

La catalyse hétérogène : un outil clé pour le développement durable

Pierre Gallezot

Résumé	Outre ses applications traditionnelles en chimie et en pétrochimie, la catalyse hétérogène joue un rôle majeur pour la préservation de l'environnement. Elle permet de réduire la demande en énergie par l'optimisation des procédés de conversion des ressources fossiles et renouvelables et de minimiser la formation de déchets non valorisables. Elle est devenue l'outil essentiel pour le traitement des polluants dans l'air et dans l'eau. L'étude de la destruction des polluants par les poussières minérales dans la haute atmosphère révèle le rôle majeur qu'elle joue pour la préservation de l'environnement à l'échelle du globe.
Mots-clés	Catalyse hétérogène, environnement, énergie.
Abstract	Heterogeneous catalysis: a unique tool for a sustainable development In addition to the traditional applications in chemistry and petrochemistry, heterogeneous catalysis plays a major role in environmental preservation. It contributes to reduce the energy demand by optimising the conversion processes of fossil and renewable resources and by minimising the formation of non-recyclable wastes. It is now the essential tool for the treatment of pollutants in air and water. The study of pollutant destruction by mineral dust in high atmosphere demonstrates the major role that it plays for global environmental preservation.
Keywords	Heterogeneous catalysis, environmental protection, energy demand.

La catalyse hétérogène est en plein essor à travers ses multiples applications associées au développement durable. Initialement appliquée à la pétrochimie et à la synthèse des grands intermédiaires chimiques, elle est devenue l'outil essentiel d'une chimie durable pour la production avec un minimum de déchets de molécules qui entrent dans tous nos produits de consommation. La catalyse hétérogène intervient dans tous les procédés de conversion des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) vers de nouveaux vecteurs d'énergie comme l'hydrogène ou le méthanol utilisables dans des piles à combustible pour la production d'électricité. Elle trouve un nouveau champ d'applications pour la production de biocarburants et de bioproduits à partir de ressources renouvelables. Elle est l'outil indispensable pour le traitement des gaz et particules toxiques émis dans l'atmosphère par les activités anthropogéniques. Elle participe de plus en plus à la dépollution et au recyclage des eaux industrielles, contribuant ainsi à la protection des milieux naturels. Enfin, elle s'invite dans des domaines inattendus, allant des appareils à usage domestique aux processus chimiques dans la haute atmosphère.

Mécanismes et méthodologies de la catalyse hétérogène

Approfondissement des mécanismes

Les étapes élémentaires des réactions catalysées par les solides restent mal connues en raison de la difficulté à identifier la structure des complexes transitoires formés entre les atomes de surface des solides et les molécules de

réactifs. Une connaissance plus approfondie des étapes élémentaires et des intermédiaires réactionnels est obtenue par des études spectroscopiques sur le catalyseur en cours de réaction, par l'étude de la cinétique des réactions et par la modélisation des espèces adsorbées sur les atomes de surface en utilisant les outils de la chimie théorique.

La spectroscopie infrarouge rapide permet de suivre les étapes élémentaires des réactions à la surface des catalyseurs avec une résolution temporelle de 33 ns. En déclenchant la réaction par un laser femtoseconde, Thibault-Starzyk *et coll.* ont détecté des intermédiaires extrêmement fugaces dans la réaction de réduction sélective de NO par CO sur un catalyseur d'argent sur alumine [1] (figure 1). D'un point de vue pratique, cette réaction permet l'élimination simultanée de ces deux polluants des gaz d'échappement des moteurs thermiques.

Quelques définitions

Le catalyseur participe aux étapes élémentaires d'une réaction chimique (cycle catalytique). Il est régénéré à la fin du cycle et peut ainsi contribuer à un grand nombre de cycles. Il abaisse l'énergie d'activation de certaines étapes et ce faisant permet d'augmenter la vitesse de la réaction et d'orienter la sélectivité vers les produits désirés. Il ne modifie pas l'énergie libre totale de la réaction et n'a donc aucun effet sur la constante d'équilibre.

La catalyse et les catalyseurs sont dits hétérogènes lorsque les étapes élémentaires impliquent les atomes de surface d'un solide alors que les réactifs sont en phase gaz ou liquide. Les vitesses de réaction exprimées en nombre de molécules converties par unité de temps et par unité de surface (mole/h.m^2) ou de poids (mole/h.kg) du catalyseur permettent de comparer l'activité des catalyseurs pour une réaction donnée.

