de médecine nucléaire. Ce matériau est doté de deux groupes actifs chargés positivement, le chlorure d'ammonium quaternaire et l'amine secondaire protonée, dont l'action synergique permet la capture de $^{131}\text{I}^-$ par échange d'ions Cl^-/I^- et par interactions électrostatiques à longue portée [1].

PARTIE 1 : Préparation de QCS-3



PARTIE 2 : Études d'adsorption d'iode



PARTIE 3 : Régénération et stabilité

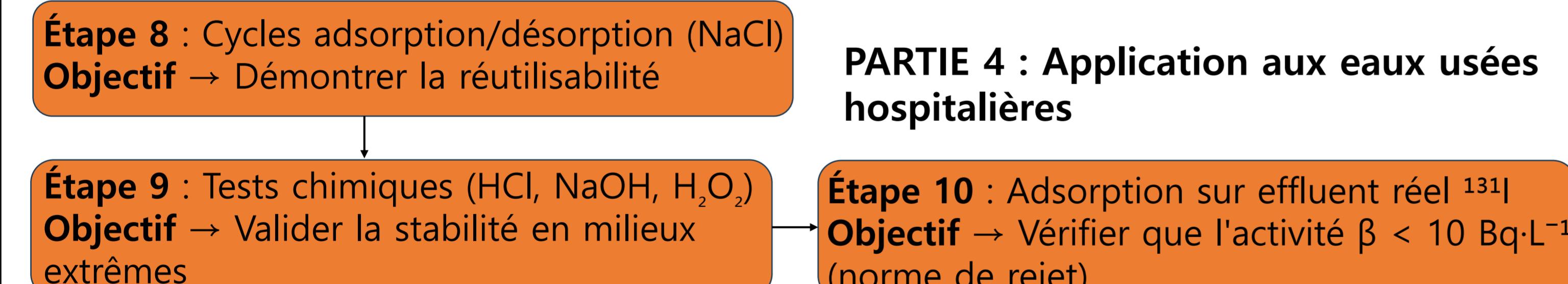


Figure 1 : Logigramme de synthèse et d'évaluation du QCS-3 pour l'adsorption de ^{131}I - réalisé d'après [1].

