

Les matériaux poreux ionosiliciques appliqués à la dépollution

Résumé La chimie supramoléculaire permet de contrôler des propriétés surfaciques de matériaux synthétisés *via* des approches « bottom-up ». Ainsi, les méthodes templates permettent d'accéder à des matériaux mésoporeux nanostructurés. Dans ce domaine, les silices poreuses présentent des caractéristiques de surface accessible très élevées ainsi qu'une physico-chimie interfaciale très modulable. Ces deux propriétés en font des matériaux de choix pour des applications liées à l'adsorption et à la dépollution. Cet article présente le cas particulier des ionosilices qui sont apparues comme des systèmes particulièrement polyvalents et adaptés aux applications recherchées, permettant de nombreuses déclinaisons possibles relatives à leurs caractéristiques texturales, structurales et physico-chimiques. Les ionosilices permettent de moduler à façon les capacités et les forces motrices de l'adsorption, en vue de mettre au point des solutions performantes pour capter des polluants d'un large spectre.

Mots-clés **Matériaux nanostructurés, ionosilices, synthèses par voie template, synthèses « bottom-up », adsorption, complexation, dépollution.**

Abstract **Ionosilicas: nanostructured materials for depollution**

Supramolecular chemistry allows controlling the surface properties of materials formed *via* bottom-up approaches. Thus, template directed approaches provide access to nanostructured mesoporous materials. In this field, porous silicas display interesting features such as very high surface accessibility characteristics as well as highly variable interfacial surface chemistry. These two properties make them the materials of choice for applications related to adsorption and depollution. This article focuses on the particular case of ionosilicas that have emerged as particularly versatile phases as they can be adapted to the desired applications. Ionosilicas allow many possible variations relating to textural, structural and physico-chemical characteristics. Ionosilicas therefore allow modulating the adsorption capacities and driving forces, in order to develop efficient solutions for the capture of a broad spectrum of pollutants.

Keywords **Nanostructured materials, ionosilicas, template directed synthesis, bottom-up syntheses, adsorption, complexation, decontamination.**

Parmi les procédés développés pour traiter les pollutions des eaux, nombre d'entre eux sont adressés par des phénomènes de sorption. La gamme des polluants visés par ces processus est très étendue, depuis les pesticides jusqu'aux radionucléides. Il s'agit de polluants organiques (colorants, principes actifs...) ou de polluants minéraux, métalliques (nitrate, plomb, arsenic, cadmium, chrome, mercure, zinc, cyanure...). En fonction des polluants et des mécanismes de sorption, la nature de ces matériaux adsorbants est très variée. D'un point de vue de leur composition chimique, ils peuvent être purement minéraux, purement organiques, ou de nature mixte ou hybride. Les mécanismes impliqués peuvent être de la « simple » adsorption (physisorption ou chimisorption) sur des matériaux comme les charbons actifs couramment utilisés pour filtrer la matière organique (BTEX pour benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes ; PAC pour poly-hydrocarbures aromatiques, phénols...) [1]. On mentionnera aussi les

mécanismes d'échanges ioniques ou de complexation. Dans ce deuxième cas, les surfaces des solides sont modifiées par fonctionnalisation pour incorporer les groupes responsables des interactions spécifiques avec les polluants ciblés [2]. Dans le cas des échangeurs, il s'agit de matériaux dits à charges permanentes, en lien avec leur déficit de charge d'origine structurale. Ces charges garantissent des capacités d'échanges élevées pour les diverses espèces ioniques. Contrairement aux matériaux porteurs de groupes sélectifs, la majorité de ces échangeurs ne sont que très peu spécifiques envers les espèces ciblées. Les matériaux les plus couramment utilisés pour les procédés de dépollution, avec leurs principales caractéristiques, sont décrits dans le *tableau*.

Cette diversité des matériaux adsorbants concerne aussi leur origine, qu'elle soit naturelle ou synthétique. Les solides naturels sont disponibles en quantités importantes et ont un coût modéré, mais en contrepartie, ces ressources présentent

Tableau - Matériaux les plus couramment utilisés pour les procédés de dépollution.

