

Procédés électrolytiques hybrides Pour le traitement et le recyclage des eaux grises

Les eaux grises – une ressource intéressante pour certains usages – doivent être traitées en raison des microorganismes pathogènes ainsi que des composés organiques et inorganiques qui peuvent entraîner des risques sanitaires et environnementaux. Les systèmes électrochimiques – reconnus comme des technologies propres – permettent de réduire la consommation d'eau potable et contribuent à préserver les ressources en eau.



PAR RIMEH DAGHRIR, Ph. D., MBA
Chercheuse, Centre des technologies de l'eau
rdaghrir@cegepsl.qc.ca

Mise en contexte

Au Canada, on dénombre des millions d'habitations isolées incluant des résidences, des campings, des campements de chantiers, des campements miniers, etc. Des données récentes ont rapporté que plus de 150 milliards de litres d'eaux usées issues de ces habitations isolées sont insuffisamment traités ou non traités et, par conséquent, sont rejetés annuellement dans les milieux naturels (Environnement Canada, 2021). En effet, l'exploitation de ces habitations génère des eaux usées (eaux grises et eaux noires), alors qu'elles ne sont pas toujours reliées aux réseaux communautaires de collecte des eaux usées. Les eaux grises sont celles qui sont générées par les drains des lavabos, des douches et de la machine à laver, alors que les eaux noires sont générées par les eaux usées issues des toilettes. Généralement, les eaux grises n'incluent pas les rejets des évier de cuisine ou des lave-vaisselle, car elles sont fortement contaminées par des matières grasses et des déchets alimentaires (Santé Canada, 2010).

Au Québec, les sources d'eaux grises peuvent représenter plus de 150 litres d'eau par personne par jour pour un citoyen québécois moyen, soit environ 600 litres d'eaux grises par jour (220 000 litres par année) qui sont envoyés au réseau d'égouts des villes pour chaque logement du territoire (Écohabitation, 2019). Toutefois, les quantités d'eaux grises produites par jour par habitant dépendent de nombreux facteurs (mode de vie, localisation géographique, saison, etc.). C'est pourquoi les flux d'eaux grises dans les bâtiments sont différents d'un habitant à l'autre, d'une région à une autre et d'un pays à l'autre (Hernández Leal et collab., 2007; Eriksson et collab., 2002). Si la quantité d'eaux grises produite est différente selon le mode de vie des habitants,



leurs qualités présentent aussi beaucoup de variations. Les eaux grises issues des résidences contiennent des concentrations importantes de polluants organiques et inorganiques, ainsi qu'une panoplie de microorganismes pathogènes (Hernández Leal et collab., 2007; Eriksson et collab., 2002; Eriksson et Donner, 2009). D'une façon générale, les eaux grises contiennent des huiles et des graisses, des détergents (nonylphénol et ses dérivés éthoxylés), des matières en suspension, une panoplie de matières organiques, des composés azotés et phosphorés ainsi que des microorganismes pathogènes (tableau 1). Dans les régions isolées, les eaux grises doivent être collectées et transportées hors site pour être disposées, ce qui peut représenter des coûts d'exploitation exorbitants, surtout lorsque les bâtiments se trouvent dans des zones extrêmement éloignées des réseaux communautaires de collecte des eaux usées, tels que les campements miniers ou les campements de chantiers.

Les eaux grises peuvent être considérées – pour certains usages – comme une ressource alternative à l'eau potable, et peuvent donc être réutilisées pour des applications telles que l'arrosage, le lavage des camions et la chasse d'eau des toilettes. Par exemple, une réutilisation des eaux grises pourrait réduire la

TABLEAU 1

Caractéristiques des eaux grises issues de buanderies et de salles de bain

PARAMÈTRES	BUANDERIE (MACHINE À LAVER)			SALLE DE BAIN			RÉFÉRENCES
	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	
pH	8,1	7,0	10	7,3	6,4	8,6	Chaillou et collab., 2011; Atasoy et collab., 2007; Birks et Hills, 2007; Gardner, 2003; Ottosson et Stenstrom, 2003; Ghaitidak et Yadav, 2013.
Conductivité ($\mu\text{Sm/cm}$)	851	190	3 000	681	14	627	
Matières en suspension (mg/L)	152	68	280	80	7	505	
Turbidité (UTN)	50	243	444	44	167	375	
DCO _T (mg/L)	775	231	2 050	288	100	1 001	
DBO ₅ (mg/L)	261	48	472	130	26	670	
COT (mg/L)	179	-	-	63	17	186	
P _T	21	0,1	171	6	0,1	49	
Azote total (mg/L)	11	6	21	10	3,6	41	
Tensioactifs anioniques (mg/L)	46	0,5	85	19	0,3	42	
Coliformes totaux (UFC/100 ml)	-	-	7 10 ⁵	-	2,5 10 ²	1,8 10 ⁸	
<i>E. coli</i> (UFC/100 ml)	-	-	-	10	0	2,4 10 ⁶	
Entérocoques (UFC/100 ml)	-	-	-	10	0	2,0 10 ⁵	