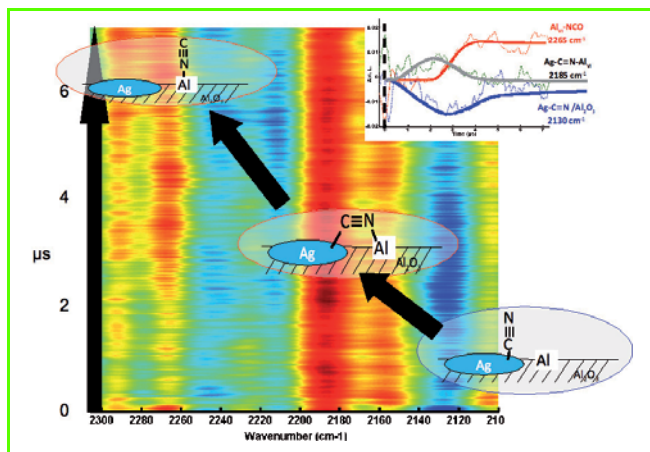


Figure 1 - Spectres infrarouge à haute résolution temporelle (33 ns) obtenus dans la réaction $\text{NO} + \text{CO}$ sur un catalyseur $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$ induite par laser femtoseconde. (Contact : Frédéric Thibault-Starzyk, LCS-ENSICAEN).

L'interprétation des spectres montre que des espèces intermédiaires de type cyanure forment un pont entre la particule d'argent et le support d'alumine. Ce pont ne dure que 2 μs puis bascule pour former un isocyanure sur alumine qui sera ensuite rapidement oxydé en isocyanate.

L'approche par la microcinétique expérimentale des réactions catalytiques permet de déterminer les paramètres cinétiques des étapes élémentaires contrôlant l'activité du catalyseur, et en particulier le rôle crucial des étapes d'adsorption. Cette approche nécessite le développement d'outils de caractérisation nouveaux, par exemple la spectrométrie IRTF à l'équilibre d'adsorption qui permet de déterminer les chaleurs d'adsorption des espèces CO dans la réaction d'oxydation de CO sur catalyseur au platine. (Contact : Daniel Bianchi, IRCELYON*).

Les études spectroscopiques sur des surfaces modèles jouent un rôle important dans la compréhension des mécanismes catalytiques, rôle reconnu par l'attribution du prix Nobel 2007 de chimie à Gerhard Ertl. Les développements technologiques récents permettent d'effectuer des études sous des pressions et températures compatibles avec une modélisation réaliste de l'acte catalytique. À titre d'exemple, la microscopie à effet tunnel fonctionnant sous pression de CO montre que l'adsorption de CO sur la surface (110) d'un cristal d'or entraîne une mobilité des atomes conduisant à une reconstruction de la structure de surface (figure 2). Cette reconstruction a été modélisée par une approche théorique où la pression de CO est directement prise en compte dans les calculs [2].

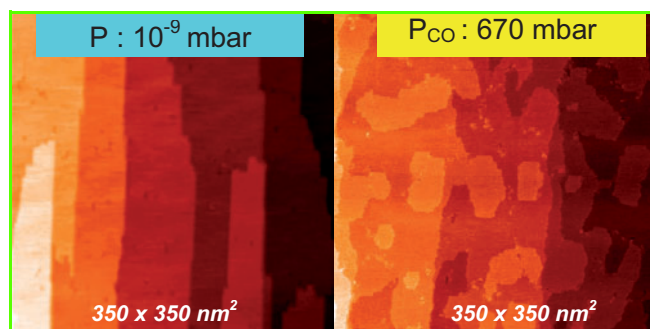


Figure 2 - Images par microscopie à effet tunnel de la surface (110) d'un monocristal d'or (surface Au (110)-(1x2)). (Contact : Francisco Cadete Santos Aires, IRCELYON*).

Champ gauche : surface sous ultra-vide ; champ droit : surface sous pression partielle de monoxyde de carbone.

De nouvelles approches en chimie théorique permettent une modélisation des interactions entre molécules de réactif et atomes de surface, conduisant ainsi à une approche prédictive de la catalyse. À titre d'exemple, l'équipe de chimie théorique de l'ENS Lyon a effectué le calcul des barrières d'énergie des étapes élémentaires de l'hydrogénation de l'acroléine sur une surface de platine dont les résultats permettent de prévoir la sélectivité vers les trois produits possibles d'hydrogénation [3] (figure 3).

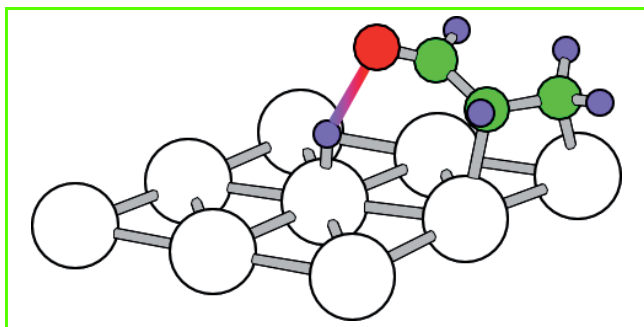


Figure 3 - Représentation d'une molécule d'acroléine adsorbée sur une surface de platine dans l'état de transition pour l'étape élémentaire d'hydrogénation sur l'atome d'oxygène. (Contact : Philippe Sautet, ENS Lyon).

