

De l'énergie à partir des déchets : une seconde vie pour les matériaux qui dépolluent l'eau

À l'Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel (IMN, UMR6502 CNRS-Nantes Université), des matériaux capables de stocker l'énergie électrique sont étudiés et développés. Nous les utilisons tous au quotidien sans y penser : ce sont eux qui font fonctionner les batteries de nos téléphones ou les supercondensateurs qui récupèrent l'énergie de freinage de certains bus et tramways. Mais produire et stocker de l'énergie ont un point commun inattendu avec une autre ressource précieuse : l'eau. Les deux sont intimement liées, l'une étant nécessaire à l'autre (Figure 1). Or, de nombreuses activités industrielles, comme le traitement des métaux ou la chimie, rejettent des eaux usées contaminées par des métaux lourds : le mercure des anciens thermomètres, le plomb des vieilles canalisations ou encore le cuivre. Ces éléments sont toxiques pour l'environnement et la santé, même à très faibles doses. Pour les capturer, on utilise des matériaux adsorbants, de véritables éponges à polluants, comme le charbon actif que l'on trouve dans les carafes filtrantes. L'adsorption est le phénomène par lequel les polluants viennent se coller à la surface du matériau, qui les retient prisonniers.

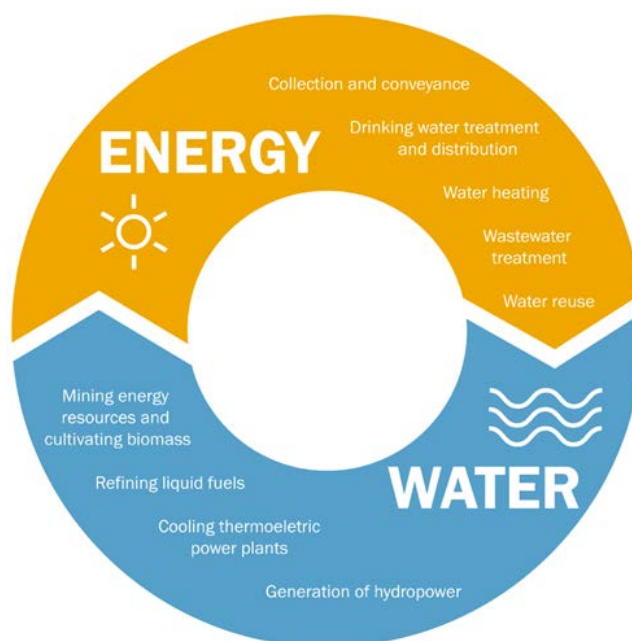


Figure 1 : Le lien étroit entre l'eau et l'énergie : il faut de l'énergie pour traiter et distribuer l'eau, et de l'eau pour produire de l'énergie.

Mais que deviennent ces éponges une fois saturées de métaux lourds ? Elles constituent à leur tour des déchets dangereux ! Aujourd'hui, elles sont généralement incinérées ou immobilisées dans du ciment, ce qui déplace le problème plutôt que de le résoudre. C'est ici qu'intervient l'idée centrale de cette thèse, résumée par sa devise : « Stocker de l'énergie à partir des déchets ». Plutôt que de jeter ces adsorbants usagés, pourquoi ne pas leur offrir une seconde vie en tant qu'électrodes de supercondensateurs (Figure 2) ? Le supercondensateur est le cousin de la batterie : il stocke moins d'énergie, mais il se charge et se décharge en quelques secondes et supporte des centaines de milliers

de cycles. Le plus surprenant, c'est que le métal lourd piégé, loin d'être un problème, devient un atout : en échangeant des électrons avec le matériau, il participe lui-même au stockage de l'énergie et améliore les performances de l'électrode. Un même matériau remplit ainsi deux missions successives : dépolluer l'eau, puis stocker l'électricité.

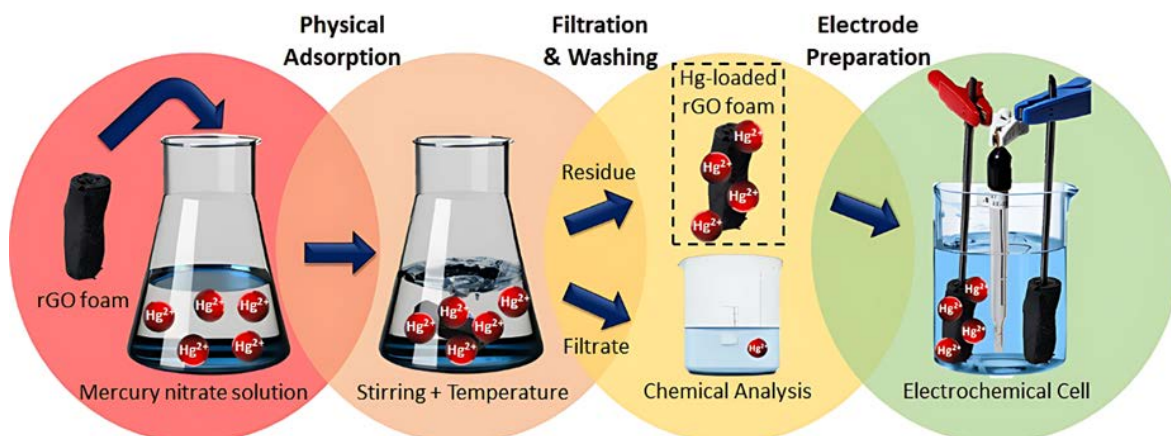


Figure 2 : Le concept développé dans la thèse : un adsorbant capture le mercure d'une eau polluée, puis, une fois séché, il est directement réutilisé comme électrode dans un dispositif de stockage d'énergie.

