

# Verwijdering van kwik uit waterige oplossingen: vergelijking van een nieuw ultrastabiel mesoporeus adsorbens met een commercieel ionenwisselaarshars

Jeriffa De Clercq<sup>1</sup>, Els De Canck<sup>2</sup> en Pascal Van Der Voort<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University College Ghent, Faculty of Applied Engineering Sciences, Schoonmeersstraat 52, 9000 Ghent, Belgium

<sup>2</sup>Ghent University, Department of Inorganic and Physical Chemistry, Center for Ordered Materials, Organometallics and Catalysis (COMOC), Krijgslaan 281-S3, 9000 Ghent, Belgium

Correspondentie: J. De Clercq, Phone: +32 9 242 42 38, Fax: + 32 9 243 87 77, [Jeriffa.DeClercq@hogent.be](mailto:Jeriffa.DeClercq@hogent.be)

## Samenvatting

De performantie van een nieuw ultrastabiel, regenerbaar adsorbens SH-ePMO voor de verwijdering van kwik uit waterige oplossingen is vergeleken met dat van een commercieel ionenwisselaarshars TP-214. De bestudeerde variabelen waren de initiële kwikconcentratie en de contacttijd.

De adsorptie-isothermen duiden op een gunstige adsorptie. De isothermen werden onderzocht met de Langmuir en Freundlich modellen. Het Langmuir model gaf de beste overeenkomst voor het SH-ePMO adsorbens, terwijl het Freundlich model de beste overeenkomst vertoonde voor TP-214. De maximale adsorptiecapaciteiten bedroegen 66, resp. 456 mg/g voor SH-ePMO, resp. TP-214. TP-214 is geschikt om water te zuiveren tot ppt-niveau.

De adsorptie-kinetiek wees op een snelle adsorptie voor beide adsorbentia. De kinetiek werd onderzocht met de Lagergren's pseudo-eerste-orde en pseudo-tweede-orde kinetische modellen. Het pseudo-eerste-orde kinetisch model kwam goed overeen met de experimentele data van beide adsorbentia.

Deze studie toont heel duidelijk het potentieel van het ultrastabiele, regenerbare SH-ePMO voor de verwijdering van kwik uit waterige oplossingen en bevestigt de performantie van het ionenwisselaarshars TP-214.

**Keywords:** adsorptie; kwik; periodieke mesoporeuze organosilica's; ionenwisselaarshars; vergelijkende studie.

## Title

Removal of mercury from aqueous solutions: comparison of a new ultra stable mesoporous adsorbent with a commercial ion exchange resin

## Abstract

The performance of a new ultra stable, regenerable adsorbent SH-ePMO for the removal of mercury from aqueous solutions was compared with that of a commercial ion exchange resin TP-214. The operating variables studied were initial mercury concentration and contact time.

The adsorption isotherms showed favourable adsorption. The adsorption isotherms were analyzed using Langmuir and Freundlich models. The Langmuir model yielded the best fit for the SH-ePMO, whereas the Freundlich model fitted best the adsorption on TP-214. The maximum adsorption capacities were 66, resp. 456 mg/g for SH-ePMO, resp. TP-214. TP-214 is capable of purifying water to ppt-levels.

The adsorption kinetics showed a fast adsorption for both adsorbents. The kinetics were analyzed using Lagergren's pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models. The pseudo-first-order kinetic model showed a good agreement of the experimental data of both adsorbents.

This study clearly shows the potential of the ultra stable, regenerable SH-ePMO for removing mercury from aqueous solutions and confirms the performance of the ion exchanger resin TP-214.

**Keywords:** adsorption; mercury; periodic mesoporous organosilica; ion exchange resin; comparative study.

## INTRODUCTIE

Kwik komt vrij in het milieu tijdens productieprocessen (bijv. chlooralkali-industrie, alkalinebatterijen, ...) en tijdens het gebruik en bij de verwijdering van deze producten via afval. Kwik wordt beschouwd als één van de meest schadelijke metalen aangetroffen in het milieu. Daarom wordt het door de Kaderrichtlijn Water (2000/60/EC) geclassificeerd als een "priority hazardous substance". Dit betekent dat tegen 2015 de kwiklozing volledig moet verdwijnen. Vlaanderen begrenst de lozingslimiet tussen 0 en 150 µg/l voor kwik, afhankelijk van de industrie, en de milieukwaliteitsnorm in Vlaanderen bedraagt 1 µg/l Hg voor oppervlaktewater en grondwater. Bijgevolg moet kwik verwijderd worden uit water en afvalwater.