Matériaux et réacteurs catalytiques

L'essor de la catalyse hétérogène doit beaucoup à la synthèse de matériaux catalytiques structurés destinés à assurer un contrôle de la diffusion des réactifs et des produits. Une multitude d'oxydes mixtes microporeux (1 nm) ou mésoporeux (2-5 nm) à pores ordonnés ont été synthétisés pour différentes applications, notamment en raffinage et pétrochimie. Une nouvelle approche consiste à créer une macroporosité permettant de diminuer le parcours des molécules à l'intérieur des solides. Ainsi, grâce à un procédé de dissolution contrôlée, des cristaux denses de zéolites (silicalite, ZSM-5) sont transformés en « nano-boîtes » dont les parois minces assurent une diffusion accrue conduisant à de meilleures activités dans les réactions d'oxydation. (Contact : Alain Tuel, IRCELYON*).

Des voies de synthèse en rupture avec celles utilisées pour les oxydes microporeux ont abouti à une nouvelle famille de solides à charpente hybride organique-inorganique (« metal organic framework » ou MOF). Ces synthèses connaissent un fort développement vers une grande variété de solides de composition, taille de pores et site catalytiques contrôlés, qui trouvent des applications en séparation et catalyse. Ainsi, Gérard Férey *et coll.* ont synthétisé le solide MIL-100(Fe) qui possède une activité catalytique supérieure à celle des zéolithes HY dans les réactions de benzylolation Friedel-Crafts [4] (figure 4).

Les réactions catalytiques sont traditionnellement mises en œuvre dans des réacteurs où le catalyseur est disposé en lit fixe ou en suspension dans un fluide. Une plus grande efficacité permettant l'intensification des procédés consiste à enduire le matériau catalytique sur les parois de réacteurs structurés compacts (monolithes, membranes, microréacteurs multicanaux). Ces unités miniaturisées permettent des productivités élevées et sécurisées. À titre d'exemple, la figure 5 montre un composite constitué d'une mousse macroporeuse de β -SiC enduite d'une zéolithe. Le composite

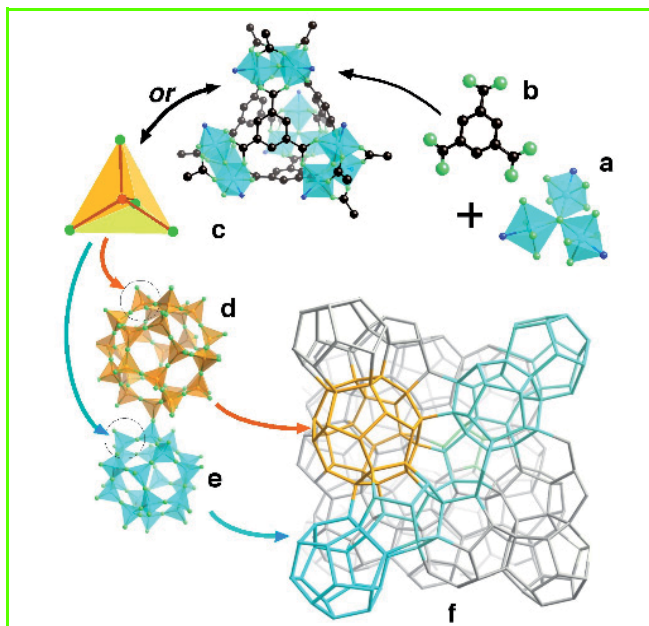


Figure 4 - Structure d'un MOF de type MIL-100. (Contact : Gérard Férey, Institut Lavoisier, Versailles).

La combinaison de trimères d'octaèdres métalliques (a) et d'ions trimésates (b) conduit à la formation de supertetraèdres (c) dont la connexion aboutit à un édifice poreux tridimensionnel avec des cages limitées par 28 (diamètre intérieur utile 25 Å) et 20 (diamètre 20 Å) supertetraèdres. La figure f représente le squelette des centres de supertetraèdres.