Conclusion

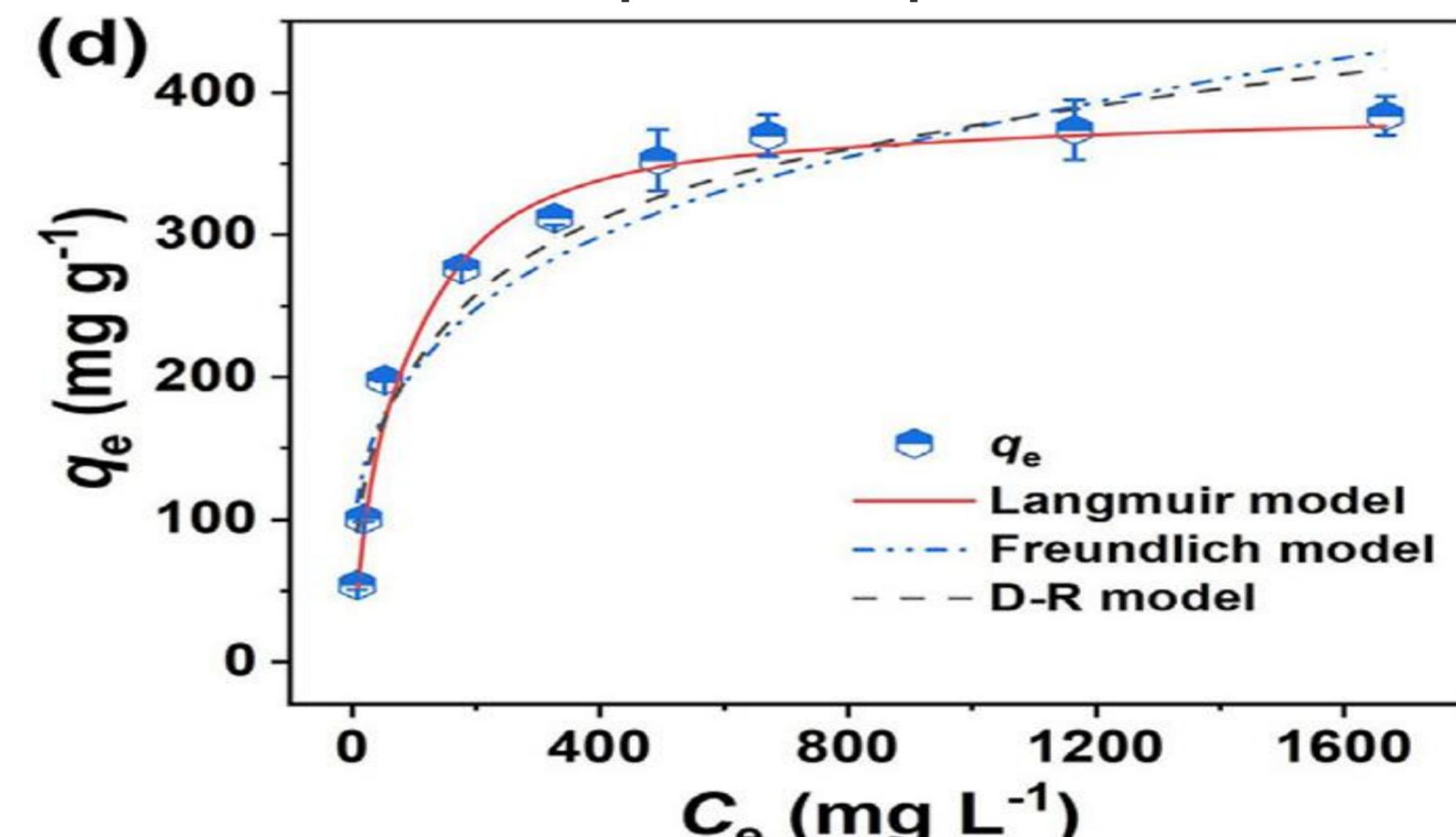
- Le QCS-3, une fibre fonctionnelle multi-site, a été synthétisé par une approche simple en une seule étape à partir de fibres de soie de maïs.
- Le QCS-3 présente une performance record : capacité statique de $383,7 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ et capture ultrarapide (~226 ps).
- Son efficacité résulte du mécanisme synergique des groupes amine secondaire protonée et le chlorure d'ammonium quaternaire.
- Le traitement des eaux usées hospitalières radioactives (^{131}I) valide le respect de la norme de rejet stricte ($<10 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$) dès 1,0 g de QCS-3 (6,79 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$), réduisant l'activité initiale de 83,10 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ à 4,65 $\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ au maximum.
- Ce résultat valide une solution pratique, économique, et conforme à la norme de rejet stricte de $10 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$.
- L'intégration de groupes d'amines protonées avec l'ammonium quaternaire est une stratégie prometteuse pour le traitement durable des eaux usées médicales radioactives.
- Le QCS-3 assure une solution pratique et durable grâce à son excellente stabilité chimique (validée en milieux acides, basiques et oxydants) et sa haute réutilisabilité sur cinq cycles.

Bibliographie

- [1] Liu J, Zhang Y-Y, Pan N, Feng S, Yang G, Zhang G, et al. Remarkable performance and physical origins of a multi-site functional material for ^{131}I -ion exchange in nuclear medical wastewater. Sci Bull 2025;70:2451–62. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.05.025>.
- [2] Kunarbekova M, Busquets R, Sailyakhanuly Ye, Mikhalkovsky SV, Toshtay K, Kudaibergenov K, et al. Carbon adsorbents for the uptake of radioactive iodine from contaminated water effluents: A systematic review. J Water Process Eng 2024;67:106174. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106174>.
- [3] Liao Z, Pan N, Liu J, Ma C, Xia X, Deng J, et al. Highly efficient iodide adsorption from medical radioactive wastewater by strong alkaline anion exchange fiber. J Environ Chem Eng 2024;12:111783. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111783>.
- [4] Suksompong T, Thongmee S, Sudprasert W. Efficacy of a Graphene Oxide/Chitosan Sponge for Removal of Radioactive Iodine-131 from Aqueous Solutions. Life 2021;11:721. <https://doi.org/10.3390/life11070721>.
- [5] Chebbi M. Piégeage d'espèces iodées volatiles sur des adsorbants poreux de type zéolithique dans le contexte d'un accident nucléaire grave. Thèses. Université de Lorraine, 2016.

