

L'odeur des explosifs attire les T-REX

Résumé La détection d'explosifs et des engins explosifs improvisés est au cœur de l'action de lutte contre le terrorisme. Différentes technologies existent et sont d'ores et déjà largement déployées. Afin de compléter l'offre de détecteurs de vapeurs d'explosifs, le CEA a développé le dispositif T-REX. Parfaitement adapté pour confirmer et identifier une menace, il peut également être employé pour les contrôles aléatoires de bagages ou colis de petits volumes. L'originalité de ce dispositif repose sur la synergie de trois technologies de capteurs chimiques de gaz, sur sa fluidique optimisée et des méthodes de traitement du signal « entraînées ». Ses performances permettent au quotidien et à différents utilisateurs de terrain de répondre aux enjeux de sécurité les plus actuels.

Mots-clés **Détection, explosifs, terrorisme, T-REX, capteurs chimiques.**

Abstract **The smell of explosives attracts T-REXs**

Detection of explosives vapors produced by improvised explosive devices is a major subject of concern for counter-terrorism. Several technologies are already well-known and worldwide employed. The CEA has developed a complementary tool for detection and identification of explosives traces for second level controls or random control applications. Combining three chemical sensors technologies, optimized fluidic detection chamber and advanced algorithms, T-REX is a helpful device for security operators.

Keywords **Detection, explosives, terrorism, T-REX, chemical sensors.**

Sentir la menace

Parmi les méthodes permettant de lutter contre le terrorisme, la détection des explosifs et engins explosifs improvisés (EEI) occupe une place prépondérante. Elle peut être conduite à différentes phases du projet d'attaque, de la préparation des explosifs à leur mise en œuvre sur le lieu d'exécution. La multiplicité des configurations opérationnelles (transports en commun, infrastructures critiques, rassemblements de foule, contrôle d'entrée...) et des menaces (type d'explosifs, vecteurs) implique le recours à une grande variété de technologies aux concepts d'emploi différents.

On distingue deux familles de détecteurs. Les détections d'anomalies vont alerter sur la présence d'un objet suspect sans confirmer qu'il s'agit d'un EEI ou explosif. Ce sont essentiellement les technologies d'imagerie ou détection de métaux que l'on peut trouver par exemple dans les aéroports. Elles permettent de visualiser la présence de quantités importantes (« bulk detection »). Afin de confirmer la présence d'un explosif, il faut utiliser des technologies sélectives qui fournissent une indication sur la nature du composé. Ce sont par exemple les technologies de détection de traces qui sont suffisamment sensibles pour détecter de très faibles quantités de matière, invisibles à l'œil nu. Les équipements de type IMS (« ionic mobile spectrometry ») déployés abondamment, en particulier dans les aéroports ou la cyno-détection, entrent dans cette catégorie.

Afin d'apporter une réponse complémentaire aux technologies de détection de traces, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) a développé un appareil de détection de vapeurs d'explosifs portable appelé T-REX (Technologie de Reconnaissance d'Explosifs). Issu du programme interministériel de recherche et développement pour la lutte contre le terrorisme NRBC-E confié au CEA par les pouvoirs publics, ce dispositif est le fruit d'une collaboration entre la Direction des applications militaires (DAM) et la Direction de la recherche technologique (DRT) du CEA. L'objectif porté par les équipes était de développer

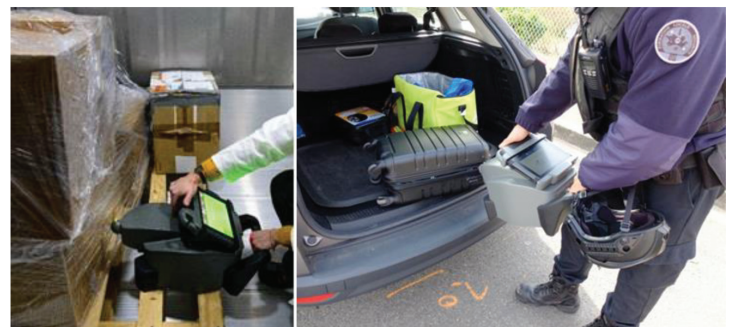


Figure 1 - Contrôles d'un colis et d'une valise avec l'appareil de détection de vapeurs d'explosifs portable T-REX.

un dispositif sensible avec une grande sélectivité permettant de détecter des vapeurs d'explosifs ou leurs précurseurs. Les concepts d'emploi de T-REX sont le contrôle de second niveau (confirmation d'une alerte) ou aléatoires de bagages (sacs à dos, valises) et colis de petits volumes (figure 1).

Détection de traces d'explosifs

Détecter une trace d'explosif peut être réalisé à partir de deux formes de prélèvements : les particules et les vapeurs. T-REX fait partie des technologies d'analyse des vapeurs.

Les explosifs sont difficiles à détecter pour différentes raisons, à la fois physiques et chimiques. D'abord, la pression de vapeur de la plupart des explosifs est faible, parfois extrêmement faible (figure 2).

De plus, les explosifs sont couramment emballés, ce qui limite l'émission des vapeurs. En fonction de l'emballage, leur concentration dans l'air peut être réduite par un facteur 1 000. Seuls les explosifs ayant les plus fortes pressions de vapeur pourraient ainsi être détectés dans ces conditions défavorables de test. De cette difficulté à détecter les explosifs à faible pression de vapeur est née l'obligation pour les fabricants d'ajouter un marqueur à la formulation des explosifs (Convention de Montréal [1]). Les marqueurs autorisés sont

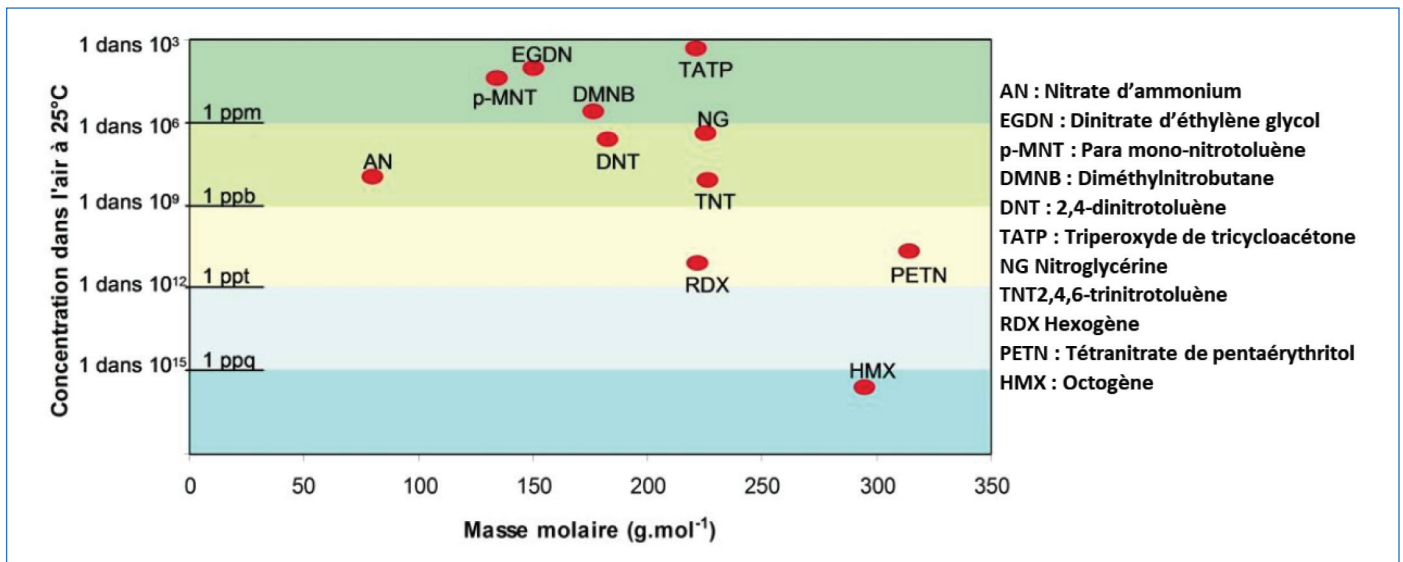


Figure 2 - Concentrations des vapeurs d'explosifs dans l'air saturé à 25 °C.

