

Les nouvelles technologies d'investigation des explosifs

Bruno Vanlerberghe est chef des interventions et risques chimiques du pôle Explosifs du Laboratoire Central de la Préfecture de Police (LCPP¹). Il est aussi membre scientifique du réseau des laboratoires Biotox-Piratox, adjoint Chimie au détachement central interministériel d'interventions techniques et expert technique en sûreté aérienne pour la détection des explosifs.

Pierre Charrue travaille à la direction des applications militaires du CEA². Il est spécialiste dans le domaine des explosifs, et collabore avec plusieurs entités étatiques ainsi qu'avec différentes instances internationales (UE, OTAN).

Mieux vaut prévenir qu'intervenir. Les besoins opérationnels imposent donc la mise en œuvre de systèmes de détection d'explosifs et d'engins explosifs pour la prévention des attentats, que ce soit dans la sécurisation du transport aérien ou dans celle d'infrastructures critiques. Malheureusement, la prévention échoue parfois, et il faut aussi pouvoir disposer de

moyens d'analyses et d'investigation post-attentats afin de poursuivre devant la Justice les personnes coupables de tels actes.

Dans la suite de ce chapitre, nous aborderons ces différentes thématiques en les positionnant au cœur de l'organisation générale des dispositifs de sécurité et de la logique qui préside à leur mise en œuvre.

1. Le LCPP est un organisme scientifique pluridisciplinaire placé sous l'autorité du Préfet de Police qui intervient à Paris et en petite couronne sur toutes les questions de sécurité des personnes et des biens, de salubrité et de pollution (site : www.lcpp.fr). Voir le [Chapitre de P. Carlotti](#), dans *Chimie et expertise, sécurité des biens et des personnes*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

2. www.cea.fr

1 Explosifs et engins explosifs (par Bruno Vanlerberghe)

1.1. Un peu d'histoire

La fabrication des explosifs est connue depuis la nuit des temps puisque la poudre noire fut découverte en Chine en 220 avant Jésus-Christ (*Figure 1*). En 690, les arabes ont utilisé la poudre noire au siège de La Mecque. Et c'est au XIII^e siècle qu'elle est arrivée en Europe.

La poudre noire est un mélange de salpêtre, c'est-à-dire du nitrate de potassium, ou éventuellement du nitrate de sodium, auquel sont ajoutés 15 % de charbon de bois, qui fournit le carbone, et 10 % de soufre. Cette recette simple a fait merveille pendant de nombreux siècles.

1.2. Qu'est-ce qu'un explosif ?

1.2.1. Généralités

Un explosif est un assemblage d'atomes oxydants et d'atomes réducteurs séparés les uns des autres. Les atomes réducteurs peuvent être du carbone, de l'hydrogène ou du soufre. Les atomes oxydants sont essentiellement constitués d'oxygène ou d'atomes d'halogènes tels que le fluor ou le chlore.

Au sein d'une molécule explosive, les atomes d'oxydants et réducteurs sont séparés par un atome neutre qui est l'azote. De tels groupements chimiques sont appelés « **groupements explosophores** » puisqu'ils sont à l'origine du comportement explosif de ces matériaux.

Parmi ces groupements explosophores, on trouve $-\text{NO}$, $\text{C}-\text{NO}_2$, $\text{C}-\text{O}-\text{NO}_2$, $\text{N}-\text{NO}_2$. Il en existe donc de plusieurs types que nous ne détaillerons pas ici.

Les groupements explosophores comme NO_2 sont les réserves d'oxygène actif. Lorsque l'on casse ces liaisons, les atomes d'oxygène se recombinaient instantanément avec les atomes réducteurs présents (carbone, hydrogène, soufre) pour former des molécules simples de type H_2O , CO , CO_2 , en libérant l'énergie de formation de ces molécules de manière très rapide. L'ensemble de ces molécules constitue ce que l'on appelle les **produits de détonation**. Ces gaz chauds, en se détendant dans l'environnement immédiat de la décomposition, conduisent à la formation d'une onde de choc qui va générer des effets mécaniques et thermiques très importants sur l'environnement. C'est ce que l'on regroupe généralement sous le vocable « d'explosion ».

Les explosifs peuvent être utilisés pour générer une onde de choc aérienne et/ou pour projeter des matériaux à grande vitesse (cas des obus d'artillerie, par exemple). Ces projectiles engendrent des dégâts très importants sur l'environnement plus ou moins lointain de l'explosion.

Les substances explosives existent sous deux formes :

- les **substances explosives** en mélange qui fonctionnent par association de différents constituants complémentaires pour former un système oxydo-réducteur métastable.

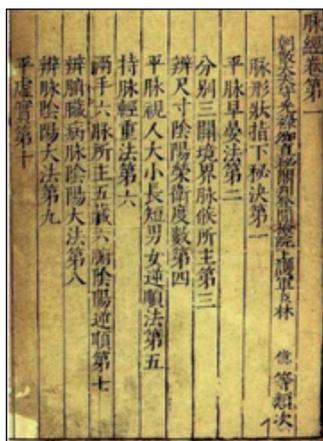


Figure 1

La poudre noire a été découverte en Chine en 220 av. J.-C.

C'est le cas par exemple de la poudre noire, d'un mélange de nitrate d'ammonium et de fioul (ANFO), ou encore de chlorate (ClO_3^-) et de sucre ;

– les **composés explosifs** : ce sont des corps purs qui possèdent au sein de leurs structures moléculaires à la fois des groupements oxydants et des groupements réducteurs qui leur confèrent les propriétés annoncées précédemment.

La **Figure 2** présente des exemples de familles de telles molécules explosives :

- des esters nitriques, comme la nitroglycérine (NG), la pentrite (PETN) ;
- les nitroaromatiques, comme le Tétryl, le TNT ;
- les nitramines, comme le RDX, le HMX ;
- les explosifs peroxydes, comme le TATP, utilisé fréquemment par des groupes terroristes.

1.2.2. Classification des explosifs

On peut aussi les classer les explosifs selon deux types (**Figure 3**) :

– les **explosifs primaires**, qui sont des explosifs extrêmement sensibles. Ils n'ont qu'un seul régime de décomposition : la détonation. Ils explosent extrêmement facilement et ils constituent l'explosif majoritairement présent dans les détonateurs commerciaux, même si on y ajoute un peu d'explosif secondaire ;

– les **explosifs secondaires** sont eux beaucoup plus diversifiés puisqu'on retrouve les produits décrits précédemment, c'est-à-dire soit des compositions explosives type

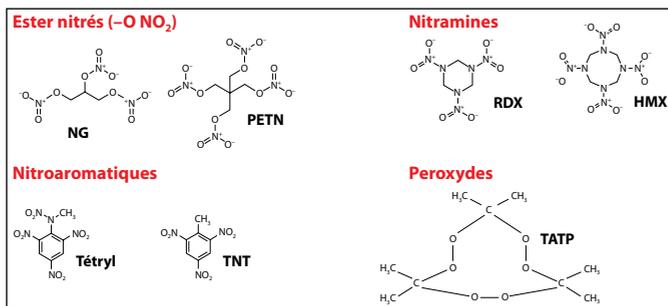


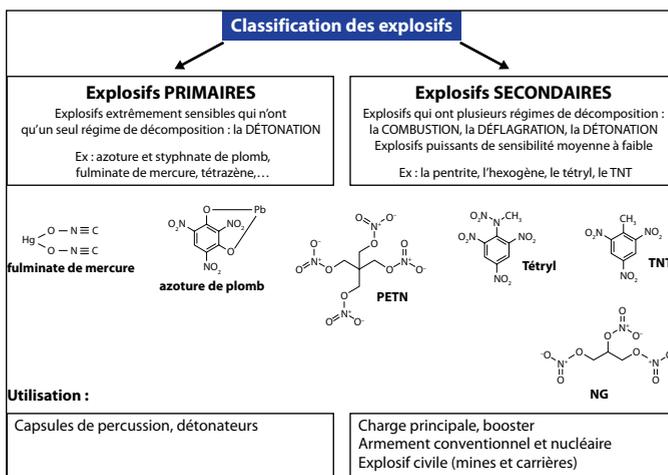
Figure 2

Exemples de molécules explosives.

nitrate-fioul, soit des corps purs comme la pentrite et le tétryl. Ils peuvent présenter plusieurs régimes de décomposition : la combustion, la déflagration, la détonation, sachant que l'on peut passer du régime de combustion au régime de détonation selon l'environnement du matériau explosif. On les trouve essentiellement dans les charges principales qui constituent les munitions. Ils sont aussi utilisés dans des applications civiles dans les mines et carrières, et aussi comme « booster » pour favoriser l'amorçage de certains explosifs très peu sensibles.

Figure 3

Les explosifs primaires et les explosifs secondaires.



1.2.3. Les régimes de décomposition des explosifs

– **La combustion, la déflagration** : la zone de réaction se déplace dans le milieu initial par conduction thermique. Le volume, la pression et la vitesse matérielle varient de façon continue, et les vitesses caractéristiques sont de l'ordre de quelques millimètres par seconde à quelques centaines de mètres par seconde ;

– **La détonation** : la vitesse de réaction se déplace dans le milieu initial par une onde de choc. Le volume, la pression, la température et la vitesse matérielle subissent une discontinuité (Figure 4). Les vitesses caractéristiques sont de plusieurs kilomètres par seconde.

Les quelques exemples suivants illustrent les différences de vitesses de propagation du front de réaction : pour la poudre noire c'est 400 mètres par seconde ; pour le nitrate-

fioul, c'est déjà 3 500 mètres par seconde ; pour la dynamite, c'est 6 500 mètres par seconde, et pour la pentrite, 8 000 mètres par seconde.