III – Résultats et discussion

1. Performance d'adsorption statique

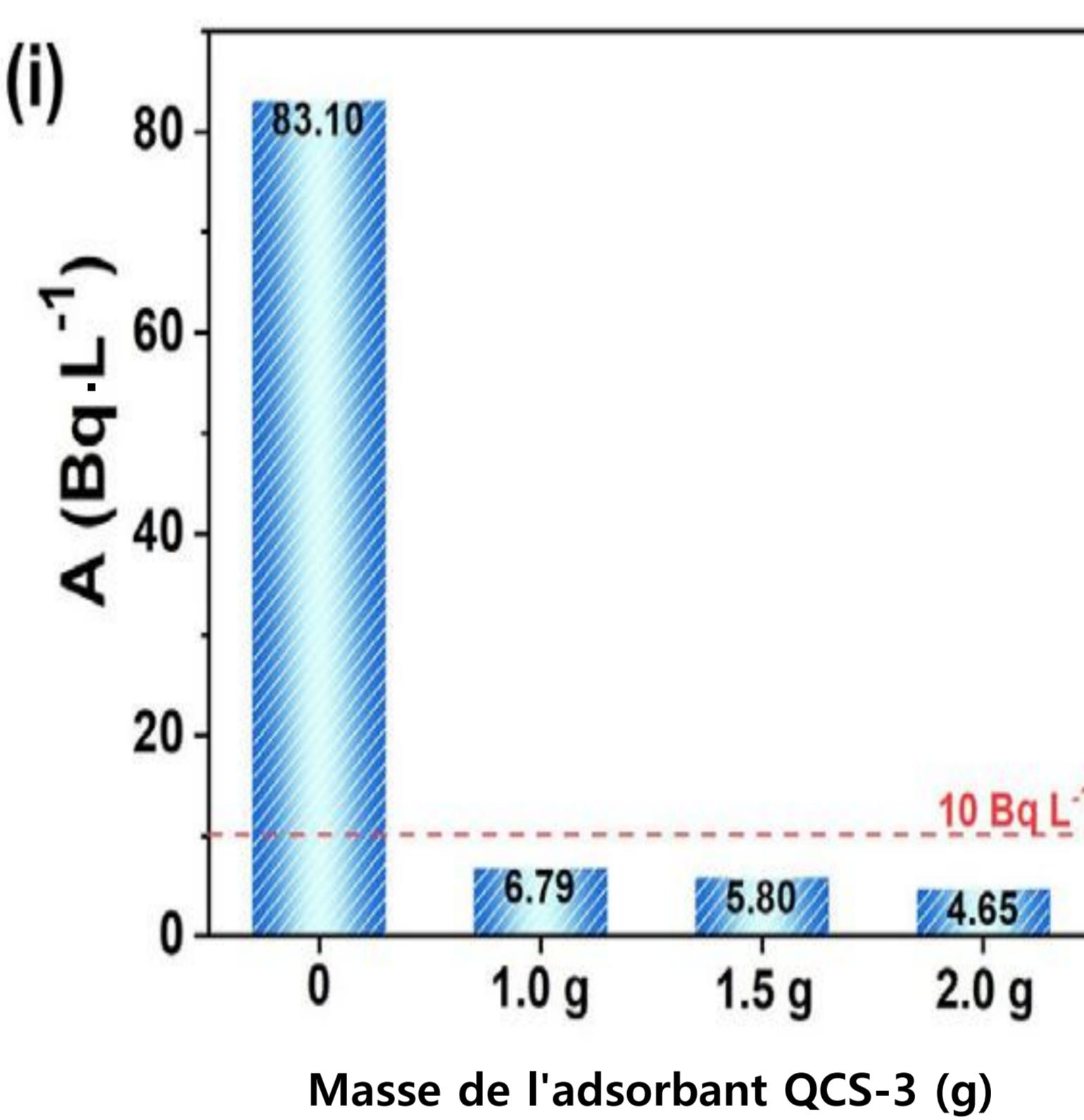


La figure 2 démontre la capacité d'adsorption statique maximale exceptionnelle du QCS-3 [1].

Le QCS-3 atteint un record de $383,7 \pm 13,7 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, et l'ajustement au modèle de Langmuir ($R^2=0,992$) indique que l'adsorption se fait via un processus monocouche et est due à la chimisorption [1].