le dinitrate d'éthylène glycol (EGDN), le 2,3-diméthyl 2,3-dinitrobutane (DMNB), le para-mononitrotoluène (p-MNT ou 4-NT) et l'ortho-mononitrotoluène (o-MNT). Ces composés ont été retenus pour leur pression de vapeur élevée. Mais si ces marqueurs facilitent la détection des explosifs fabriqués conventionnellement, la problématique reste complexe pour les engins explosifs improvisés utilisant des explosifs dits artisanaux. C'est pourquoi les technologies développées doivent proposer une sensibilité supérieure à celle nécessaire pour la détection des marqueurs. En complément des vapeurs générées directement par l'explosif massif, des pollutions laissées par les terroristes sur eux-mêmes ou à l'extérieur du colis peuvent faciliter la détection. En effet, ces résidus d'explosifs peuvent contenir plusieurs microgrammes de particules invisibles à l'œil nu mais détectables par des technologies sensibles.

T-REX : comment ça marche ?

Les capteurs chimiques répondent à presque toutes les exigences requises pour la détection de vapeurs d'explosifs. Leur miniaturisation, leur faible coût et la simplicité de leur utilisation expliquent l'intérêt qu'ils suscitent depuis plusieurs années pour les contrôles dans l'industrie chimique et dans certains laboratoires. L'innovation apportée par T-REX est la combinaison de trois technologies complémentaires de capteurs chimiques de gaz [2-5].

Le principe de fonctionnement des capteurs chimiques de gaz repose sur l'interaction hétérogène de la molécule cible (sous forme de gaz) avec un matériau sensible (généralement sous forme d'une fine couche solide) qui engendre la variation d'une ou de plusieurs propriétés physico-chimiques de ce dernier (figure 3). Ce changement peut être de nature électrique, optique, mécanique, magnétique, ou gravimétrique par adsorption de la molécule cible à la surface du matériau sensible. Il est ensuite converti par un système de transduction en un signal électrique exploitable par un traitement algorithmique adéquat afin de signaler la présence ou non de la molécule cible dans l'atmosphère.

T-REX combine trois technologies complémentaires et peut intégrer jusqu'à quatorze capteurs différents (couple support/matériau sensible) (figure 4). Cette variété permet de détecter

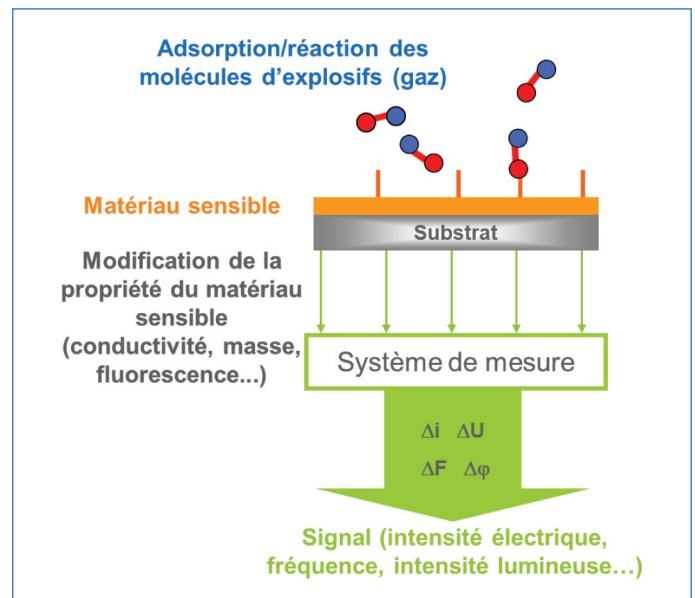


Figure 3 - Principe de fonctionnement d'un capteur chimique de gaz.