Kwik kan verwijderd worden uit (afval)water door verschillende methoden, zoals chemische precipitatie, membraanfiltratie, ionenwisseling, elektrolyse, solventextractie en adsorptie. Adsorptie ((bio)-adsorptie/ionenwisseling) blijkt de meest beloftevolle techniek te zijn om kwik te verwijderen uit waterige oplossingen welke minder dan 100 mg/l kwik bevatten. (Ghodbane en Hamdaoui, 2008; Anirudhan et al., 2008)

Verschillende materialen zoals actieve kool, harsen, kleien en silica's – sommige van hen zijn gemodificeerd met organische functionele groepen om de selectiviteit te verbeteren – zijn bestudeerd voor de adsorptie van kwik. (Puanngam en Unob, 2008)

Een nieuw, stabiel mesoporeus adsorbens, met name een “thiol-containing ethene bridged Periodic Mesoporous Organosilica” (SH-ePMO), is ontwikkeld voor de selectieve verwijdering van kwik (De Canck et al., 2010). PMOs hebben goed-gedefinieerde poriegroottes en porievormen, hoge specifieke oppervlaktes en een uniforme verdeling van de functionele groepen (Van Der Voort et al., 2008). Dit adsorbens combineert de adsorptie-efficiëntie van de thiol-groep ten opzichte van kwik met de stabiliteit van de “ethene bridged PMOs” (Vercaemst et al., 2007; Vercaemst et al., 2009). Bovendien behoudt het zijn functionele groepen na meerdere regeneratie-cycli, zodat het adsorbens kan herbruikt worden (De Canck et al., 2010).

Het doel van deze studie is de adsorptie-eigenschappen van dit nieuwe materiaal te evalueren en te vergelijken met een commercieel ionenwisselingshars, Lewatit MonoPlus TP-214. Ionenwisselaarsharsen zijn immers geschikt om water heel ver te zuiveren inzake kwikgehalte (Chiarle et al., 2000). TP-214 is een mono-sferisch, macroporeus chelaterend hars met thioureum-groepen en heeft een sterke affiniteit voor kwik. Het kan evenwel niet geregenereerd worden. De invloed van initiële concentratie en contacttijd op de kwikadsorptie is onderzocht. De adsorptie-evenwichtsdata, resp. kinetische data, zijn vergeleken met de Langmuir en Freundlich modellen, resp. pseudo eerste/tweede orde kinetische modellen.

## **MATERIAAL EN METHODEN**

### **Materialen en reagentia**

De waterige kwikoplossing is bereid door verdunning van een bepaald volume kwiknitraatstandaard-oplossing (0.05 N waterige oplossing, Sigma Aldrich), in gedestilleerd water.

De synthese van SH-ePMO is beschreven in De Canck et al. (2010). De SH-ePMO heeft een specifieke oppervlakte van ca. 640 m<sup>2</sup>/g en bevat 0.4 mmol SH/g. Lewatit MonoPlus TP-214 is verkregen van Lanxess en bevat minstens 1.35 N functionele groepen.

### **Evenwichtstudie**

Batch-adsorptie-experimenten zijn uitgevoerd door toevoegen van een bepaalde hoeveelheid adsorbens (150 mg) aan glazen flesjes welke 50 ml kwikoplossing van verschillende concentraties (0 – 900 mg/l) bevatten, zonder aanpassing van pH. De flessen werden in een thermostatische schud-incubator (Multitron, Analis) geroerd bij 21 °C en 200 rpm gedurende 3 uur. Stalen werden gefiltreerd met spuitfilters (Rotilabo®, 0.45 µm, Carl Roth). Het filtraat is geanalyseerd op kwikgehalte met Koude Damp Atomaire Absorptie Spectrometrie (GBC-933 gecombineerd met GBC-HG3000). De hoeveelheid geadsorbeerd kwik werd als volgt berekend:

$$q_e = \frac{C_i - C_e}{W} V \quad (1)$$

met  $q_e$  de hoeveelheid geadsorbeerd kwik (mg/g),  $C_i$  en  $C_e$  de initiële en evenwichtsconcentraties aan kwik in de oplossing (mg/l),  $V$  het volume van de oplossing (l), en  $W$  de massa adsorbens (g).