Matériaux	Caractéristiques et propriétés de sorption
Argiles	Échangeurs inorganiques (aluminosilicates) lamellaires de cations
Hydroxydes doubles lamellaires	Échangeurs inorganiques lamellaires d'anions
Résines	Édifices macromoléculaires porteurs de fonctionnels, échangeurs de cations ou d'anions
Zéolithes	Aluminosilicates microporeux, échangeurs de cations
Charbons actifs	Carbones nanostructurés pour l'adsorption de matière organique ; préparés à partir de différentes matières premières et selon différentes conditions de carbonisation et modes d'activation

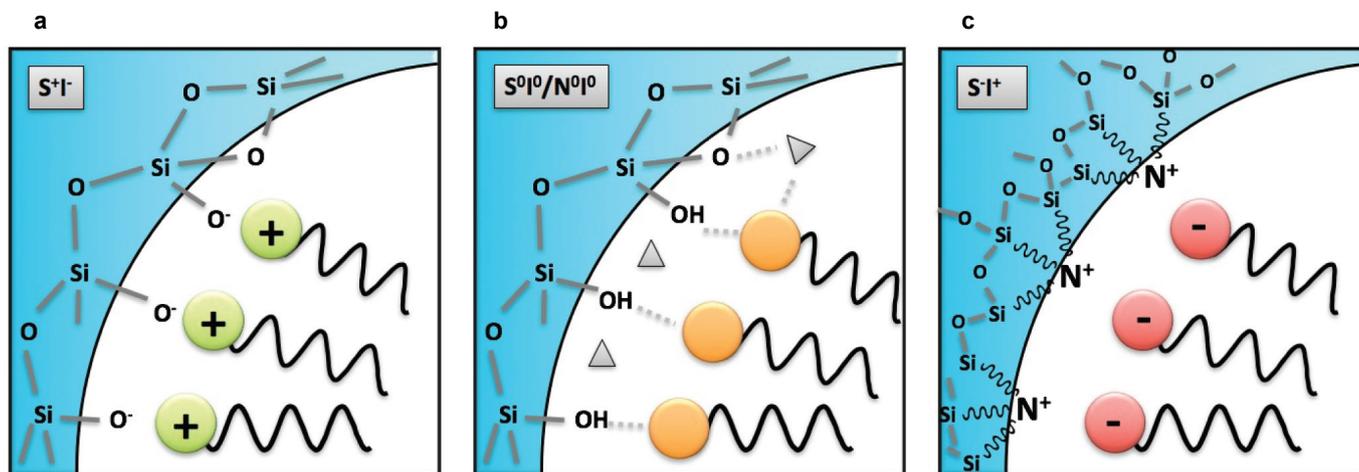


Figure 1 - Représentation schématique des interfaces entre les espèces siliciques et les têtes chargées ou neutres des tensioactifs utilisés, en lien avec les conditions de synthèse, et conséquences sur les types d'interactions électrostatiques (S^+T^- ou S^1T^+) ou par liaisons H (S^0I^0/N^0I^0). S représente le surfactant et I la charpente du matériau. D'après [5] et [6].

parfois de nombreuses impuretés ou hétérogénéités. À l'opposé, les caractéristiques des matériaux synthétiques sont plus facilement contrôlées en termes de propriétés surfaciques, interfaciales... et la modification de leur chimie en fait des supports de choix pour l'adsorption et les procédés de dépollution.

L'association gagnant-gagnant entre porosité et dépollution

De manière générale, un matériau dédié à la dépollution doit être très fortement adsorbant en termes de quantité et d'affinité. Les prérequis pour de tels supports sont donc nombreux. Il s'agit en particulier de disposer de solides présentant des capacités de sorption élevées, en lien avec des surfaces accessibles importantes. Ce critère permet ainsi d'accéder à des matériaux présentant des sites actifs disponibles pour leurs propriétés de sorption.

En particulier, les matériaux poreux présentent des caractéristiques texturales (surface spécifique, volume poreux, taille et distribution en taille de pores...) très intéressantes pour leur utilisation en tant qu'adsorbant. Leurs surfaces spécifiques couvrent une très large gamme, allant de 200 à plus de 1 200 m²/g. Ces valeurs sont en lien avec l'étendue de la porosité. On parlera de matériaux micro-, méso- ou macroporeux pour les gammes de pores inférieures à 2 nm, entre 2 et 50 nm, et supérieures à 50 nm respectivement, et le volume poreux s'étend entre 0,2 et 1,2 cm³/g. On pourra retenir l'un ou l'autre de ces domaines de pores suivant la nature des polluants, l'accessibilité, les cinétiques attendues de sorption, voire aussi développer des matériaux à porosité hiérarchisée, combinant plusieurs classes de pores (micro/méso, méso/macro, voire les trois). Ces multiples porosités permettent de favoriser plusieurs paramètres nécessaires à un procédé de sorption efficace, combinant un chemin d'accès favorable pour une diffusion rapide, tout en maintenant des temps de séjour suffisants pour assurer une bonne réactivité du système [3]. Il est aussi possible de greffer à la surface des supports poreux (les silices en particulier) des groupes organiques spécifiques qui contribuent à améliorer l'adsorption. On aboutit ainsi à des matériaux fonctionnalisés qui, grâce au choix des fonctions ainsi greffées, peuvent assurer des mécanismes de sorption sélective des espèces visées [2, 4]. Ces greffages présentent un très grand intérêt pour des systèmes complexes, dans lesquels de