1.2.4. Les composants d'un engin explosif artisanal

Les composants d'un engin explosif artisanal sont reportés sur la Figure 5. Le système de déclenchement peut être un téléphone portable, une minuterie, un système à pression, et même une pince à linge qui, sous ouverture d'un contact, vont provoquer l'explosion.

La source d'énergie est généralement une pile.

L'initiateur est un détonateur, et la charge explosive peut être de plusieurs centaines de grammes à plusieurs kilos, voire plusieurs centaines de kilos s'il s'agit, par exemple, d'un véhicule qui est piégé.

Tout cet ensemble est dissimulé dans un emballage. Certains systèmes ont deux emballages, le premier pour la charge explosive (par exemple une boîte Tupperware ou une bouteille de gaz), et le second pour le transport de l'ensemble est très varié, le but étant d'être le plus discret possible.

Figure 4

Déplacement d'une onde de choc dans une détonation.

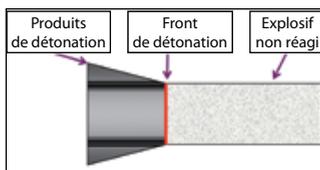
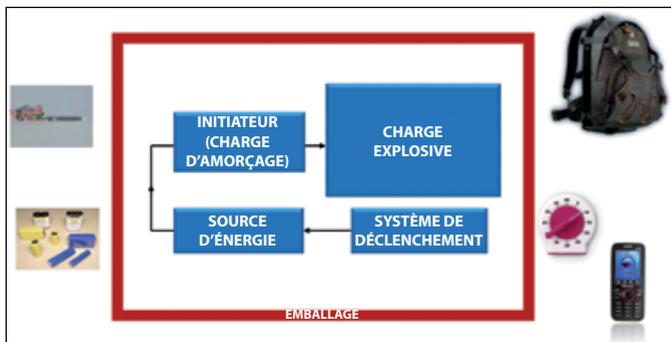


Figure 5

Composants d'un engin explosif artisanal.



1.3. Les explosifs : une menace permanente

Les attentats ne datent malheureusement pas d'aujourd'hui. La première « machine infernale » explose en 1800, sur le passage de la voiture du Premier Consul Napoléon (**Figure 6A**). En 1835, a eu lieu un attentat à l'explosif contre Louis-Philippe, qui devait passer en revue la garde nationale sur les grands boulevards, à Paris (boulevard du Temple, **Figure 6B**). En 1858, Félice Orsini et quatre complices jettent trois bombes sur le cortège Impérial qui se rendait à l'Opéra (**Figure 6C**). À l'époque, il n'y avait ni moyens de détection, ni moyens d'analyses pour prévenir ces attentats !

Plus récemment, malgré les moyens de prévention mis en place, plusieurs attentats terribles restent dans la mémoire collective : Madrid en 2004 (192 morts, 1750 blessés), Londres en 2005 dans le métro et dans les bus (52 morts, 700 blessés), Oslo en 2011 (une voiture garée devant un bâtiment officiel contenant plusieurs centaines de kilos d'explosifs), Boston lors du marathon de Boston (un sac déposé parmi la foule), Tripoli en 2013 (une voiture explose devant l'ambassade de

France), et enfin Volgograd en 2013. On retrouve le principe, souvent utilisé par les terroristes, d'attaquer les réseaux de transports, que ce soit les bus ou les gares.

Pour déjouer les mesures de prévention mises en place, les terroristes font preuve d'inventivité qu'il faut essayer d'imaginer : par exemple l'utilisation de substances liquides en 2006, ou encore la tentative de dissimulation des explosifs dans une imprimante transportée par un vol commercial en 2010.

1.4. Les sources d'approvisionnement des explosifs

La **Figure 7** résume les principales sources d'approvisionnement des explosifs.

Ils peuvent être dérobés dans les mines et carrières, bien que ces lieux soient de plus en plus protégés. Chaque année pourtant, plusieurs centaines de kilos d'explosifs sont retrouvés lors de perquisitions réalisées dans des affaires de banditisme, essentiellement sous forme de pains d'explosifs issus de trafics principalement en provenance de l'est de l'Europe.

La littérature sur la fabrication d'explosifs artisanaux est

Figure 6

A) Attentat contre Napoléon, le 24 décembre 1800, 22 morts et 56 blessés ; B) attentat contre Louis-Philippe, le 28 juillet 1835, 18 morts et 42 blessés ; C) attentat contre Napoléon III, le 14 janvier 1858, 8 morts et 150 blessés.





Figure 7

Les sources d'approvisionnement des explosifs sont multiples.

malheureusement extrêmement riche, notamment via Internet où l'on trouve des informations plus ou moins pertinentes. Les terroristes utilisent les explosifs parce qu'ils sont malheureusement encore trop facilement accessibles.

1.5. Les cibles potentielles d'attentats

La prévention exige de prendre en compte et de protéger les principales cibles potentielles des attentats, que sont essentiellement la foule, les bâtiments publics, les stades, les transports de masse (trains, métros et avions) (**Figure 8**). Les derniers attentats en France datent des années 1990. Il y a eu également dans un passé récent des attaques contre les transports maritimes comme celle du golfe d'Aden, dans

les années 2000, où un petit bateau est venu accoster un pétrolier avec l'intention de le couler.

Les autres cibles potentielles sont les infrastructures critiques de fonctionnement des institutions nationales comme les administrations, les industries, les industries à risques, les centrales nucléaires.

2 La détection des explosifs

(par **Pierre Charrue**)

La lutte contre le terrorisme est essentiellement faite en amont (**Figure 9**). Les services de renseignements de la police et de la gendarmerie sont les plus efficaces dans cette lutte et permettent heureusement d'arrêter la plupart des attaques.

Malheureusement, il demeure toujours un risque qui néces-



Figure 8

Les cibles potentielles des attentats : stades, foule, bâtiment public, transport de masse, aviation, transport maritime, administration, industrie, centrale nucléaire, police, renseignement, etc.

Sources : Wikipédia : métro : Licence CC-BY-SA-3.0, Pline ; piste d'avion : Licence CC-BY-2.0, Phillip Capper ; cargo : Licence CC-BY-SA-2.5, Ra Boe.

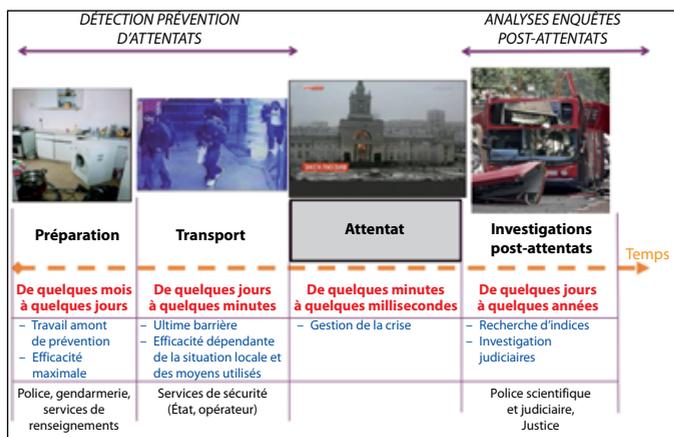


Figure 9

Les différents moments de détection d'explosifs.

site de mettre en place une ultime barrière pour que les porteurs de ces engins de mort soient détectés avant qu'ils n'arrivent dans les infrastructures et qu'ils n'atteignent leur cible. Les moyens utilisés sont des moyens de détection locaux comme ceux des aéroports et de toutes les infrastructures protégées.

Lorsque la pré-détection a malheureusement échoué, il faut gérer la crise et diligenter le travail d'investigation post-attentat (ce qu'on appelle aussi le « forensic »), où des moyens d'analyses de traces sont mis en œuvre au profit de l'enquête pour remonter les filières et arrêter les auteurs de ces attaques.

2.1. Les défis de la détection des explosifs

Il faut prendre en compte le fait que les configurations et conditions d'emploi des engins explosifs sont extrêmement variables, et qu'il y a par conséquent de nombreux défis à relever pour détecter

des explosifs dans des infrastructures.

D'abord, il faut **localiser la charge**, qui peut être par exemple une bombe humaine, une valise abandonnée, ou encore un véhicule piégé.

Il faut **tenir compte de la diversité des environnements** : les conditions pour protéger une infrastructure critique à partir de l'extérieur sont différentes de celles à mettre en œuvre dans un aéroport.

Il faut **déjouer** les tentatives des auteurs d'attentats qui masquent la présence d'explosifs en utilisant **des emballages particuliers, des leurres**, etc. Pour que le système soit opérationnel, il faut éviter les fausses alarmes, qui, en plus d'aller l'encontre de l'objectif recherché, peuvent avoir un impact important sur l'exploitation des infrastructures critiques, en particulier dans le cas du transport de masse.

Il faut **une réponse rapide et adaptée à la diversité des configurations**. Il existe déjà une très grande variété d'explosifs, et malheureuse-

ment cette menace est en perpétuelle évolution. De plus, les formes physiques de ces matériaux explosifs sont très variables : des solides, des gaz, des liquides, des gels, etc. Il faut savoir sonder à travers des vêtements, des emballages, des parois. Il faut généralement maîtriser plusieurs techniques simultanément pour éviter les effets de masquage, définir les scénarii d'utilisation et connaître les limites d'emploi de ces techniques dans les conditions opérationnelles.

Toutes ces conditions montrent qu'il n'y a pas de solution simple et unique pour répondre au problème, et qu'il faut adapter les moyens de détection aux conditions du terrain, ainsi qu'à la nature des menaces à identifier. Pour ce faire, différents moyens de détection, basés sur des principes physiques variés, ont été développés ou sont en cours de développement dans les laboratoires, afin de faire face à ces différents défis que représente la détection des explosifs.