demande en eau jusqu'à 30 % par rapport à la consommation domestique totale (Chaillou et collab., 2011; Ghaitidak et Yadav, 2013). Cependant, cette réutilisation doit satisfaire à certaines exigences (NSF, s. d.) qui sont de plus en plus strictes; par exemple, une limite maximale de 10 à 20 mg O₂/L (DBO₅), 10 mg/L (MES), 2 UTN (turbidité) et un niveau non détectable de coliformes fécaux (US EPA, 2004). Le traitement sur site peut apporter une certaine souplesse de gestion, et représente une approche économiquement rentable pour les communautés et les agglomérations peu peuplées et éloignées.

Il existe sur le marché plusieurs technologies de traitement décentralisé des eaux, mais elles ne répondent pas toujours aux exigences d'élimination complémentaire de l'azote, du phosphore, de la désinfection, de la réutilisation des eaux et d'autonomie d'utilisation (Meknassi, 2003). Le choix d'une technologie dépendra des objectifs de traitement ainsi que de la charge initiale organique et hydraulique des eaux grises à traiter, qui varient d'un site à un autre. Pour y faire face, les recherches actuelles – fort dynamiques – s'orientent de plus en plus vers le développement des technologies électrochimiques qui sont respectueuses de l'environnement (c'est-à-dire sans ajout de produits chimiques), moins coûteuses pour l'implantation, relativement simples à appliquer, efficaces et permettant de réduire la consommation d'eau potable (Daghrir et collab., 2012; Tran et collab., 2009). Elles contribuent ainsi à préserver

les ressources en eaux et répondent à une réglementation de plus en plus contraignante.

Enjeux et intérêt des procédés électrochimiques

Les procédés électrochimiques se définissent comme étant la décomposition des polluants lors du passage du courant électrique à travers un composé ionisé en général dissous dans les eaux usées et dénommé électrolyte. Lors d'un processus électrolytique, le courant électrique est appliqué entre deux électrodes (anode [+]) et cathode [-]) reliées à une source d'alimentation et immergées dans la solution. Les techniques électrochimiques – qui se basent sur un transfert d'électrons – s'accompagnent d'une libération de H₂, ce qui les rend intéressantes du point de vue environnemental. Reconnus comme des technologies vertes, les procédés électrochimiques peuvent être appliqués pour le traitement d'un grand nombre de polluants de types organiques et inorganiques ainsi que pour assurer une meilleure désinfection des eaux. Il s'agit de techniques faciles à mettre en œuvre et à automatiser pour des applications à grande échelle (Chen, 2004). Pour les petites agglomérations et plus particulièrement dans les régions isolées qui nécessitent des systèmes autonomes d'assainissement, les techniques électrolytiques sont compactes et plus faciles à mettre en œuvre que d'autres systèmes de traitement conventionnels (biologique ou physicochimique).

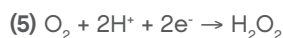
Mode d'action

Dans un processus de traitement des eaux grises par voie électrochimique, il est possible d'exploiter les réactions qui se produisent dans le compartiment anodique et cathodique pour produire respectivement des agents coagulants ($\text{Fe}(\text{OH})_2/\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$) et oxydants (H_2O_2 ; OH°). Une électroproduction de ses ions de façon simultanée permet d'exploiter dans le même réacteur les processus d'électrocoagulation (EC) et d'électroréduction (ER).

En effet, les ions $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ou Al^{3+} pourraient s'obtenir par dissolution anodique des électrodes consommables de fer ou d'aluminium (équations 1 et 2). Ces ions qui se forment in situ réagiront avec les ions hydroxyles (OH^-) libérés par la réduction cathodique de la molécule d'eau. Les hydroxydes métalliques formés (équations 3 et 4) ont une forte capacité d'adsorption et de précipitation de polluants (Daghrir et collab., 2012; Asselin, 2007). Le processus d'EC est généralement associé avec un processus d'électroflottation où les bulles d'oxygène et d'hydrogène sont respectivement produites à l'anode et à la cathode. Ces petites bulles fournissent une surface spécifique importante pour l'attachement des particules présentes dans les eaux grises favorisant ainsi une meilleure efficacité de séparation dans le processus d'EC.