multiples espèces sont présentes, et éventuellement en compétition. Dans ces milieux multicomposants, faire appel à des fonctions complexantes par exemple permet de cibler une espèce précise, de la capter à de très faibles concentrations, voire à l'état de traces, avec des forces d'interaction élevées, voire avec des liaisons irréversibles.

Parmi les différentes classes de matériaux poreux susceptibles d'être utilisés pour des applications dans les domaines de la dépollution, nous avons choisi de décrire plus en détail l'exemple de silices hybrides nanostructurées d'un type particulier, à savoir des ionosilices, et leurs applications dans le domaine de l'échange d'anions.

La formation de silices mésoporeuses nanostructurées par voie template

Les synthèses par voie template sont définies comme des réactions « bottom-up » pour l'élaboration de solides divisés nanostructurés par des réactions d'hydrolyse-condensation à partir de précurseurs moléculaires. Ces approches font appel à des stratégies de synthèse basées sur la chimie supramoléculaire. Elles s'appuient sur l'utilisation de surfactants qui forment des phases lyotropes en milieu aqueux. Ces phases peuvent développer différentes architectures : des phases lamellaires, 2d hexagonales ou cubiques en sont les plus courantes. Ces arrangements supramoléculaires servent de « moule » pour engendrer des architectures et textures spécifiques pour les solides obtenus. Ces voies, dites voies « templates », ont été largement développées pour accéder à des oxydes métalliques présentant des propriétés surfaciques particulières. Parmi les oxydes à architecture régulière, les silices sont sans doute l'exemple le plus étudié. En effet, les silices occupent une position singulière du fait de leur grande diversité avec des surfaces spécifiques élevées, des arrangements structurés au niveau mésoscopique et des textures particulières. L'origine de cette grande variété est liée à la capacité des précurseurs de silice d'interagir différemment selon les templates structurants, notamment des surfactants cationiques et neutres, comme montré sur la figure 1a-b. Ces différentes interactions conduisent ainsi à la formation d'agrégats supramoléculaires pour générer diverses phases organisées suivant la nature des tensioactifs, notamment des surfactants cationiques ou non ioniques. Ainsi, des phases nanostructurées formées de type M41S et les SBA⁽¹⁾ sont les plus courantes.

Les ionosilices, des absorbants innovants

Les ionosilices sont définies comme des matériaux siliciques contenant des entités ioniques, qui sont contenues dans la matrice de silice et liées par des liaisons covalentes. On peut distinguer des ionosilices fonctionnalisées, où des entités ioniques sont ancrées par greffage sur un support silicique, et des ionosilices hybrides, obtenues exclusivement à partir de précurseurs di- ou oligotrialkoxysilylés *via* des réactions d'hydrolyse et de polycondensation. Les ionosilices hybrides sont par conséquent une sous-famille de matériaux PMO (« periodic mesoporous organosilicas »). Elles attirent particulièrement l'attention du fait du nombre élevé de sites ioniques intégrés dans la matrice, ce qui modifie de façon significative les propriétés de ces solides. La suite de cet article traite en particulier des aspects liés à leur synthèse, à leurs propriétés surfaciques, et de l'utilisation comme adsorbants de ces matériaux originaux et innovants.