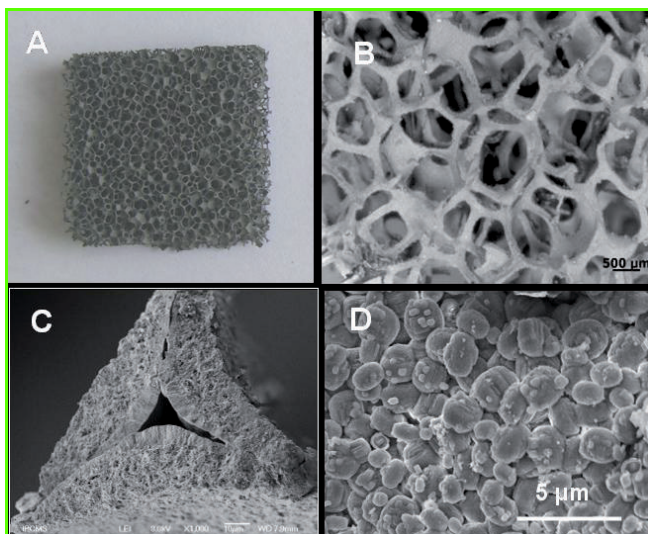


Figure 5 - Structure d'un monolithe de carbure de silicium enduit d'un catalyseur acide de type zéolithe. (Contact : Cuong Pham-Huu, Marc Jacques Ledoux, LMSPC, Strasbourg).

Les vues à différents grossissements montrent la morphologie externe et interne du monolithe.

permet un haut flux de réactifs et une rapide désorption des produits, conduisant à une activité plus élevée et plus stable [5].

La catalyse hétérogène pour la production de nouveaux vecteurs d'énergie

Carburants propres et carburants synthétiques

La production de carburants propres passe par une désulfuration des coupes pétrolières qui est effectuée par

hydrotraitement en présence de catalyseurs à base de sulfures métalliques dont les performances sont continuellement améliorées. Cependant, pour répondre à des normes européennes inférieures à 10 ppm de soufre, l'utilisation de procédés complémentaires s'avère nécessaire. L'une des voies est l'alkylation des composés thiophéniques par les oléfines conduisant à des composés plus lourds qui peuvent être séparés par distillation (figure 6).

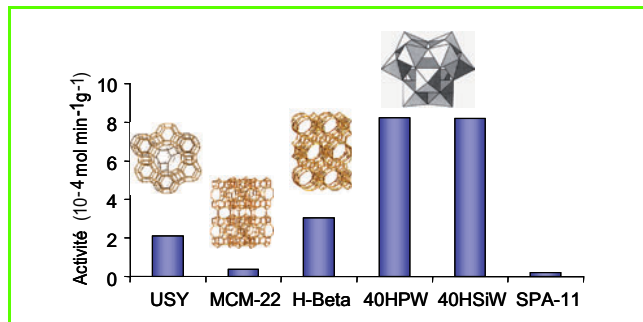


Figure 6 - Alkylation des composés thiophéniques des essences. (Contact : Christophe Geantet, IRCELYON*).

Activités initiales à 358 K en réacteur autoclave. Parmi divers solides acides, les hétéropolyacides de type $H_3PW_{12}O_{40}$ ou $H_4SiW_{12}O_{40}$ supportés sur silice sont les plus performants pour ces réactions.

La production de carburants synthétiques à partir de gaz naturel, charbon ou biomasse est appelée à se développer pour remplacer les carburants dérivés du pétrole. La catalyse hétérogène intervient dans le reformage à la vapeur d'eau des ressources fossiles ou renouvelables pour la production de gaz de synthèse ($CO + H_2$) qui est ensuite utilisé dans le procédé catalytique Fischer-Tropsch pour la synthèse d'hydrocarbures. Ce dernier procédé fait l'objet de recherches par les laboratoires académiques, l'IFPEN et les compagnies pétrolières, afin de développer des catalyseurs robustes dont la sélectivité peut être orientée vers des mélanges d'hydrocarbures compatibles avec les différents types de moteurs thermiques.

Production, stockage et utilisation de l'hydrogène

Un effort à l'échelle mondiale est réalisé pour produire de l'hydrogène à partir des hydrocarbures, du gaz naturel ou de la biomasse afin d'alimenter les piles à combustible. La catalyse hétérogène intervient dans les trois étapes nécessaires à la production d'hydrogène pur : (1) reformage en gaz de synthèse, (2) réaction du « gaz-à-l'eau » pour convertir le CO en CO_2 avec production d'hydrogène, (3) élimination des traces de CO dans l'hydrogène par oxydation sélective. L'intensification de ces procédés est réalisée par enduction de catalyseurs sur les parois des canaux de réacteurs microstructurés (figure 7). Ce type de réacteur utilisé pour le reformage du méthane améliore d'un facteur trois la production d'hydrogène par rapport à un réacteur en lit fixe en raison d'un meilleur contrôle thermique de la réaction.

Le stockage de l'hydrogène est l'un des verrous pour l'utilisation pratique de ce vecteur d'énergie. Pour des piles à combustible de petite puissance, une solution consiste à stocker l'hydrogène sous forme de borohydride ($NaBH_4$). L'hydrogène est libéré par hydrolyse de $NaBH_4$ en présence d'un catalyseur au cobalt qui permet de libérer l'hydrogène avec un rendement de 9,7 % en poids proche du rendement théorique maximal de 10,8 %. (Contact : Aline Auroux, IRCELYON*).

