



OCT.
2018

REACTEUR **PLASMA** INNOVANT POUR L'ELIMINATION DE COV EN INDUSTRIE

AAP CORTEA 2015 : RECOVER

NOTE DE
SYNTHESE

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Cédric SERNISSI (MINES ParisTech)
Laurent GOFFART (V. MANE FILS)
Djenet BELAHDJI (V. MANE FILS)
François JORAND (LPGP)
Bernard LACOUR (Excitronic)
Delphine COTTET (ADEME)
Aude-Claire HOUDON (ADEME)

CITATION DE CETTE NOTE DE SYNTHÈSE

AFFONSO NOBREGA Pedro ; BLIN-SIMIAND Nicole ; BOURNONVILLE Blandine ; CARRIERE Luc ; CAUNEAU François ; COURSIERES Nathalie ; DRAZENOVIC Beatrice ; FABRY Frédéric ; FULCHERI Laurent ; GUEYE Magamou ; HANNETEL Jean-Michel ; LEROUX Patrick ; PASQUIERS Stéphane ; PETRI Arnaud ; ROCHE Patrice ; ROHANI, Vandad ; SCHIPPA Christine. 2018. Réacteur plasma innovant pour l'élimination de COV en industrie - Projet RECOVER - Synthèse. ADEME. 10 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1581C0029

Projet de recherche coordonné par : V. MANE FILS

Appel à projet de recherche : CORTEA

Coordination technique - ADEME : HOUDON Aude-Claire

Direction/Service : Direction Productions et Energies

Durables/Service Entreprises et Dynamiques Industrielles



Résumé

Des composés organiques volatils (COV) présents dans l'air peuvent avoir un fort impact odorant, même à faible concentration, et doivent être traités. Des techniques de traitement telles que l'adsorption par charbons actifs, le lavage ou l'oxydation thermique permettent de récupérer ou détruire ces composés. Cependant, ces techniques ne sont pas toujours adaptées aux forts débits d'air et/ou aux faibles concentrations, caractéristiques de certains procédés industriels émetteurs de COV. Une alternative prometteuse à ces techniques traditionnelles est l'utilisation de plasmas non-thermiques, aussi appelés « plasmas froids ». Ce type de plasma, obtenu par des décharges électriques hors-équilibre thermodynamique, contient des espèces réactives, telles que des radicaux ou des molécules excitées, qui favorisent la destruction des composés organiques volatils.

Le projet RECOVER vise à répondre aux besoins de la société MANE, acteur important de l'industrie d'arômes et parfums, en termes de traitement de composés organiques volatils odorants. Ce projet a été conçu dans le cadre de l'appel à projets CORTEA (COonnaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air) de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). L'objectif du projet est de développer et tester un nouveau réacteur pour le traitement de COV par plasma non-thermique avec trois aspects innovants combinés : les barrières électrocéramiques, les décharges de surface et les impulsions haute-tension très courtes, dites « nanoseconde ».

Sur le plan académique et théorique, le projet RECOVER a permis l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques dans différentes disciplines impliquées dans ce projet : physique des plasmas froids, catalyse, chimie de la décomposition des COV, génie chimique des réacteurs, électrocéramiques. En particulier, les études réalisées au sein du LPGP nous ont permis de mieux comprendre le comportement des électrocéramiques STREAMER, notamment en ce qui concerne leur utilisation en configuration de surface. Un autre point important a été le développement de modèles pour décrire le comportement du traitement de COV dans un réacteur plasma non-thermique. Ces modèles, quoique simples, ont permis de reproduire et interpréter les résultats expérimentaux obtenus.