Dans le but de synthétiser des matériaux présentant des propriétés chimiques, surfaciques et interfaciales originales et inhabituelles, nous avons étudié des réactions d'hydrolyse/polycondensation de précurseurs ioniques, souvent inspirés de liquides ioniques. Il convient ici de mentionner que les liquides ioniques constitués de cations organiques (imidazolium, ammonium, phosphonium...) et d'anions de natures diverses ont été reconnus comme étant une classe de solvants et de liquides d'une versatilité et d'une polyvalence hors pair. La transposition des propriétés des liquides ioniques sur des solides, et notamment l'accès à des systèmes liquides ioniques poreux inspire divers domaines de la chimie des matériaux et des polymères. Ici, les ionosilices permettent de transposer la grande versatilité des liquides ioniques à la famille des silices hybrides. Ainsi, l'incorporation de sous-structures ioniques similaires au sein d'une matrice solide est apparue une voie originale pour accéder à une nouvelle classe de matériaux fonctionnels présentant alors une polyvalence similaire à celle des liquides ioniques, avec des potentialités en séparation, mais également en catalyse, stockage d'énergie, etc. Par conséquent, les ionosilices peuvent être considérées comme des « designer materials », dans le même sens que les liquides ioniques ont été reconnus comme des « designer solvents ». Similaire à la synthèse d'organo-silices conventionnelles, la synthèse d'ionosilices fait donc intervenir des réactions d'hydrolyse-polycondensation. La particularité réside dans le fait que les ionosilices sont obtenues à partir de précurseurs ioniques [7-9]. La nature ionique modifie fortement le comportement des précurseurs silylés dans des réactions d'hydrolyse et de polycondensation. C'est uniquement en présence de surfactants anioniques que nous sommes parvenus à la formation de matériaux nanostructurés. Ce résultat reflète typiquement l'importance d'une part de la formation de paires d'ions précurseur-surfactant dans le milieu réactionnel, et d'autre part de la formation d'agrégats supramoléculaires à partir de ces espèces (*figure 1c*). L'utilisation de surfactants anioniques présente d'autres avantages qui sont liés à leur faible coût et leur toxicité moindre par rapport aux surfactants cationiques.

La formation de paires surfactant-précurseur met également en avant une autre différence fondamentale de la synthèse d'ionosilices par rapport aux silices classiques. Il s'agit de la génération de phases structurées qui est gouvernée non par les fonctions silanol/silanolate, mais par les sous-structures organo-ioniques des précurseurs silylés. Le mécanisme de

formation du solide suit alors un chemin différent. Cet aspect est particulièrement intéressant du point de vue chimique, car il ouvre un terrain de jeu important pour contrôler les interactions entre précurseur et surfactant, permettant ainsi de jouer sur la texture des matériaux formés. On peut notamment imaginer différents couples anion/cation, l'utilisation de précurseurs contenant divers cations (imidazolium /ammonium/ phosphonium...) et de différents surfactants (sulfate/sulfonate, carboxylate, phosphonate...). On a alors la possibilité d'accroître ou d'affaiblir les interactions ioniques, de jouer sur la formation d'agrégats supramoléculaires, et *in fine* de contrôler l'architecture des matériaux formés. Quelques exemples donnés ci-après permettent de montrer la variété des propriétés des matériaux ainsi obtenus (structurales, texturales, surfaciques, physico-chimiques), et jusqu'à quel point il est possible de moduler ces caractéristiques par un choix approprié des conditions de synthèse.

La synthèse d'ionosilices en présence de surfactants anioniques conduit dans un premier temps à la formation de nanocomposites organisés. L'élimination du surfactant anionique est le plus souvent réalisée en milieu acide (acide chlorhydrique) ou par des solutions salines. Cette élimination est en fait basée sur un échange anionique : le surfactant anionique est remplacé par un autre contre-ion moins volumineux, le plus souvent un anion chlorure. Ceci montre une autre particularité des ionosilices : leurs modifications et leurs applications sont le plus souvent basées sur des échanges anioniques, impliquant des solutions salines.

En dehors du fait qu'il est donc possible de contrôler la texture d'ionosilices par un choix judicieux du template, nous avons également démontré que des ionosilices avec des morphologies variées peuvent aisément être obtenues. Le plus souvent, les ionosilices sont obtenues sous forme de poudre. La morphologie des particules de ces poudres peut varier entre des agrégats de particules jusqu'aux fibres micrométriques, dépendant des conditions de synthèse et particulièrement du pH du milieu réactionnel d'hydrolyse/polycondensation. Néanmoins, les ionosilices peuvent être obtenues sous d'autres formes telles que des monolithes, des aérogels ou des nanoparticules (*figure 2*). Ces mises en forme variées sont intéressantes à des fins d'utilisation de ces solides fonctionnels et peuvent élargir la fenêtre d'applications de façon importante. À titre d'exemple, nous avons récemment démontré que des nanoparticules ionosiliciques peuvent être utilisées pour véhiculer des principes actifs [10].