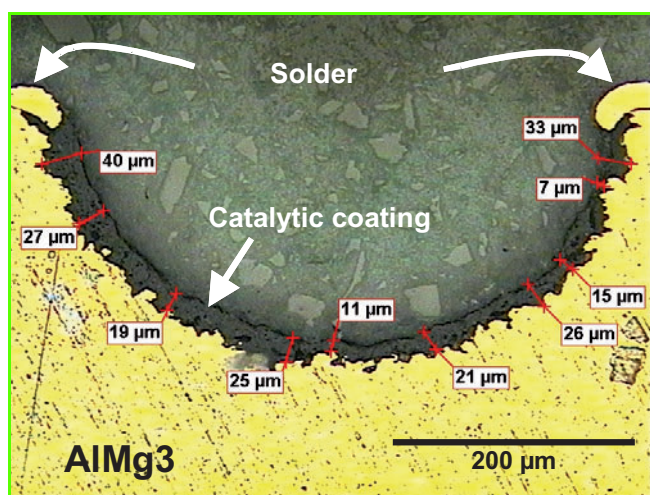


Figure 7 - Coupe transversale d'un microréacteur métallique de type échangeur de chaleur montrant un canal dont les parois sont fonctionnalisées par enduction d'un catalyseur Cu-Zn-Al. (Contact : Claude Mirodatos, IRCELYON*).

Les catalyseurs hétérogènes interviennent également dans le cœur des piles à combustible à électrolyte polymère pour assurer l'oxydation de l'hydrogène ou du méthanol à l'anode et la réduction de l'oxygène à la cathode de la pile ; l'un des défis est de diminuer la quantité de platine sur les électrodes, par exemple grâce à des formulations bimétalliques.

Des recherches sont également conduites sur des piles à combustible à électrolyte oxyde (SOFC) intégrant un reformage interne du gaz naturel sur des catalyseurs de type $\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{CrO}_3$. Le combustible serait du biogaz issu de la fermentation anaérobie des déchets qui est constitué de méthane contenant des impuretés avec du soufre et de l'azote qui doivent être éliminées par des réactions catalytiques avant d'envisager un couplage direct biogaz/pile SOFC. (Contact : Patrick Gelin, IRCELYON*).

Biocarburants

La technologie Esterip-HTM, basée sur des catalyseurs hétérogènes et mise au point par l'IFPEN, représente une innovation majeure pour la production des esters méthyliques d'acide gras (biodiesel) par transestérification des huiles végétales. L'utilisation de catalyseurs solides évite les rejets inhérents aux technologies qui emploient des catalyseurs liquides à base de soude ou de potasse et permet d'obtenir une glycérine pure.

Les biocarburants dits de première génération, qui utilisent des ressources agricoles au dépend des besoins pour l'alimentation, font place à des biocarburants de deuxième génération utilisant la biomasse lignocellulosique. La catalyse hétérogène intervient dans toutes les conversions thermochimiques de la biomasse pour produire des carburants synthétiques : gazéification, pyrolyse, hydrotraitement, synthèse Fischer-Tropsch. Toutes les voies de la filière thermochimique font actuellement l'objet de recherches au laboratoire et à l'échelle pilote afin d'optimiser les catalyseurs. L'industrialisation des procédés est envisagée soit dans des bioraffineries dédiées, soit plus probablement dans les raffineries existantes. Ainsi le « co-processing » des charges pétrolières avec l'huile de pyrolyse permet de produire de l'essence par craquage catalytique (FCC) sur des catalyseurs acides. Il a été montré que des ajouts de 20 % en

bio-huiles restent compatibles avec une production d'essence standard. (Contact : Yves Schuurman, IRCELYON*).

La catalyse hétérogène pour une chimie durable

L'industrie chimique est engagée dans une logique de développement durable qui consiste à préserver les ressources disponibles avec une utilisation raisonnée des matières premières, des atomes et de l'énergie nécessaires aux transformations chimiques. La catalyse hétérogène est l'outil indispensable pour minimiser la formation de sous-produits non valorisables dans toute la gamme de produits allant des grands intermédiaires à la chimie de spécialité ; les enjeux sont particulièrement grands pour la synthèse d'intermédiaires de fort tonnage ou pour les synthèses multi-étapes susceptibles de générer des quantités importantes de déchets. Il n'est pas possible ici de donner un aperçu des multiples applications de la catalyse hétérogène pour la chimie verte. À titre d'exemple, la conception d'un catalyseur à base d'un polyoxométallate comportant des promoteurs d'activité comme le vanadium et de sélectivité comme le tellure en position contrôlée dans la structure de type Keggin a permis d'obtenir une sélectivité record en acides méthacrylique et méthacroléine en une seule étape à partir de l'isobutane, minimisant ainsi la formation de nombreux sous-produits non valorisables. (Contact : Jean-Marc Millet, IRCELYON*).