Alle experimenten werden uitgevoerd in tweevoud en de gemiddelde waarden worden hier gerapporteerd. De relatieve standaarddeviatie was lager dan 0.6%. Blanco-experimenten werden eveneens uitgevoerd.

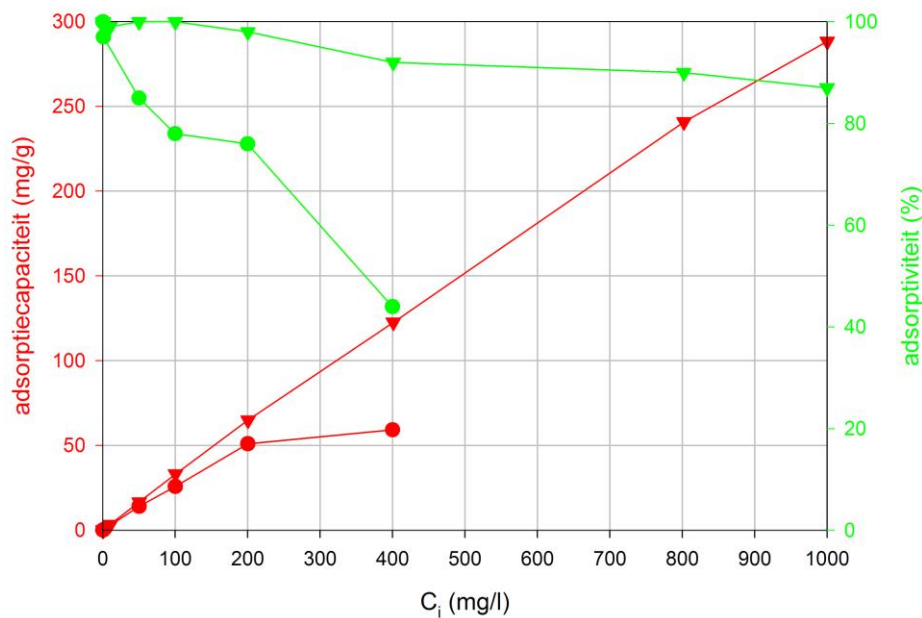
### **Kinetische studie**

Kinetische experimenten werden uitgevoerd in flesjes bij een vaste verhouding (3 gram per liter) van adsorbens-massa tot volume kwikoplossing (10 en 100 mg/l). Kinetische experimenten met 1 mg/l kwikoplossingen en TP-214 zijn eveneens uitgevoerd. De mengsels werden geroerd bij ca. 200 rpm met een magnetische roerder. Op welbepaalde tijdstippen werden stalen genomen, gefiltreerd met spuitfilters en geanalyseerd op kwikgehalte met Koude Damp Atomaire Absorptie Spectrometrie (GBC-933 gecombineerd met GBC-HG3000).