La diversité des compositions accessibles pour ces matériaux, de par la modularité de la sous-structure cationique (ammonium, imidazolium, guanidinium, zwitterion...), permet d'accéder à des matériaux dont les caractéristiques physico-chimiques, et ainsi les performances en sorption, peuvent être ajustées grâce à cette sous-structure. Nous avons en particulier montré en utilisant des molécules sondes des surfaces que ces ionosilices sont très hydrophiles, en comparaison avec les silices pures de types SBA par exemple, et surtout vis-à-vis des silices greffées qui sont souvent considérées comme plutôt hydrophobes [11]. La *figure 3* montre par ailleurs que ce caractère plus ou moins hydrophile est modifié non seulement en fonction de la sous-structure cationique, mais est aussi dépendant de l'anion échangé sur cette brique ionique, en analogie avec les propriétés des liquides ioniques.

Les matériaux ainsi préparés se sont révélés d'excellents adsorbants échangeurs d'anions, envisagés ci-après dans des applications liées à la dépollution.



Figure 2 - Différentes morphologies d'ionosilices. De gauche à droite : poudre, monolithes, obtenus par extraction en milieu scCO_2 , nanoparticules.

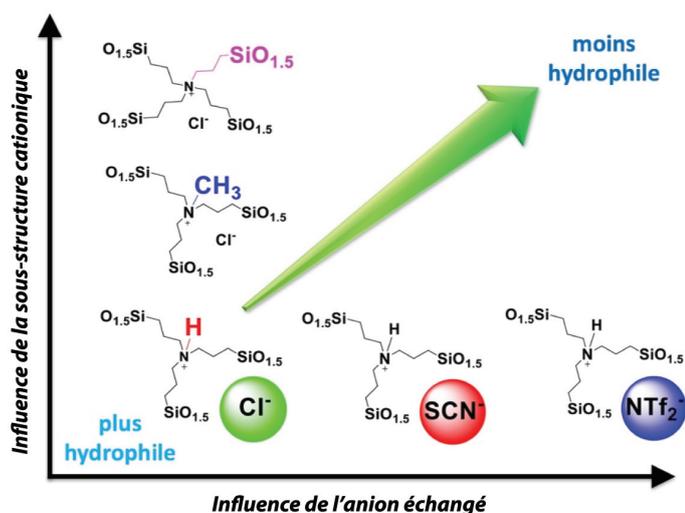


Figure 3 - Évolution du caractère hydrophile des silices hybrides ioniques ou ionosilices en fonction de la sous-structure cationique et de l'anion échangeur contenu dans le matériau initial. L'hydrophilie est évaluée par calorimétrie à flux de l'adsorption compétitive de butanol dans l'heptane (ou dans l'eau pour l'évaluation de la contribution hydrophobe) [11].

Adsorption et dépollution : deux champs d'applications

Dans le domaine de la chimie analytique ou de la dépollution, des méthodes basées sur les échanges ioniques sont largement utilisées pour la séparation. L'échange ionique est particulièrement intéressant car la réversibilité permet une régénération aisée du matériau échangeur. Des échangeurs ioniques à base de résines organiques sont par exemple largement utilisés en tant qu'adoucisseurs d'eau ou pour la rétention de micropolluants, de radionucléides... Les ionosilices décrites précédemment possèdent aussi ces capacités d'échange d'anions. En particulier, nous avons vu que la chimie supramoléculaire permet d'accéder à des matériaux siliciques fonctionnels et de moduler leur morphologie, leur texture et leurs propriétés interfaciales. Tous ces paramètres permettent une mise en forme aisée en accédant ainsi à des matériaux « sur mesure », qui sont d'excellents candidats pour ces applications spécifiques de dépollution. Le principe repose sur des réactions d'échange entre l'ion initialement contenu dans l'ionosilice et l'ion cible qui doit être retenu, tel que représenté sur la figure 4.

Les capacités de sorption/échange ont été évaluées pour différents types de polluants anioniques. Les ionosilices sont

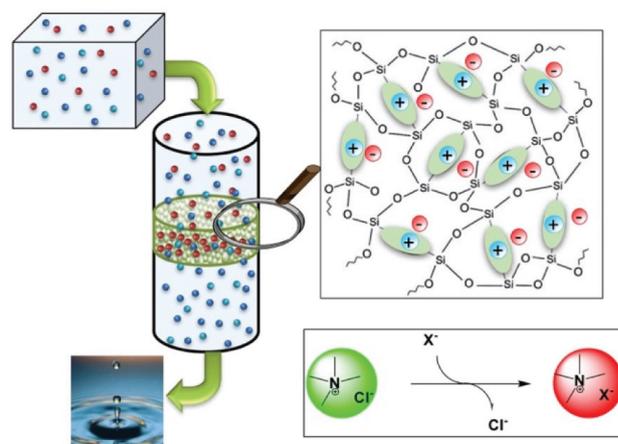


Figure 4 - Représentation de la réaction d'échange en vue de l'utilisation des silices hybrides pour la rétention de polluants anioniques dans un réacteur en colonne.

