

CONSTRUIRE AUJOURD'HUI POUR DEMAIN AVEC DES CIMENTS À EFFET PHOTOCATALYTIQUE

Fabrice DECROIX

Ciments CALCIA

Arnaud PLASSAIS, Laurent GUILLOT

Centre Technique Groupe Italcementi

PRÉAMBULE

La photochimie joue un rôle important dans les processus biologiques et dans le contrôle de l'environnement. L'exigence d'un environnement plus propre et d'une meilleure qualité de vie nécessite une nouvelle réflexion sur l'utilisation de la lumière à des fins environnementales.

La technologie photochimique appliquée aux matériaux de construction peut être une solution gagnante. Des recherches approfondies dans ce domaine ont jeté les bases d'une large application dans divers secteurs de l'industrie.

L'énergie solaire qui atteint la surface terrestre équivaut environ à 10 000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle.

La recherche d'une conversion efficace de toute cette énergie en formes utiles (conditionnement thermique, transports, production industrielle, etc.) est l'une des plus grandes opportunités pour le développement technologique.

Aujourd'hui, deux ciments issus des travaux du centre de recherche d'Italcementi Group font appel au procédé de la photocatalyse. Ils ouvrent d'importantes perspectives aux maîtres d'ouvrage, architectes et bureaux d'études dans le cadre de leurs projets d'avenir.

Avec la promesse de réduire les salissures d'origine biologique, le premier ciment est un vecteur d'économies futures pour les maîtres d'ouvrage libérés de l'entretien des façades. Le deuxième ciment se positionne quant à lui sur le terrain de la protection de l'environnement en combattant la pollution atmosphérique. Celui-ci possède des applications diversifiées, en neuf comme en rénovation, dans les secteurs de la voirie urbaine et de l'aménagement des villes.

L'objectif de cet article est de présenter, dans un premier temps, un rappel du fonctionnement de la photocatalyse puis les essais de caractérisation mis en place en laboratoire pour mettre en évidence l'effet photocatalytique et évaluer l'effet dépolluant de mortiers et bétons réalisés à base de ciment photocatalytique. Enfin, des résultats sur des chantiers tests, en grandeur réelle, seront exposés, et illustrés concernant d'une part pour l'aspect autonettoyant avec un suivi colorimétrique et d'autre part pour l'aspect dépolluant avec un suivi de la concentration en oxyde d'azote (NOx).

LA PHOTOCATALYSE : LA FORCE DE LA LUMIÈRE

La photocatalyse est le phénomène naturel dans lequel une substance, appelée photocatalyseur, accélère la vitesse d'une réaction chimique sous l'action de la lumière (naturelle ou artificielle). Lors de cette réaction, le catalyseur n'est ni consommé ni altéré. Cette réaction présente beaucoup de similitude avec la synthèse chlorophyllienne.

En utilisant l'énergie lumineuse, l'eau et l'oxygène de l'air, les photocatalyseurs engendrent la formation de molécules très réactives (appelées radicaux libres), capables de décomposer certaines substances,

organiques et inorganiques, présentes dans l'atmosphère. et parfois nocives, en composés totalement inoffensifs par oxydo-réduction.

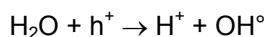
Le photocatalyseur est du dioxyde de titane (TiO_2). Le TiO_2 est un semi-conducteur. Sous un rayonnement d'énergie suffisante (ou supérieure à 3,2 eV, soit 388 nm, ce qui correspond à de l'UV proche), un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction (voir figure 1). Il y a alors création d'une **paire électron-trou** (électron e^- au niveau d'énergie de la bande de conduction et lacune électronique h^+ dans la bande de valence). Par analogie avec des phénomènes électriques, le TiO_2 passe d'un état isolant à conducteur.

Une autre propriété importante de ce matériau est son **temps de recombinaison** paire e^-/h^+ suffisamment long ; ce qui détermine en partie son activité photocatalytique. Ces e^- et les h^+ ont le temps de migrer vers la surface des particules de TiO_2 pour intervenir dans des réactions d'oxydo-réduction.

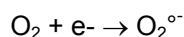
En effet, les e^- et les h^+ qui parviennent à migrer vers la surface de la particule réagissent avec les molécules adsorbées sur celle-ci pour produire des espèces hyperoxydantes et hyperréductrices : les radicaux libres.

Les réactions menant à la formation des radicaux les plus courants dans nos systèmes sont les suivantes :

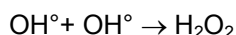
Oxydation des molécules d'eau par les lacunes :



Réduction des molécules de dioxygène par les électrons :



Formation de peroxyde d'hydrogène :



Ce sont ces espèces radicalaires formées en surface des particules d'oxyde de titane qui entraînent un ensemble de réactions en chaîne qui mènent à la dégradation d'un grand nombre de polluants tels que les oxydes d'azote :

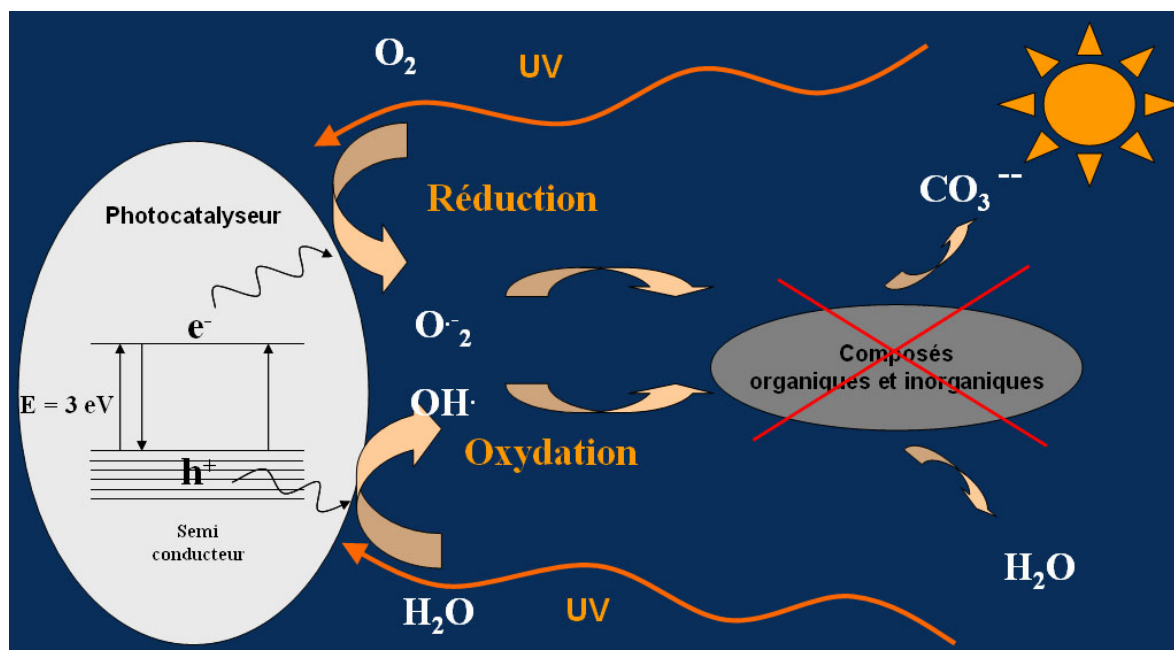
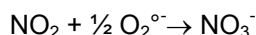
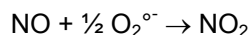