2.2. Les moyens de détection

On a deux grandes catégories de détecteurs (**Figure 10**) :

- les détecteurs actifs : ils émettent un signal qui interagit avec la cible, et le signal ainsi modulé est capté, décrypté et analysé pour voir s'il y a lieu ou pas de déclencher une alerte ;
- les détecteurs passifs sont ceux où le corps ou l'objet suspect émet lui-même le signal qui peut les perdre. Ce sont par exemple l'émission de vapeurs de matériaux explosifs, ou encore des variations de températures sur une personne qui révèlent la présence d'un objet masqué, etc.

2.2.1. Principe du détecteur actif

Dans un détecteur actif (**Figure 11**), l'émetteur émet une onde électromagnétique vers une personne ou un objet à contrôler ; cette onde peut être soit réfléchiée par l'objet, soit transmise à travers l'objet. Dans les deux cas, l'onde sera modulée par rapport à l'onde incidente. Dans le cas de la réflexion d'onde,

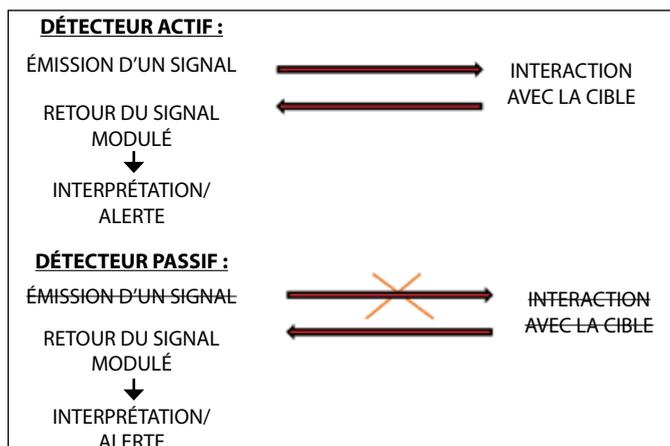


Figure 10

Les deux grandes catégories de détecteurs.

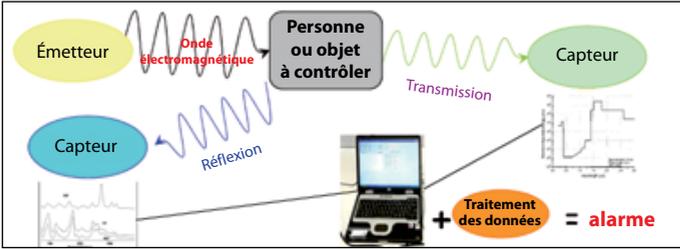


Figure 11

Principe du détecteur actif.

on obtient essentiellement un spectre de la surface ou un spectre à faible profondeur. En transmission, l'onde traverse l'objet ou la personne, derrière lesquels on récupère un signal modulé qui présentera des caractéristiques exploitables pour une interprétation.

La **détection** peut être faite à distance dans les deux modes par des **capteurs dédiés**. On peut avoir des réponses multiples : de l'imagerie et, par exemple, une réponse spectrale dans certaines conditions. Les temps de détection peuvent être relativement rapides (inférieurs à la seconde). Et l'on peut faire des contrôles à poste (personne par personne) ou en masse, c'est-à-dire à la volée. Mais il existe toujours une possibilité de masquage pour chaque type de technologie considérée. Il existe des technologies très efficaces mais elles ne sont pas toujours applicables sur l'homme, c'est le cas des technologies d'analyse par rayons X (« *RX backscattering* »), que l'on ne peut pas utiliser en France.

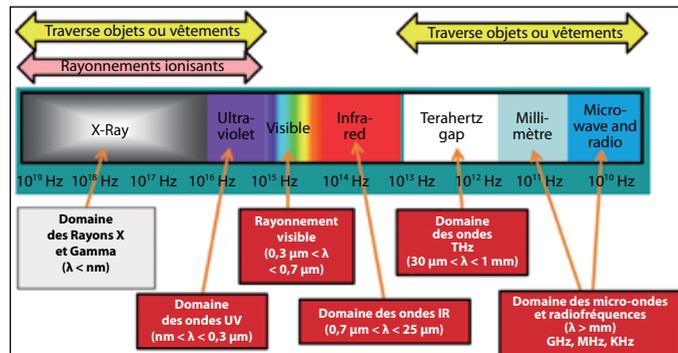
D'une manière générale, les machines doivent respecter une réglementation extrêmement précise et stricte, applicable à la manipulation

de ces faisceaux-sondes, en présence du grand public.

La **Figure 12** présente le domaine spectral des ondes électromagnétiques utilisées ou utilisables. À gauche, figurent les rayonnements durs à très courtes longueurs d'ondes ou rayonnements ionisants (rayons X et rayonnement UV), qui peuvent traverser des objets ou des vêtements, ce qui peut être intéressant pour sonder des bagages, des colis ou examiner à distance certains objets suspects. Cependant, ces rayonnements ne sont évidemment pas utilisables sur des personnes ou sur des animaux. À droite, on trouve les rayonnements de plus grandes longueurs d'ondes, qui peuvent traverser des vêtements avec plus ou moins de facilité, et

Figure 12

Domaine spectral des ondes électromagnétiques utilisées dans les détecteurs actifs.



vont également apporter des informations complémentaires pertinentes. Au milieu, se trouvent les rayonnements dans le visible et l'infrarouge, également utilisés pour obtenir en réflexion essentiellement des informations de surface (spectres de réflexion).

2.2.2. Principe du détecteur passif

Un détecteur passif est applicable sur l'homme puisqu'aucune onde ne le traverse (Figure 13). Le masquage est plus difficile dans la mesure où l'on est vraiment proche de l'objet ou de la personne à contrôler, et l'on peut faire du contrôle à poste. Ce sont des techniques qui présentent un bon niveau de sensibilité, voire de sélectivité. En cas d'alarme, la détection est vérifiée par les prélèvements au contact (par exemple typiquement ce qui est fait dans les aéroports), car il n'y a pas de localisation de la menace. On peut toutefois avoir des temps de mesure longs, et une robustesse d'emploi qui

dépend des conditions d'utilisation et d'environnement opérationnel.

2.3. Les différents types de détecteurs actifs

2.3.1. Détecteur à rayons X

Les détecteurs actifs utilisant les rayons X sont ceux utilisés dans les aéroports pour l'inspection des bagages. Ces systèmes permettent d'identifier avec une bonne précision la forme des objets, d'en mesurer la densité, et un numéro atomique moyen Z, qui est un paramètre physique caractéristique d'un matériau.

Le CEA a développé d'autres types de technologies, en particulier des capteurs spectrométriques qui permettent, en plus, d'analyser le spectre rayons X de l'objet examiné (Figure 14).

Mais cette technologie RX présente plusieurs inconvénients. Elle ne peut être mise en œuvre uniquement que pour des contrôles à poste, et

Figure 13

Principe du détecteur passif.

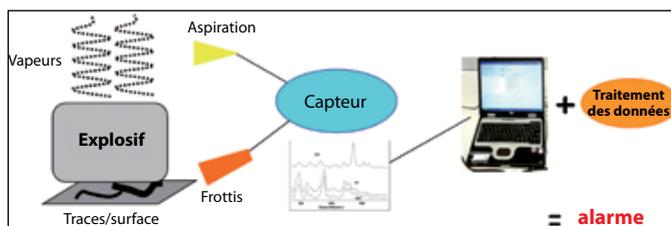


Figure 14

Utilisations du détecteur à rayons X pour les objets (A) et pour l'homme (B) (« back scattering »).



il faut que ces machines soient servies par un personnel bien formé. Les coûts d'acquisition sont relativement significatifs. De plus, pour des problèmes d'éthique et de réglementation, ce type de détecteur n'est pas facilement utilisable sur l'homme : sur la **Figure 14B** est représenté un système que l'on appelle le *back scattering*, qui utilise du rayonnement X rétrodiffusé³. Ces systèmes ont essentiellement été développés aux États-Unis et mis en place dans certains aéroports américains (à Washington par exemple), mais viennent d'être retirés suite aux plaintes répétées des ligues de défense citoyenne américaines.

2.3.2. Détecteur à rayonnements neutroniques

Le détecteur à rayonnement neutronique utilise le principe de la diffusion élastique en réflexion et transmission du rayonnement⁴. C'est une technologie qui permet d'accéder à essentiellement deux paramètres : les mesures de densité et la composition élémentaire d'un objet suspect (mesure du Z moyen), dans un endroit particulier qui aura été préalablement repéré. Cette technologie fonctionne bien ; des prototypes ont été étudiés depuis longtemps, et, il y a quelques années,

développés en particulier pour des contrôles de conteneurs maritimes (**Figure 15**). Malheureusement, cette technologie a du mal à s'implanter. Aujourd'hui, ce sont encore des prototypes qui sont utilisables pour contrôler des bagages abandonnés. Ces technologies, assez intéressantes, restent malgré tout difficiles à mettre en œuvre en France du fait d'une réglementation compliquée. Les Russes, en revanche, l'utilisent en association avec des rayons X pour le contrôle des bagages dans certains aéroports.

2.3.3. Détecteur à ondes infrarouges

Différents systèmes travaillent dans le domaine des ondes infrarouges (**Figure 16**). Les technologies à grande distance permettent par exemple d'explorer la surface d'un véhicule ou l'arrière d'un camion ou d'une camionnette. L'imagerie infrarouge peut être utilisée pour repérer certaines fréquences caractéristiques des molécules explosives présentes sur une surface ; ces images sont souvent superposées aux images réelles obtenues par vidéo. Cette technologie est utilisée pour détecter et localiser les traces de certains explosifs qui peuvent même être ainsi identifiés.