Sur le plan technologique, le projet a conduit à la conception, la réalisation et tests sur site d'un dispositif pilote à échelle semi-industrielle implémenté en sortie d'une unité pilote d'atomisation de la société MANE, reproduisant les conditions de production à l'échelle industrielle, ainsi qu'au développement de réacteurs dédiés spécifiquement aux électrocéramiques STREAMER. Si le réacteur pilote, basé sur un diélectrique classique, a donné des résultats bien encourageants lorsque le plasma est combiné à un catalyseur (abattements de plus de 95%, élimination de sous-produits), un réacteur combinant deux types de décharges à barrière électrocéramique a eu une performance très prometteuse, puisque, en plus d'atteindre un bon taux d'abattement, ni l'ozone ni le monoxyde de carbone ont été détectés en sortie (sans besoin d'un catalyseur).

Enfin, sur le plan de la valorisation, le projet RECOVER a donné lieu à des publications scientifiques dont une thèse de doctorat, a permis la réalisation d'une analyse économique du traitement par plasma froid et a ouvert des perspectives ? extrêmement très intéressantes, à la fois en ce qui concerne le réacteur pilote en place sur le site de la société MANE, le développement de réacteurs dédiés aux électrocéramiques ou l'utilisation d'un catalyseur pour améliorer l'efficacité du traitement.



Abstract

Volatile organic compounds (VOC) may have a strong odorant impact, even at weak levels, and therefore must be correctly handled. Techniques such as activated carbon filters, scrubbing or thermal oxidation may be used to either remove or destroy these compounds. However, these techniques are not always suited to strong flow rates and/or weak concentrations found in some VOC-emitting industrial processes. Non-thermal plasmas, also known as “cold” plasmas, are a promising alternative to these traditional techniques. This kind of plasma is obtained by non-equilibrium electrical discharges. It contains reactive species such as chemical radicals and excited molecules which favours the destruction of VOCs.

Project RECOVER aims at answering the needs of MANE, a key flavours and fragrances manufacturer, in what concerns the treatment of odorant volatile organic compounds. This project has been conceived within the ambit of the CORTEA (COonnaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l’Air) call for projects from the French Environment and Energy Management Agency (ADEME). The project’s goal is to develop and to test a new non-thermal plasma reactor for VOC treatment combining three innovative aspects: electroceramic barriers, surface discharges and nanosecond high-voltage pulses.

From an academic and theoretical point of view, RECOVER has provided us with further scientific knowledge in several disciplines involved in this project: cold plasma physics, catalysis, VOC decomposition chemistry, chemical reactor engineering, electroceramics. In particular, experimental work performed by the LPGP allowed us to better understand the behaviour of STREAMER electroceramics, specially concerning their use in a surface discharge configuration. Another important point of RECOVER is the development of models describing the treatment of VOC in a cold plasma reactor. Those models, although simple, allowed us to reproduce and interpret experimental results.

From a technological point of view, the project has conducted to the design, construction and tests of a semi-industrial pilot reactor, installed at the outlet of a spray dryer pilot unit of MANE, which reproduces production conditions, as well as to the development of specific reactors adapted to STREAMER electroceramics. If the pilot reactor, based on a classical dielectric barrier discharge, provided much encouraging results when combining the plasma treatment to a catalyst (abatement over 95 %, by-products elimination), a reactor combining two types of electroceramic barrier discharges had a very promising performance, attaining good abatement levels without the detection of ozone or carbon monoxide at the outlet (without the need for a catalyst).

Finally, from a valorisation point of view, the RECOVER project resulted in some scientific publications among which a PhD thesis, allowed an economic analysis of the cold plasma treatment and paved the way for very interesting perspectives concerning the pilot reactor installed in MANE’s site, the development of electroceramic based reactors or the use of catalyst to improve the performance of the treatment.



1 Introduction

Le projet RECOVER a été conçu dans le cadre de l'édition 2015 de l'appel à projets CORTEA (CONnaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air), dont l'objectif est de faire émerger des projets de Recherche & Développement orientés vers l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et extérieur, en cohérence avec les actions de l'ADEME dans les secteurs de l'agriculture, du bâtiment, de l'industrie et des transports.