particulièrement efficaces pour piéger les ions chromates [12], comme le montre l'isotherme sur la figure 5a. Les quantités adsorbées sont jusqu'à 2,5 fois supérieures à celles mesurées sur des résines commerciales de référence. Ces performances montrent que jusqu'à 85 % des sous-structures cationiques incorporées dans le matériau initial sont disponibles pour la sorption. Ces sites échangeurs sont primitivement présents en grande quantité au cœur du matériau de départ puisqu'il n'est composé que de ces briques ioniques. De plus, ces sites sont particulièrement accessibles du fait de la très forte hydrophilie du solide. Grâce aux approches supramoléculaires, des agents structurants similaires à ceux décrits classiquement pour les silices (CTAB pour les cationiques, P123 pour les neutres, SHS pour les anioniques) ou des agents gonflants tels que le mésitylène sont utilisés, permettant de moduler les porosités et les surfaces accessibles. Ces modifications de la physico-chimie et de la texture de ces adsorbants a alors permis d'adapter les performances de sorption. Nous avons montré que non seulement les capacités de sorption sont modifiées, mais aussi les cinétiques ou les forces des interactions, comme mesurées par calorimétrie en évaluant les intensités des enthalpies de déplacement [12]. L'ensemble de ces contributions a été mis en évidence sur des séries d'adsorbants obtenues en ajustant les caractéristiques des assemblages supramoléculaires au cours de l'élaboration des matériaux.

Ces supports d'adsorption ont aussi été utilisés avec succès pour la sorption/échange d'autres types de polluants

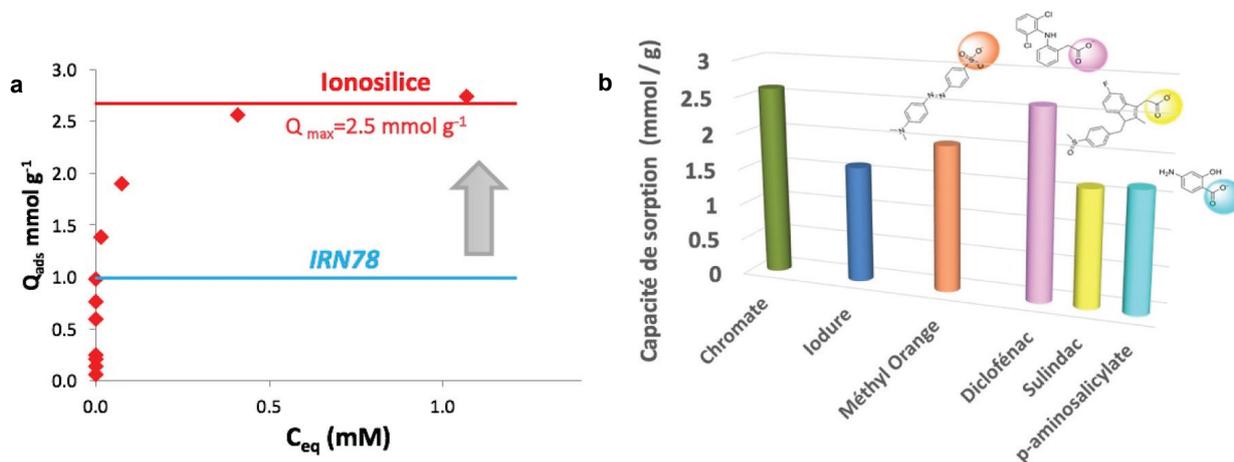


Figure 5 - a) Isothermes de sorption de l'anion chromate sur une ionosilice en comparaison avec la capacité maximale mesurée sur une résine échangeuse organique de type amberlite (IRN78). b) Capacités maximales de sorption de différents anions sur des ionosilices synthétisées à base du précurseur amine protonnée et du template anionique (hexadécyl sulfate), à l'exception des iodures, qui ont été adsorbés sur des silices élaborées avec le précurseur tétrasilylé et le template cationique CTAB (cétyltriméthylammonium bromure).

anioniques. À partir des isothermes de sorption, les capacités maximales de rétention correspondantes ont été évaluées et sont comparées sur la figure 5b pour différents types d'anions. Dans le cas des effluents contaminés par des radionucléides, la sorption des iodures est aussi très efficace [13]. En outre, les matériaux testés sont stables sous l'effet des irradiations, ce qui en fait des supports de choix pour le traitement de pollutions accidentelles (Tchernobyl, Fukushima Daiichi), ou pour les actions de retraitement lors du démantèlement des centrales nucléaires. Les industries textiles constituent d'autres sources de pollutions. Les ionosilices sont aussi performantes pour la sorption de colorants, comme le méthyl orange (figure 5b). Enfin, les principes actifs, disséminés dans les milieux naturels à l'état de traces par exemple, peuvent aussi être captés de manière efficace par ces solides adsorbants [10, 14-15].