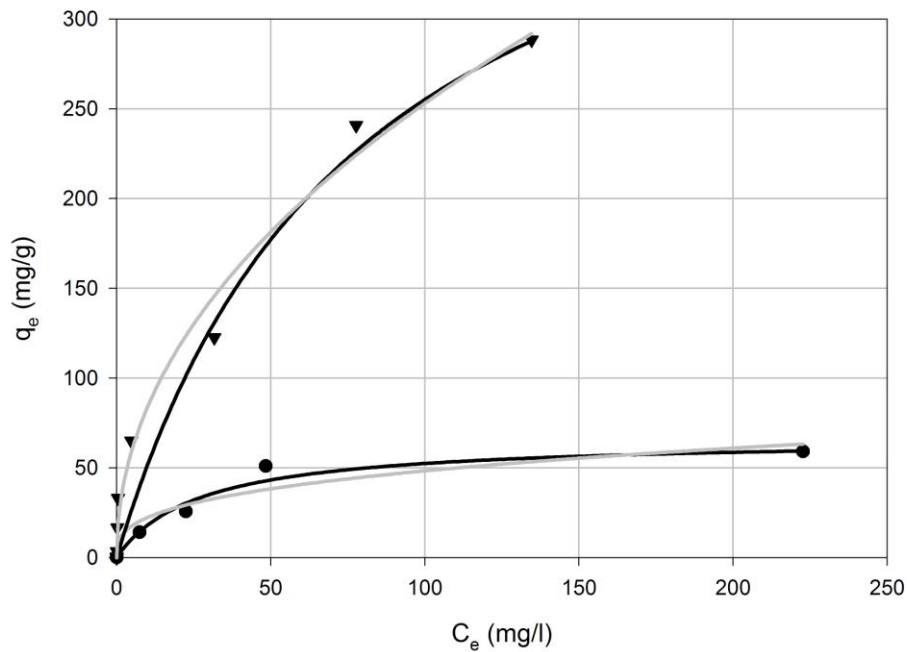
## RESULTATEN EN DISCUSSIE

### Adsorptie-evenwicht

De invloed van initiële kwikconcentratie op de adsorptie en de adsorptiviteit (% kwik geadsorbeerd) wordt weergegeven in Figuur 1. De adsorptiviteit daalt met toenemende kwikconcentraties, terwijl de adsorptiecapaciteit toeneemt. Een hogere initiële kwikconcentratie geeft immers een grotere drijvende kracht, de concentratiegradiënt. Bij lagere initiële concentraties (lager dan 400  $\mu\text{g/l}$ , resp. 100  $\text{mg/l}$ , voor SH-ePMO, resp. TP-214) wordt het kwik volledig verwijderd: voor deze kwikconcentraties zijn de adsorbentia geschikt voor volledige kwikverwijdering. TP-214 bevat meer functionele groepen en verwijdert bijgevolg ook meer kwik dan SH-ePMO. Na adsorptie is de pH van de oplossing gedaald, wat betekent dat protonen zijn afgegeven tijdens de adsorptie, zoals verwacht.



**Figuur 1.** Invloed van de initiële kwikconcentratie op het kwikadsorptie-evenwicht voor SH-ePMO (●) en TP-214 (▼)



**Figuur 2.** Adsorptie-isothermen van kwik op SH-ePMO (●) en TP-214 (▼) en de betreffende modellen (Langmuir: —; Freundlich: ---)

De adsorptie-isothermen worden weergegeven in Figuur 2. De adsorptie-isothermen vertonen in het begin een heel sterke stijging, welke duidt op sterke adsorptie bij lagere concentraties. Beide isothermen zijn van het type I volgens de classificatie en dus gunstige isothermen. De isothermen van Figuur 2 werden gefit aan de Langmuir en Freundlich isotherm modellen:

$$\text{Langmuir: } q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (2)$$

$$\text{Freundlich: } q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

met  $q_{\max}$  de maximale adsorptiecapaciteit (mg/g),  $b$  de Langmuir isotherm constante (1/mg/l),  $K_F$  de Freundlich constante ( $l^n \text{mg}^{1-n}/\text{g}$ ) en  $n$  de heterogeniteit factor. De geschatte parameters van beide modellen worden weergegeven in Tabel 1. De waarden van de heterogeniteit factor (tussen 1 en 10) wijzen op gunstige adsorptie. De maximale adsorptiecapaciteit van SH-ePMO bedraagt 66 mg/g. Dit bevestigt de 1:1 stoëchiometrie van kwik ten opzichte van de thiol-groep van het mesoporeuze materiaal