Fabriquer ces matériaux, c'est un peu comme faire la cuisine. Notre ingrédient de départ est le graphite, le même carbone que celui des mines de crayon. Une première réaction chimique le transforme en oxyde de graphène, des feuillets de carbone ultramincés qui se dispersent dans l'eau. La solution obtenue est ensuite chauffée dans un autoclave, la cocotte-minute du laboratoire, pour former une mousse légère d'oxyde de graphène réduit (rGO foam, dans le cercle rouge de la Figure 2). Plongée dans des eaux « synthétiques » préparées au laboratoire et chargées en mercure, chrome, cobalt, ainsi que d'autres métaux colorés (Figure 3), cette mousse nettoie et capture plus de 95 % de ces métaux. La capacité d'adsorption atteinte dans cette thèse (jusqu'à 240 milligrammes de mercure par gramme de mousse), elle l'une des meilleures rapportées pour ce type de matériau. Il suffit ensuite de sécher la mousse pour obtenir, sans aucun traitement supplémentaire, une électrode prête à l'emploi. Observée au microscope électronique (Figure 4), la mousse révèle un labyrinthe de feuillets de carbone froissés, comme un mille-feuille chiffonné, offrant une immense surface où le mercure peut se fixer.

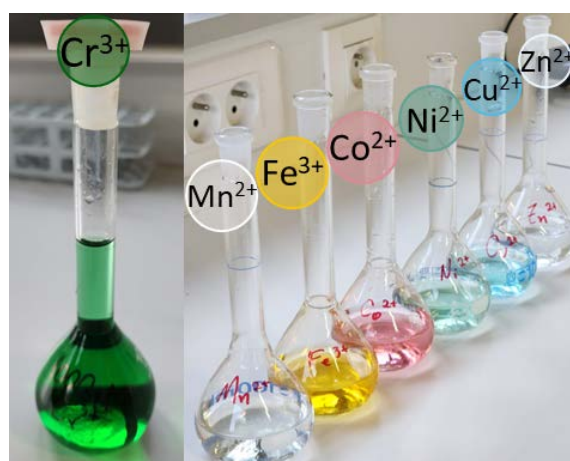


Figure 3 : Solutions de métaux lourds à 300 mg/L.

Figure 4 : La mousse de rGO vue au microscope électronique à balayage avant adsorption du mercure : des feuillets de carbone froissés formant un labyrinthe à très grande surface.

Encore faut-il prouver que cette électrode recyclée fonctionne ! Pour cela, elle a été assemblée dans une petite cellule de test étanche (Figure 5), remplie d'un liquide conducteur d'ions appelé électrolyte. La technique reine de l'électrochimiste est la voltamétrie cyclique. On fait varier la tension et on mesure le courant, ce qui permet de tracer une sorte d'électrocardiogramme du matériau (Figure 6). Verdict : la signature de l'électrode chargée en mercure présente des pics supplémentaires, preuve que le mercure échange des électrons de manière réversible et que sa capacité de stockage dépasse de 15 à 33 % celle du matériau vierge.



Figure 5 : Une cellule électrochimique de test utilisée au laboratoire pour évaluer les électrodes.

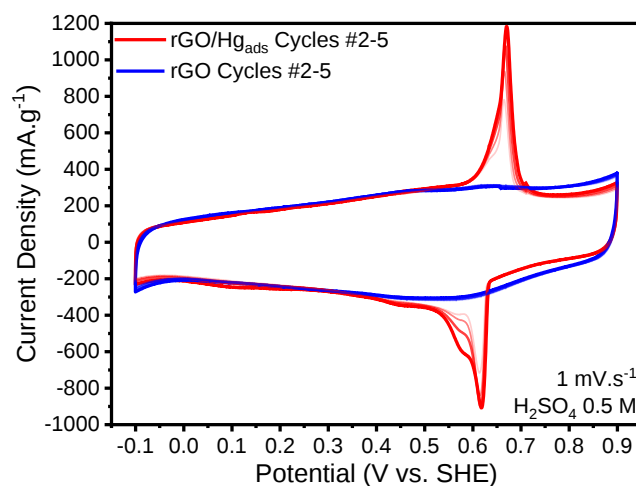


Figure 6: Signature électrochimique des électrodes des électrodes (voltamétrie cyclique) : le matériau chargé en mercure (rouge) présente des pics supplémentaires et stocke davantage de charge que le matériau vierge (bleu).

Ces résultats démontrent qu'un déchet dangereux peut devenir une ressource pour la transition énergétique, dans une véritable logique d'économie circulaire. La prochaine étape ? Passer des eaux modèles synthétisées au laboratoire à des eaux usées réelles, pour que, demain, dépolluer l'eau serve aussi à stocker notre énergie.

Article écrit par Marcelo Amaro de Andrade, docteur de Nantes Université. Sa thèse, intitulée « Recycling Wastewater Adsorbents for Energy Storage Applications », a été réalisée à l'Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel (IMN, CNRS – Nantes Université) sous la direction de Thierry Brousse et Olivier Crosnier, et soutenue le 7 octobre 2025. Elle s'inscrit dans le programme doctoral européen DESTINY, financé par le programme Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre des actions Marie Skłodowska-Curie COFUND (accord de subvention n° 945357), avec le soutien de la Région Pays de la Loire, et a bénéficié d'une mobilité à Chalmers University of Technology (Suède) dans l'équipe de Patrik Johansson.