PROJET

Titre complet : Elimination du Fluor, des ions chlorures et de la salinité dans les eaux de consommation : cas du bassin arachidier au Sénégal.

Acronyme : **Eli-Flicsa**

PORTEURS/TEUSES du PROJET

Nom : **SY** Prénom : **Adama**

Etablissement d'appartenance : Université Gaston Berger de Saint-Louis (UGB)

Laboratoire : Sciences de l'atmosphère et des Océans-Matériaux-Energie et Dispositifs (LSAO-MED)

LISTE DES LABORATOIRES ET ÉQUIPES CONCERNÉES

Etablissement	Laboratoire	Equipe	Nom des E-C / C impliqués	Section CNU ou équivalent	% d'implication dans le projet
Université Gaston Berger (Saint – Louis)	LSAO – MED LaBAAM	– TEQALIM	Adama SY Alioune SOW	CAMES	50
Université d'Abomey – Calavi (Bénin)	LHA		Flavien Edia DOVONOU	CAMES	20
INSA Toulouse	TBI	EAD10	Maria A FERNANDEZ Stéphane MATHE Antonin AZAIS	62 33 62	30

1. Description du projet scientifique

a. Positionnement dans l'état de l'art

L'accès à l'eau potable pose un problème politique et économique majeur dans plusieurs parties du monde. Il a été estimé que plus de cinq (05) milliards de personnes ne disposeront plus d'un accès à des installations d'eau potable d'ici 2030 **(Scambelluri et al., 1997).** Au Sénégal, la gestion de l'eau est devenue de plus en plus un problème récurrent du fait de sa surexploitation dans certaines zones et de la dégradation de sa qualité. L'approvisionnement en eau est fait à travers les eaux de surface et les eaux souterraines. Les eaux souterraines sont principalement exploitées dans les zones où les

quantités de réserves en eau de surface sont faibles notamment dans le bassin arachidier (Diourbel, Fatick, Kaolack). Dans cette zone, les nappes captées et exploitées présentent des teneurs élevées en fluor (> 1, 5 mg / L), en chlorure (> 200 mg / L) et en sels minéraux **(Gueye et al., 2022)**. Or, les teneurs en fluorure dans l'eau de consommation supérieures à 1,5 mg/L sont nocives pour la santé humaine **(OMS, 2011)**. De plus, les effets toxiques du fluorure sur la santé humaine sont encore exacerbés par la coexistence et les effets synergétiques de l'arsenic présent dans les eaux souterraines, qui peuvent être mortels pour les êtres humains (**Gebrewold et al., 2024).**

Par exemple, après sa consommation, le fluorure agit d'abord sur le mucus intestinal et forme ensuite de l'acide fluorhydrique, un irritant pour les voies gastrique et intestinale (**Ahmad et al., 2022**). Aussi, il est mentionné, dans plusieurs études, que cet acide fluorhydrique interfère avec les enzymes et perturbe la phosphorylation oxydative et les activités métaboliques **(Gwenzi et al., 2017 ; Levin et al., 2016 ; Abouleish et al., 2016)**. Ainsi, une consommation excessive et prolongée en fluorure expose la population à des maladies comme les fluoroses dentaire et osseuse, les troubles neurologiques et articulaires, les cancers, l'infertilité, le syndrome d'Alzheimer, les troubles thyroïdiens, l'intoxication rénale, l'insulinorésistance, les lésions hépatiques, la stérilité masculine et les éruptions cutanées **(OMS, 2011 ; Bhatnagar et al., 2011 ; Nagaraj et al., 2017 ; Zuo et al., 2018 ; Nabbou et al., 2019 ; Nagendra et al., 2021 ; Zhu et Wei, 2024)**. Les teneurs élevées de fluorure dans les eaux souterraines sont un problème mondial, notamment aux États-Unis, en Asie, en Afrique, au sud de l'Europe et en Russie (**Gebrewold et al., 2024).** Cependant, la particularité du Sénégal par rapport aux autres pays reste la présence concomitante du fluor et de la salinité**.** En Afrique, par ailleurs, le réchauffement climatique et la sécheresse entraînent une recharge minimale des nappes phréatiques et une diminution du débit d'eau, ce qui favorise l'accumulation de fluorure, l'augmentation de sa concentration ainsi que la salinité (**Irunde et al., 2022 ; Sunitha et al., 2022)**. Ce problème affecte non seulement la santé publique, mais il entrave également les activités économiques comme l'agriculture, le maraîchage etc. La solution au problème nécessite la mise en œuvre de méthodes de traitements efficaces à des coûts abordables partout où les directives recommandées par les organismes internationaux sont dépassées. Ainsi, il sera indispensable de proposer et de maitriser les procédés d'élimination du fluor, des ions chlorures et de la salinité dans les eaux de consommation. A cet effet, plusieurs techniques ont été utilisées pour le traitement de ces eaux parmi lesquelles on peut citer :