L'Institut de recherche allemand Fraunhofer a développé une technologie de ce type appelée IRLDEX. Les États-Unis utilisent également l'imagerie infrarouge dans une configuration comparable. On peut aussi utiliser l'infrarouge en mode cohérent grâce aux lasers, et cela dans



Figure 15

Détecteur à rayonnements neutroniques.



Figure 16

Détecteur à ondes infrarouges.
Source : Fraunhofer Institute.

3. Le rayonnement X rétrodiffusé est un rayon X qui est dévié de sa trajectoire pour revenir vers sa position initiale.

4. La diffusion élastique en réflexion et transmission de rayonnement est un phénomène complexe d'interaction entre le matériau analysé et le rayonnement qui le traverse.



Figure 17

Utilisations du détecteur à ondes térahertz.

le cadre de la réglementation. Celle-ci impose que les lasers qui n'appartiennent pas à la classe 1⁵ ne puissent pas être utilisés en présence de public (pour la protection des yeux). Ne sont utilisables que les lasers « eye safe ».

2.3.4. Détecteur à ondes térahertz

Le domaine des ondes térahertz⁶ correspond aux fréquences entre 500 et 5 000 gigahertz (Figure 17). Cette technologie de détection peut être utilisée en mode actif ou en mode passif. Elle permet de faire de l'imagerie sur des objets cachés sous des vêtements. Toutefois, l'inconvénient majeur de ce domaine de fréquences est qu'il faut tenir compte des bandes de rotation⁷ des petites molécules présentes dans l'air. Il

5. On classe les lasers selon une échelle de 1 à 4, où les lasers de classe 1 sont les moins dangereux et nécessitent peu de précaution, tandis que les lasers de classe 4 peuvent provoquer un incendie ou des brûlures de la peau.

6. $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz} = 1\,000\,000\,000\,000 \text{ Hz}$.

7. La bande de rotation d'une molécule est la partie du spectre caractéristique du mouvement de rotation de cette molécule sur elle-même.

faut donc travailler sur des fenêtres spectrales⁸ bien particulières. Cette technologie est néanmoins très intéressante pour un contrôle de second niveau, par exemple pour identifier sous une chemise un objet suspect. Elle permet aussi, par exemple, dans le cadre d'une technologie développée au Japon, de rechercher et identifier la présence de poudres suspectes dans des enveloppes.

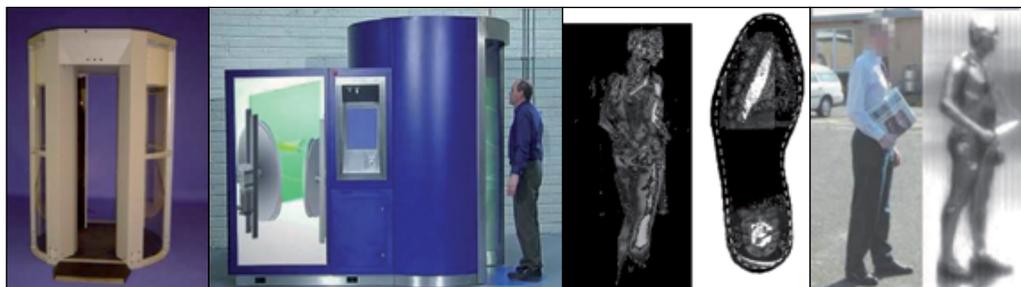
2.3.5. Détecteur à ondes millimétriques

Le domaine des ondes millimétriques est utilisé dans les portiques appelés « body-scanner » (Figure 18). Ces technologies commencent à apparaître dans certains aéroports européens, en particulier à Amsterdam Schiphol en Hollande. Ce type de technologie permet de repérer, sous les vêtements, la présence d'objets suspects, ce qui par ailleurs peut poser des problèmes éthiques. C'est pour cela que la France était jusqu'à une période récente plutôt réticente à son déploiement sur certaines infrastructures critiques.

8. En spectroscopie, la fenêtre est un intervalle d'énergie dans lequel on peut étudier la molécule.

Figure 18

Utilisations du détecteur à ondes millimétriques.



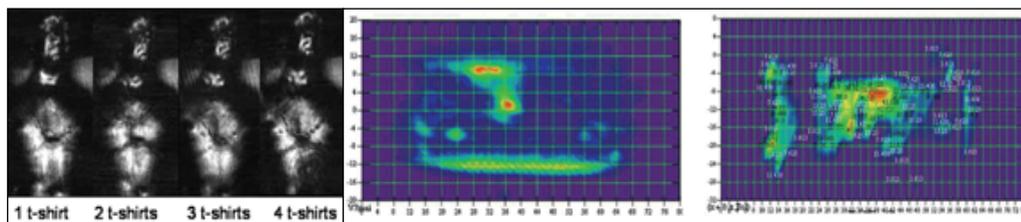


Figure 19

Utilisations du détecteur à micro-ondes (spectres obtenus).

2.3.6. Détecteur à micro-ondes

Les micro-ondes, dans le domaine des ondes millimétriques, correspondent aux ondes radars, c'est-à-dire typiquement en dessous des fréquences de l'ordre de 100 gigahertz (Figure 19). Ces ondes ne permettent pas d'obtenir des images très bien résolues, elles ne permettent que la reconnaissance des formes, de sorte que la question de la protection de la vie privée ne se pose pas de la même manière que précédemment. Ces technologies sont actuellement en forte évolution du fait de développements multiples.

2.3.7. Détecteur à radiofréquences

Ces détecteurs utilisent les ondes de fréquences inférieures au gigahertz, typiquement de l'ordre de quelques mégahertz. Cette technologie permet d'identifier les structures cristallines contenant des atomes d'azote par une technique dite de Résonance Quadripolaire Nucléaire (RQN). Tous les explosifs azotés ont un spectre RQN caractéristique, non ambigu quand il est identifié. Mais cette technologie n'est encore qu'à

l'état de prototype et n'est applicable qu'à des explosifs solides ; il faut la coupler avec une autre technologie, par exemple l'imagerie IRM ou la RMN⁹, pour être efficace. L'une des premières tentatives d'application présentée est ce qu'on appelle le « shoe-scanner », dont l'objectif est de repérer de l'explosif présent dans les chaussures (Figure 20). Cette méthode est issue de l'affaire « Reid » survenue il y a quelques années.

2.3.8. Comparaison des différents types de détecteurs actifs

Les avantages et les inconvénients des différents types de détecteurs actifs sont comparés dans le [Tableau 1](#).

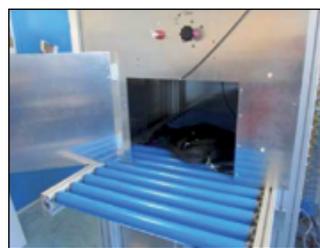


Figure 20

Utilisations du détecteur à radiofréquences.

9. RMN : la résonance magnétique nucléaire est une propriété de certains noyaux d'atomes dans un champ magnétique. La spectroscopie RMN permet d'obtenir un spectre de ces noyaux atomiques caractéristiques des atomes, ce qui permet d'accéder à la composition du matériau analysé. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une technique magnétique reposant sur la RMN et permettant d'obtenir des images 2D et 3D d'un objet caché (par exemple pour observer des organes sans intervention sur le corps).

Tableau 1

Avantages et les inconvénients des différents types de détecteurs actifs.

Avantages	Inconvénients
Domaine des rayons X	
<ul style="list-style-type: none"> - Technologie disponible et ayant largement fait ses preuves (contrôle des bagages pour aviation civile) - Mesure rapide 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôles à poste uniquement - Personnel « formé » - Coût d'acquisition et de fonctionnement (20 k€ à quelques M€) - Non applicable sur l'homme en France
Domaine des rayonnements neutroniques	
<ul style="list-style-type: none"> - Grand pouvoir de pénétration (envisageable pour le contrôle de containers et cargos) - Masquage difficile - Imagerie possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôles à poste uniquement - Technologie non mature (pas commercialisée) - Coût d'acquisition et de fonctionnement - Non applicable sur l'homme (sanitaire et réglementaire) - Contraintes réglementaires (aspects opérationnels)
Domaine des ondes infrarouges	
<ul style="list-style-type: none"> - Mesures à grandes distances (plusieurs mètres) - Contrôles de masse - Mesure rapide - Traces/surface : difficilement contrôlable par les terroristes 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de pouvoir de pénétration - Faible surface éclairée - Technologie portable mature (commercialisée) - Coût d'acquisition et de fonctionnement - Difficile à appliquer à l'homme (RAMAN) - Contraintes réglementaires (aspects opérationnels)
Domaine des ondes THz	
<ul style="list-style-type: none"> - Mesures à distance (plusieurs mètres pour l'imagerie) - Capacité moyenne de pénétration des vêtements - Contrôles de masse - Applicable sur l'homme - Technologie en début de commercialisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Pouvoir de pénétration limité - Technologie adaptée surtout pour les explosifs solides - Coût d'acquisition - Spectroscopie non mature - Sources THz stables et large bande difficilement accessibles
Domaine des ondes millimétriques	
<ul style="list-style-type: none"> - Mesures à distance (plusieurs mètres) - Capacité de pénétration des vêtements - Contrôles à poste ou de masse - Applicable sur l'homme - Technologie commercialisée 	<ul style="list-style-type: none"> - Pouvoir de pénétration limité - Forme suspecte = explosif ? (levée de doute indispensable) - Coût d'acquisition - Aspects éthiques (protection vie privée)

Tableau 1

(suite)

Avantages	Inconvénients
Domaines des micro-ondes	
<ul style="list-style-type: none"> - Mesures à distance - Capacité de pénétration des vêtements - Contrôles à poste - Applicables sur l'homme - Technologie commercialisée (domaine en forte évolution, STANDEX) 	<ul style="list-style-type: none"> - Forme suspecte = explosif ? (levée de doute indispensable) - Coût d'acquisition (quelques dizaines de k€)
Domaine des radiofréquences	
<ul style="list-style-type: none"> - Grande sensibilité - Contrôles à poste - Mesure rapide - Identification - Possibilité de couplage RGN/IRM (détection solides et liquides) 	<ul style="list-style-type: none"> - Pouvoir de pénétration limité (masquage) - Sensibilité - Technologie adaptée pour les explosifs solides et cristallisés à base d'N uniquement - Coût d'acquisition - Difficilement applicable sur l'homme en l'état (normes radiofréquences) - Interférences magnétiques

2.4. Exemples de détecteurs passifs

Les pressions de vapeurs de matériaux explosifs sont reportées sur la **Figure 21**. Les pressions de vapeur sont technologiquement détectables jusqu'au ppb (partie par milliard ; 1 ppb = 0,000 000 1 %). En dessous de ces concentrations, la chose est plus difficile à cause des interférents potentiels présent dans l'air, l'hygrométrie ou les polluants atmosphériques. Les détecteurs passifs doivent aussi être sélectifs.