Alors que les voies de synthèse de produits chimiques à partir des hydrocarbures ont été optimisées pendant plus d'un siècle, les procédés catalytiques dans la filière biomasse-produits chimiques sont comparativement à l'état embryonnaire. La grande variété des molécules issues de la biomasse et la multitude des chemins réactionnels vers les produits posent un défi pour la recherche et l'industrialisation. Des catalyseurs doivent être mis au point pour convertir sélectivement des molécules hautement fonctionnalisées, souvent insolubles et thermiquement instables, en présence d'impuretés présentes dans la matière première ou générées au cours des procédés de fermentation. La catalyse hétérogène est utilisée pour des procédés à fort tonnage comme l'hydrogénation du glucose en sorbitol dont le procédé a été amélioré par l'utilisation de catalyseurs au ruthénium plus actifs, sélectifs et stables que les catalyseurs au nickel. (Contact : Pierre Gallezot, IRCELYON*).

L'hydrogénation catalytique des huiles végétales en graisses alimentaires est connue depuis longtemps mais les applications en oléochimie se développent actuellement pour la synthèse de tensioactifs, lubrifiants et plastifiants biocompatibles. Ainsi, les huiles végétales préalablement époxydées sont acétylées par l'anhydride acétique en présence de solides basiques de type hydrotalcite pour produire des plastifiants remplissant les spécifications rhéologiques des PVC souples, en remplacement des phtalates interdits en raison de leur toxicité dans certaines applications. (Contact : Catherine Pinel, IRCELYON*).

La catalyse hétérogène et la photocatalyse pour dépolluer l'air et l'eau

La catalyse hétérogène est l'outil indispensable pour le traitement des effluents toxiques tels que les composés organiques volatils (COV), les oxydes d'azote (NOx) et les

particules (sues...) émis par les activités anthropogéniques. La mise au point des pots catalytiques permettant l'élimination des polluants émis par les moteurs fonctionnant à l'essence (CO, NOx et hydrocarbures imbrûlés) constitue un axe de recherche historique. L'élimination des particules de suies et des NOx émis par les moteurs Diesel est un défi en passe d'être relevé grâce à la mise au point de filtres à particules assurant la réduction des NOx par injection d'hydrocarbures et l'oxydation des particules à basse température. Une solution originale (procédé NOxTRAP) fait appel à un système électrocatalytique sur les parois d'un filtre à particules pour piéger transitoirement les NOx qui sont ensuite réduits par injection d'hydrocarbures. (Contact : Philippe Vernoux, IRCELYON*).

La photocatalyse, qui combine l'action des oxydes semi-conducteurs et du rayonnement UV (solaire), connaît un développement important vers les applications pour le traitement de l'air et de l'eau [6]. Les photocatalyseurs à base de TiO_2 supporté sur matériaux fibreux sont notamment utilisés pour le traitement des composés organiques volatils ou pour la destruction des agents pathogènes. Parallèlement, une recherche active est dirigée vers la conception de photocatalyseurs actifs sous rayonnement visible.

La disponibilité en quantité et en qualité de l'eau dans le monde est devenue un enjeu environnemental et géostratégique majeur pour le XXI^e siècle. La catalyse intervient à la fois dans le traitement des eaux potables et des eaux usées, voire dans celui des boues de station d'épuration. La photocatalyse permet l'élimination de polluants toxiques comme les pesticides, mais également celle de micro-organismes pathogènes (virus, bactéries, parasites...). Ainsi, en présence de TiO_2 et sous irradiation UV-A, on observe une dégradation de l'ARN et de l'ADN intracellulaires d'une bactérie *Escherichia coli* K-12. La désorganisation de la membrane bactérienne et sa perforation sont clairement observées par microscopie électronique en transmission (figure 8).

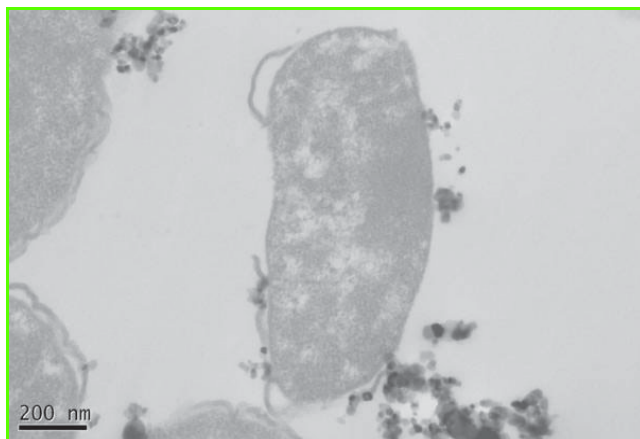


Figure 8 - Vue par microscopie électronique en transmission d'une suspension de bactéries *E. coli* en contact avec le catalyseur TiO_2 Degussa P-25, après 180 min d'irradiation sous UV-A. (Contact : Chantal Guillard, IRCELYON*).