un nombre de menaces important, augmente la sélectivité et réduit à un niveau très faible le taux de fausses alarmes. La détection est réversible, n'engendre pas de saturation et assure par conséquent une disponibilité optimale du système. La chambre de détection est le cœur du dispositif ; son design fluide optimise la circulation des vapeurs aspirées par l'appareil et permet d'exposer l'ensemble des capteurs aux vapeurs ambiantes. Elle intègre les trois types de capteurs : deux microbalances à quartz (MBQ), huit capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) et une lame de capteurs fluorescents (OPTO) disposés dans les modules présentés figure 5. Sans contact direct avec la cible lors de la mesure (pas besoin de frottis comme avec les équipements actuels) et limitant ainsi le risque pour les opérateurs, T-REX détecte des concentrations jusqu'au ppb par simple aspiration d'air. Il permet de détecter et d'identifier rapidement (en 30 s à 2 min en fonction de la vapeur cible et de sa concentration dans l'air prélevé) les vapeurs d'une large gamme d'explosifs et de précurseurs d'explosifs (notamment les nitroaliphatiques, nitroaromatiques, esters nitriques et peroxydes). Sa réponse

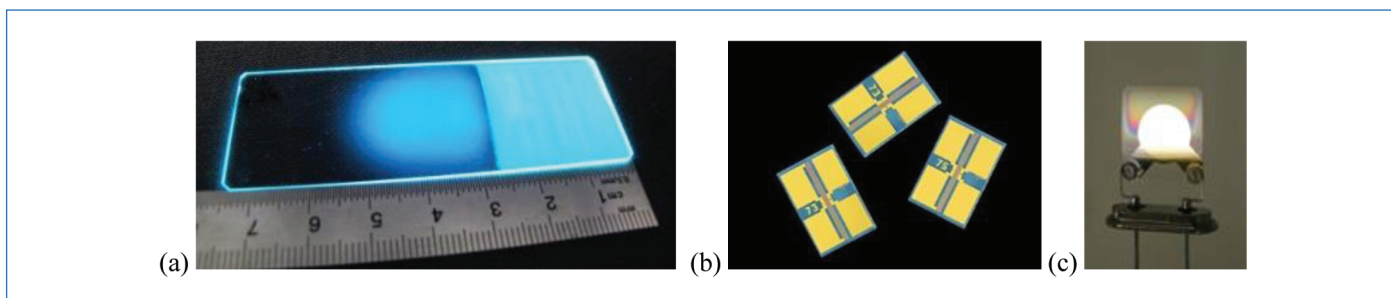


Figure 4 - Les trois types de capteurs utilisés dans T-REX : (a) lame déposée de matériaux sensibles fluorescents, (b) capteurs à ondes acoustiques de surface, et (c) microbalance à quartz piézoélectrique.

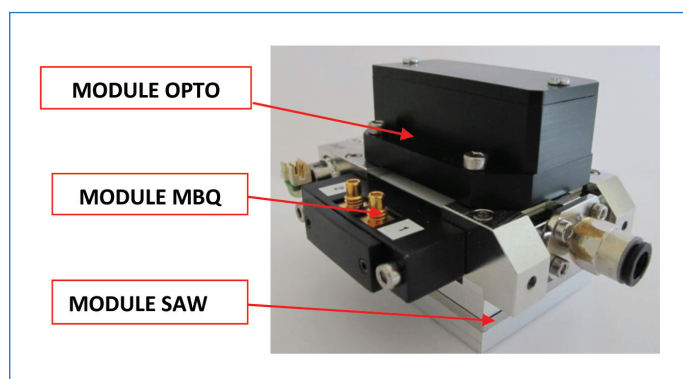


Figure 5 - Chambre de détection du T-REX.

se fait via le déclenchement d'alarmes visuelles et sonores lors de la détection d'une menace.

D'abord évalué en laboratoire, les chercheurs ont travaillé en étroite collaboration avec les utilisateurs terrain. Industrialisé dans une première version, T-REX a ainsi pu démontrer sa robustesse et son efficacité lors de tests réalisés dans des environnements opérationnels (métro, gare) en France et à l'étranger.