- les procédés membranaires : électrodialyse, nanofiltration, osmose inverse, … ;
- les procédés chimiques : précipitation, échanges d'ions, adsorption, etc.

Cependant, seules quelques-unes de ces techniques peuvent être appliquées à grande échelle dans les pays en développement en raison de leurs coûts d'investissement initiaux élevés, de leurs coûts de maintenance et d'exploitation élevés, ou du risque de production d'intermédiaires toxiques pendant le processus de traitement **(Solomon et al., 2023)**. Par conséquent, des technologies rentables sont nécessaires pour traiter les eaux souterraines et assurer un approvisionnement sûr en eau potable dans les pays en développement. Dans ces pays, en général, dans les zones rurales, en particulier, des matériaux bon marché et abondants sont nécessaires pour répondre aux besoins en eau potable avec une quantité de fluorure, de chlorure et de sels minéraux respectant les normes de consommation (**Mukherjee et al., 2018 ; Pongener et al., 2018).** De plus, parmi ces différentes techniques, l'adsorption

sur du charbon actif reste l'une des techniques qui a montré une grande efficacité pour l'élimination de la plupart des polluants (organiques et minéraux) (**Gwenzi et al., 2017)**. Ces dernières années, la recherche s'est orientée sur l'élaboration de charbon actif efficace, renouvelable et bon marché par la valorisation de la biomasse agricole et animale tels que les coques d'arachides, les noix de coco, les cendres d'os, les balles de riz et autres (**Diémé et al., 2017** ; **Ungureanu et al., 2023)**. Le choix de la coque d'arachide réside dans sa disponibilité. En effet, le Sénégal fait partie des plus grands pays producteurs d'arachide en Afrique avec une production d'environ 1,7 million de tonnes en 2023-2024 (**Agropasteur, 2024**)**.** Cette activité génère une grande quantité de déchets rejetés dans la nature qui pourrait participer à la dégradation de l'environnement. De plus, la coque d'arachide contient principalement de la cellulose et de la lignine constituées de groupements hydroxyles qui facilitent l'activation du matériau et améliorent la stabilité et la capacité de sorption des polluants (**Tan et al.,2024).** Ces matériaux biosourcés présentent l'avantage d'être regénérés après utilisation pour l'élimination des fluorures, des chlorures, de la salinité et d'autres polluants.

b. Objectifs et démarche scientifique

Ce projet de recherche s'inscrit dans l'élaboration de charbons actifs par la valorisation des agro ressources et de la biomasse animale pour le traitement des eaux saumâtres hyperfluorurées et hyperchlorurées. De manière plus spécifique, il sera question de :

- élaborer et caractériser des charbons actifs à base de coques d'arachides, de noix de coco, de cendres d'os et autres ;
- appliquer ces charbons actifs à l'élimination des eaux saumâtres hyperfluorurées et hyperchlorurées ;
- comparer la capacité d'adsorption de différents charbons actifs issus de la biomasse agricole et animale ;
- identifier les matériaux les plus performants en termes d'investissement, d'exploitation, d'amortissement et d'impact sur l'environnement.