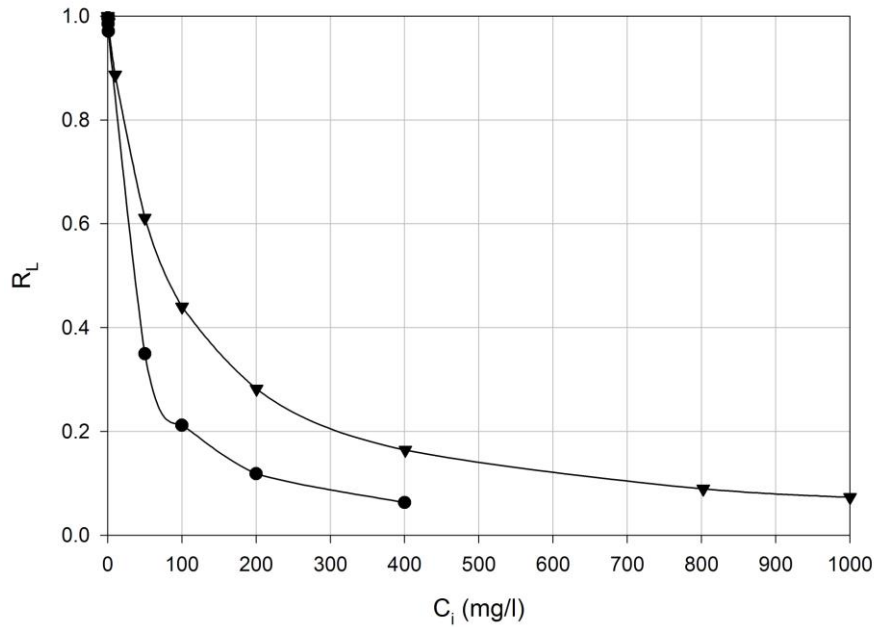
(De Canck et al., 2010) en is consistent met de literatuur (Walcarius et al., 2002; Mercier en Pinnavaia, 1998; Wu et al. 2009). De maximale adsorptiecapaciteit van SH-ePMO is lager dan de capaciteit van de mesoporeuze organosilica's, welke teruggevonden werden in de literatuur (Walcarius en Delacôte, 2005; Olkhoviyk en Jaroniec, 2007). Hierbij moet evenwel in beschouwing genomen worden dat het aantal thiol-groepen van SH-ePMO eveneens lager is. De maximale adsorptiecapaciteit van TP-214 bedraagt 456 mg/g. De berekende, minimale capaciteit van TP-214 is ca. 446 mg/g, rekening houdend met een 1:1 stoëchiometrie en het aantal functionele groepen (min. 1.35 mol/l), het watergehalte (43-48 gew%) en de dichtheid (ca. 1.1 g/mL). Dit doet ons besluiten eveneens een 1:1 stoëchiometrie van kwik ten opzichte van de thioureum-groepen voor te stellen. De essentiële karakteristieken van de Langmuir isotherm kunnen uitgedrukt worden in een dimensieloze scheidingsfactor  $R_L$  (Ghodbane en Hamdaoui, 2008):

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_i} \quad (4)$$

De  $R_L$ -waarden (Figuur 3) wijzen op gunstige adsorptie ( $0 < R_L < 1$ ) voor alle initiële concentraties en zelfs gunstigere adsorptie voor de hogere concentraties.

**Tabel 1.** Parameters van de Langmuir en Freundlich isotherm modellen

	Langmuir			Freundlich		
	$q_{\max}$ (mg/g)	$b$ (l/mg) $\times 10^3$	$R^2$	$K_F$ (l <sup>n</sup> mg <sup>1-n</sup> /g)	$n$	$R^2$
SH-ePMO	66.52	37.2	0.9765	10.34	2.99	0.9342
TP-214	456.14	12.7	0.9736	27.71	2.08	0.9902



**Figuur 3.** Scheidingsfactor voor de kwikadsorptie op SH-ePMO (●) en TP-214 (▼)

De  $R^2$ -waarden (Tabel 1) geven aan dat Langmuir de adsorptie op SH-ePMO beter beschrijft dan Freundlich, terwijl het tegengestelde wordt geobserveerd voor TP-214.

Het is interessant om de evenwichtsconcentratie voor heel lage initiële kwikconcentraties, bijv. 50  $\mu\text{g/l}$ , voor beide adsorbentia te berekenen voor 50 ml oplossing en 150 mg adsorbens (Chiarlé et al., 2000).

Hiervoor wordt de massabalans voor kwik gebruikt:

$$C_e + \frac{0.150\text{g}}{0.050\text{L}} q_e = C_i \quad (5)$$

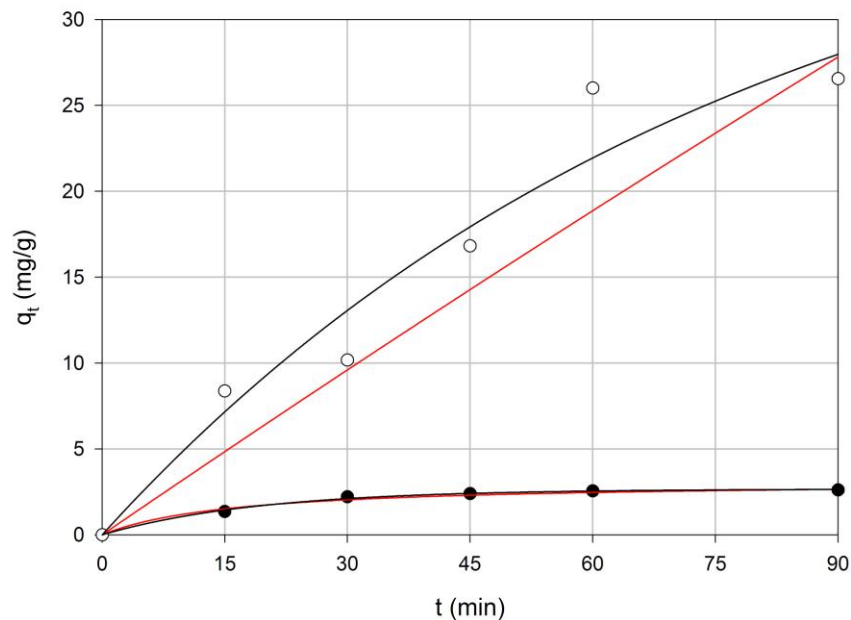
en de resp. isotherm modellen. De evenwichtsconcentratie voor SH-ePMO is ca. 6  $\mu\text{g/l}$ , terwijl dit  $2 \times 10^{-4}$   $\mu\text{g/l}$  bedraagt voor TP-214. De efficiëntie van TP-214 is zeer hoog: als evenwicht zou bereikt worden, kan het water gezuiverd worden tot heel hoge niveaus. Uiteraard mag voor volschalige toepassingen de evenwichtstijd niet té hoog zijn.

### Adsorptie-kinetiek

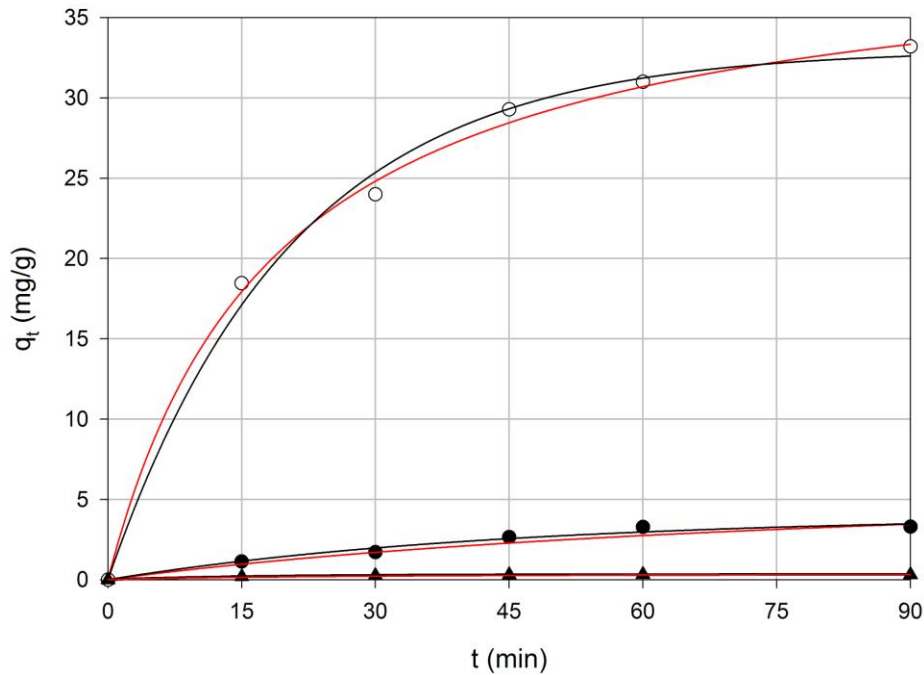
Adsorptie hangt niet alleen af van het adsorptie-evenwicht van het adsorbens (gebaseerd op een “oneindige” contacttijd) maar ook van de adsorptie-kinetiek. De adsorptie-kinetiek wordt bepaald door massa-overdracht en wordt weergegeven op Figuren 4 en 5. De adsorptiecapaciteit neemt toe met de tijd



tot evenwicht is bereikt. De contacttijd, die nodig is om evenwicht te bereiken, neemt toe met de initiële concentratie. Dit kan verklaard worden door het feit dat bij lage concentratie, kwik sneller adsorbeert, terwijl bij hogere concentraties, het kwik dieper in het adsorbens-deeltje moet diffunderen alvorens te adsorberen (Ghodbane en Hamdaoui, 2008). Na 1 à 1.5 uur wordt het evenwicht bereikt bij de lagere concentraties zodat de adsorptie als heel snel kan beschouwd worden. De initiële adsorptiesnelheid is hoger voor hogere initiële kwikconcentraties omwille van de hogere drijvende kracht voor massa-overdracht (Ghodbane en Hamdaoui, 2008).



**Figuur 4.** Adsorptie-kinetiek van SH-ePMO bij 10 (●) en 100 (○) mg/l initiële kwikconcentratie en de resp. modellen (eerste-orde: —; tweede-orde: —)



**Figuur 5.** Adsorptie-kinetiek van TP-214 bij 1 (▲), 10 (●) and 100 (○) initiële kwikconcentratie en de resp. modellen (eerste-orde: —; tweede-orde: —)

Twee modellen worden frequent gebruikt om de adsorptie-kinetiek van kwik te beschrijven (Ghodbane en Hamdaoui, 2008; Walcarius et al., 2002), met name het Lagergren pseudo-eerste-orde model en de Ho lineaire vorm van het pseudo-tweede-orde model (Ho, 2006):

$$\text{pseudo-eerste orde: } q_t = q_e \left[ 1 - e^{-k_1 t} \right] \quad (6)$$

$$\text{pseudo-tweede orde: } q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (7)$$

met  $q_t$  (mg/g) de adsorptiecapaciteit op tijdstip  $t$  (min),  $k_1$  (l/min) en  $k_2$  (g/mg/min) de pseudo-eerste-orde en pseudo-tweede-orde constanten, resp. Figuren 4, 5 en Tabel 2 geven de resultaten weer van de fit aan beide kinetische modellen. De overeenkomst met het pseudo-eerste-orde kinetisch model is beter. Dit bevestigt de 1:1 stoëchiometrie van kwik ten opzichte van de functionele groepen van beide adsorbentia. De waarden voor de adsorptiecapaciteit,  $q_e$ , berekend met het pseudo-eerste-orde model benaderen de geobserveerde waarden, uitgezonderd voor 100 mg/l en SH-ePMO, waar de experimentele

data enige spreiding vertonen. De initiële adsorptiesnelheid (de pseudo-eerste-orde constante vermenigvuldigd met de adsorptiecapaciteit bij evenwicht) neemt toe met de initiële kwikconcentratie, zoals verwacht gezien de toename van de drijvende kracht (Hameeda en El-Khaiary, 2008).

**Tabel 2.** Parameter van de kinetische modellen

	pseudo-eerste-orde			pseudo-tweede-orde		
	q <sub>e</sub> (mg/g)	k <sub>1</sub> (l/min)	R <sup>2</sup>	q <sub>e</sub> (mg/g)	k <sub>2</sub> (g/mg/min)	R <sup>2</sup>
SH-ePMO 10 mg/l	2.663	0.0520	0.9958	3.118	0.0201	0.9855
SH-ePMO 100 mg/l	40.76	0.0129	0.9460	526.3	1.177 10 <sup>-6</sup>	0.8694
TP-214 1 mg/l	0.3260	0.0583	0.9958	0.4110	0.0901	0.8882
TP-214 10 mg/l	3.992	0.0227	0.9765	7.148	1.453 10 <sup>-3</sup>	0.9452
TP-214 100 mg/l	33.00	0.0487	0.9946	40.16	1.337 10 <sup>-3</sup>	0.9977

## CONCLUSIE

De performantie van twee adsorbentia, met name een nieuw ultrastabiel adsorbens SH-ePMO en een commercieel ionenwisselaarshars TP-214, voor de verwijdering van kwik uit waterige oplossingen is vergeleken.

Het Langmuir model beschreef de adsorptie op SH-ePMO het best, terwijl voor TP-214 het Freundlich model de beste resultaten gaf. De maximale adsorptiecapaciteiten bedragen 66, resp. 456 mg/g voor SH-ePMO, resp. TP-214. Dit wijst op een 1:1 stoëchiometrie voor kwik ten opzichte van de functionele groepen van beide adsorbentia. TP-214 heeft een veel hogere adsorptiecapaciteit dan SH-ePMO en is geschikt om water te zuiveren tot ppt-niveau. De lagere capaciteit van SH-ePMO is toe te schrijven aan de lagere hoeveelheid thiol-groepen.

De adsorptiekinetiek van beide adsorbentia kan goed beschreven worden met het Lagergren's pseudo-eerste-orde kinetisch model. Het evenwicht wordt snel bereikt voor beide adsorbentia.

Deze studie toont heel duidelijk het potentieel van het ultrastabiele, regenerereerbare SH-ePMO voor de verwijdering van kwik uit waterige oplossingen vermits het SH-ePMO in deze studie een beperkt aantal functionele groepen had. Toekomstig werk zal zich dan ook focussen op de optimalisatie van het

regeneerbare SH-ePMO: het bereiken van een analoge performantie als dat van TP-214 (hoge adsorptiecapaciteit en zuivering van water tot ppt-niveau) door o.a. het aantal functionele groepen te verhogen.

## Erkenning

De auteurs bedanken Karolien De Doncker, resp. Elena Soler van de Faculteit Toegepaste Ingenieurswetenschappen (Hogeschool Gent) voor haar hulp met de CV-AAS metingen, resp. adsorptie-experimenten. Els De Canck bedankt de Universiteit Gent voor diens financiële steun. De auteurs erkennen tevens Jean Moriau van Lanxess voor het aanleveren van ionenwisselaarshars.

## Referenties

T.S. Anirudhan, L. Divya, M. Ramachandran, Mercury(II) removal from aqueous solutions and wastewaters using a novel cation exchanger derived from coconut coir pith and its recovery, *J. Hazard. Mater.* 157 (2008), 620–627.

S. Chiarle, M. Ratto, M. Rovatti, Mercury Removal from Water by Ion Exchange Resins Adsorption, *Water Res.* 34 (2000), 2971-2978.

E. De Canck, L. Lapeire, J. De Clercq, F. Verpoort, P. Van Der Voort, A new Ultra Stable Mesoporous Adsorbent for the Removal of Mercury, *Langmuir* 26 (2010), 10076–10083.

I. Ghodbane, O. Hamdaoui, Removal of mercury(II) from aqueous media using eucalyptus bark: Kinetic and equilibrium studies, *J. Hazard. Mater.* 160 (2008), 301–309.

B.H. Hameeda, M.I. El-Khaiary, Batch removal of malachite green from aqueous solutions by adsorption on oil palm trunk fibre: Equilibrium isotherms and kinetic studies, *J. Hazard. Mater.* 154 (2008), 237–244.

Y. Ho, Review of second-order models for adsorption systems, *J. Hazard. Mater.* B136 (2006), 681–689.

L. Mercier, T.J. Pinnavaia, Heavy metal ion adsorbents formed by the grafting of thiol functionality to mesoporous silica molecular sieves: factors affecting Hg<sup>2+</sup> uptake, *J. Environ. Sci. Technol.*, 32 (1998), 2749-2754.

O. Olkhovyk, M. Jaroniec, Polymer-Templated Mesoporous Organosilicas with Two Types of Multifunctional Organic Groups, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46 (2007), 1745-1751.

M. Puangam, F. Unob, Preparation and use of chemically modified MCM-41 and silica gel as selective adsorbents for Hg(II) ions, *J. Hazard. Mater.* 154 (2008), 578–587.

- P. Van Der Voort, C. Vercaemst, D. Schaubroeck, F. Verpoort, Ordered mesoporous materials at the beginning of the third millennium: new strategies to create hybrid and non-siliceous variants, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 10 (2008), 347–360.
- C. Vercaemst, M. Ide, B. Allaert, N. Ledoux, F. Verpoort, P. Van Der Voort, Ultra-fast hydrothermal synthesis of diastereoselective pure ethenylene-bridged periodic mesoporous organosilica, *Chem. Commun.* 22 (2007), 2261-2263.
- C. Vercaemst, M. Ide, P.V. Wiper, J.T. A. Jones, Y.Z. Khimyak, F. Verpoort, P. Van Der Voort, Ethenylene-bridged periodic mesoporous organosilicas: From E to Z, *Chem. Mater.* 21 (2009), 5792–5800.
- A. Walcarius, C. Delacôte, Mercury(II) binding to thiol-functionalized mesoporous silicas: critical effect of pH and sorbent properties on capacity and selectivity. *Analytica Chimica Acta*, 547 (2005), 3–13.
- A. Walcarius, M. Etienne, J. Bessiere, Rate of Access to the Binding Sites in Organically Modified Silicates. 1. Amorphous Silica Gels Grafted with Amine or Thiol Groups, *Chem. Mater.* 14 (2002), 2757-2766.
- H.Y. Wu, C.H. Liao, Y.C. Pan, C.L. Yeh, H.M. Kao, Synthesis and characterization of cubic thiol-functionalized periodic mesoporous organosilicas as effective mercury ion adsorbents, *Microporous and Mesoporous Mater.*, 119 (2009), 109-116.