Dépollution... et au-delà

Le développement de nouveaux matériaux inclut l'ensemble de leurs cycles de vie, depuis la synthèse, la mise en œuvre, la durabilité, et jusqu'à la fin de vie. Les nouvelles approches de synthèse sont conçues avec cette sensibilisation à l'utilisation de produits biosourcés, à l'économie d'atomes (économie de réactifs, de solvants, recours à des solvants verts). Dans le cas de matériaux adsorbants, l'évaluation de leur régénéralité est un élément clé. Cette cyclabilité des matériaux implique le suivi de leur intégrité chimique, texturale et morphologique au cours des différentes étapes de sorption/désorption. Par exemple, dans le cas des matériaux poreux fonctionnalisés, la stabilité du greffage sera un point déterminant. Pour les applications nucléaires et la sorption des radionucléides, l'un des critères de sélection à considérer sera aussi la stabilité des matériaux sous l'effet des rayonnements. Pour la décontamination, le choix des matériaux adsorbants doit aussi être confronté aux solutions d'inertage et/ou de stockage, imposant de nouvelles contraintes de stabilité et de durabilité (stabilité thermique par exemple pour le stockage profond), voire des contraintes plus globales à intégrer dans le procédé comme l'incorporation d'oxydes spécifiques pour la vitrification des résidus. Enfin, le dernier critère qui sera souvent déterminant sera le coût total du matériau, en lien avec le procédé envisagé. Suivant les priorités des utilisateurs, cet équilibre entre coût et performance sera évalué en lien avec

les impacts environnementaux, voire sociétaux, des méthodes utilisées.

En conclusion, les matériaux poreux, et en particulier les silices, peuvent être préparés par de multiples voies, parmi lesquelles les voies templates offrent la possibilité de moduler les interactions et auto-assemblages à l'échelle supramoléculaire au cours de la synthèse. Cette stratégie de synthèse donne ainsi accès à un très large panel de matériaux qui présentent une large diversité en termes de caractéristiques structurales, texturales et physico-chimiques. Cette variabilité ouvre alors un champ d'applications très vaste pour ces matériaux, en particulier pour l'adsorption de polluants de différentes natures. Dans ce contexte, les ionosilices sont des matériaux innovants qui offrent des propriétés d'usage très intéressantes, en termes de capacité de sorption, d'accessibilité, de variétés de polluants cibles. Outre ces perspectives dans le domaine de la dépollution, des extensions sont envisageables pour tous les champs où l'adsorption peut avoir un intérêt : la chimie fine, le biomédical ou le génie des procédés.

Les auteurs tiennent à associer à ce document U.D Thach, D. Sauvanier et R. Bouchal pour leur implication dans l'élaboration et l'étude de ces matériaux. Ces travaux ont été réalisés avec le soutien financier du Labex CheMISyst (ANR-10-LABX-05-01) et de la SATT AxLR (Maturation Initiale IonEx et Maturation Standard Partenariale AcOEx).

(1) Les M41S et SBA sont différents types de matériaux siliciques nanostructurés par voie template introduits par les chercheurs de l'entreprise Mobil (M41S) et l'Université de Santa Barbara (SBA).

[1] Morlay C., Laidin I., Chesneau M., Joly J.-P., Charbons actifs et traitement des eaux, *L'Act. Chim.*, **2006**, 295-296, p. 95.

[2] Walcarius A., Mercier L., Mesoporous organosilica adsorbents: nanoengineered materials for removal of organic and inorganic pollutants, *J. Mater. Chem.*, **2010**, 2, p. 4478.

[3] Galarneau A., Sachse A., Said B., Pelisson C.-H., Boscaro P., Brun N., Courthouex L., Olivi-Tran N., Coasne B., Fajula F., Hierarchical porous silica monoliths: a novel class of microreactors for process intensification in catalysis and adsorption, *C.R. Chimie*, **2016**, 19, p. 231.

[4] Hoffmann F., Cornelius M., Morell J., Fröba M., Silica-based mesoporous organic-inorganic hybrid materials, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, **2006**, 45, p. 3216.