L'aventure continue

Le détecteur T-REX est désormais mature dans une version déployable en conditions réelles. Il permet d'apporter une réelle innovation pour le contrôle de second niveau, sur des petits volumes. Il est ainsi bien adapté à la sécurisation des sites sensibles, en complément d'autres technologies de détection, comme par exemple l'imagerie à rayons X ou la détection de particules par spectrométrie à mobilité ionique. Toutefois, les enjeux de sécurité sont plus larges, et les utilisateurs de T-REX cherchent à atteindre d'autres concepts d'emploi. En particulier, la capacité à contrôler des grands volumes pour l'analyse du chargement de camions et utilitaires, ou encore la détection d'objets cachés dans des véhicules, constitue des demandes fortes d'évolution. Les objectifs technologiques associés à ces nouveaux besoins sont cependant ambitieux. Un gain de plusieurs décades en sensibilité est nécessaire, ce qui suppose de passer de la gamme des ppb (10^{-9}) aux ppt (10^{-12}). Cette sensibilité au ppt est en fait celle atteinte classiquement par les appareils de laboratoire, par exemple en spectrométrie de masse. Dès lors, il sera difficile pour un système de terrain comme T-REX, bien que très optimisé, de s'approcher de ces niveaux de performance.

Pour contourner cette problématique, il est nécessaire d'augmenter la quantité de cible analysée, en concentrant les

vapeurs prélevées, par exemple pour permettre à T-REX, bien que très optimisé, de s'approcher de ce niveau de performance. Un prototype (de concentrateur) est actuellement en cours de développement.

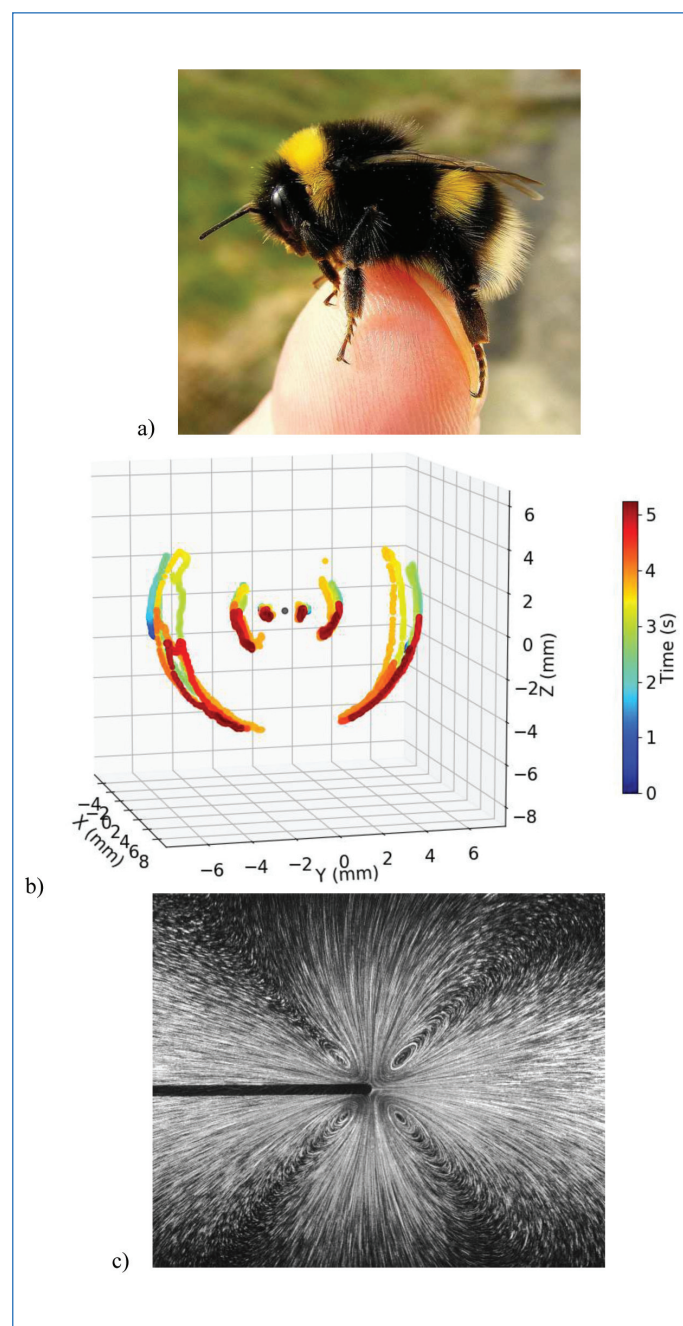


Figure 6 - Bioinspiration pour la détection de traces d'explosifs : a) bourdon, b) reconstruction 3D du mouvement des antennes du bourdon, c) visualisation de la circulation acoustique des flux d'air d'une antenne robot bioinspirée par le bourdon.