2.4.1. Détecteurs biologiques

Les détecteurs biologiques utilisent principalement une réponse physiologique, et en particulier l'odorat d'animaux. Ces détecteurs un peu parti-

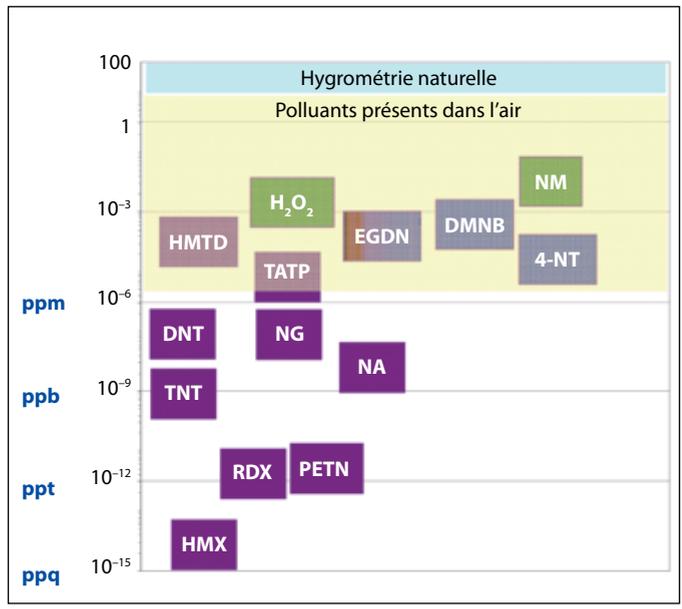


Figure 21

Diagramme des pressions de vapeur de quelques explosifs à température ambiante.

culiers sont basés sur l'apprentissage et/ou le dressage. Les chiens sont d'excellents détecteurs passifs (**Figure 22**). Des rats géants, dont l'odorat est très développé, sont utilisés dans certains pays tels que le Mozambique pour trouver des mines. Des abeilles et des souris ont aussi été testées dans ce même objectif.

Ces techniques ont l'avantage d'être disponibles et d'avoir largement fait leurs preuves dans différents domaines (aviation civile, déminages, douanes). De plus, elles sont très sensibles, leur réponse est rapide et l'on peut procéder à la détection à partir de prélèvements ou frottis réalisés sur un objet ou une surface quelconque.

Leurs inconvénients, liés à l'utilisation collaborative d'animaux, sont l'obligation d'un contrôle à poste, avec un personnel présent et bien formé, et travaillant en symbiose avec l'animal. La disponibilité opérationnelle des chiens est limitée dans le temps et l'éventail des cibles est lui aussi limité par l'apprentissage et la capacité propre de l'animal à mémoriser les odeurs.

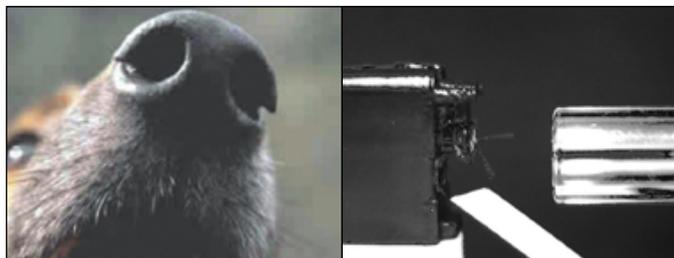


Figure 22

Des exemples de détecteurs biologiques.

2.4.2. Détecteurs chimiques

Les grands systèmes développés aujourd'hui pour la détection de vapeurs sont basés sur des couches « actives » déposées sur des transducteurs¹⁰, l'acquisition du signal se faisant par l'adsorption spécifique des molécules cibles sur ces couches « actives », l'ensemble couche et transducteur constituant le capteur.

Le principe est expliqué sur la **Figure 23A**. Les molécules de gaz sont adsorbées sur un matériau sensible, ce qui se traduit par une information physico-chimique (du type variation de masse (Δm), de température (Δt), de densité ($\Delta \sigma$) ou de fluorescence...), qui est transformée en une information électrique (ΔU , Δi ...) par un dispositif adapté. Le signal ainsi généré est transmis à l'appareil de mesure.

La **Figure 23B** montre trois exemples de transducteurs : de fluorescence, de masse *via* une microbalance à quartz, et d'onde acoustique de surface.

Ces technologies ont l'avantage d'utiliser des éléments issus de la microélectronique et donc d'être duplicables aisément pour un coût de fabrication et de fonctionnement qui restent raisonnables. Elles sont généralement portables, et tout type de personnel peut

10. Un transducteur est un dispositif physique permettant de convertir un signal physique en un autre signal. Par exemple, le haut-parleur transforme un signal électrique en onde sonore. Les transducteurs de fluorescence, de microbalances à quartz ou d'ondes acoustiques de surface en sont d'autres exemples.

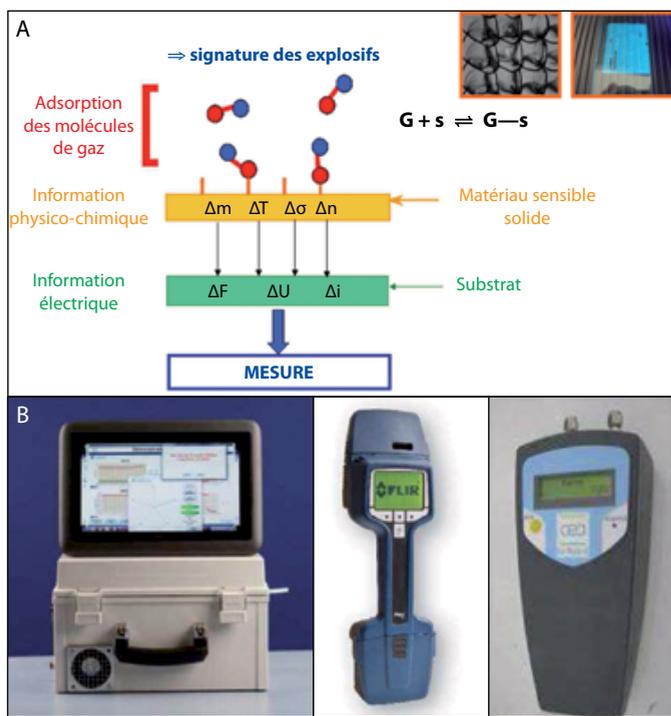


Figure 23

Détecteurs chimiques : A) principe de mesure ; B) quelques exemples de transducteurs.

les utiliser. Elles sont en outre sensibles et sélectives, et peuvent être utilisées pour des vapeurs ou des frottis. Il existe cependant encore peu de systèmes commercialisés, et leur robustesse dépend de l'environnement dans lequel on les utilise (humidité, courant d'air...). Leur temps de réponse (de l'ordre de quelques dizaines de secondes) reste encore l'une des limitations à leur usage intensif, mais les choses s'améliorent rapidement.

Le CEA travaille au développement de ce type de capteur. Le programme de la recherche se déroule sur cinq points :

- la recherche et la mise en œuvre de nouveaux matériaux sensibles ;
- les technologies de dépôts en couches minces ;

- la mise au point des tests de performance ;
- la miniaturisation et l'intégration des systèmes ;
- les essais en conditions réelles sur site opérationnel.

La **Figure 24A** montre un exemple de recherche de matériaux sensibles par greffage de molécules actives sur des particules de silice.

Les techniques utilisées pour le dépôt de couches minces sont variées, comme le montre la **Figure 24B**.