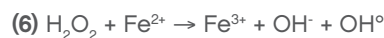
Au sein du même réacteur électrochimique, il est possible de produire simultanément du H_2O_2 par réduction cathodique de l'oxygène dissous sur une électrode insoluble (contre électrode) de graphite ou de carbone vitreux (équation 5) (Daghrir et Drogui, 2013). Cela pourrait se faire par régulation du courant électrique en jouant sur le bilan électronique et en contrôlant également les conditions hydrodynamiques à l'intérieur de la cellule électrolytique. Durant ce processus d'ER, la taille des surfaces spécifiques de l'électrode et la capacité de transfert de masse sont également deux facteurs incontournables qui touchent la production de H_2O_2 . Par exemple, des électrodes à base de carbone (feutre de carbone, carbone vitreux, graphite, carbone vitreux réticulé) possèdent des groupements oxygénés fonctionnels à la surface qui facilitent l'échange d'électrons avec les substances organiques, et qui sont surtout moins polluantes pour l'environnement (Guitaya, 2013).



Le H_2O_2 généré par voie électrolytique possède un potentiel redox élevé (1,77 V/ENH). Il se caractérise par une forte capacité d'oxydation prononcée sur les composés organiques et inorganiques qui contaminent les eaux grises. En l'absence de catalyseur, le peroxyde d'hydrogène est stable. Il est bactériostatique à une concentration de 2,0 mg/L, mais non bactéricide. Pour devenir bactéricide, il doit être accompagné d'une réaction permettant d'assurer sa décomposition, en particulier par l'intermédiaire de la formation de radicaux

hydroxyles. Le peroxyde d'hydrogène généré in situ ne produit pas de résidu de réaction, contrairement au chlore qui est actuellement le désinfectant le plus utilisé et dont des résidus peuvent se former, tels que les chloramines, les chloroformes et autres produits halogénés. Ainsi, il est possible de désinfecter les eaux grises sans ajout de produit chimique par simple réaction électrochimique sur l'eau et/ou l'oxygène dissous au niveau du compartiment cathodique. On obtient alors une technologie propre qui ne génère pas de composés résiduels et n'augmente pas la salinité des eaux traitées au cours du temps.

L'application d'un procédé d'EC utilisant des électrodes de fer à l'anode mène à la présence des ions ferreux dans la solution. Ces ions générés représentent un catalyseur très efficace pour la dégradation du H_2O_2 produite à la cathode par un procédé d'ER. En effet, la présence des ions Fe^{2+} en solution mène à la formation des radicaux hydroxyles ($E^\circ(\text{OH}^\circ/\text{H}_2\text{O}) = 2,81 \text{ V/ENH}$) grâce à la réaction Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) (équation 6). Les radicaux hydroxyles (OH°) sont les oxydants les plus puissants qu'on peut utiliser pour la décontamination des polluants organiques réfractaires présents dans les eaux grises.



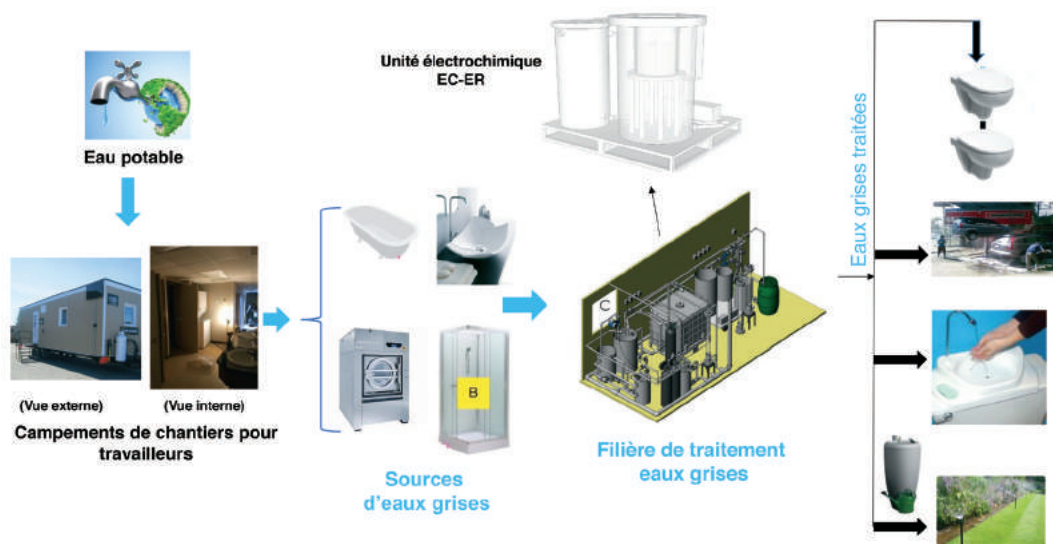
Technologies électrochimiques hybrides

Les eaux grises issues de salles de bain et de machines à laver représentent environ 60 % des consommations quotidiennes d'eau potable. Ces eaux présentent une charge polluante moins élevée que celles des eaux usées. Elles représentent sans conteste la meilleure source de valorisation à l'échelle domestique. De nos jours, le traitement et le recyclage des eaux grises pour des applications « non potables » présentent un grand intérêt en raison des avantages environnementaux, sociaux et économiques que peut présenter une telle approche. Le recyclage des eaux grises sur site contribue à réaliser des économies sur les coûts exorbitants reliés à la consommation de l'eau potable, à réduire les pressions sur les ressources hydriques et à minimiser les rejets des eaux usées vers les milieux récepteurs.

Sachant que la contamination des eaux grises peut être à la fois sous la forme dissoute ou non dissoute, l'approche technologique du procédé électrolytique hybride EC-ER pourrait constituer une alternative intéressante aux procédés physicochimiques conventionnels (figure 1). Les études antérieures de Daghrir (2021) ont démontré que la chaîne de traitement incluant la technologie EC-ER suivie par une

« Les eaux grises [...] représentent sans conteste la meilleure source de valorisation à l'échelle domestique. »

FIGURE 1
 Traitement et recyclage des eaux grises issues des campements de chantiers par voie électrochimique EC-ER



L'avenir de l'eau

Depuis plus d'une décennie, Cteau travaille pour l'avenir de l'eau avec l'industrie privée et le secteur public.

Nous accélérons vos projets grâce à notre expertise en recherche appliquée et nos ressources à la fine pointe de l'industrie. Nous vous offrons un accompagnement personnalisé pour de l'aide technique, la conception et l'opération de pilotes de toute envergure et la certification ou la validation de vos procédés et équipements.

Nous contribuons à votre succès par l'identification des meilleures pratiques, nos sources de financement privilégiées et notre capacité de former votre équipe. De plus, nous vous cédon la propriété intellectuelle développée ensemble et nous en protégeons la confidentialité.

L'avenir de l'eau se trouve à www.Cteau.com

Cteau

CENTRE DES TECHNOLOGIES DE L'EAU

« En fonction du niveau de traitement souhaité et de l'utilisation prévue de l'eau traitée, diverses qualités d'eau peuvent être produites en modulant les conditions électrolytiques de traitement EC-ER. »

unité de polissage était capable de recevoir une variation des charges organiques, inorganiques et microbiologiques détectées dans les eaux grises, de traiter ces dernières afin qu'elles ne présentent pas de risque sanitaire ou environnemental, et de réutiliser ces eaux recyclées pour des applications telles que la chasse d'eau des toilettes. L'approche technologique EC-ER appliquée à une densité de courant de 2,5 mA/cm² en mode d'opération continue (temps de rétention au sein de la cellule EC/ER de 20 min) a permis d'assurer une meilleure clarification (turbidité < 1 UTN et absence d'odeur) et désinfection des eaux grises (*E. coli* < 10 UFC/100 mL ; coliformes fécaux < 10 UFC/100 mL), et d'atteindre des concentrations résiduelles inférieures à 10 mg DCO_p/L, < 2 mg DBO₅/L, 3 mg MES/L et 0,1 mg P/L. En fonction du niveau de traitement souhaité et de l'utilisation prévue de l'eau traitée, diverses qualités d'eau peuvent être produites en modulant les conditions électrolytiques de traitement EC-ER. En outre, ce type de traitement électrolytique se prête bien pour des installations compactes et moins encombrantes, lesquels critères sont souvent requis dans le traitement des eaux grises provenant des campements, des hôtels éloignés ou des campings. ●