Figure n°1 : Principe de la photocatalyse

La photocatalyse est un accélérateur de processus d'oxydation / réduction qui existent déjà dans la nature. Elle favorise une décomposition plus rapide des polluants en évitant leur accumulation.

Substances pouvant être réduites ou oxydées par la photocatalyse

Composés non-organiques : NO_x ; SO_x ; CO ; NH₃ ; CH₃S ; H₂S

Composés organiques chlorurés : CH₂Cl₂ ; CHCl₃ ; CCl₄ ; 1,1-C₂H₄Cl₂ ; 1,2-C₂H₄Cl₂ ;

1,1,1-C₂H₃Cl₃ ; 1,1,2-C₂H₃Cl₃ ; 1,1,1,2-C₂H₂Cl₄ ; 1,1,2,2-C₂H₂Cl₄ ; 1,2-C₂H₂Cl₂ ;

C₂H₂Cl₃ ; C₂H₂Cl₄ ; dioxine ; chlorobenzène ; chlore phénol

Composés organiques : CH₃OH ; C₂H₅OH ; CH₃COOH ; CH₄ ; C₂H₆ ; C₃H₈ ; C₂H₄ ; C₃H₆ ; C₆H₆ ; phénol ; toluène ; étylbenzène ; o-xylène ; m-xylène ; phénantroquinine

Pesticides : Tradimefon ; Pirimicarb ; Asulam ; Diazinon ; MPMC ; atrazine

Autres systèmes complexes : Bactéries ; virus ; cellules cancérogènes ; PM

Ce procédé appliqué aux ciments (traités au dioxyde de titane) confère deux propriétés qui ont été validées : l'autonettoyance et la dépollution.

LA PROPRIÉTÉ AUTONETTOYANTE

La plupart des salissures de couleurs noire, verte et rouge rencontrées sur les différents bâtiments sont d'origine biologique (spores, algues, bactéries, lichens...).

La propriété « autonettoyante » d'un matériau formulé avec un ciment à effet photocatalytique résulte d'une constante compétition entre le dépôt, voire la croissance, et la destruction des salissures d'origine biologique par la photocatalyse.

En effet, la photocatalyse permet de détruire les salissures d'origine biologique ; Cependant, des conditions de forte humidité favorisent leur croissance et une surface rugueuse facilite leur accroche mécanique.

Il a donc été envisagé de réaliser un guide d'aide à la prescription dans lequel sont croisés les paramètres influant sur la propriété autonettoyante :

- Environnement : il caractérise la quantité et le type de salissures susceptibles d'être en présence à la surface des bâtiments.
 - Verdoyant : correspondant à des bâtiments situés à proximité de forêts, de parcs, à la campagne ou en périphérie de petites villes. Pour ce type d'environnement, les salissures présentes sont essentiellement d'origine biologique et, par essence, destructibles par photocatalyse.
 - Industriel : correspondant à des bâtiments situés à proximité de zones industrielles, d'usines chimiques, de centrales thermiques... Pour ce type d'environnement, les salissures présentes sont essentiellement d'origine inorganique (poussières minérales, suies, résidus de combustion) et, de ce fait, ne sont pas destructibles par photocatalyse. Cependant, il est à noter que ces dernières utilisent les molécules organiques pour s'accrocher aux surfaces.
 - Mixte : correspondant à des bâtiments situés à proximité de villes, de routes. Pour ce type d'environnement, il est possible de trouver les salissures d'origine organique et inorganique.
- Conditions d'exposition (l'humidité relative a notamment une incidence sur la cinétique de prolifération des salissures d'origine biologique, en tant que nutriment).
 - Conditions sèches (humidité relative < 65%). Pour ce type d'exposition, le béton n'étant pas ou très peu exposé à l'humidité, les conditions hydriques ne sont pas réunies pour la prolifération d'organismes biologiques.

- Conditions humides (humidité relative > 95%). Pour ce type d'exposition, le béton est très souvent ou constamment en contact avec la pluie ou l'eau. Les conditions hydriques sont donc réunies pour la prolifération d'organismes biologiques (organiques).
- Conditions « standard » (65% < d'humidité relative < 95%). Pour ce type d'exposition, le béton est en contact avec la pluie à chaque intempérie lorsqu'il pleut. Les conditions hydriques peuvent donc être réunies pour la prolifération d'organismes biologiques.
- Surface du matériau : elle a une influence directe sur l'accroche des salissures organiques et inorganiques, ainsi que sur l'humidité à la surface des bâtiments.
 - Lisse (poli, brut de décoffrage). Pour ce type de surface, l'accroche mécanique des salissures est « naturellement » très faible. Par ailleurs, l'absence de rugosité de la surface du béton favorise son séchage après humidification, et donc la non-prolifération des organismes biologiques.
 - Rugueux (acidification, désactivation légère). Pour ce type de surface, l'accroche mécanique des polluants est modérée. Par ailleurs, cette légère rugosité de la surface du béton peut favoriser légèrement la conservation des conditions humides en surface du béton et donc la prolifération des organismes biologiques.
 - Très rugueux (forte désactivation, gratté). Pour ce type de surface, l'accroche mécanique des salissures est « par principe » très forte. D'une part, l'importante rugosité de la surface du béton favorise la présence des conditions humides en surface du béton, et donc la prolifération des organismes biologiques. D'autre part, la surface du béton ayant ce type de finition ne contient que très peu de pâte, et donc une faible quantité en principe actif pour la photocatalyse. Ce type de surface est donc plutôt proscrit.