Le traitement des eaux industrielles fortement concentrées en produits toxiques et non biodégradables nécessite une première étape d'oxydation des molécules où la catalyse intervient pour opérer dans des conditions plus douces de température et de pression. Cette technologie, appelée oxydation voie humide catalysée (OVHC), a été appliquée au traitement d'effluents de blanchiment de la pâte à papier ou de margines (effluents non biodégradables

issus de la fabrication d'huile d'olives). Les catalyseurs hétérogènes au platine ou ruthénium supportés sur TiO_2 ou ZrO_2 sont actifs pour l'abatement des teneurs en carbone organique total (COT). Un prétraitement des margines par OVHC permet d'améliorer la production de biogaz en méthanisation biologique de ces effluents. (Contact : Michèle Besson/Claude Descorme, IRCELYON*).

Catalyse hétérogène dans la maison et le bâtiment

L'utilisation des catalyseurs permettant une combustion propre et sans flamme des gaz butane ou propane pour le chauffage ou séchage par panneaux radiants est connue depuis longtemps. On connaît aussi les applications pour les fours catalytiques autonettoyants et les diffuseurs catalytiques à effet déodorant et anti-bactérien. Le fer à repasser à semelle catalytique pour l'élimination par combustion douce des salissures sur le linge est une nouvelle application (figure 9). La mise au point au laboratoire d'un dépôt de palladium en film mince (40-50 nm) a été industrialisée et commercialisée depuis la fin 2008 par la société Calor.

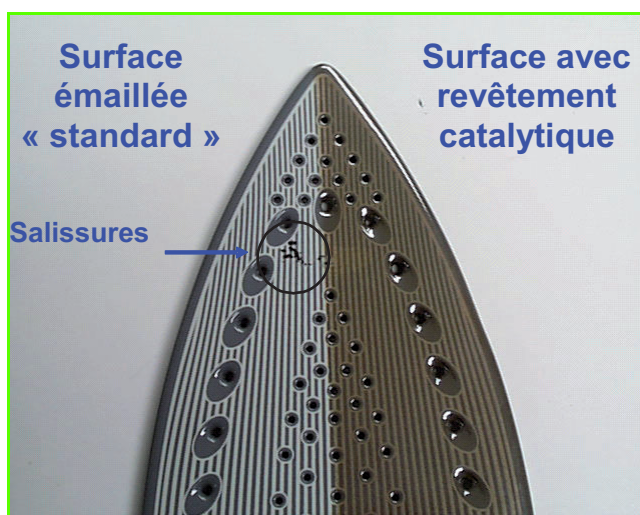


Figure 9 - Fer à repasser à semelle catalytique au palladium permettant l'élimination des salissures (brevet CNRS). (Contact : Jean-Claude Bertolini, IRCELYON*).

L'incorporation de photocatalyseurs à base d'oxyde de titane aux matériaux constituant les façades des bâtiments (murs et vitrages) permet d'oxyder de manière continue les salissures d'origine organique. Les vitres et bétons autonettoyants contribuent ainsi de façon durable à la propreté des bâtiments. (Contact : Jean-Marie Herrmann, IRCELYON*).

Processus catalytiques dans la haute atmosphère

Des millions de tonnes de poussières minérales peuvent être transportées du Sahara vers la haute atmosphère. Les oxydes de titane et de fer présents dans ces poussières sont le siège de réactions photocatalytiques qui participent à la destruction des oxydes d'azote, phénomène qu'il est possible de reproduire en laboratoire. Ces réactions catalytiques dans la haute atmosphère contribuent à la destruction des polluants à l'échelle planétaire (figure 10).

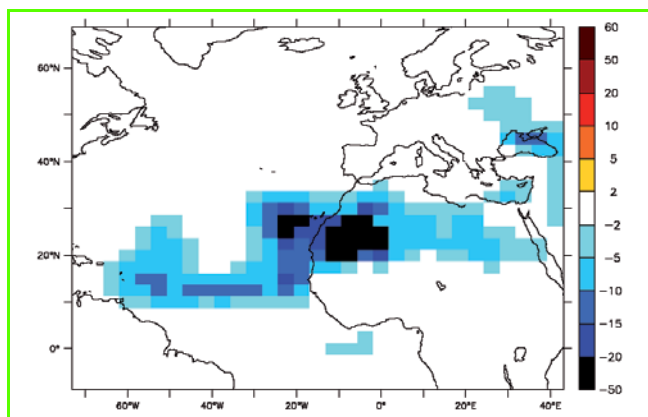


Figure 10 - Dégradation du NO_2 à l'échelle planétaire lors d'un épisode saharien. (Contact : Christian George, IRCELYON*).