Références

- Asselin, M. (2007). *Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique*. Thèse (maîtrise en sciences de l'eau), Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 282 p.
- Atasoy, E., S. Murat, A. Baban et M. Tiris (2007). « Membrane bioreactor (MBR) treatment of segregated household wastewater for reuse ». *CLEAN – Air Soil Water*, vol. 35, n° 5, p. 465-472.
- Birks, R., et S. Hills (2007). « Characterization of Indicator Organisms and Pathogens in Domestic Greywater for Recycling ». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 129, n°s 1-3, p. 61-69.
- Chaillou, K., C. Gérente, Y. Andrès et D. Wolbert (2011). « Bathroom Greywater Characterization and Potential Treatments for Reuse ». *Water, Air & Soil Pollution*, vol. 215, p. 31-42.
- Chen, G. (2004). « Electrochemical technologies in wastewater treatment ». *Separation and Purification Technology*, vol. 68, n° 1, p. 11-41.
- Daghrir, R. (2021). *Gestion des eaux grises : développement d'un procédé électrochimique ERG innovant pour le traitement et le recyclage des eaux grises issues des campements de chantiers*. Présentation dans le cadre d'un webinaire organisé par CentrEau.
- Daghrir, R., et P. Drogui (2013). « Coupled electrocoagulation–electro-Fenton for efficient domestic wastewater treatment ». *Environmental Chemistry Letters*, vol. 11, n° 3, p. 151-156.
- Daghrir, R., P. Drogui, J.-F. Blais et G. Mercier (2012). « Hybrid Process Combining Electrocoagulation and Electro-Oxidation Processes for the Treatment of Restaurant Wastewaters ». *Journal of Environmental Engineering*, vol. 138, n° 11, p. 1146-1156.
- Écohabitation (2019). *La récupération des eaux grises*. En ligne : ecoHabitation.com/guides/2522/la-recuperation-des-eaux-grises.
- Environnement Canada (2021). *Règlement sur les effluents des systèmes d'assainissement des eaux usées*. En ligne : laws-lois.justice.gc.ca/PDF/SOR-2012-139.pdf.
- Eriksson, E., et E. Donner (2009). « Metals in greywater: Sources, presence and removal efficiencies ». *Desalination*, vol. 248, n°s 1-3, p. 271-278.
- Eriksson, E., K. Auffarth, M. Henze et A. Ledin (2002). « Characteristics of grey wastewater ». *Urban Water*, vol. 4, n° 1, p. 85-104.
- Gardner, E.A. (2003). « Some examples of water recycling in Australian urban environments: a step towards environmental sustainability ». *Water Supply*, vol. 3, n° 4, p. 21-31.
- Ghaidak, D.M., et K.D. Yadav (2013). « Characteristics and treatment of greywater – A review ». *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 20, p. 2795-2809.
- Guitaya, M.L.R. (2013). *Décontamination par voie électrolytique des eaux résiduaires domestiques par électroxygénation/superoxydation (EO-SO)*. Thèse (doctorat en sciences de l'eau), Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 272 p.
- Hernández Leal, L., G. Zeeman, H. Temmink et C. Buisman (2007). « Characterisation and biological treatment of greywater ». *Water Science and Technology*, vol. 56, n° 5, p. 193-200.
- Meknassi, Y.F. (2003). *Traitement biologique des eaux usées hautement riches en matières nutritives provenant d'abattoir de porcs dans un réacteur biologique séquentiel*. Thèse (doctorat en sciences de l'eau), Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, 250 p.
- NSF (s. d.). *NSF/ANSI STANDARD 350 for water reuse treatment systems*. En ligne : nsf.org/newsroom_pdf/ww_nsf_ansi350_qa_insert.pdf.
- Ottosson, J., et T.A. Stenstrom (2003). « Faecal contamination of greywater and associated microbial risks ». *Water Research*, vol. 37, n° 3, p. 645-655.
- Santé Canada (2010). *Recommandations canadiennes sur les eaux domestiques recyclées destinées à alimenter les chasses d'eau des toilettes et des urinoirs*. En ligne : canada.ca/content/dam/canada/health-canada/migration/healthy-canadians/publications/healthy-living-vie-saine/water-reclaimed-recyclee-eau/alt/reclaimed-water-eaux-recyclees-fra.pdf.
- Tran, L.H., P. Drogui, G. Mercier et J.-F. Blais (2009). « Electrochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote solution using ruthenium oxide on titanium expanded mesh anode ». *Journal of Hazardous Materials*, vol. 164, n°s 2-3, p. 1118-1129.
- US EPA (US Environmental Protection Agency) (2004). *Guidelines for water reuse*. En ligne : cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRML&dirEntryId=129543.