Le guide d'aide à la prescription (figure n°2) croise les différents paramètres et met en évidence par des couleurs les conditions favorables à l'utilisation du ciment à effet photocatalytique.

Environnement	Verdoyant									Mixte (Verdoyant-Industriel)						Industriel	
Conditions d'exposition	< 65% Hr			Entre 65% et 95% Hr			> 95% Hr			< 65% Hr			Entre 65% et 95% Hr			> 95% Hr	
Surface du matériau	Lisse	Rugueux	Très rugueux	Lisse	Rugueux	Très rugueux	Lisse	Rugueux ou très rugueux	Lisse	Rugueux	Très rugueux	Lisse	Rugueux ou très rugueux	Lisse ou rugueux ou très rugueux			
Prescription																	

Conditions favorables à l'utilisation du ciment TX Arca®

Conditions à évaluer (au cas par cas) quant à l'utilisation du ciment TX Arca®

Conditions défavorables à l'utilisation du ciment TX Arca®

Figure n°2 : Guide d'aide à la prescription

Par ailleurs, l'activité photocatalytique des matériaux formulés avec du ciment à effet photocatalytique est évaluée à l'aide d'un test de laboratoire qui a été développé par le Centre technique du groupe Italcementi.

Ce test consiste à suivre, par des mesures colorimétriques, la dégradation d'une substance organique rose (la rhodamine B), qui joue le rôle de salissures d'origine biologique, appliquée sur des échantillons formulés avec du ciment TX Arca, lesquels sont ensuite exposés à une radiation UV. Les figures n°3 et n°4 suivantes mettent en évidence la différence de cinétique liée à la photocatalyse.

En seulement 4 jours, le ciment TX Arca permet de détruire entièrement la substance organique rose.

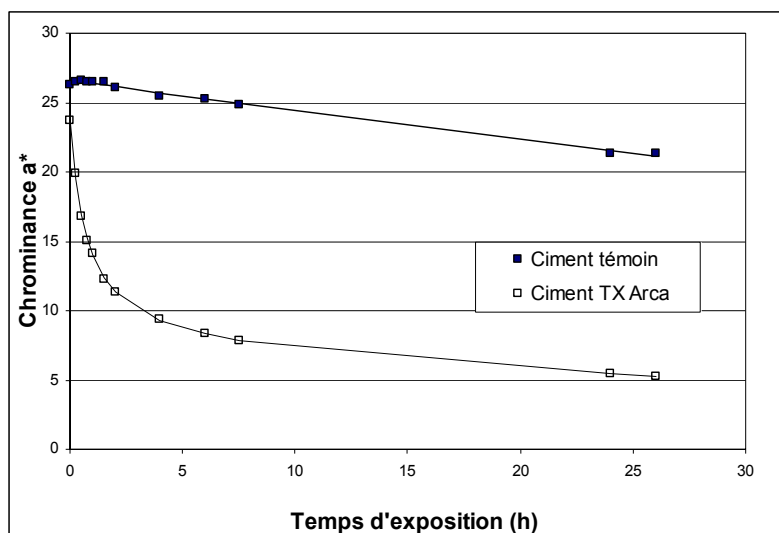


Figure n°3 : Suivi de la chrominance a^* qui correspond à la couleur rouge

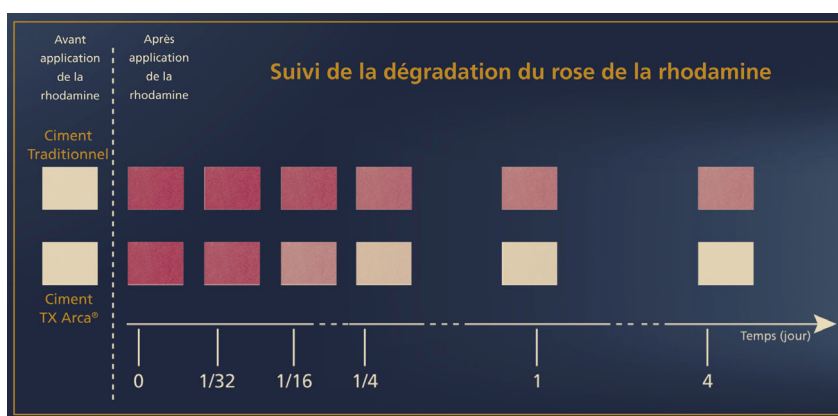


Figure n°4 : Suivi colorimétrique de la dégradation de la Rhodamine

La première application en ciment photocatalytique voit le jour en 1996 pour satisfaire aux exigences de Richard Meier, architecte de l'église Dives in Misericordia à Rome (photo n°1). Pureté du blanc, brillance et conservation dans le temps des qualités esthétiques étaient les requêtes du grand architecte qu'Italcementi, sponsor technique de l'œuvre, a été en mesure de satisfaire grâce au ciment blanc photocatalytique.



Photo n°1 : Eglise Dives in Misericordia

En 1999, Ciments Calcia réalise, en ciment TX Arca, la Cité des arts et de la musique à Chambéry et décide de suivre son efficacité autonettoyante en conditions réelles. Près de 6 ans après son inauguration, la couleur d'origine des façades est totalement préservée grâce à l'utilisation du ciment à effet photocatalytique, comme le montre la figure n°5 suivante. La luminance L^* (dont 0 correspond à la couleur noire et 100 à la couleur blanche) est suivie à l'aide d'un colorimètre.