Pour réaliser les tests de performance, il a fallu générer des atmosphères représentatives de la réalité contenant des traces de vapeurs d'explosifs et/ou d'interférents chimiques potentiels. Les teneurs de ces différents constituants se devaient

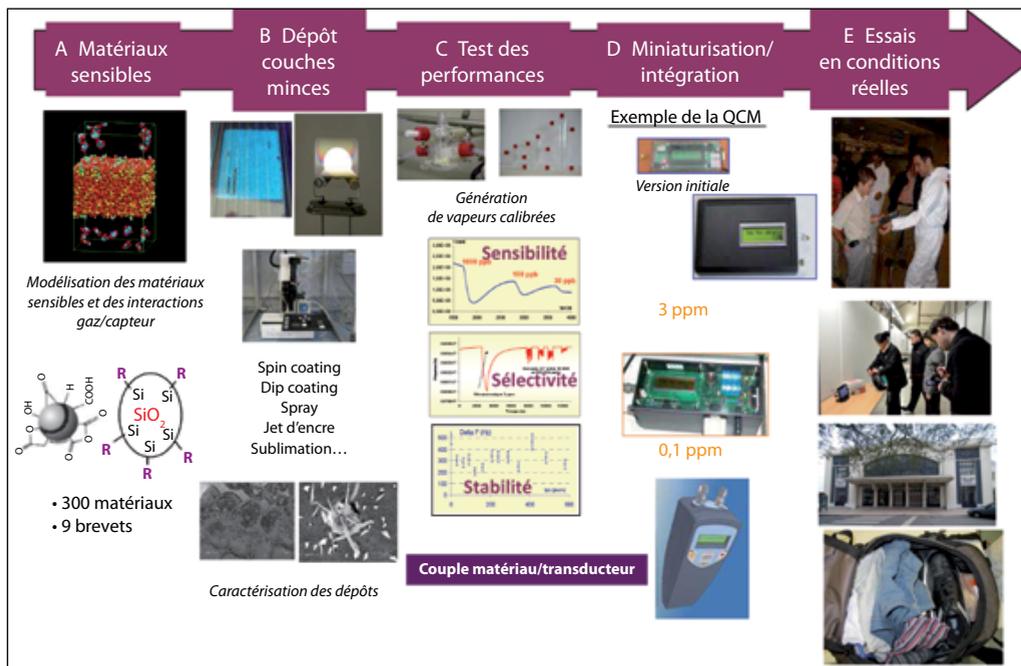


Figure 24

A) Modélisation des matériaux sensibles et des interactions gaz/capteur ; B) exemples de dépôts de couches minces et caractérisation des dépôts ; C) exemples de tests de performances ; D) miniaturisation des systèmes ; E) essais en conditions réelles.

d'être parfaitement bien calibrées pour tester la sensibilité, la sélectivité et la stabilité de ces machines prototypes (Figure 24C).

La Figure 24D montre l'importance de la miniaturisation et de l'intégration de la technologie dans un système qui prédefinit ce que pourrait être une version commercialisable ; cette dernière doit ensuite être testée en conditions réelles.

2.5. Tendances et évolutions des moyens de détection

Ainsi que nous l'avons rappelé précédemment, aucun appareil de détection ne couvre l'ensemble des menaces connues. Tous les appareils ont des limitations technologiques, et toutes les technologies ont leurs points faibles. Le nombre de fausses alarmes doit être réduit afin

que ces technologies soient crédibles en utilisation opérationnelle. Les machines actuelles ont un coût d'acquisition et de mise en œuvre qui reste très élevé. Il est donc nécessaire de réinvestir quasiment en permanence pour accroître la capacité de détection en termes de sensibilité et d'élargissement de l'éventail des menaces potentielles.

L'évolution actuelle tend à utiliser plusieurs types de technologies en même temps pour un même point de contrôle pour élargir les capacités de détection et compenser les limitations respectives de chacune d'elles. Pour limiter le « masquage », on utilise des technologies dites « orthogonales », qui apportent chacune des renseignements différents et complémentaires. L'ensemble de ces technologies est intégré au

sein de systèmes de détection, et l'on développe désormais des concepts opérationnels de plus en plus sophistiqués basés sur une intégration de ces systèmes au sein des infrastructures à protéger.

Le Système T-REX : un prototype de système de détection

Pour détecter les traces d'explosifs, le CEA a développé un système qui associe trois technologies de capteurs. La réponse est très rapide, elle ne prend que dix secondes, et l'identification de l'explosif prend une à deux minutes. Ce

prototype, mis au point par quatre départements du CEA (Figure 25), est en cours de transfert technologique vers le monde industriel. Il permet de détecter entre autres des explosifs militaires, des explosifs artisanaux, ainsi que certains précurseurs chimiques de ces explosifs. La mise au point de ce prototype a nécessité quatre années de travaux en laboratoire (Figure 26). La notion de **système de détection** est appliquée au concept STANDEX.

Ce système pourrait par exemple être mis en œuvre avec des imageurs à micro-

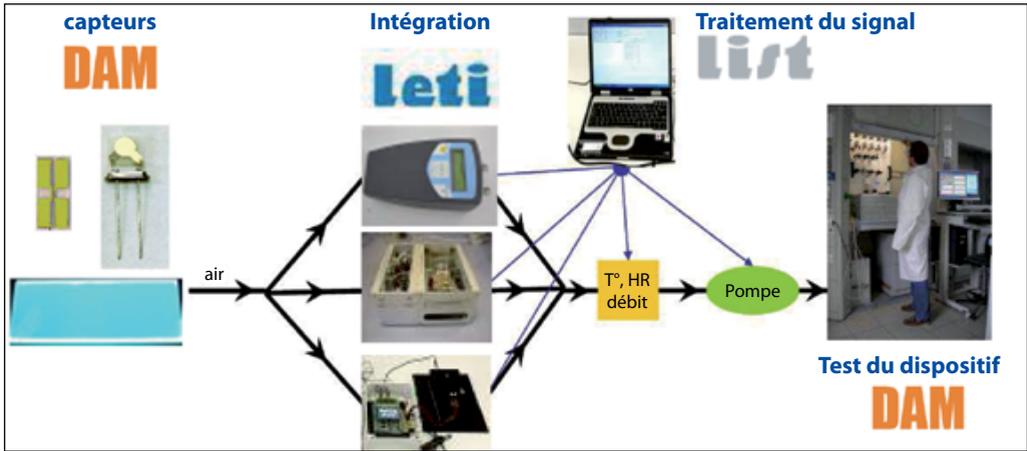


Figure 25

Le projet transverse CEA.

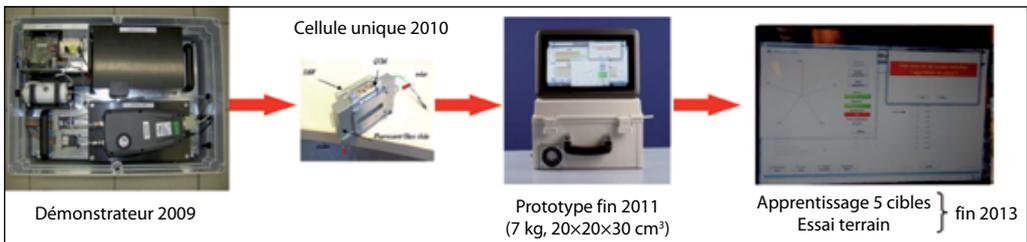


Figure 26

Mise au point du système T-REX.

ondes pour détecter et identifier la présence de « menace » sur des personnes qui entrent dans une infrastructure critique (Figure 27). Le couplage des deux types de détection permettra de limiter le taux de fausses alarmes et ainsi de rendre la détection plus fiable.

La Figure 28 montre la vision de l'opérateur sur sa console. Les cônes bleus sont les cônes de détection. Les personnes observées sont les petits cubes en mouvement. Lorsqu'un porteur potentiel de menace est détecté, son cube change de couleur

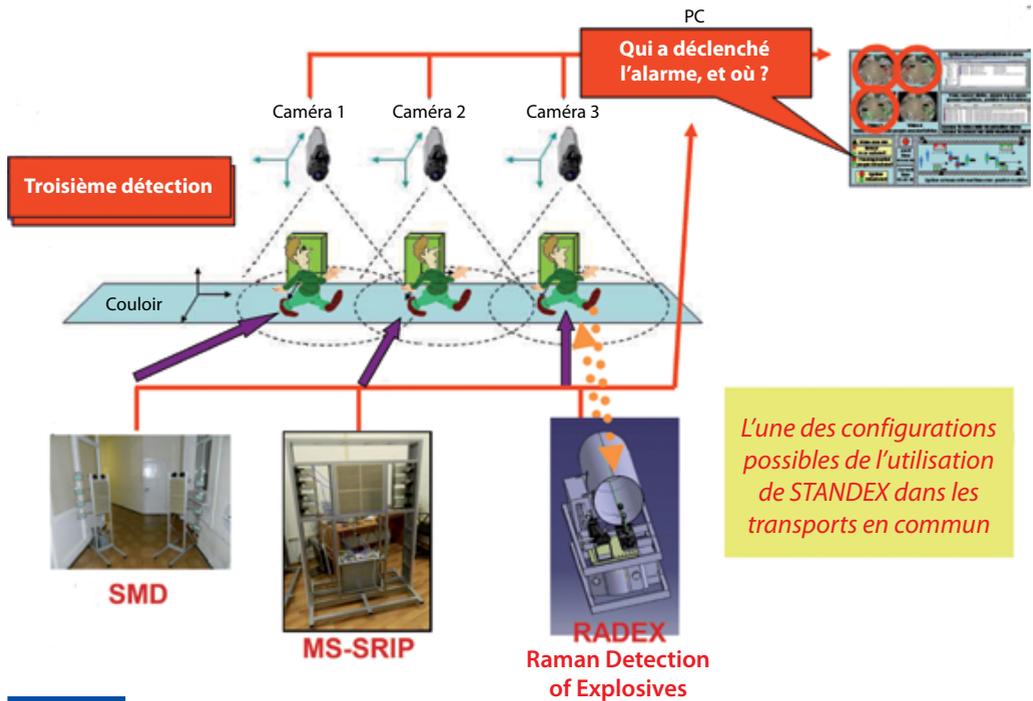


Figure 27 Configuration du système STANDEX de détection les explosifs.



Figure 28 Vision de l'opérateur sur la console du système de détection les explosifs.

et devient orange. Lorsque l'alerte est confirmée par une autre détection, le cube orange devient rouge et le système génère automatiquement une alerte vers les forces de sécurité.

3 Les analyses post-attentat (par Bruno Vanlerberghe)

3.1. De l'explosion à l'analyse

Prenons l'exemple d'une forte explosion survenue à 7h du matin, dans un quartier urbain, avec une voiture enflammée (Figure 29A). Les secours arrivent (Figure 29B), les pompiers en brisent les vitres pour éteindre l'incendie. De nombreux dégâts sont constatés : des vitres brisées sur les immeubles voisins (Figures 29C), des véhicules endommagés, des fragments partout (Figure 29D).

L'idée que l'incendie provient directement du véhicule paraît peu probable, et dès leur arrivée, les pompiers ont suspicion d'un attentat ; ils ap-

pellent le service de déminage dont l'objectif est d'éviter le sur-attentat, en effectuant immédiatement une visite de sécurité afin de s'assurer qu'un second engin n'est pas dissimulé au voisinage du premier et d'examiner les traces et indices. Dans cet exemple, un cratère est présent derrière le véhicule enflammé ; on peut donc soupçonner que ce n'est pas la voiture qui a explosé (Figure 29D).

Sur une scène d'attentat, tout n'est pas détruit, il reste des morceaux physiques notamment, on doit chercher et retrouver des morceaux de l'emballage de l'explosif. Dans le cas présent, les enquêteurs trouvent de petits morceaux : de sac, de la minuterie, de la batterie, du conteneur, des morceaux de fils (Figure 30). À ces éléments physiques, s'ajoutent des traces chimiques parce que la réaction chimique des explosifs est rarement complète, ce qui permet de prélever ces traces soit en collectant des morceaux physiques

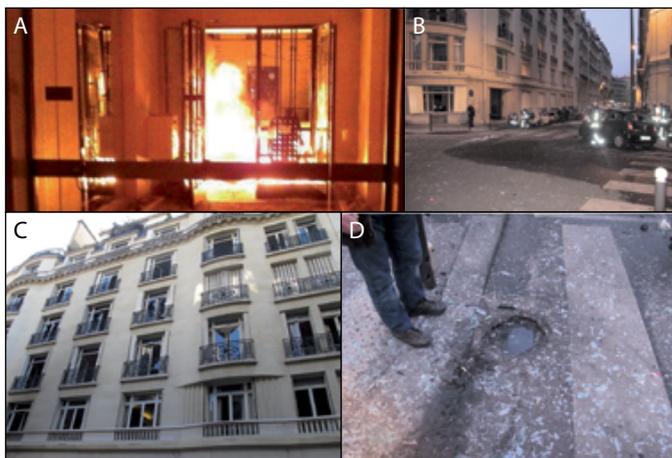
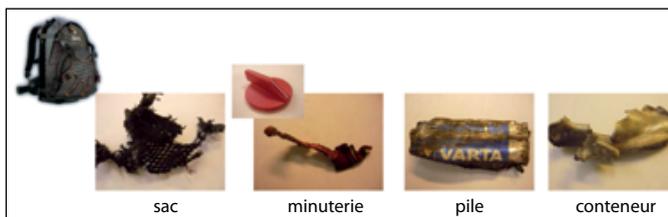


Figure 29

Attentat avec mise en œuvre d'un engin explosif improvisé : A) une voiture est enflammée ; B) arrivée des pompiers ; C) constat des dégâts sur les immeubles voisins ; D) relevé des traces et indices.

Figure 30

Morceaux physiques présents sur une scène d'attentat à l'explosif.



qui ont été en contact avec l'engin, soit en réalisant des essayages à sec ou avec des solvants pour entraîner les traces d'explosifs.

Un quadrillage de la zone de l'attentat doit être rapidement mis en place (Figure 31) afin de positionner, à l'aide d'un système de repérage en (x,y), les différents éléments recueillis dans les différentes zones de la recherche.

La collecte est un long travail qui consiste à chercher partout, sous et dans les voitures, sur les trottoirs, sur les toits, dans les murs... les moindres traces, ou matériaux ou objets (Figure 32). Si une voiture

est percée par les éclats, les portières sont démontées pour les récupérer. Ce travail dure généralement plusieurs heures.

Le ratissage minutieux de la zone d'attentat permet non seulement de collecter des centaines d'éléments de l'engin, y compris dans les logements voisins, mais aussi d'évaluer les effets sur les infrastructures, notamment de déterminer la taille du cratère, sa profondeur, de regarder jusqu'à quelle distance les vitres sont brisées (Figure 33).

Tous les fragments de cette collecte sont mis sous scellé

Figure 31

Quadrillage d'une zone d'attentat à l'explosif.

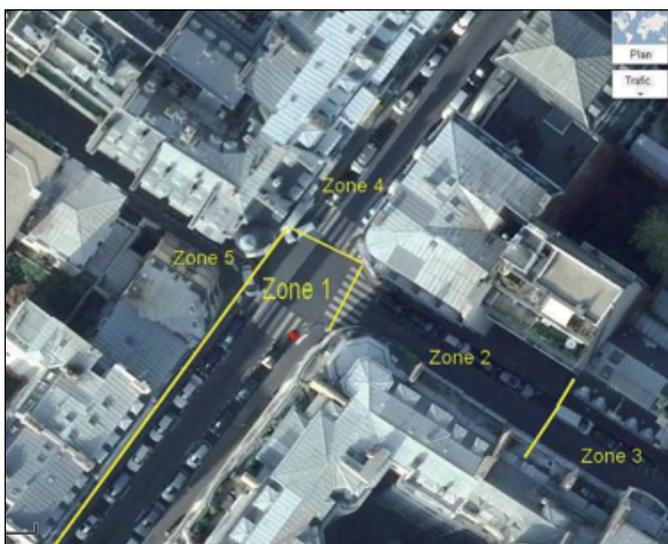




Figure 32

Collecte sur une zone d'attentat à l'explosif.



Figure 33

Ratissage minutieux et collecte dans la zone de l'attentat.

et, comme pour les résidus d'incendie, les échantillons sont collectés dans des boîtes étanches afin de ne pas perdre les traces éventuelles

d'explosifs, notamment s'ils sont extrêmement volatils, afin de pouvoir les analyser dans les meilleures conditions possibles (Figure 34).

Figure 34

Mise sous scellés de pièces à conviction.



3.2. L'analyse des pièces à conviction

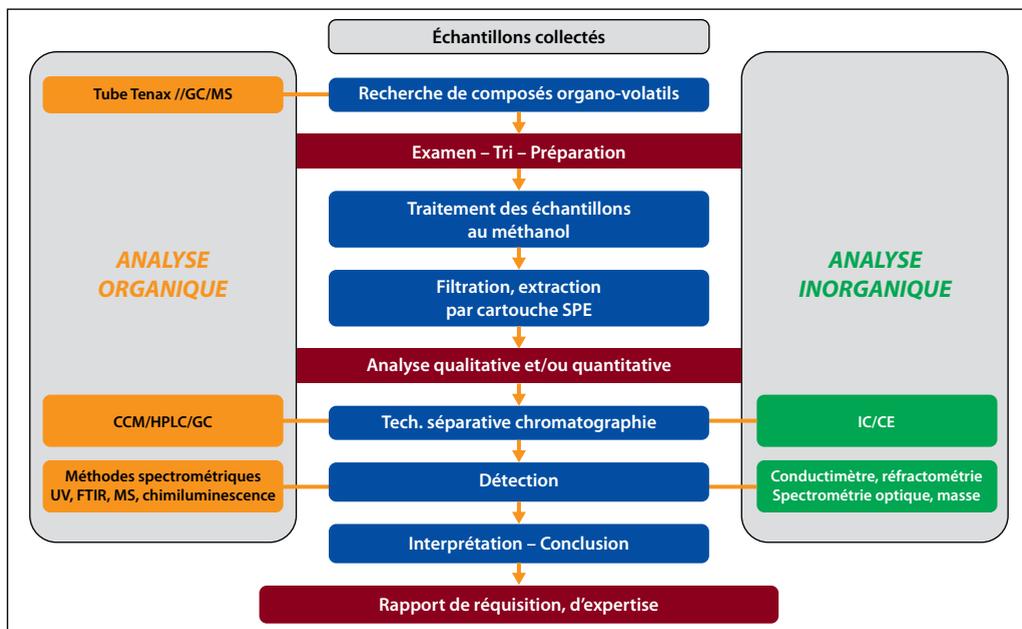
Les étapes du processus d'analyse des indices et pièces à conviction sont résumées sur la **Figure 35**. On dispose aujourd'hui de nombreuses techniques d'analyse. Les

échantillons à analyser sont de type organique, mais aussi inorganique (métaux, céramiques, roches, béton...).

La première étape, à partir d'un échantillon collecté, consiste à rechercher les composés organiques volatils.

Figure 35

Les étapes du processus d'analyse.



Le bocal de collecte est mis en contact avec un tube Tenax¹¹ contenant un « lit adsorbant », qui piège les molécules volatiles ; celles-ci sont ensuite désorbées et analysées par CPG/SM¹², afin d'identifier les traces des différentes molécules d'explosifs.

La deuxième étape est l'examen « Tri-Préparation », qui permet de remonter à l'origine du morceau de fil ou de débris trouvé, qui pourrait correspondre à telle ou telle minuterie. Cet examen est associé à un travail de photographie. Les échantillons sont ensuite triés pour les rassembler par catégories : tous les morceaux de piles, tous les morceaux de minuterie, etc.

Ensuite vient la phase de préparation des échantillons en vue des analyses chimiques. Ces analyses sont qualitatives et, si possible, quantitatives. Pour les traces d'explosifs, l'analyse quantitative est difficile. On utilise les techniques séparatives de type chromatographie : chromatographie liquide (CPL) et chromatographie gazeuse (CPG). Le problème de la chromatographie gazeuse est qu'il faut chauffer les échantillons, et les molécules thermola-

11. Un tube Tenax est un tube permettant de collecter des échantillons de composés volatils. Le « lit » fait référence à la partie adsorbante du tube.

12. La CPG/SM (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse) est décrite dans les *Chapitres de G. Cognon/B. Frère* et *P. Sibille*, dans l'ouvrage *Chimie et expertise, sécurité des biens et des personnes*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

biles, sensibles à la chaleur, peuvent alors être détruites donc perdues. Associées à ces techniques de chromatographie, on dispose de tout un panel de moyens de détection analytiques : des méthodes spectrométriques du type UV, infrarouge, spectrométrie de masse, ou de chimioluminescence. Pour l'analyse des échantillons inorganiques, on utilise de la chromatographie ionique, de l'électrophorèse capillaire¹³, voire de l'ICP¹⁴ (ICP optique, ICP/ SM).

Revenons sur l'étape de préparation des échantillons (*Figure 36*). Ces derniers sont traités dans un solvant, généralement du méthanol, et l'extrait brut de ce traitement passe dans des cartouches de SPE¹⁵, qui retiennent les molécules à analyser. La cartouche est ensuite rincée à l'eau pour récupérer un premier éluant¹⁶ contenant certaines molé-

13. Électrophorèse capillaire : technique permettant de séparer les espèces chimiques d'un système selon leur charge électrique. Voir *La chimie et le sport*, Chapitre de J.-L. Veuthey, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, R. A. Jacquesy, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

14. ICP : spectrométrie par torche à plasma. C'est une technique qui permet de déterminer la concentration de différents constituants d'un mélange de manière rapide. Voir le *Chapitre de P. Carlotti*, dans *Chimie et expertise*, EDP Sciences, 2014.

15. SPE : extraction sur phase solide. C'est une technique permettant de séparer les différents constituants gazeux d'un système.

16. L'éluant est le solvant utilisé en chromatographie pour dissoudre le composé solide à analyser et/ou le faire migrer à travers un système permettant de séparer les différents constituants.

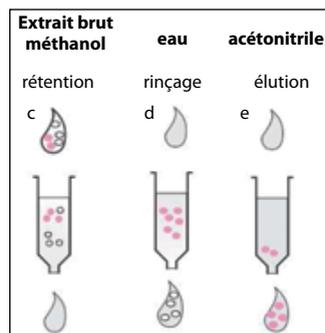


Figure 36

Préparation des échantillons pour l'analyse des traces d'explosifs.

cules. Puis elle est ensuite traitée à l'acétonitrile (CH_3CN), et la phase acétonitrile est récupérée pour être injectée dans les colonnes séparatives des techniques analytiques choisies.

3.3. Les techniques d'analyse séparative

Les techniques d'analyse séparative ont beaucoup évolué ; auparavant, on ne disposait que de la chromatographie sur couche mince (CCM), dont le principe est rappelé sur la **Figure 37**. C'était une technique simple mais peu sensible. La révélation des différentes molécules d'ex-

posifs organiques s'effectuait en pulvérisant des réactifs chimiques sur la plaque, notamment le réactif de Griess (sélectif des nitramères et des esters nitrés), et le réactif de Bratton-Marshall (sélectif des nitroaromatiques).

On utilise maintenant la chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse haute résolution (« CPL/SM exacte »), qui présente l'intérêt d'être extrêmement sensible (**Figure 38**).

Les avantages de cette technique sont illustrés sur la **Figure 39**. Les analyses sont très rapides, les composés sont identifiés à partir de leurs masses exactes, et les limites

Figure 37

Principe de la chromatographie sur couche mince (CCM).

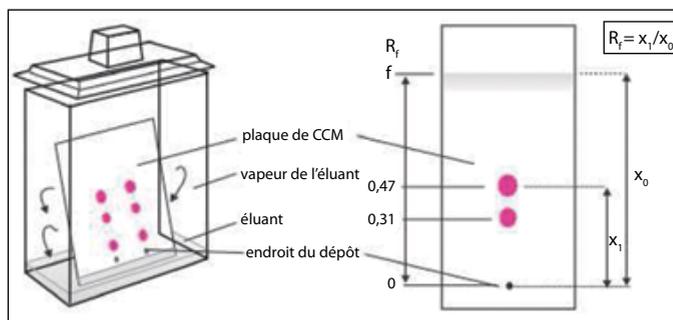
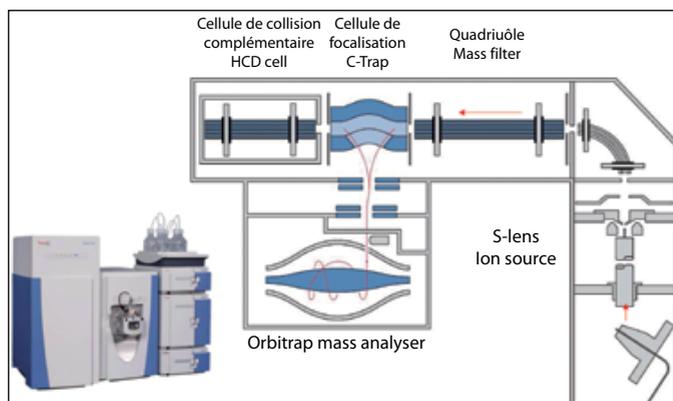
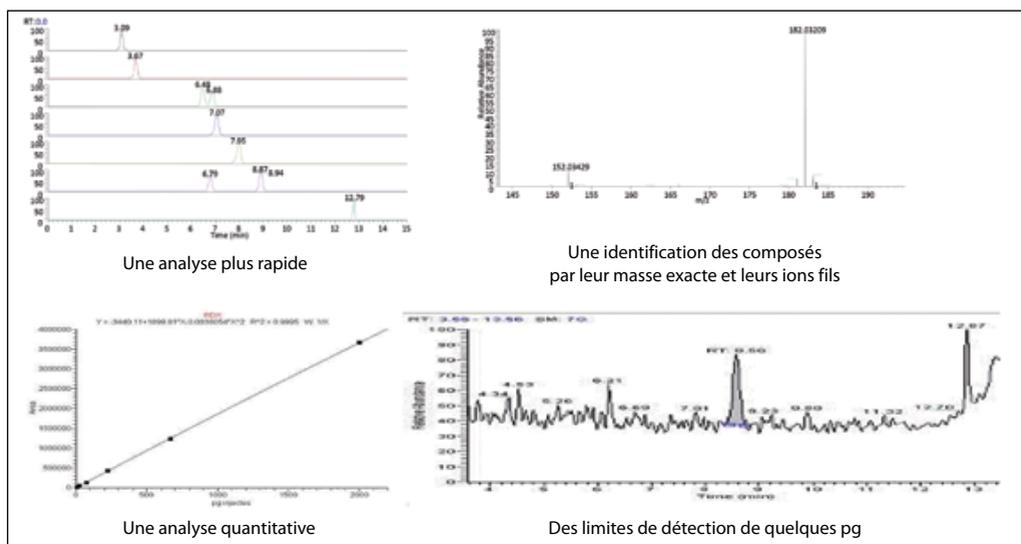


Figure 38

Appareil et schéma de principe du couplage CPL/SM.





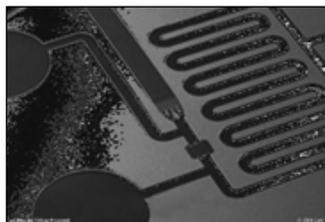


Figure 40

Exemple d'une miniaturisation d'appareil.

aux progrès de la spectrométrie de masse haute résolution (SMHR), on peut encore espérer descendre d'un facteur de dix prochainement.

3.4. Tendances et évolutions des systèmes de détection

Comme évoqué dans le **Chapitre de B. Feignier**, dans *Chimie et expertise* (EDP Sciences, 2014), la tendance est de « miniaturiser » les

systèmes d'analyse, afin de pouvoir travailler sur des échantillons de plus en plus petits (les « *labs on chip* »). La difficulté pour analyser ce type d'échantillon est toujours la phase de préparation à partir des échantillons prélevés sur la voie publique, qui en général sont des échantillons sales, et ce sont ces phases de préparation qui sont les plus longues à réaliser (**Figure 40**).

Les explosifs, un vaste domaine pour des compétences et technologies variées

La détection des explosifs est un vaste domaine qui fait intervenir des compétences variées et qui présente des spécificités opérationnelles. Il faut savoir choisir selon les cas les détecteurs en ce qui concerne leurs configurations, les cibles et les limitations opérationnelles. Les technologies utilisables sont variées et doivent être sélectionnées en fonction des scénarii d'emploi, des cibles et des lieux d'utilisation.

La tendance actuelle est de s'orienter vers des systèmes de détection couplant la mise en œuvre de différentes technologies pour accroître la couverture des différents besoins opérationnels et améliorer les performances globales, ainsi que la fiabilité de la détection. Hors aérien, on manque encore de réglementations claires pour l'utilisation de ces technologies structurées en systèmes en présence de public.

L'orientation des configurations de détection en systèmes regroupant plusieurs technologies de capteurs, voire de systèmes au sein

des infrastructures critiques, semble inexorable. Ces configurations devraient améliorer à la fois la fiabilité de la détection et le confort des personnes, qui doivent se soumettre au quotidien à ces contrôles. Ces configurations permettront également de réajuster très rapidement les calibrages des différents capteurs mis en œuvre pour faire face à l'évolution permanente de la menace.