Ce projet a eu pour objectif le développement et l'évaluation d'un nouveau réacteur plasma froid pour le traitement de molécules malodorantes. Ce réacteur devrait combiner trois technologies innovantes : les décharges de surface, les barrières électrocéramiques et l'excitation par des impulsions haute-tension très courtes, avec des temps de montée de quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes, dites impulsions « nanoseconde ». Si des travaux précédents montrent l'efficacité de ces technologies, leur combinaison reste originale.

Le projet RECOVER répond à un besoin exprimé par la société MANE, première entreprise française de l'industrie des parfums et des arômes, en termes d'une solution pour le traitement d'odeurs en milieu industriel. Quelques procédés de traitement classiques existant sur le marché ont été analysés par la société MANE, mais chacun présente de forts inconvénients. Les plasmas froids se présentent comme une alternative prometteuse à ces procédés classiques, qui sera explorée par le projet RECOVER. En particulier, les objectifs du projet sont :

- Obtenir un plasma non-thermique à pression atmosphérique dans une configuration de décharge à barrière électrocéramique de surface.
- Eliminer l'odeur désagréable causé par un mélange de mercaptans, acides carboxyliques et cétones, molécules qui entrent dans la composition de certains arômes.
- Construire un réacteur pilote robuste et efficace sur le plan énergétique, destiné à une démonstration de faisabilité à échelle semi-industrielle.

Pour réaliser ces objectifs, quatre partenaires contribuent au projet RECOVER :

- **MANE** : La société MANE a exprimé le besoin d'une méthode efficace pour le traitement des COV présents dans l'air en sortie de certains de ses procédés. Le réacteur pilote sera installé sur une unité pilote sur le site de la société dans la commune du Bar-sur-Loup, dans les Alpes-Maritimes.
- **STREAMER SAS** : la société STREAMER possède un savoir-faire spécifique en matériaux céramique pour applications électriques. La société STREAMER fournira les électrocéramiques nécessaires à la mise en œuvre des décharges à barrière électrocéramique.
- **LPGP** : le Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP), et en particulier son équipe DIREBIO, a des compétences concernant la physique des décharges électriques hors-équilibre et les mécanismes chimiques impliqués dans la décomposition de composés organiques volatils. Le LPGP réalisera des études fondamentales à échelle laboratoire.
- **PERSEE** : l'équipe plasma du Centre PERSEE de MINES ParisTech/ARMINES vise à développer de nouveaux procédés avancés sobres et propres capables d'apporter des solutions aux défis énergétiques et environnementaux. Le rôle du Centre PERSEE dans le projet est de concevoir le réacteur pilote et coordonner cette conception avec les autres activités du projet.

2 Essais en laboratoire

Lors d'essais en laboratoire, nous avons étudié plusieurs aspects liés à la mise en œuvre des décharges à barrière électrocéramique (DBE) en vue d'un traitement de composés organiques volatils.

Nous avons étudié le dépôt d'énergie et la formation d'oxygène atomique dans une décharge à barrière électrocéramique (DBE). Ce type de décharge est caractérisé par l'existence de deux régimes, un premier régime « à faible énergie déposée » et un deuxième régime « à forte énergie déposée ». Dans le premier régime, les décharges sont similaires à celles obtenues avec un diélectrique classique, mais pouvant avoir lieu à des tensions plus faibles. Le deuxième régime est caractérisé par un pic de courant important et une chute brutale de la concentration d'ozone issu de la décharge. Nous avons observé des transitions du premier et vers le deuxième régime après un certain temps d'opération de la décharge. Ces transitions semblent dépendre du type de signal électrique utilisé.



Nous avons aussi mis en œuvre des décharges à barrière électrocéramique en configuration de surface. Cette configuration n'a été possible qu'à condition d'utiliser une tige (diamètre 1 mm) comme électrode haute-tension.

Afin de mieux comprendre le traitement de composés organiques volatils par les décharges à barrière électrocéramique, nous avons étudié le traitement de l'éthanol, de l'acide butyrique et du sulfure de diméthyle par une DBE cylindrique. Nous avons identifié un fort effet positif de la température au sein du réacteur dans le traitement de l'acide butyrique. En effet, lorsque la température augmente de 25 à 200 °C, l'énergie caractéristique (nécessaire pour obtenir un abattement de 63,2 %) passe de 217 J/L à 41 J/L. Un effet similaire est observé pour le traitement de l'éthanol. En ce concerne le DMS, une dégradation totale par la DBE a été observée pour une énergie spécifique de 371 J/L, avec une concentration initiale de 500 ppm. Cette dégradation totale correspond à la formation de 10 ppm de méthane (CH₄), 97 ppm de formaldéhyde (CH₂O) et 6 ppm d'acide cyanhydrique (HCN), ainsi que d'autres composés non quantifiés : les oxydes de carbone, le méthyl nitrate (CH₃ONO₂), l'acide formique (HCOOH), l'acide nitrique (HNO₃), le protoxyde d'azote (N₂O), le sulfure de carbonyle (O=C=S) et le dioxyde de soufre (SO₂).

3 Essais avec réacteur DBE

Le principal verrou technologique pour l'adoption des céramiques STREAMER se situe dans la fabrication de composants de grandes tailles et/ou de formes plus complexes. Un grand travail a été réalisé dans ce sens dans le cadre du projet RECOVER sur différentes étapes du processus de production des pièces en céramique : la préparation des poudres, la mise en forme ou le traitement thermique. Néanmoins, nous avons rencontré nombreuses difficultés, notamment dans la fabrication de plaques de céramique de grandes tailles.

Nous avons donc choisi d'étudier des conceptions de réacteurs qui pourraient s'adapter spécifiquement aux céramiques STREAMER. Cet effort a été mené en parallèle du développement du réacteur pilote avec des diélectriques classiques et l'étude des réacteurs en configuration fil-cylindre en laboratoire. Nous avons abouti à une configuration en deux zones. Une première zone consiste en un réacteur cylindrique spirale générant uniquement des décharges du premier régime. La deuxième zone, placée en aval de la première, consiste en un réacteur multi-pointes de même dimension, en imposant un signal électrique générant des décharges du deuxième régime. Cette configuration à deux zones a donné de résultats très encourageants, avec l'abattement de 60 % d'une concentration de 3000 ppm d'essence d'ail diluée dans de l'air sec. De plus, nous remarquons que la deuxième zone, avec les décharges énergétiques, neutralise les sous-produits (pas de H₂S, O₃ ou CO lorsque les deux zones sont actives) en plus d'augmenter le taux d'abattement.

4 Essais avec réacteur pilote

Nous avons conçu un réacteur pilote pour étudier le traitement de COV par plasma dans un milieu industriel. Ce réacteur utilise des décharges de surface alimentées par des impulsions de tension de type « nanoseconde » et des diélectriques classiques. Le procédé plasma rejetant de l'ozone résiduel, un étage catalytique à base d'un catalyseur minéral a été rajouté afin d'éliminer cet ozone.

Lors des essais réalisés, le traitement par plasma seul a donné des résultats variables. Lors des essais avec des molécules individuelles, le n-butanol, l'éthanol et le DMS, l'abattement de COV avec le plasma seul n'était pas forcément satisfaisant (10 à 50 % pour des énergies spécifiques de jusqu'à 85 J/L). Nous avons aussi traité un arôme constitué d'un mélange de mercaptans, de cétones et d'acides carboxyliques. Cette fois, le plasma a été très efficace pour l'abattement des mercaptans (>99% d'abattement) et des acides carboxyliques (84 à 97 % d'abattement), familles de molécules associées à un fort impact odorant.

Mais les résultats les plus encourageants ont été obtenus avec plasma et catalyseur sont couplés. En effet, le matériau utilisé a montré une extrême affinité pour l'adsorption de très nombreux et différents composés organiques volatils, améliorant significativement la performance du traitement. En effet, avec le couplage plasma-catalyseur nous avons obtenu des taux d'abattement supérieurs à 95 %. De plus, le catalyseur a été capable d'éliminer presque complètement non seulement les sous-produits organiques issus du traitement par plasma, mais aussi le SO₂ dans le cas du traitement de composés soufrés. Ce résultat est d'autant plus important que les sous-produits sont un des inconvénients majeurs du traitement de COV par plasma non-thermique.



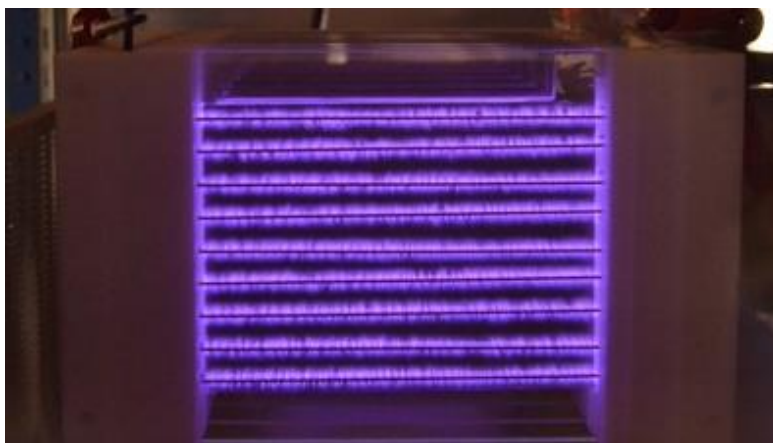


Figure 1 : Décharges à barrière diélectrique de surface pendant les tests préliminaires.

5 Modélisation

Dans le cadre du projet RECOVER, deux modèles ont été développés : un modèle analytique et un modèle basé sur la mécanique des fluides numérique (CFD). Le modèle analytique a été développé suite aux résultats expérimentaux obtenus lors du traitement de l'éthanol dans une décharge à barrière diélectrique de surface en laboratoire. En particulier, ce modèle avait pour objectif de reproduire la dynamique du traitement par les décharges de surface, dont l'efficacité ralentit significativement avec l'augmentation de l'énergie spécifique ou de la fréquence. Il reproduit assez bien les résultats obtenus. De plus, il montre que le transfert de masse au sein du réacteur peut devenir un facteur limitant pour le traitement des COV par plasma non-thermique. Le modèle CFD a été développé avec pour objectif d'évaluer la plausibilité du modèle analytique. Nous avons pu montrer que les deux modèles sont équivalents. De plus, le modèle CFD montre que la diffusivité moléculaire ne peut pas à elle seule expliquer le transfert de masse au sein du réacteur, et donc les résultats expérimentaux obtenus.

6 Conclusion

Le projet RECOVER est considéré par les partenaires comme un succès puisque la plupart des objectifs définis initialement ont été atteints et pour certains mêmes, dépassés.

Sur le plan académique et théorique, le projet RECOVER a permis l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques dans différentes disciplines impliquées dans ce projet : physique des plasmas froids, catalyse, chimie de la décomposition des COV, génie chimique des réacteurs, électrocéramiques.

Sur le plan technologique, le projet a conduit à la conception, la réalisation et tests sur site d'un dispositif pilote à échelle semi-industrielle implémenté en sortie d'une unité pilote d'atomisation de la société MANE, reproduisant les conditions de production à l'échelle industrielle, ainsi qu'au développement de réacteurs dédiés aux électrocéramiques.

Sur le plan de la valorisation, le projet RECOVER a donné lieu à des publications scientifiques dont une thèse de doctorat, a permis la réalisation d'une analyse économique du traitement par plasma froid et a ouvert des extrêmement très intéressantes, à la fois en ce qui concerne le réacteur pilote en place sur le site de la société MANE, le développement de réacteurs dédiés aux électrocéramiques ou l'utilisation d'un catalyseur pour améliorer l'efficacité du traitement.