Une autre évolution portera sur l'ajout de nouvelles cibles détectables par T-REX. Ce système « renifle » les vapeurs ; pour les familles d'explosifs très peu volatiles comme la pentrite ou l'hexogène, la concentration en molécules à détecter reste faible, voire très faible. Pour y remédier, un accessoire complémentaire a été développé ; il permettra d'analyser également les particules d'explosifs après collecte sur les surfaces d'intérêt. Il s'agit, en définitive, d'un petit « four » permettant de forcer le passage à l'état gazeux des molécules constituant ces particules, la pression de vapeur saturante d'une substance augmentant avec la température.

Enfin, un autre axe d'évolution en cours vise à rendre T-REX encore plus portable, avec pour objectif une réduction de sa taille et de sa masse d'au moins 50 %. Ces travaux seront menés prochainement avec un nouveau partenaire industriel. Par ailleurs, certains développements plus amonts peuvent laisser espérer, à terme, d'autres améliorations. Une des pistes, peut-être la plus surprenante, est celle du biomimétisme. Comme abordé précédemment, l'optimisation du prélèvement sera centrale pour les gains en performance espérés. La nature a ses champions de la détection (chiens, insectes...). Le bourdon, par exemple, par un mouvement complexe de ses antennes, dirige les odeurs vers son système olfactif (figure 6a). Ces mouvements ont été étudiés et une reconstruction 3D par un réseau de neurones profond a pu être établie (figure 6b). Une antenne robot vibrante a ensuite permis de reproduire artificiellement ces mouvements (figure 6c) et a conduit au design d'un prototype de nez

bioinspiré pour T-REX. Cette innovation laisse espérer un gain sur la vitesse du flux d'air de plus de 160 % [6].

L'auteur remercie Cinta Pépin, Alice Damerville, Alain Bry, Lionel Hairault, Aurélien Mayoue, Eric Pasquinet, Nicolas Claverie et Pierrick Buvat pour leur contribution aux travaux de développement de T-REX.

[1] Décret no 99-460 du 2 juin 1999 portant publication de la Convention sur le marquage des explosifs plastiques et en feuilles aux fins de détection, signée à Montréal le 1^{er} mars 1991, MAEJ9930030D, *JORF*, 1999, n° 128, p. 8296.

[2] P. Montméat, F. Thery-Merland, L. Hairault, Capteurs chimiques pour la détection d'explosifs, *Techniques de l'Ingénieur*, 2003, IN14, p. 1-8.

[3] S. Clavaguera et al., La détection d'explosifs : état de l'art et développement de capteurs fluorescents performants, *L'Act. Chim.*, 2009, 330, p. 14-19.

[4] P. Montméat et al., Procédé de détection de d'identification d'un analyte présent dans un milieu gazeux, Brevet FR 2971336, 2011.

[5] P. Montméat et al., Capteurs chimiques comprenant des polymères conjugués fluorescents comme matériaux sensibles, et leur utilisation pour la détection ou le dosage de composés nitrés, Brevet FR 2868842, 2012.

[6] N. Claverie, Olfaction active bioinspirée de vapeurs pour la détection de substances spécifiques, Thèse de doctorat, Université de Tours, 2022.

Chrystel AMBARD*, **Christophe BOSSUET**, et **Didier POUILLAIN**,
CEA, DAM, Le Ripault, Monts.

* chrystel.ambard@cea.fr



Avril 2018 : obus chimique allemand fuyard de la Première Guerre mondiale découvert sur le champ de bataille du Vieil Armand (68). © Sécurité civile – Déminage Colmar.