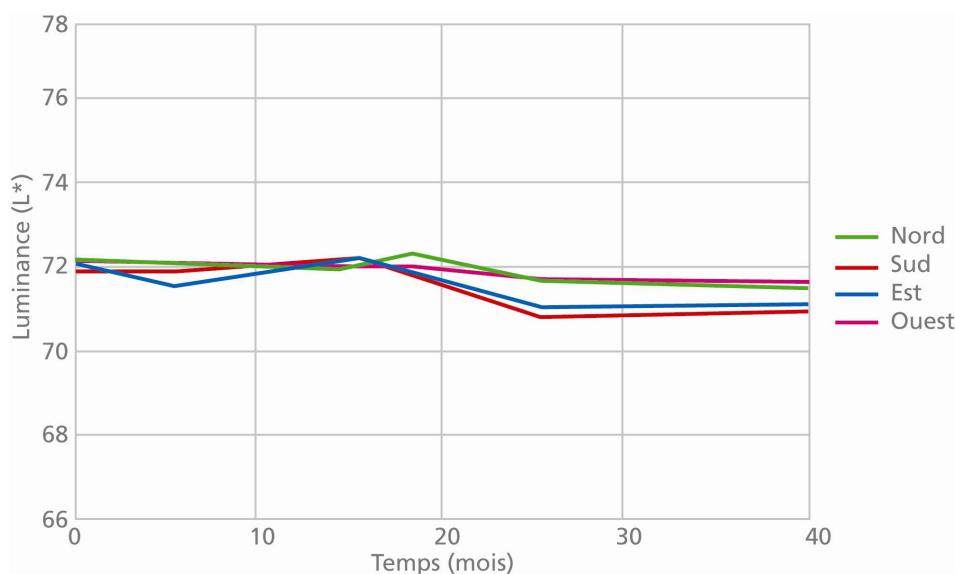


Figure n°5 : Suivi colorimétrique

LA PROPRIÉTÉ DÉPOLLUANTE

La pollution atmosphérique génère un ensemble d'effets nocifs qui altèrent la biosphère et qui, par conséquent, se répercutent sur l'homme. Ces effets nocifs dépendent de l'action des facteurs qui modifient les équilibres existants, libérés pour la plupart comme sous-produits de l'activité humaine dans l'air. Il existe donc dans l'atmosphère des substances qui ne sont pas présentes dans la composition naturelle de l'air ou qui y sont présentes à un niveau de concentration inférieur et qui, de par leur présence, ont un effet nocif sur l'homme, les animaux, la végétation ou les matériaux.

L'Organisation Mondiale de la Santé affirme que plus de 25 millions de personnes sont mortes au 20^{ème} siècle des effets nocifs de la pollution atmosphérique. La Banque mondiale affirme que, chaque année, un nombre de morts compris entre 300 000 et 700 000 personnes peut être imputé à cette cause.

L'Institut national du cancer de Milan affirme qu'une réduction de 50 % de la pollution de l'air entraînerait, rien qu'à Milan, 1 200 morts et 10 000 cas de maladies respiratoires en moins par an.

Il y a quelques années, l'Environmental Protection Agency (EPA) a identifié 129 « polluants prioritaires » d'origine organique et nonorganique. Les substances polluantes libérées dans la biosphère sont produites, dans la plupart des cas, par l'activité humaine. Les principaux facteurs responsables de la pollution atmosphérique sont générés par les émissions des gaz d'échappement des véhicules, des centrales électriques, des usines, des installations d'incinération et de la combustion domestique des combustibles fossiles dans les zones urbaines et industrielles. Les principaux responsables de la pollution atmosphérique sont les véhicules à moteur à explosion, les industries, les centrales thermoélectriques, les combustibles pour le chauffage domestique, la combustion des déchets, surtout si elle n'est pas réalisée dans des installations adaptées de réduction des poussières et d'épuration des fumées. Les agents polluants peuvent également provenir de l'utilisation de pesticides vaporisés dans les zones rurales, de la poussière générée par l'extraction minière, ainsi que de l'agriculture.

Les principaux polluants sont le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone, le benzène, les hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), les poussières (de diamètre inférieur à 10 μm) et le plomb.

Les villes sont donc des lieux où se concentrent (principalement) des sources de déséquilibre pour l'environnement avec des conséquences directes également sur la santé des citoyens.

Il est à noter que la pollution se divise en pollution primaire et pollution secondaire.

Les polluants primaires sont les polluants directement émis par des sources.

Les principaux polluants primaires sont ceux issus des processus de combustion de nature quelconque, ou les hydrocarbures non brûlés, le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote (principalement sous forme de monoxyde) et les particules inférieures à 10 µm. Lorsque les combustibles contiennent du soufre, il peut y avoir émission de dioxyde de soufre (SO₂).

Une fois émis dans l'atmosphère, les polluants primaires sont l'objet de processus de diffusion, de transport et de dépôt, ainsi qu'à des processus de transformation physico-chimique qui peuvent conduire à la formation de nouvelles espèces polluantes, qui s'avèrent généralement plus toxiques et qui ont une zone de présence plus vaste que les polluants d'origine.

La dispersion des polluants dans l'atmosphère, déterminée par les phénomènes de diffusion agitée et le transport des masses d'air, comme leur disparition, déterminée par des processus de dépôt, est étroitement dépendante du comportement dynamique des basses strates de l'atmosphère. Il en résulte que pour l'étude du comportement des polluants primaires, il est nécessaire de connaître le profil qualitatif, quantitatif et temporel des émissions ou d'avoir des informations sur les processus météorologiques qui régulent le comportement dynamique de la basse troposphère (classes de stabilité, direction et intensité du vent).

Les polluants secondaires sont les espèces polluantes qui se forment suite aux transformations physico-chimiques des polluants primaires

Parmi les processus de formation des polluants secondaires, une importance particulière est accordée à la série de réactions provenant des oxydes d'azote et des hydrocarbures en présence de la lumière du soleil. Cette chaîne de réactions mène à l'oxydation du monoxyde d'azote (NO), au dioxyde d'azote (NO₂), à la production d'ozone (O₃) et à l'oxydation des hydrocarbures, avec formation de peroxyacétylnitrate (PAN), de formaldéhyde, d'acide nitrique, de nitrates et de nitrodérivés en phase particulaire et d'une centaine d'autres espèces chimiques mineures. L'ensemble des produits de ces réactions est appelé smog photochimique et représente l'une des formes de pollution les plus dangereuses pour l'écosystème. Le terme smog désigne à la forte réduction de visibilité observée au cours des épisodes de pollution photochimique, en raison de la formation d'un grand nombre de particules de dimensions significatives.

Les directives issues de la Commission européenne ces dernières années ont modifié le cadre normatif relatif à l'évaluation et à la gestion de la qualité de l'air.

A la base du travail de la Commission européenne se trouve le développement d'une stratégie de contrôle à travers la définition d'objectifs à long terme.

En 1996, l'Union Européenne s'est dotée d'une loi-cadre sur l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air (Directive 96/62/CE), qui a débouché, en 1999, sur une directive d'application (Directive 1999/30/CE) qui a fixé les valeurs limites pour les polluants, dont l'oxyde et le dioxyde d'azote, le dioxyde de soufre, le plomb et les particules PM₁₀.

Toutefois, aujourd'hui, la Commission ne peut que constater le manquement de neuf pays aux obligations communautaires.

Face à ce constat et en capitalisant sur ses expériences autonettoyantes, ainsi que sur les connaissances acquises sur le principe de la photocatalyse, Ciments Calcia a complété sa gamme avec une ligne de ciment environnementale : TX Aria.