Les matériaux locaux ciblés dans ce projet sont : les poudres d'os, les coques d'arachides, les noix de coco, les balles de riz et autres, calcinées**.** Ces poudres préparées à différentes températures (100 – 600 °C) avec différentes granulométries seront mises en œuvre lors des expériences d'adsorption en présence d'eaux contenant des ions chlorures, des ions fluorures et d'autres sels minéraux de concentrations connues. Une étude des mécanismes d'élimination en mode continu et/ou discontinue sera effectuée afin de déterminer l'influence de certains paramètres tels que le pH, le temps de contact, la concentration initiale et le ratio d'adsorbants ainsi que les isothermes et cinétiques d'adsorption. Pour cela, des expériences seront menées pour comprendre et optimiser les processus d'adsorption des polluants.

c. Eléments de faisabilité dans le cadre d'une thèse (planning, encadrement, …)

Ce projet sera déroulé sur une durée de trois (03) ans sous la supervision d'enseignants-chercheurs et chercheurs de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis (Sénégal), de l'Université d'Abomey Calavi (Bénin) et de l'INSA de Toulouse (France). Lors de **la première année** de thèse (au Sénégal et au Bénin), le travail de la doctorante portera sur :

- Etat de l'art sur la contamination naturelle et anthropique des ressources en eau. Caractérisation des eaux à traiter (teneur en fluorure, chlorure, et autres minéraux, matière organique totale …). Il sera important aussi d'évaluer la variabilité de ces teneurs, afin d'envisager les limites d'application du procédé ou d'anticiper les écarts de performance.
- Synthèse bibliographique sur les principales techniques existantes et présentant des possibilités d'élimination partielle du fluor, des chlorures et des sels minéraux dans les eaux destinées à la consommation humaine. L'accent sera mis sur la production de charbon actif biosourcé à partir de matériaux de biodéchets pour l'adsorption de contaminants. Cette technologie émergente à faible coût, attire l'attention des chercheurs sur la recherche et l'optimisation d'adsorbants d'origine biologique pour le traitement des eaux souterraines et des eaux usées (**Gwenzi et al., 2017).** Ces matériaux à bon maché, facilement accessibles et largement disponibles peuvent être modifiés physiquement, thermiquement ou chimiquement avec des procédures simples et à moindre coût **(Ayalew, 2023 ; Gwenzi et al., 2017).**
- Elaboration des charbons actifs à base de coques d'arachides, de cendres d'os, de noix de coco, de balles de riz et autres. Il conviendra ici de vérifier la reproductibilité du procédé d'élaboration du charbon activé.
- Caractérisation des charbons actifs synthétisés : il s'agira de déterminer la surface spécifique, le taux d'humidité, l'indice d'iode, indice de bleu de méthylène, les fonctions chimiques présentes dans le charbon par la spectroscopie Infrarouge et d'autres techniques très pointues

Une fois les matériaux adsorbants à utiliser préparés, **la deuxième année** (en France) permettra de les tester et de comprendre leurs modes d'action. Pour cela :

- des solutions synthétiques seront élaborées sur la base des résultats de caractérisation effectués (teneur en fluorure, chlorure principalement, mais aussi d'autres espèces pouvant interférer dans le traitement comme les sulfates et nitrates…) ;
- des tests préalables seront utilisés pour sélectionner les matériaux les plus performants pour l'élimination d'espèces visées.
- Pour les matériaux sélectionnés, l'établissement des isothermes et des cinétiques d'adsorption, permettront de poser les bases pour le dimensionnement du procédé et d'identifier les conditions optimales de travail.

Enfin, lors de **la troisième année** (à nouveau au Sénégal), des expériences pourront être conduites directement sur les eaux de consommation hyper-fluorurées et hyper-chlorurées réelles, afin de valider les conditions de travail et les performances espérées. Dans cette dernière phase du travail, le co-encadrement des différents laboratoires sera essentiel. L'ensemble de ces travaux devrait permettre d'évaluer le procédé proposé en termes d'investissement, d'exploitation, d'amortissement et d'impact sur l'environnement.

d. Résultats et impacts scientifiques attendus

Les résultats suivants sont attendus au terme de ce travail :

- la biomasse agricole et animale telle que les os, les coques d'arachides, les noix de coco et autres est utilisée pour l'élimination des eaux saumâtres hyperfluorurées et hyperchlorurées ;

- la capacité d'adsorption de différents charbons actifs issus de la biomasse agricole et animale est comparée ;
- les matériaux les plus performants en termes d'investissement, d'exploitation, d'amortissement et d'impact sur l'environnement sont identifiés.
- Si le projet montre la faisabilité du traitement, les conditions de fonctionnement du procédé seront définies.