[5] Soler-Illia G.J., Sanchez C., Lebeau B., Patarin J., Chemical strategies to design textured materials: from microporous and mesoporous oxides to nanonetworks and hierarchical structures, *Chem. Rev.*, **2002**, 102, p. 4093.

[6] Hoffmann F., Fröba M., Silica-based mesoporous organic-inorganic hybrid materials, *The Supramolecular Chemistry of Organic-Inorganic Hybrid Materials*, K. Rurack, R. Martinez-Manez (eds), John Wiley & Sons, **2010**, p. 37.

[7] El Hankari S., Motos-Perez B., Hesemann P., Bouhaouss A., Moreau J.J.E., Pore size control and organocatalytic properties of nanostructured silica hybrid materials containing amino and ammonium groups, *J. Mater. Chem.*, **2011**, *21*, p. 6948.

[8] Nguyen T.P., Hesemann P., Moreau J.J.E., i-Silica: nanostructured silica hybrid materials containing imidazolium groups by hydrolysis-polycondensation of disilylated bis-N,N'-alkyl-imidazolium halides, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **2011**, *142*, p. 292.

[9] Nguyen T.P., Hesemann P., Tran T.M.L., Moreau J.J.E., Nanostructured polysilsesquioxanes bearing amine and ammonium groups by micelle templating using anionic surfactants, *J. Mater. Chem.*, **2010**, *20*, p. 3910.

[10] Bouchal R., Daurat M., Gary-Bobo M., Da Silva A., Lesaffre L., Aggad D., Godefroy A., Dieudonne P., Charnay C., Durand J.-O., Hesemann P., Biocompatible periodic mesoporous ionosilica nanoparticles with ammonium walls: application to drug delivery, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2017**, *9*, p. 32018

[11] Thach U.D., Trems P., Prelot B., Zajac J., Hesemann P., Tuning the interfacial properties of mesoporous ionosilicas: effect of cationic precursor and counter anion, *J. Phys. Chem. C*, **2016**, *120*, p. 27412.

[12] Thach U.-D., Prelot B., Pellet-Rostaing S., Zajac J., Hesemann P., Surface properties and chemical constitution as crucial parameters for the sorption properties of ionosilicas: the case of chromate adsorption, *ACS Appl. Nano Mater.*, **2018**, *1*, p. 2076.

[13] Thach U.D., Hesemann P., Yang G., Geneste A., Le Caër S., Prelot B., Ionosilicas as efficient sorbents for anionic contaminants: radiolytic stability and ion capacity, *J. Colloid Interface Sci.*, **2016**, *482*, p. 233.

[14] Thach U.D., Prelot B., Hesemann P., Design of ionosilicas: tailoring ionosilicas for the efficient adsorption of p-aminosalicylate, *Sep. Purif. Technol.*, **2018**, *196*, p. 217.

[15] Bouchal R., Miletto I., Thach U.D., Prelot B., Berlier G., Hesemann P., Ionosilicas as efficient adsorbents for the separation of diclofenac and sulindac from aqueous media, *New J. Chem.*, **2016**, *40*, p. 7620.

Bénédicte PRELOT,
est chargée de recherche CNRS à l'Institut Charles Gerhardt de Montpellier, CNRS-Université Montpellier-ENSCM, Équipe AIME (Agrégats Interfaces et Matériaux pour l'Énergie).

Peter HESEMANN,
est directeur de recherche CNRS à l'Institut Charles Gerhardt de Montpellier, CNRS-Université Montpellier-ENSCM, Équipe CMOS (Chimie Moléculaire et Organisation du Solide).

* benedicte.prelot@umontpellier.fr ;
peter.hesemann@umontpellier.fr

**"Made in Europe for the World"
Oui, mais avec vos contributions !**

Analytical and Bioanalytical Chemistry
Springer
the language of science

WILEY-VCH
ChemPubSoc Europe

Les journaux de ChemPubSoc*
* ChemPubSoc regroupe 16 sociétés de chimie européennes, dont la SCF
- European Journal of Inorganic Chemistry
- European Journal of Organic Chemistry
- Batteries & Supercaps
- Chemistry - A European Journal
- ChemBioChem - ChemPlusChem
- ChemCatChem - ChemistrySelect
- ChemElectroChem - ChemSusChem
- ChemMedChem - ChemistryOPEN
- ChemPhotoChem - ChemViews
- ChemPhysChem

L'Actualité Chimique
SCF
Société Chimique de France

NOUVEAU

**Pour montrer la vitalité de la chimie française,
toutes ces revues attendent vos communications**

© www.magdesign.fr