Figure 2 : Modélisation de l'isotherme d'adsorption de Langmuir, Freundlich et Dubinin-Radushkevitch (D-R) de I^- sur QCS-3, basée sur l'effet de la concentration initiale de I^- sur l'adsorption [1].

2. Validation sur eaux usées réelles et conformité



- La conformité est obtenue dès 1,0 g, le gain au-delà reste limité, ce qui met en évidence l'efficacité économique du matériau [1].

Figure 3 : Concentration d'activité bêta globale des eaux usées radioactives avant et après adsorption [1].

3. Mécanisme et Cinétique Atomique

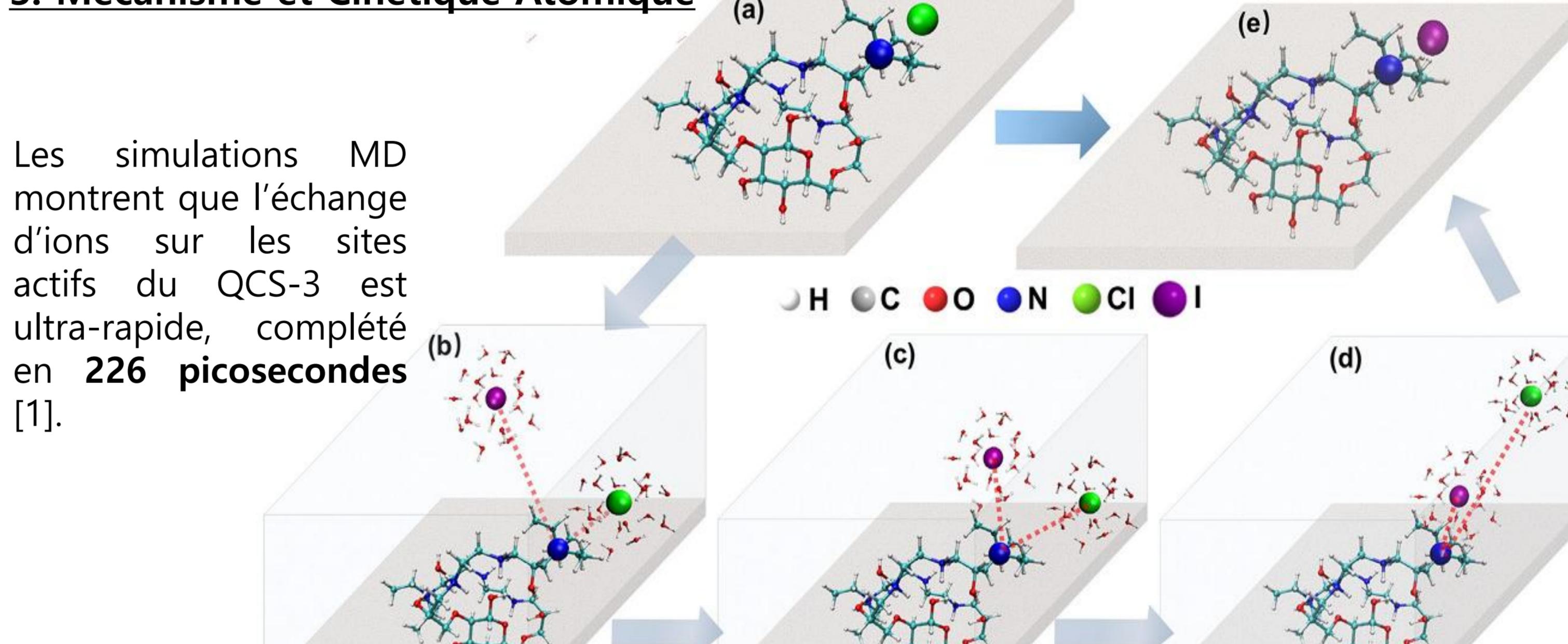


Figure 4 : Illustration des simulations de dynamique moléculaire (MD) du processus d'échange d'ions pour la capture de I^- par QCS-3. (a) État initial de QCS-3 avec Cl^- . (b) QCS-3 commence à adsorber I^- par interaction électrostatique. (c) I^- s'approche de QCS-3 tandis que Cl^- est déplacé. (d) I^- remplace Cl^- sur QCS-3. (e) Achèvement du processus d'échange d'ions [1].