Perspectives et recommandations

- Le dimensionnement d'un réacteur plasma doit nécessairement passer par la réalisation d'essais en laboratoire, idéalement dans une configuration la plus proche possible de celle prévue à grande échelle. Dans ce sens, une approche *numbering-up* est d'autant plus intéressante, car elle permet de maîtriser au mieux le changement d'échelle.
- Les modèles développés, analytique et CFD, peuvent être utilisés comme support aux futurs essais expérimentaux dans le domaine du traitement de COV par plasma froid.



- D'après nos estimations, les coûts du plasma non-thermique s'avèrent compétitifs avec ceux d'autres technologies de traitement traditionnelles, notamment en ce qui concerne le coût d'opération.
- Pour une technologie de traitement par plasma avec des décharges à barrière diélectrique classique, sans l'utilisation d'électrocéramiques, l'usage d'un catalyseur s'impose pour améliorer les performances du traitement et éliminer les sous-produits.
- L'alimentation électrique est un composant clé du traitement par plasma-catalyse et correspond à une grande partie du coût d'installation. Il est nécessaire d'étudier si une forme d'alimentation plus efficace est capable de compenser un coût d'installation plus élevée, vu que le coût de la puissance électrique consommée est relativement modeste.
- La maîtrise des deux régimes de décharges est un facteur important pour l'application des céramiques STREAMER au traitement de COV. Cette maîtrise permet d'utiliser au mieux les caractéristiques de chaque régime, comme lors de la conception du réacteur à deux zones.
- Il est important de prévoir un traitement préalable pour enlever les poussières en amont du traitement par plasma non-thermique.
- Les difficultés d'analyse chimique ne doivent pas être négligées lors des essais. L'analyse GC-MS, quoique donnant une grande richesse d'informations, est coûteuse. Nous cherchons encore une méthode simple capable de donner des résultats immédiats pour des mélanges de molécules (nez électronique ?).
- Nous pensons que les électrocéramiques auront une place dans la future adoption des traitements par plasma à l'échelle industrielle. La montée en échelle est la prochaine étape.
- Pour une adoption à échelle industrielle, quelque chemin reste à parcourir : tests sur une plus grande variété de molécules, plus d'informations sur le catalyseur notamment en ce qui concerne la saturation et possible régénération, plus d'information sur la formation de sous-produits (particules fines, NO_x, etc).
- Les moyens développés dans le cadre du projet (pilote, technique analytique, réacteurs STREAMER) forment une bonne base pour la poursuite des expérimentations, les résultats étant très encourageants.
- Nous pensons que, de manière générale, il n'existe pas de technique parfaite 100 % adaptée. Nous préconisons plutôt un couplage de procédés (plasma+catalyse, plasma+chauffage ou plasma+lavage).



L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





REACTEUR PLASMA INNOVANT POUR L'ELIMINATION DE COV EN INDUSTRIE

Le projet RECOVER visait à répondre à un besoin en termes de traitement de composés organiques volatils odorants. L'objectif du projet était de développer et de tester un nouveau réacteur pour le traitement de COV par plasma non-thermique avec trois aspects innovants combinés : les barrières électrocéramiques, les décharges de surface et les impulsions haute-tension très courtes, dites « nanoseconde ».

Le projet RECOVER a permis l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques dans différentes disciplines (physique des plasmas froids, catalyse, chimie de la décomposition des COV, génie chimique des réacteurs, électrocéramiques) et a conduit au développement d'un réacteur pilote à l'échelle semi-industrielle et de réacteurs dédiés spécifiquement aux électrocéramiques.

Essentiel à retenir

Développement d'un réacteur pilote, avec des très bons résultats lorsque le traitement par plasma est couplé à un catalyseur.

Réacteurs basés sur des électrocéramiques produisant un plasma à plus basse tension et sans formation d'ozone, résultats très prometteurs.