Les travaux du Centre Technique Group ont dès lors convergé vers la réduction de la pollution atmosphérique par la décomposition des substances volatiles organiques et inorganiques grâce à la photocatalyse. Pour ce faire, des tests de laboratoire, puis un site expérimental à l'échelle 1/5^{ème} en condition extérieure (« Rue Canyon ») ont été développés dans un premier temps et enfin quelques chantiers expérimentaux ont été réalisés.

Les tests de laboratoire visant à évaluer les caractéristiques dépolluantes des produits réalisés avec des ciments TX Aria ont été effectués avec des appareils spécifiques et des méthodes d'essai novatrices. Le principe consiste à mettre un gaz contenant une quantité d'oxyde d'azote représentant une pollution atmosphérique possible en contact avec un matériau fabriqué avec du ciment TX Aria et à suivre, la décomposition du gaz lié à la photocatalyse, lorsque ce dernier est soumis à un rayonnement UV.

La première vérification (méthode « statique ») de l'efficacité contre les oxydes d'azote (NO_x) a été menée avec une chambre (figure n°6) de volume connu (35 m³), dans laquelle a été insufflé du NO₂

qui, dilué avec l'air contenu, atteint une concentration polluante prédéfinie (200 ppb). A l'intérieur se situe un analyseur chimiluminescence NO_x , une lampe UV et un produit (4 m² de surface) réalisé avec du ciment TX Aria. Divers tests ont été réalisés avec une intensité lumineuse définie et les concentrations polluantes dans la chambre ont été mesurées après la réaction de photocatalyse (figure n°7).

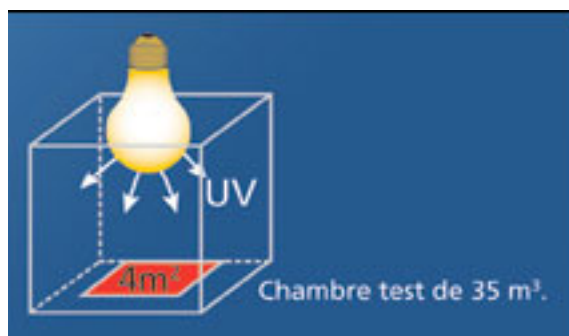


Figure n°6 : Schéma de principe

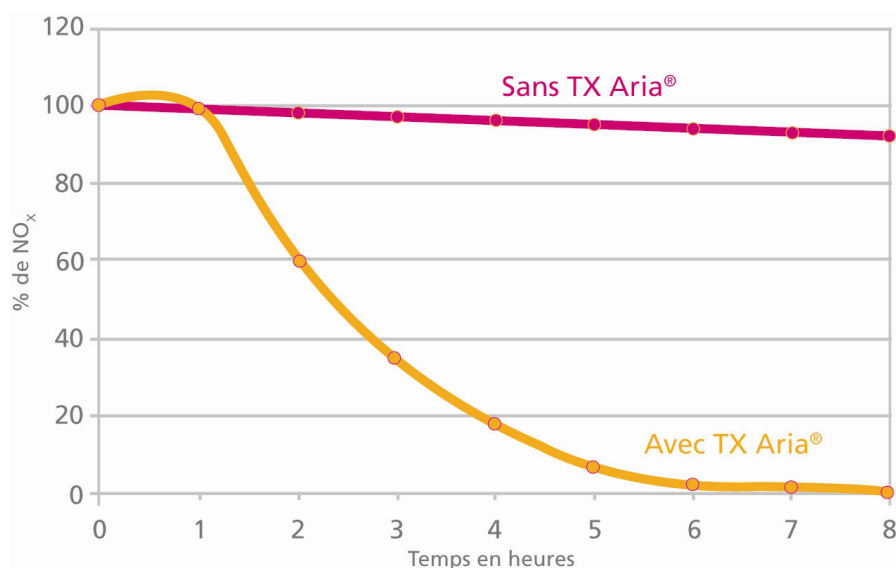


Figure n°7 : Suivi de l'activité dépolluante pour un matériau réalisé avec du TX Aria et un témoin

Dans ces conditions spécifiques de laboratoire, la destruction de 100 % de la teneur en NO_2 a été enregistrée en 6 heures.

La deuxième méthode (« dynamique ») consiste à suivre la quantité de gaz (NO_x) au dessus d'un échantillon soumis à un flux continu.

Le schéma de principe est représenté figure n°8. Un air pollué artificiellement est contrôlé et injecté dans une chambre de réaction contenant un échantillon dont on souhaite évaluer l'activité dépolluante.

La description de l'appareillage et les conditions de l'essai sont les suivantes :

- un générateur d'air artificiel assure l'introduction en continu d'un flux d'air avec un certain niveau de concentration en NO_x (formé de NO et NO_2). Le débit gazeux est de 1 l.min⁻¹ avec une concentration en NO_x proche de 500 ppb.
- Une chambre de réaction contenant un échantillon surmonté d'une lampe Ultra violet de 300 Watt (Osram) fournit une irradiation à la surface de l'échantillon de 1,5 mW/cm². Le volume de la chambre est d'environ 5 litres et permet de tester des échantillons d'une surface d'environ 100 cm².
- La concentration en NO_x à la sortie de la chambre de réaction est mesurée à l'aide d'un analyseur à chimiluminescence NO_x .

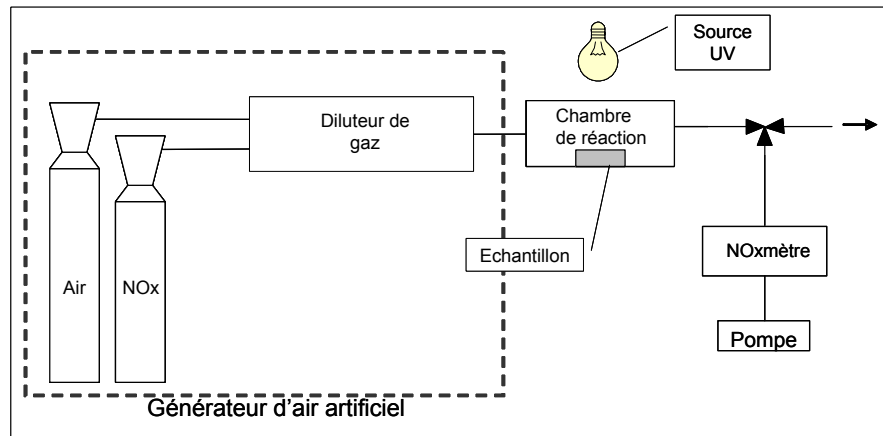


Figure n°8 : Schéma de la méthode dynamique.

La procédure de mesure est la suivante :

- La première étape consiste à stabiliser le flux d'air entrant dans la chambre de réaction durant une heure. Pendant cette phase, l'échantillon est placé à l'intérieur de la chambre de réaction et soumis à un flux d'air pollué, mais pas au rayonnement UV. La concentration initiale de NO_x est notée C₀.
- La source lumineuse est alors activée, puis on attend la stabilisation de la concentration en NO_x durant environ 40 minutes. La concentration en NO_x à cet équilibre est notée C_{eq}.
- La source lumineuse est ensuite éteinte et un retour à la concentration initiale à l'équilibre est suivi.

La forme typique des courbes de mesures est présentée sur la figure n°9.

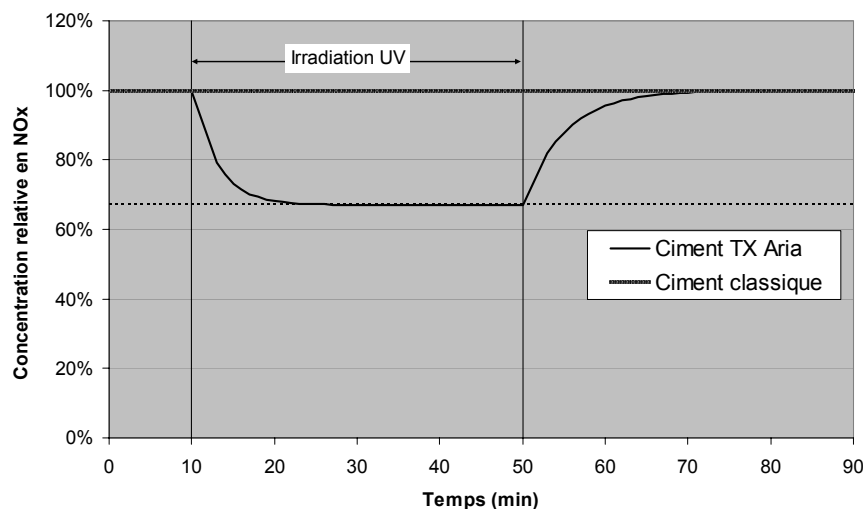


Figure n°9 : Données typiques obtenues avec la méthode dynamique sur un échantillon photocatalytique et un non photocatalytique.
La concentration en NO_x est exprimée en pourcentage de la concentration initiale

Les résultats sont exprimés en pourcentage d'abattement à l'aide de la formule suivante et permettent ainsi des comparaisons entre produits et des optimisations de formulations :

$$Q = \frac{(C_{eq} - C_0)}{C_0} \cdot 100$$

Sur l'exemple de la figure n°9, l'activité dépolluante est Q = 33 %.

Le site expérimental de la « Rue Canyon » (photo n°2), a été mis au point en France dans une zone adjacente aux laboratoires CTG de Guerville. Cette expérience est le fruit d'un projet de recherche européen, le Projet PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for De-pollution

Assessment) auquel ont collaboré des centres de recherche européens et des regroupements d'entreprises privées, dont Italcementi, qui mène depuis longtemps des recherches, dépose des brevets et développe des applications.

Ce site expérimental a été validé par une campagne d'expérimentation de 3 mois (Maggos et al. 2005).

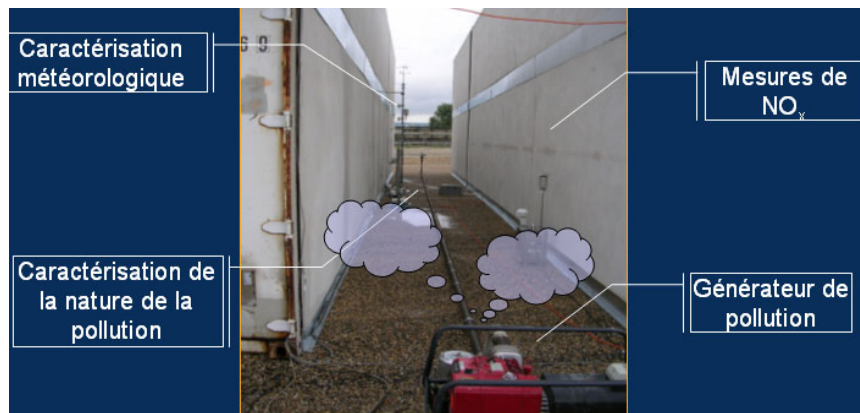


Photo n°2 : Vue de la « Rue Canyon »

L'expérimentation a visé à tester l'efficacité des propriétés photocatalytiques sur un modèle (en conditions extérieures) reproduisant les conditions environnementales d'une rue (à l'échelle 1/5^{ème}) située entre deux copropriétés dans un contexte urbain classique. Deux rues ont ainsi été reproduites, chacune d'une longueur d'environ 18 m, d'une largeur de 2,5 m et d'une hauteur d'environ 5 m. Les murs des ruelles ont été enduits, l'un avec un enduit à base de ciment TX Aria, l'autre avec un enduit à base de ciment ordinaire.

Pour simuler les conditions de pollution liées au trafic urbain, un tuyau percé duquel s'échappent les gaz d'échappement a été installé sur toute la longueur des murs, dans l'axe de la rue. Les gaz d'échappement sont produits en continu, pendant 7 heures, par un moteur relié au tuyau.

Aux extrémités supérieures et latérales, ont été installés des systèmes de mesure de NOx. Les gaz d'échappement ont été contrôlés en mesurant aussi bien les vitesses que les températures et les compositions.

De plus, 3 capteurs situés à 5 mètres de hauteur et à intervalles réguliers sur toute la longueur du canyon, permettent de relever l'humidité, la température, l'ensoleillement. Des anémomètres ont également été installés pour mesurer la vitesse et la direction du vent à l'intérieur et à l'extérieur de la rue.

Bien que liée à différentes variables comme la concentration de NOx, des conditions météorologiques (orientation et force du vent) et de l'ensoleillement, l'action dépolluante des murs réalisés avec du ciment TX Aria a donné des résultats très prometteurs.

Les résultats sont présentés sous la forme d'une rose des vents sur laquelle l'orientation des rues est dessinée à l'aide de 2 rectangles gris ; la concentration de NOx dans la rue traitée est en orange et la concentration de NOx dans la rue témoin est en bleu (figure n°10). Cette représentation met en évidence que la concentration en NOx dans la « Rue Canyon » varie de façon notable à la fois dans la rue dont les murs sont réalisés avec du ciment TX Aria et témoin. Il a donc été possible d'évaluer l'effet photocatalytique par rapport aux directions du vent. Il a été mis en évidence que le pourcentage de réduction du niveau de pollution dans la rue passe de 20 %, lorsque l'orientation des vents est parallèle à la rue, à 80 % lorsqu'elle est perpendiculaire à la rue. Autrement dit, lorsque les gaz restent plus longtemps en contact avec la surface des murs, l'action dépolluante est plus significative. Et, lorsque les vents évacuent la pollution à l'extérieur de la rue « Canyon », l'action dépolluante est moins importante. Cependant, il est à noter que le matériau a toujours la même activité dépolluante intrinsèque.

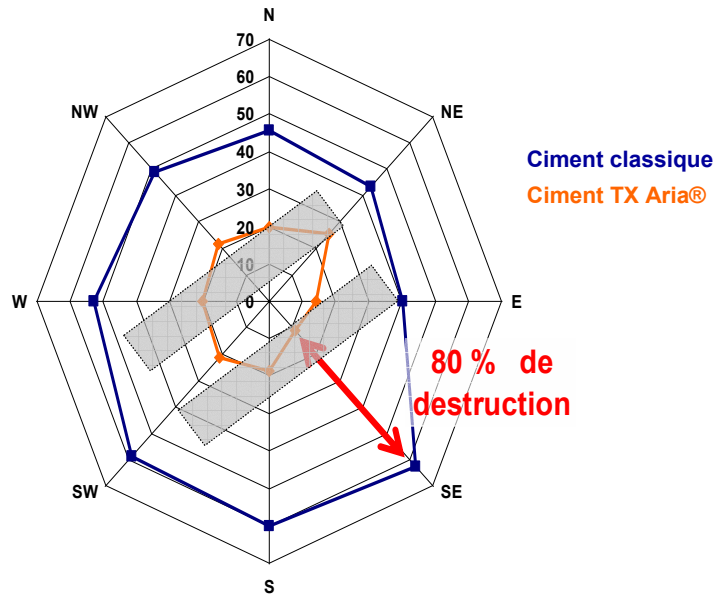


Figure n°10 : Concentration de NOx (ppb) en fonction de la direction principale du vent

Parallèlement aux essais réalisés en laboratoire et sur le site expérimental, il a été décidé de confirmer ces résultats en réalisant des chantiers expérimentaux.

La première expérimentation a eu lieu à Segrate (Milan) en novembre 2002. La commune de Segrate a identifié la rue Morandi comme un site propice à l'expérimentation. Il s'agit d'une rue à double sens de circulation à trafic élevé (plus de 1 000 véhicules/heure) puisqu'elle relie la SS11 Cassanese à la SP Nuova Rivoltana.

Les caractéristiques de la rue Morandi peuvent être considérées comme constantes tout au long de la portion concernée par l'expérimentation : la largeur de la route est d'environ 10 m, avec sur le côté des zones de stationnement, sur le côté est et sur le côté ouest de la rue cohabitent des bâtiments, distants de 7 à 10 m du bord de la rue, et sans interruption d'un bâtiment à l'autre sur une distance de 30 m. Les propriétés sont séparées par des grilles qui n'empêchent pas la libre circulation de l'air. Les trottoirs sont ornés d'arbres (photo n°3).



Photo n°3 : Rue Morandi



Photo n°4 : Plan de l'expérimentation

Sur le sol bitumeux a été appliqué, en fine couche, un mortier à base de liant photocatalytique TX Aria. Un revêtement a été mis en place sur près de 230 m, du croisement de la rue Modigliani-Via Don Sturzo à Via Cristi, ce qui représente au total une zone d'environ 7 000 m².

Le prolongement de la rue Morandi en direction du nord, de la rue Cristì jusqu'au croisement avec la rue Turati, a été pris comme référence pour l'expérimentation (Photo n°4).

Les paramètres environnementaux et l'efficacité du revêtement photocatalytique ont été vérifiés avec un luxmètre, avec un anémomètre à fil chaud et un Noxmètre à chimiluminescence avec enregistreur. Pour

évaluer l'influence des conditions environnementales, trois séries de relevés ont été réalisées : la première en novembre 2002, les autres fin juillet 2003.

Novembre 2002 : l'essai a été mené pendant environ 1 heure avec une luminosité moyenne d'environ 30 000 Lux, une vitesse du vent de 0,4 m/s environ et une température ambiante de 10°C environ. Des données inhérentes aux NOx ont été relevées à égalité d'intensité du trafic (environ 1 600 véhicules par heure) pendant une durée de 45 minutes dans les 2 portions de la rue prises en compte (traitée et non traitée).

Juillet 2003 : l'essai a été mené pendant environ 1 heure avec une luminosité moyenne d'environ 100 000 Lux, une vitesse du vent de 0,7 m/s environ, une température ambiante de 32°C et une humidité de 46 %. Successivement, le relevé a concerné pendant environ 1 heure la portion de route où a été posé le mortier photocatalytique. Plus précisément, les deux analyseurs ont été installés dans la contre-rue à hauteur du numéro 17, à une distance de 30 mètres environ. La luminosité a oscillé entre 93 000 et 100 000 Lux, la vitesse du vent était de 0,5 m/s environ, avec une température ambiante de 32°C et une humidité de 40 %.

Un troisième essai a été effectué pendant environ 1 heure sur la route asphaltée, toujours à hauteur du numéro 44. Dans ce cas, les deux analyseurs étaient reliés. La luminosité était d'environ 46 800 Lux, la vitesse du vent de 0,50 m/s environ, avec une température ambiante de 32°C et une humidité de 42 %.

Pour finir, la concentration de NOx a été relevée dans une zone distante de 1 km environ (localité de Don Sturzo), en l'absence totale d'habitations et de trafic routier, pour déterminer la concentration de NOx dans ces conditions.

Les résultats de ces 3 campagnes de mesures mettent en évidence une réduction de la pollution (NOx) d'environ 60% en moyenne (Figure n° 11).

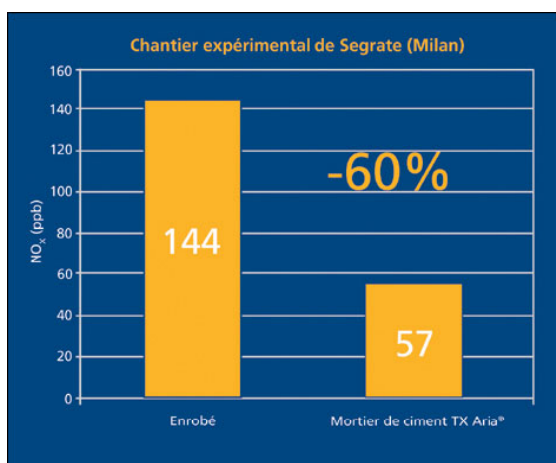


Figure n°11 : Résultats des campagnes de mesures de l'activité dépolluante du revêtement à base de ciment TX Aria de la rue Morandi

Photo n°5 : Zone réalisée en pavé dépolluant à base de ciment TX Aria

Une autre expérimentation conçue pour vérifier l'efficacité du ciment TX Aria photocatalytique dans la réduction des oxydes d'azote (NOx) a été conduite au mois de mars 2003, mettant en œuvre 8 000 m² de pavés préfabriqués sur une partie de la place de la nouvelle cimenterie Italcementi de Calusco (photo n°5).

L'efficacité des pavés dépolluants a été vérifiée (avec un luxmètre, un anémomètre à fil chaud et un Noxmètre à chimiluminescence avec enregistreur) et comparée à une zone témoin.

La quantité de NOx a été mesurée simultanément durant une journée avec les deux analyseurs et reportée dans les graphiques présentés sur la figure n°12.

Il est constaté que, sur la zone réalisée en pavé dépolluant, la concentration de NOx mesurée est nettement inférieure à celle de la zone de référence : en moyenne de 45 %. De plus, les pics de pollution présents sur la zone témoin ont disparu dans la zone en pavés dépolluants. Pour vérifier l'équivalence de mesure des 2 Noxmètres, à 16h00, les deux analyseurs ont été placés au même endroit.

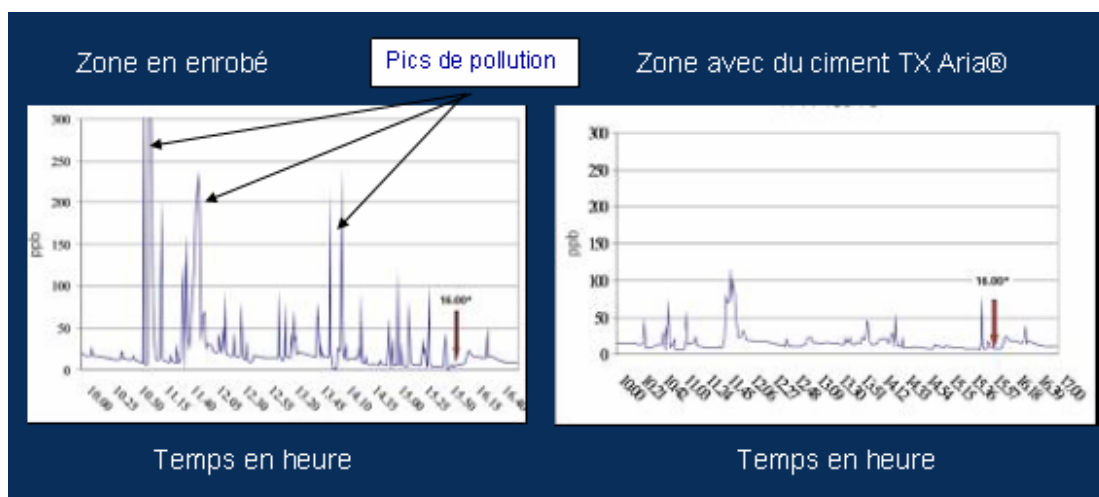


Figure n°12 : Suivi de la pollution dans les 2 zones

En conclusion, la pollution atmosphérique est une problématique importante liée en grande partie au transport routier. La lutte contre la pollution passe notamment par l'utilisation de matériaux dépolluant formulés à base de ciment photocatalytique. Ils permettent de réduire les molécules atmosphériques gazeuses nocives (oxydes d'azote : NOx), par une succession de réactions d'oxydoréductions induites par un rayonnement ultra-violet.

Le groupe Italcementi s'est fortement impliqué dans le développement et la validation de méthodes d'essais, ainsi que dans la formulation de matériaux dépolluants à base de ciment photocatalytique. Ces matériaux ont permis dans le cadre d'applications routières, de réduire de manière significative le niveau de pollution atmosphérique. Bien que fonction de conditions climatiques et de la géométrie du site, la réduction de la pollution peut atteindre jusqu'à 80 % en NOx.

RÉFÉRENCES

BARMPAS, Photios, LEITL, Bernd; MOUSSIOPOULOS, Nicolas, SCHATZMANN, Michael (2005) "Physical modelling of flow and dispersion in and around an idealized street canyon – Replicating the PICADA field experiment in a boundary layer wind tunnel". 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain, March 29-31, 2005.

KANEKO, Masao, OKURA, Ichiro (2002) "Photocatalysis – Science and Technology". ISBN 3-540-43473-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

LE CLOAREC (2005) "COV – Composés organiques volatiles". Les techniques de l'ingénieur, G1835

MAGGOS, Thomas, PLASSAIS, Arnaud, BARTZIS, John, VASILAKOS, Christos, MOUSSIOPOULOS, Nicolas, BONAFOUS, Laurent (2005) "Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels". 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain, March 29-31, 2005.

MILIS, A., PERAL, J., DOMENECH, X., NAVIO, J.A. (1994). Journal of Molecular Catalysis, vol 87, pp 67-94.

MOUSSIOPOULOS, Nicolas; OSSANLIS, Ioannis; BARMPAS, Photios; BARTZIS, John (2005) "Comparison of numerical and experimental results for the evaluation of the depollution effectiveness of photocatalytic coverings in street canyons". 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain, March 29-31, 2005.

STRINI, Alberto, CASSESE, S., SCHIAVI, L (2005) "Measurement of Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and o-Xylene gas phase photodegradation by titanium dioxide dispersed in cementitious materials using a mixed flow reactor". Applied Catalysis B, vol 61, pp 90-97.

WAN-KUEN, Jo; JUNG-HOON, Park, HEE-DONG, Chun (2002) "Photocatalytic destruction of VOCs for in-vehicle air cleaning". Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry, vol 148, pp 109-119.

World Health Organization Library Cataloguing in Publication Data (2005) "Health effects of transport-related air pollution", Edited by: Michal Krzyzanowski, Birgit Kuna-Dibbert and Jürgen Schneider, ISBN 92 890 1373 7.