Les impacts scientifiques liés à ce projet de thèse sont multiples et variés. En effet, à l'issue de cette thèse :

- les dispositifs et / ou procédés de traitements des eaux saumâtres hyperfluorurées et hyperchlorurées mis en place sont testés à différentes échelles (pilote, domestique, forage communautaire) dans la zone d'intervention du projet ;
- des articles scientifiques dans des revues abstractées et indexées sont réalisés ;
- les partenariats Nord-Sud et Sud-Sud sont renforcés.

2. *Enjeu primaire (et enjeu secondaire s'il y a) dans lequel se situe le projet (positionnement argumenté)*

L'une des innovations de ce projet est la prise en compte de la biomasse afin d'apporter une solution à la gestion délicate des déchets d'origine agricole et animale. Ainsi, à travers ce projet, il sera question d'enjeux multiples comme :

- la récupération des terres salées du bassin arachidier ;
- la politique d'autosuffisance alimentaire ;
- l'amélioration des capacités productives nationales ;
- l'augmentation des rendements de production agricole ;
- la gestion des déchets d'origine animale et végétale.

3. *Impact sociétal : contribution aux enjeux considérés et originalité du défi ciblé (caractère disruptif)*

Ce projet de thèse aura un fort impact positif sur la société pour plusieurs raisons. En effet, l'objectif global de ce projet qui est d'élaborer des charbons actifs par la valorisation des agro ressources et de la biomasse animale pour le traitement des eaux saumâtres hyperfluorurées et hyperchlorurées répond également aux préoccupations du gouvernement du Sénégal en contribuant à :

- la réduction des risques liées à la consommation des eaux saumâtres hyperfluorées et hyperchlorurées ;
- l'amélioration de l'état nutritionnel des populations ;
- l'amélioration de la qualité des eaux souterraines à l'échelle communautaire ;
- la disponibilité de produits agricoles à fort potentiel nutritionnel ;
- l'accroissement des revenus des producteurs ;
- la lutte contre la pauvreté et la réduction du chômage.

Ce projet permettra aux populations de disposer d'une eau de très bonne qualité et répondant aux normes internationales. La vulgarisation des résultats permettra de concevoir de nouveaux matériaux

peu coûteux et efficaces dans le traitement de ces eaux. L'envergure des résultats devra également encourager la création d'unité spécialisée dans la valorisation des déchets (os, coques d'arachides, noix de coco, balles de riz…) tout en étant moins impactant sur l'environnement. En effet, la biomasse agricole et animale étant des produits déjà disponibles en très grande quantité dans le bassin arachidier, leur valorisation entrainerait une plus grande attention et une protection de la part des populations locales.

4. *Plus-value de l'interdisciplinarité pour le projet et pour chacune des disciplines engagées*

Cette multidisciplinarité est un atout majeur car elle permettra de mettre en commun les différentes expériences et expertises des uns et des autres pour mener à bien ce projet. De plus, l'équipe est exclusivement constituée d'enseignants-chercheurs et experts qui ont envie de participer activement à la résolution des problèmes auxquels sont confrontés certains pays (comme le Sénégal et le Bénin), et aussi à participer à la mise d'un dispositif et/ou procédé adapté aux traitements des eaux saumâtres hyperfluorurées et hyperchlorurées. De plus, dans le cadre de ce projet, il est prévu à ce que chaque objectif spécifique aboutisse à la publication d'au moins un article scientifique, soit au minimum cinq.

5. *Publications récentes (max 5) des co-encadrants en lien avec le projet*

- Ndiaye E. M, **Sow A**, Faye P. G, Ba K, Ndoye M, Cisse O. I. K, Ayessou N. C, Cisse M (**2024**). Improving the quality of baobab oil by filtration on activated carbon from the fruit capsules. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 12 (1): 69-83. https://doi.org/10.4236/msce.2024.121006
- Ndiaye E. M, **Sow A**, Ba K, Ndoye M, Idrissi Y. E, Ndiaye S, Hamza E. M, Faye P. G, Harhar H, Ayessou N, Tabyaoui M, Cisse M (**2023**). Processes for the clarification of the crude oil of baobab seeds extracted by pressing on activated carbon elaborated from the capsules of the fruit (*Adansonia digitata*) L. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 13: 105-118. https://doi.org/10.4236/aces.2023.132009
- Ndiaye E. M, Ba K, **Sow A**, Diop A, Idrissi Y. E, Hamza E. M, Faye P. G, Harhar H, Ayessou N, Tabyaoui M, Cisse M (**2022**). Valorization of natural residue into activated carbon: example of the shells of the african baobab fruit (*Adansonia digitata*) L. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 12 (4-6): 41-54. https://doi.org/10.17265/2161-6213/2022.4-6.001
- **Dovonon L. F. C**, Soclo H. H, Gbaguidi M. A. N, Youssao A (**2011**). Utilisation des os calcinés dans la défluoruration des eaux contaminées : Détermination expérimentale de la température de calcination et de la granulométrie optimale des os. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(4) : 1712-1726.

e. Financement acquis

Le financement de la troisième année n'est pas encore acquis, mais il pourrait être obtenu à travers :

- le programme de bourse de mobilité France – Sénégal ;
- le programme de mobilité entrante ou sortante du CEA – MITIC ;
- les appels à projet comme le Projet FIRST ;
- les financements au sein des UFR et Instituts.

Références bibliographiques

- Abouleish, M.Y.Z., 2016. Evaluation of fluoride levels in bottled water and their contribution to health and teeth problems in the United Arab Emirates. Saudi Dental J 28 (4), 194–202. https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2016.08.002.
- Ahmad, K., Shah, I.A., Ali, S., Khan, M.T., Qureshi, M.B.A., Shah, S.H.A., Ali, A., Rashid, W., Gul, H.N., 2022. Synthesis and evaluation of Ca-doped ferrihydrite as a novel adsorbent for the efficient removal of fluoride. Environ. Sci. Pollut. Res. 29 (4), 6375–6388. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16105-5.
- Agropasteur., 2024. ARACHIDES : Le classement des pays africains producteurs d'arachides : le Sénégal dans le top dix. https://agropasteur.com/arachides-le-classement-des-pays-africains-producteurs-darachides-le-senegal-dans-le-top-dix/ (consulté le 03 février 2024).
- Ayalew, A.A., 2023. Comparative adsorptive performance of adsorbents developed from kaolin clay and limestone for de-fluoridation of groundwater. South Afr. J. Chem. Eng. 44 (1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.11.002.

- Bhatnagar, A., Kumar, E., Sillanp¨ a¨ a, M., 2011. Fluoride removal from water by adsorption—a review. Chem. Eng. J. 171 (3), 811–840. https://doi.org/10.1016/j. cej.2011.05.028.
- Dieme, M. M., Villot, A., Gerente, C., Andres, Y., Diop, S. N. Diawara, C. K., 2017. Sustainable conversion of agriculture wastes into activated carbons: energy balance and arsenic removal from water. Environ. Technol. 38:3, 353-360. http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2016.1193225.
- Gebrewold, B.D., Kijjanapanich, P., Rene, E.R., Lens, P.N., Annachhatre, A.P., 2018. Fluoride removal from groundwater using chemically modified rice husk and corn cob activated carbon. Environ. Technol. 40 (22), 2913–2927. https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1459871, 2018.
- Irunde, R., Ijumulana, J., Ligate, F., Maity, J.P., Ahmad, A., Mtamba, J., Bhattacharya, P., 2022. Arsenic in Africa: potential sources, spatial variability, and the state of the art for arsenic removal using locally available materials. Groundw. Sustain. Develop. 18, 100746. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100746.
- Levin, S., Krishnan, S., Rajkumar, S., Halery, N., Balkunde, P., 2016. Monitoring of fluoride in water samples using a smartphone. Sci. Total Environ. 551, 101–107. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.156.
- M. Scambelluri, G. B. Piccardo, P. Philippot, A. Robbiano, et L. Negretti, « High salinity fluid inclusions formed from recycled seawater in deeply subducted alpine serpentinite », Earth Planet. Sci. Lett., vol. 148, nº 3, p. 485-499, 1997, doi: https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00043-5.
- Mukherjee, S., Barman, S., Halder, G., 2018. Fluoride uptake by zeolite NaA synthesized from rice husk: isotherm, kinetics, thermodynamics and cost estimation. Groundw. Sustain. Dev. 7, 39–47. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.003.
- Nabbou, N., Belhachemi, M., Boumelik, M., Merzougui, T., Lahcene, D., Harek, Y., Zorpas, A.A., Jeguirim, M., 2019. Removal of fluoride from groundwater using natural clay (kaolinite): optimization of adsorption conditions. Compt. Rendus Chem. 22 (2–3), 105–112. https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.09.010.
- Nagaraj, A., Sadasivuni, K.K., Rajan, M., 2017. Investigation of lanthanum impregnated cellulose, derived from biomass, as an adsorbent for the removal of fluoride from drinking water. Carbohydr. Polym. 176, 402–410. https://doi.org/10.1016/j. carbpol.2017.08.089.
- Nagendra, A.H., Bose, B., Shenoy P, S., 2021. Recent advances in cellular effects of fluoride: an update on its signalling pathway and targeted therapeutic approaches. Mol. Biol. Rep. 48, 5661–5673. https://doi.org/10.1007/s11033-021-06523-6.
- OMS, 2011. Directives de qualité pour l'eau de boisson, Tableau A4.2 : produits chimiques pour lesquels une valeur guide est établie.
- Pongener, C., Bhomick, P.C., Supong, A., Baruah, M., Sinha, U.B., Sinha, D., 2018. Adsorption of fluoride onto activated carbon synthesized from Manihot esculenta biomass—equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. J. Environ. Chem. Eng. 6 (2), 2382–2389. https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.02.045.
- Solomon, A., Andoshe, D.M., Abebe, A.M., Terfasa, T.T., Ganesh, T., Hone, F.G., Tegegne, N.A., Tesfamariam, B.B., 2023. Optimization of preparation parameters of ceramic pot water filters for potential application of microbial and fluoride removal from groundwater. Heliyon 9 (2), e13261. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023. e13261.
- Tan, X., Shi, Y., Ma, C.-F., Chi, Q., Yang, Y.-H., Zhang, W.-X., Xiao, H.-M., Wang, X., 2024. Fluoro-functionalized plant biomass adsorbent: preparation and application in extraction of trace perfluorinated compounds from environmental water samples. J. Environ. Sci. 137, 703–715. https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.03.023.
- Ungureanu, E.L., Mocanu, A.L., Stroe, A.C., Panciu, C.M., Berca, L., Sionel, R.M., Mustatea, G., 2023. *Agricultural byproducts used as low-cost adsorbents for removal of potentially toxic elements from wastewater: a comprehensive review*. Sustainability, 15, 5999. https://doi.org/10.3390/su15075999.
- Zhu, S., Wei, W., 2024. Progress in research on the role of fluoride in immune damage. Front. Immunol. 15, 1394161. https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1394161.
- Zuo, H., Chen, L., Kong, M., Qiu, L., Lü, P., Wu, P., Chen, K., 2018. Toxic effects of fluoride on organisms. Life Sci. 198, 18–24. https://doi.org/10.1016/j. lfs.2018.02.001.

Avis motivés et signatures des directeurs/trices des laboratoires concernés

Nom/Prénom : Pr WADE Malick Avis motivé : favorable Signature :	Nom/Prénom : Pr DOVONON Flavien Edia Avis motivé : favorable Signature :	Nom/Prénom : E. TREVISIOL Avis motivé : Très favorable Sous réserve d'acceptation du dossier ZRR Signature : Emmanuelle TREVISIOL Directrice Adjointe Toulouse Biotechnology Institute - TBI Université de Toulouse - CNRS 5504 - INRAe 792 - INSA