Conclusion

Ce survol des avancées récentes en catalyse hétérogène est évidemment très incomplet et n'a pas l'ambition de refléter l'ensemble des résultats marquants obtenus dans tous les laboratoires français de catalyse. Pour les lecteurs désirant plus d'informations sur la catalyse hétérogène et ses applications dans l'énergie, l'environnement, l'industrie chimique, les transports et la vie quotidienne, la division Catalyse de la Société Chimique de France a réalisé un état complet des lieux sur son site Internet [7].

Références

- [1] Thibault-Starzyk F., Seguin E., Thomas S., Daturi M., Arnolds H., King D.A., Real-time infrared detection of cyanide flip on silver-alumina NOx removal catalyst, *Science*, **2009**, 324, p. 1048.
- [2] Loffreda D., Piccolo L., Sautet P., Surface restructuring under gas pressure from first principles: A mechanism for the CO-induced removal of the Au(110)-(1x2) reconstruction, *Phys. Rev. B*, **2005**, 71, p. 113415.
- [3] Loffreda D., Delbecq F., Vigné F., Sautet P., Fast prediction of selectivity in heterogeneous catalysis from extended Brønsted-Evans-Polanyi relations: A theoretical insight, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2009**, 48, p. 8978.
- [4] Horcajada P., Surlé S., Serre C., Hong D.Y., Seo Y.K., Chang J.S., Grenèche J.-M., Margiolaki I., Férey G., Synthesis and catalytic properties of MIL-100(Fe), an iron(III) carboxylate with large pores, *Chem. Comm.*, **2007**, p. 2820.
- [5] Ivanova S., Vanhaecke E., Louis B., Libs S., Ledoux M.J., Rigolet S., Marichal C., Pham C., Luck F., Pham-Huu C., Efficient synthesis of dimethyl ether over HZSM-5 supported on medium-surface area beta-SiC foam, *ChemSusChem*, **2008**, 1, p. 851.
- [6] Herrmann J.M., *Photocatalysis*, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, vol. 19, 5th ed, Arza Seidel (ed.), John Wiley & Sons, **2006**, p. 73-106.
- [7] <http://91.121.18.171/sfc/DivCata/Projet-fiches-Vulg/divcat1008.html>



Pierre Gallezot

est directeur de recherche émérite à l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IRCELYON)*.

* IRCELYON, UMR 5256 CNRS/UCBL, 2 avenue Albert Einstein, F-69626 Villeurbanne Cedex.

Courriel : pierre.gallezot@ircelyon.univ-lyon1.fr
 Nota : les chercheurs de l'IRCELYON cités dans cet article sont joignables par courriel à prenom.nom@ircelyon.univ-lyon1.fr



STAGES 2011 - 2012

- Photonique et photovoltaïque Septembre à février
- Imagerie et mesures par AFM aux interfaces électrochimiques 17 octobre 2011
- Couleur : origine, physique et modélisation 20 et 21 octobre 2011 / 8 et 9 mars 2012
- Perfectionnement en spectrométrie de masse : méthodes d'ionisation, désorption - Spectrométrie de masse en tandem, applications analytiques 7 au 10 novembre 2011
- Mesures d'impédances appliquées à l'électrochimie niveau 2. 14 au 18 novembre 2011
- Détection des gaz formés à l'interface électrode / solution (DEMS - Differential Electrochemical Mass Spectroscopy) 14 novembre 2011 / 21 novembre 2011
- Initiation aux techniques de moulage - niveau 1 28 novembre au 2 décembre 2011 / 6 au 10 février 2012
- Initiation aux techniques de moulage - niveau 2 5 au 16 décembre 2011 / 2 au 13 avril 2012
- Perfectionnement aux techniques de moulage - niveaux 1 et 2. sur demande
- Mesures de bruit électrochimique appliquées à la corrosion et aux systèmes diphasés 30 et 31 janvier 2012
- Outils de caractérisation de particules colloïdales en suspension 13 au 16 mars 2012 / 12 au 15 juin 2012
- Mesures d'impédances appliquées à l'électrochimie niveau 1. 19 au 23 mars 2012
- Rhéologie pratique. 21 au 23 mars 2012
- Chromatographie en phase gazeuse (colonnes capillaires). 9 et 11 mai 2012

Inscriptions : 01 53 10 43 20

Stages sur mesure : chantal.viger@upmc.fr

Services personnalisés d'accompagnement à la reprise d'études et à la VAE : fc.reva@upmc.fr

www.fc.upmc.fr



Formation continue

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS