

La détection d'explosifs

État de l'art et développement de capteurs fluorescents performants

Simon Clavaguera, Frédéric Parret, Clément Véron, Pierre Montméat, Jean-Pierre Lère-Porte et Lionel Hairault

Résumé La détection d'explosifs est devenue un enjeu majeur dans le cadre de la lutte contre le terrorisme. Cet article fait état des différentes techniques utilisées ou développées actuellement. Parmi celles-ci, les capteurs chimiques offrent des perspectives intéressantes en termes de portabilité, de coût de revient et de facilité d'utilisation. Les différents types de capteurs chimiques sont ainsi détaillés. Enfin, les développements du CEA Le Ripault présentés en dernière partie montrent qu'il est possible à l'aide de matériaux π -conjugués spécifiquement synthétisés pour cette application, de détecter le 2,4-dinitrotoluène (DNT), impureté présente dans de nombreuses compositions explosives à base de trinitrotoluène (TNT), aussi bien par inhibition de fluorescence qu'à l'aide d'une microbalance à quartz.

Mots-clés Capteurs chimiques, explosifs, fluorescence.

Abstract **The detection of explosives: state of art and development of competitive fluorescent sensors**
Chemical sensors for the detection of explosives have attracted an increasing attention over the last decade. There is a demand for quick and reliable means of detection of these substances particularly to anticipate terrorist attacks. This paper presents the state-of-the-art technologies for the detection of explosives. Chemical sensors are among the most sensitive, rapid and portable techniques for an affordable cost. The developments in the CEA Le Ripault highlight the opportunity to use π -conjugated materials to detect 2,4-dinitrotoluene (DNT) via fluorescence quenching or with a quartz crystal microbalance.

Keywords Chemical sensors, explosives, fluorescence.



La problématique de la lutte contre les menaces terroristes a pris en France, comme dans tous les autres pays occidentaux, une ampleur considérable depuis le 11 septembre 2001. Cette question dont l'impact sociétal est très fort, a conduit les pouvoirs publics à mettre en œuvre un plan global de lutte contre les menaces

terroristes intégrant un important volet de recherche et développement à l'élaboration duquel le CEA a activement contribué dans le cadre du programme interministériel NRBC⁽¹⁾. Ce programme vise à concevoir et à développer les moyens de détecter la menace, de la diagnostiquer et de lutter efficacement contre. L'ensemble des menaces terroristes doit être couvert. La thématique de la détection des explosifs revêt un caractère particulièrement important puisque ces derniers sont utilisés par les groupes terroristes pour satisfaire à deux objectifs. Le premier consiste à utiliser le pouvoir brisant de l'explosif afin de causer de nombreux dégâts aux biens et aux personnes, le second permet de disperser un agent toxique ou pathogène dans un environnement particulier afin de créer le plus grand nombre de victimes possible. Cette conjoncture a conduit le CEA à développer plusieurs voies innovantes de capteurs chimiques où la recherche combinée de la sensibilité et de la sélectivité a été privilégiée, comme nous le verrons plus loin. Ainsi, l'utilisation conjointe des techniques de la microélectronique et de la chimie organique a constitué une avancée significative avec la réalisation de prototypes.

Cet article décrit les différentes familles d'explosifs et leurs propriétés, puis dresse un état de l'art complet des technologies existant aujourd'hui pour répondre à ce besoin. Enfin, il présente les développements entrepris par le CEA

Le Ripault dans le domaine des capteurs chimiques de type microbalance à quartz ou fluorescents, du matériau sensible jusqu'au prototype opérationnel.

Les différentes familles d'explosifs

Les explosifs sont constitués d'un mélange intime entre un oxydant (atomes d'oxygène, groupes nitro...) et un réducteur (atomes de carbone et d'azote). Dans certains cas, l'oxydant et le réducteur sont des fonctions chimiques présentes sur une même molécule. L'initiation donne lieu à une décomposition très fortement exothermique et extrêmement rapide qui conduit à des produits gazeux.

Les molécules explosives sont regroupées en quatre grandes familles (tableau I). Parmi ces composés, les peroxydes organiques ont récemment été utilisés lors des attentats de Londres en 2005. Le TATP et le HMTD sont les plus courants. Leur usage à des fins terroristes est principalement dû à leur synthèse qui nécessite peu de moyens et de compétences. Les toutes premières études sur la détection de ces composés apparaissent actuellement mais ne feront pas l'objet de cet article. Nous nous concentrerons sur la famille des explosifs nitrés.

Pour détecter des traces de vapeurs d'explosifs, il convient de s'intéresser à leur pression de vapeur :

Explosifs	TNT (ppb ^v)	DNT (ppb ^v)	RDX (ppt ^v)	PETN (ppt ^v)	NG (ppb ^v)
Pression de vapeur saturante	1 à 11	193 à 289	1,3 à 6	18	340 à 410

Afin d'être capable d'identifier la présence d'explosifs à une relative proximité de l'objet, il est nécessaire de détecter

Tableau I - Les molécules explosives sont regroupées en quatre grandes familles.

Famille	Exemple de composés
Nitroaromatiques	1,3,5-trinitrotoluène (TNT), acide picrique, hexanitrostilbène (HNS), dinitrobenzène (DNB), 1,3,5-trinitrobenzène (TNB), 2,4-dinitrotoluène (DNT), 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzène (TATB), tétryl, acide picrique (AP)
Nitramines ou Nitrosamines	octogène (HMX), hexogène (RDX)
Esters nitriques	pentrite (PETN), éthylène glycol dinitrate (EGDN), nitroglycérine (NG), nitroguanidine (NGA)
Peroxydes	triacétone triperoxyde (TATP), hexaméthyltriperoxyde (HMTD)

des concentrations comprises approximativement entre le centième et le millième de la pression de vapeur, soit de 100 ppt^v à 1 ppb^v pour le DNT. La détection de traces de vapeurs d'explosif devient donc un défi monumental.

État de l'art et dispositifs technologiques commercialisés

Dispositifs disponibles ou commercialisés

Parmi les méthodes spécifiques et facilement mobiles, figure en premier lieu l'utilisation d'animaux, notamment de chiens, qui permettent d'atteindre des niveaux de sensibilité très élevés. Les chiens sont considérés comme l'outil le plus fiable pour la détection d'explosifs depuis la Seconde Guerre mondiale. L'identification d'explosifs par les chiens entraînés a un taux de réussite de l'ordre de 90 à 95 % [1]. Cependant, cette méthode est chère et n'est pas adaptée pour le suivi continu puisque les chiens demandent une attention particulière et sont rapidement fatigués [2]. Des petits animaux comme le rat [3] ou l'abeille [4] ont également été utilisés.

Les techniques d'imagerie par rayons X sont également employées pour détecter les explosifs dans diverses situations, le plus souvent pour surveiller les bagages, valises et autres affaires personnelles dans certains lieux publics et aéroports. Le fort rayonnement qui leur est lié les rend inopérantes sur l'Homme. D'autres techniques plus récentes d'imagerie passive utilisant des ondes millimétriques sont maintenant disponibles. C'est le cas par exemple de systèmes développés par la société Brijot⁽²⁾ qui permettent d'imager et d'interpréter l'image en simultanée sans l'expertise d'une personne formée pour cela.

Enfin, la spectroscopie à mobilité ionique (IMS) est l'une des techniques les plus utilisées pour la détection de traces d'explosifs. Elle consiste à soumettre des molécules ionisées à un champ électrique. Les ions sont détectés en fonction de leur vitesse qui dépend de leur masse, leur taille et leur forme, et sont ainsi séparés. Des détecteurs de traces par IMS ont été miniaturisés sous les noms d'IMS Ionscan 400B et 500DT⁽³⁾, de MicroHound^{TM(4)} et de E5000 qui est un appareil couplé chromatographe en phase gazeuse (GC)/IMS⁽⁵⁾ (figure 2). Cette technique est couramment utilisée dans les



Figure 2 - Les principaux détecteurs d'explosifs par IMS.

aéroports. Sa gamme de sensibilité se situe du picogramme au nanogramme, mais elle est relativement coûteuse – le prix des appareils est de l'ordre de 30 à 80 k\$ –, dépendante de l'opérateur et donne parfois des faux positifs. De plus les spectromètres nécessitent d'être fréquemment calibrés [5]. Actuellement, les appareils transportables Ionscan et E5000 sont beaucoup plus fiables que les appareils portables.

De façon générale, le coût élevé de ces appareils (à partir de 30 k€) et leur relative fiabilité reste un frein à leur généralisation. C'est probablement une combinaison de plusieurs de ces techniques qui répondra à la problématique de détection d'explosifs dans son ensemble. L'analyse de l'existant en termes de dispositifs commerciaux montre qu'il existe actuellement peu de systèmes de détection d'explosifs portables basés sur une sélectivité chimique entre le revêtement sensible et le gaz. Il apparaît que ces capteurs pourraient offrir une solution aussi performante (voire plus sélective) et surtout plus facilement déployable en grande quantité du fait de leurs faibles coûts, taille, poids et autonomie.

Capteurs chimiques en développement

Capteurs piézo-électriques

• Microbalance à quartz

La microbalance à quartz est le plus connu et le plus utilisé des transducteurs piézo-électriques. Le principe consiste à entretenir des oscillations au sein du cristal en se plaçant autour de sa résonance. Le signal actif correspond alors à la fréquence de résonance du transducteur. Il faut noter que même si la détection est principalement gravimétrique, d'autres paramètres comme la variation de viscosité ou de densité du film sensible entrent en ligne de

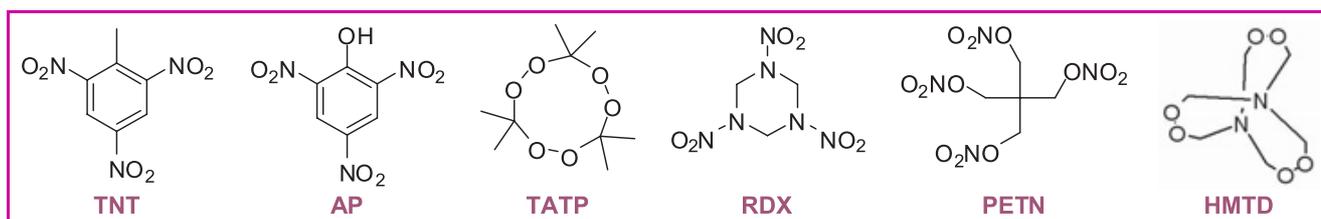


Figure 1 - Structure de différents explosifs.

compte. La relation de Sauerbrey pour les films rigides relie une fréquence d'oscillation à une variation de masse en surface du quartz.

Depuis quelques années, les matériaux sensibles aux nitroaromatiques déposés sur les microbalances ont été beaucoup étudiés (figure 3). Différentes familles ont été testées (cavitands, macrocycles ou encore polymères), et des polyéthylènes glycol (Carbowax 1000) [6] et des polysiloxanes [7] ont montré des résultats intéressants pour la détection de nitrotoluène. Par ailleurs, des phthalocyanines de cuivre, qui sont connues pour être de bons adsorbants de nombreux composés, donnent de relativement bonnes sensibilités vis-à-vis du nitrobenzène. La réponse limite de 10 Hz est observée pour une concentration de 0,78 ppm^V, la sélectivité est néanmoins faible [8].

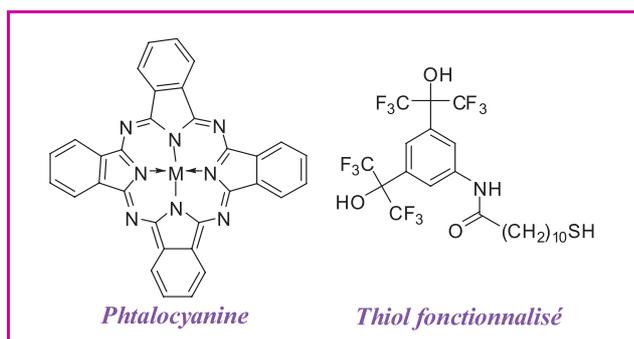


Figure 3 - Exemples de matériaux sensibles utilisés avec la microbalance à quartz.

Le CEA Le Ripault a testé des matériaux polymères de type polysiloxane qui permettent de détecter le DNT et le TNT à des concentrations proches de leur pression de vapeur. Plusieurs prototypes ont été développés montrant qu'il était possible de proposer, à l'aide de la microbalance à quartz, des détecteurs portables à faibles coûts et présentant des caractéristiques de sensibilité, de sélectivité et de stabilité dans le temps tout à fait remarquables (figure 4). Le CEA Le Ripault a également développé des thiols fonctionnalisés [9-10] et des métalloporphyrines [11] qui permettent de détecter sélectivement des nitroaromatiques. Une approche multicapteur a été développée avec comme combinaison de matériaux sensibles des calixarènes, du poly(pentiptycène), des phthalocyanines et des porphyrines [12].



Figure 4 - Exemples de dispositifs portables à microbalance à quartz développés au CEA Le Ripault.

• Ondes acoustiques de surface

Les dispositifs à ondes acoustiques de surface figurent parmi les transducteurs les plus prometteurs car leurs fréquences nominales d'utilisation sont bien supérieures à celles des microbalances à quartz (souvent > 100 MHz). Ainsi, des sensibilités en masse *a priori* plus importantes sont obtenues même si la composante massique n'est pas la seule à provoquer un changement de fréquence. Le principe repose sur la propagation d'une onde à la surface du matériau sensible. En raison de la technologie planaire

utilisée pour sa mise en œuvre, ce type de dispositif est appelé généralement dispositif à ondes de surface (SAW). Les ondes de surface sont issues de déformations mécaniques à l'interface d'un solide et sont guidées à la surface de propagation par confinement de leur énergie élastique. Un grand nombre de polysiloxanes ont été testés et ont montré qu'ils adsorbent préférentiellement les vapeurs de nitroaromatiques à des vapeurs d'interférents comme l'eau et des solvants organiques (octane et toluène). Un polymère siloxane a montré une forte sensibilité au nitrobenzène ainsi qu'au DNT. Un signal réversible est observé avec le DNT pour une exposition à 400 ppb de DNT. Par extrapolation, la limite de détection est estimée à 235 ppt^V.

Le Carbowax 1000, polymère organique de la famille des polyéthylène glycols, a été testé sur un dispositif SAW pour la détection de nitroaromatiques. Ces films sensibles sont stables jusqu'à 225 °C et adsorbent les nitroaromatiques de façon réversible. Un dispositif SAW ayant comme film sensible le Carbowax 1000 (10 μm) montre en une minute d'exposition à 3 L/h de DNT un changement de fréquence notable pour 117 ppb^V de DNT.

Des dispositifs basés sur les SAW ont été commercialisés sous le nom HAZMATCAD™ Plus pour la détection d'agents de guerre chimique et de nitroaromatiques notamment.

Il existe également des capteurs basés sur le principe des microleviers qui sont actuellement en développement pour la détection d'explosifs.

Capteurs optiques

Depuis le début du XX^e siècle, les techniques spectroscopiques pour l'analyse chimique ont été développées et utilisées massivement. Les capteurs chimiques basés sur ces techniques présentent un attrait considérable actuellement. Plusieurs études complètes sur les capteurs optiques ont été publiées récemment et font référence dans la littérature [13-15].

• Matériaux utilisés pour les capteurs optiques

Trois revues extrêmement bien référencées ont été publiées par les groupes de Swager [16] et de Trogler au cours des dernières années sur la détection d'explosifs en utilisant notamment des composés organiques fluorescents. Les polymères conjugués fluorescents organiques et inorganiques ainsi que les agrégats supramoléculaires ont été étudiés pour la détection d'explosifs nitroaromatiques en solution et en phase gaz. Les limites de détection sont le plus souvent de l'ordre du ppb^V avec des extrapolations en ppt^V. La plupart du temps, l'inhibition de fluorescence suit un mécanisme de transfert d'électron donneur/accepteur. Les analytes pauvres en électrons, tels que les nitroaromatiques, jouent le rôle d'accepteurs d'électrons pour les électrons photoexcités du matériau sensible.

• Poly(para-phénylèneéthynylènes) (PPE)

Afin de faciliter l'interaction du nitroaromatique avec un matériau organique fluorescent, Yang et Swager ont développé une série de PPE poreux utilisant une structure rigide cruciforme de type pentiptycène (figure 5a) [17]. Ces matériaux possèdent une structure rigide tridimensionnelle qui évite les interactions par empilement π. De plus, les

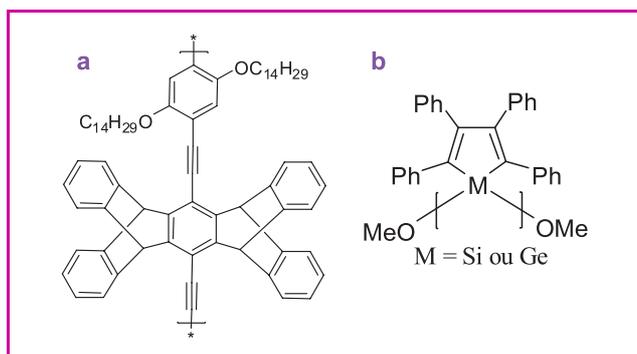


Figure 5 - a) le pentiptycène ; b) les polymétalloles.

structures cruciformes permettent d'augmenter la porosité du film en créant des cavités. Les rendements quantiques de fluorescence sont exaltés et la sensibilité vis-à-vis du TNT est améliorée grâce à ce motif iptycène. La société ICx Nomadics⁽⁶⁾ a développé plusieurs dispositifs en utilisant le pentiptycène comme matériau sensible pour la détection de vapeurs de TNT et de DNT. Le dispositif commercial, appelé Fido, permet le suivi en temps réel de l'intensité de fluorescence d'une couche mince de polymères conjugués exposée à des vapeurs d'explosifs. Une sensibilité de l'ordre du femtogramme a été démontrée sur ce dispositif lors de tests en 2001 et le fabricant revendique une sensibilité jusqu'à 0,1 ppt.

• Polymères inorganiques conjugués

Trogler et Sailor ont publié plusieurs de leurs travaux décrivant comment les poly(silole)s peuvent être utilisés pour la détection de nitroaromatiques par inhibition de fluorescence. Les poly(silole)s, comme le poly(tétraphényl-1,1-silole) ont un squelette Si-Si. Les copolymères métalloles (figure 5b) sont robustes et insensibles aux interférents courants tels que les solvants et les acides. Ces matériaux présentent des sensibilités en milieu liquide deux à cinq fois supérieures à celles décrites par l'équipe de Swager avec les pentiptycènes en solution dans le toluène. Cependant les pentiptycènes offrent une sensibilité supérieure à l'état solide [18].

Bilan des différentes technologies identifiées

Le tableau II rassemble les principales technologies utilisées pour la détection d'explosifs (principalement nitrés). Il apparaît que les sensibilités les meilleures correspondent au chien, aux techniques analytiques de laboratoire (IMS par exemple), aux dispositifs à ondes de volume (SAW) et à la fluorescence. Les capteurs chimiques, en raison de leur faible coût, de leur utilisation aisée et de leur portabilité, sont

tout à fait concurrentiels par rapport aux technologies existantes. En conséquence, le CEA Le Ripault a développé les deux techniques d'avenir que sont les dispositifs SAW et la fluorescence.

Développement de capteurs chimiques pour la détection d'explosifs

Présentation du matériau sensible

Cette partie présente un exemple de développement d'un matériau sensible aux explosifs. À partir du même matériau, deux dispositifs sensibles seront testés, à savoir une microbalance à quartz et un capteur fluorescent.

Comme cela a déjà été évoqué, les polymères constituent une famille de composés particulièrement intéressants pour la détection des gaz et notamment des explosifs. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons mis au point des polymères chiraux π -conjugués spécifiques à la détection des explosifs de type nitroaromatiques comme le TNT [19-20]. Un exemple de matériau de type polyimine est présenté figure 6. Ce matériau se compose d'une structure π -conjuguée qui lui confère le caractère fluorescent, et d'un cycle aromatique substitué par des groupements alkoxyles qui confèrent une richesse en électrons suffisante pour présenter une excellente affinité pour les nitroaromatiques pauvres en électrons. Ces groupements facilitent la mise en solution du polymère, et par conséquent sa mise en forme, et une unité chirale qui confère une bonne porosité au matériau sous forme de film mince.

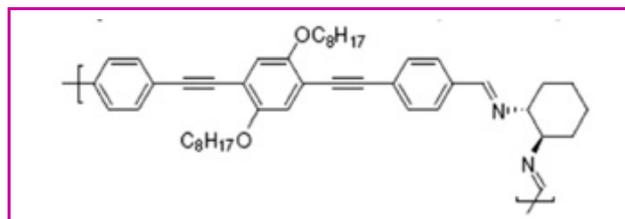


Figure 6 - Polyimine racémique.

Microbalance à quartz

Le premier système de détection auquel on peut s'intéresser est la microbalance à quartz. Une microbalance à quartz de fréquence fondamentale de 9 MHz est revêtue d'un film mince de polyimine. La microbalance et le dispositif de mesure sont présentés en figure 7. L'appareillage qui permet d'acquérir la fréquence de la microbalance a été développé au laboratoire, il présente une résolution de 1 Hz.

Tableau II - Les principales technologies utilisées pour la détection d'explosifs.

Technologies	Degré de développement	Coût	Sensibilité	Portabilité	Limitation
Chien	commercialisé	10 à 20 k\$ + nourriture	ppb/ppt	transportable	Formation de l'opérateur nécessaire Suivi continu impossible
IMS	commercialisé	30 à 80 k\$	ppm/ppb	portable	Calibration fréquente nécessaire
Capteurs piézo-électriques	MBQ	-	ppm/ppb	portable	Sélectivité et sensibilité dépendante de la couche sensible
	SAW	-	ppb/ppt	portable	
	Microleviers	-	ppm/ppb	-	
Fluorescence	développement	-	ppb/ppt	portable	Sélectivité et sensibilité dépendante de la couche sensible

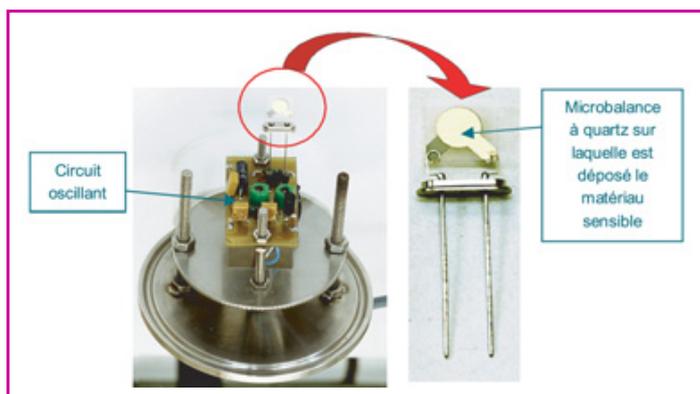


Figure 7 - La microbalance et le dispositif de mesure associé.

Le capteur constitué par la microbalance revêtue de polymère a été exposé à différentes vapeurs à 20 °C. Pour le 2,4-dinitrotoluène, représentatif des explosifs de type nitroaromatique, la concentration testée est de 300 ppb et différents solvants interfèrent, représentatifs d'atmosphères polluées exemptes de traces d'explosifs : le dichlorométhane, le toluène, la méthyléthylcétone et l'éthanol. Dans chaque cas, la concentration testée est supérieure à 10 000 ppm. Les signaux du capteur sont présentés en figure 8. On constate que chaque vapeur conduit à une diminution de fréquence de la microbalance qui traduit une adsorption des vapeurs à la surface du matériau. La cinétique d'adsorption et de désorption est lente dans le cas du DNT, et beaucoup plus rapide dans le cas des solvants. Si l'on s'intéresse aux sensibilités du matériau, c'est-à-dire aux réponses ramenées à 1 ppm pour chaque vapeur, on constate que la sensibilité du polymère au DNT atteint 266 Hz/ppm alors qu'elle est toujours très inférieure à 0,1 pour les solvants (tableau III).

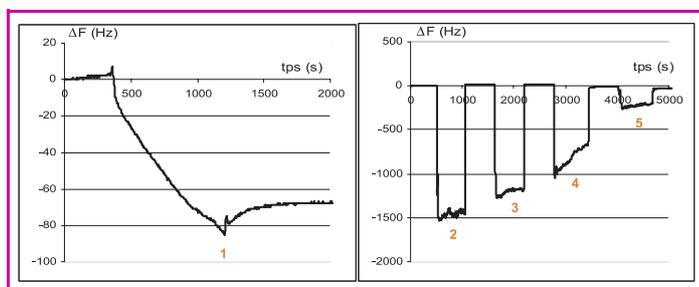


Figure 8 - Réponses de la microbalance au DNT (1), au dichlorométhane (2), au toluène (3), à la méthyléthylcétone (4) et à l'éthanol (5).

Tableau III - Sensibilité du polymère à différentes vapeurs.

Analyte	Concentration (ppm)	Réponse (Hz)	Sensibilité (Hz/ppm)
DNT	0,3	80	266
dichlorométhane	580 000	1456	0,003
toluène	38 000	1204	0,032
méthyléthylcétone	126 000	758	0,006
éthanol	79 000	199	0,003

Capteur fluorescent

On peut mettre à profit la fluorescence du polymère π-conjugué en utilisant ce matériau comme capteur optique. Le dispositif de mesure se compose d'un spectrofluorimètre



Figure 9 - Cellule de détection et spectrofluorimètre.

FLUROMAX 3 (Jobin Yvon) et d'une cellule spécifique (figure 9). Cette cellule permet de mesurer la fluorescence d'un matériau déposé sur une lame de quartz tout en plaçant dans différentes atmosphères gazeuses.

Un exemple de réponse au DNT d'une lame de quartz revêtue de polyimine est présenté en figure 10. Nous avons choisi d'exciter le matériau à une longueur d'onde de 391 nm, l'intensité de fluorescence est mesurée à 508 nm. On constate qu'elle diminue très nettement en présence de DNT.

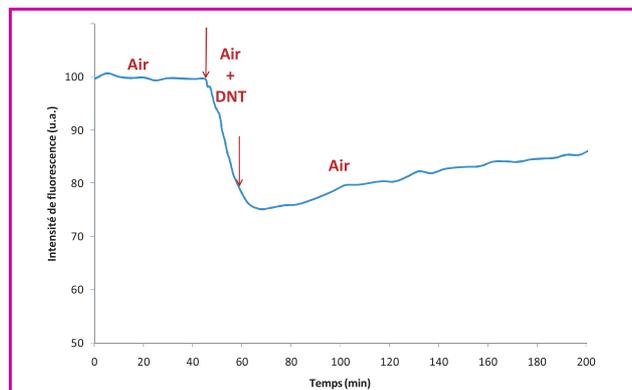


Figure 10 - Suivi de l'intensité de fluorescence du polymère sous air puis sous DNT (100 ppb).

Le caractère π-conjugué, la présence d'un cycle enrichi en électrons et d'une unité chirale confère au matériau une aptitude marquée pour la détection des nitroaromatiques. Ce composé peut ainsi être utilisé avec succès comme élément sensible d'un capteur fluorescent ou d'une microbalance à quartz.

Conclusion

Malgré l'enjeu capital dans la lutte antiterroriste, il existe aujourd'hui peu de dispositifs commerciaux opérationnels pour la détection d'explosifs en mode vapeur. Les technologies les plus performantes actuellement sont la spectrométrie à mobilité ionique associée à un prélèvement par frottis. C'est pourquoi un fort intérêt s'est porté lors des années passées sur la recherche et le développement de capteurs chimiques de gaz. Ceux-ci offrent l'avantage de pouvoir détecter les vapeurs d'explosifs avec des dispositifs à faible coût et simples d'utilisation. À ce titre, le CEA Le Ripault a pu mettre au point en collaboration avec un laboratoire de l'École de Chimie de Montpellier un matériau organique présentant la particularité de pouvoir détecter une centaine de ppb de 2,4-DNT aussi bien par microbalance

à quartz que par fluorescence. Les premiers dispositifs devraient voir le jour d'ici deux à trois ans.

Notes et références

- (1) NRBC pour risques nucléaire, radiologique, biologique et chimique.
- (2) www.brijot.com
- (3) Smiths Detection, www.smithsdetection.com
- (4) Sandia National Laboratories, www.sandia.gov
- (5) Scintrex Trace Corporation, www.tracedetection.com
- (6) www.nomadics.com
- [1] Furton K.G., Myers L.J., *Talanta*, **2001**, *54*, p. 487.
- [2] Czarnik A.W., *Nature*, **1998**, *394*, p. 417.
- [3] Weinstein S., Drozdenko R., Weinstein C., Third International Symposium on Analysis and Detection of Explosives, Mannheim-Neustheim, Allemagne, **1989**, p. 32.31-32.32.
- [4] Lesnes C., *Le Monde*, 17-18 décembre **2006**, p. 20.
- [5] Wallis E., Griffin T.M., Popkie N., Eagan M.A., McAtee R.F., Vrazel D., McKinly J., *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, **2005**, *5795*, p. 54.
- [6] Tomita Y., Ho M.H., Guilbault G.G., *Anal. Chem.*, **1979**, *51*(9), p. 1475.
- [7] Rajakovic L.V., *J. Serb. Chem. Soc.*, **1991**, *56*(8-9), p. 521.
- [8] Kurosawa S., Kamo N., Matsui D., Kobatake Y., *Anal. Chem.*, **1990**, *62*(4), p. 353.
- [9] Pasquinet E., Bouvier C., Théry-Merland F., Hairault L., Leuret B., Méthivier C., Pradier C.-M., *J. Colloid. Interf. Sci.*, **2004**, *272*, p. 21.
- [10] Théry-Merland F., Méthivier C., Pasquinet E., Hairault L., Pradier C.M., *Sens. Actuators B*, **2006**, *114*, p. 223.
- [11] Montméat P., Madonia S., Pasquinet E., Hairault L., Gros C.P., Barbe J.-M., Guillard R., *IEEE Sens. J.*, **2005**, *5*(4), p. 610.
- [12] Théry-Merland F., Besnard S., Montméat P., Hairault L., *Techniques de l'Ingénieur*, **2005**, *6*, IN 33, p. 1.
- [13] Baldini F., Chester A. N., Homola, J., Martellucci S., *Optical Chemical Sensors*, NATO Science Series, Springer, Dordrecht, **2004**.
- [14] *Fluorescence Sensors and Biosensors*, R.B. Thompson (ed.), Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, **2006**.
- [15] *Advanced Concepts in Fluorescence Sensing. Part A: Small Molecule Sensing* (vol. 9) in *Topics in Fluorescence Spectroscopy*, C.D. Geddes, J.R. Lakowicz (eds.), Springer, New York, **2005**; *ibid Part B: Macromolecular Sensing* (vol. 10).
- [16] Thomas III S.W., Joly G.D., Swager T.M., *Chem. Rev.*, **2007**, *107*, p. 1339.

- [17] Yang J.-S., Swager T.M., *J. Am. Chem. Soc.*, **1998**, *120*, p. 5321 ; *ibid* p. 11864.
- [18] Sohn H., Sailor M.J., Madge D., Troglor W.C., *J. Am. Chem. Soc.*, **2003**, *125*, p. 3821.
- [19] Clavaguera S., *Conception, synthèse et caractérisation de matériaux fluorescents pour l'élaboration d'un capteur chimique d'explosifs*, Thèse de doctorat, Université de Montpellier, **2007**.
- [20] Hairault L., Pasquinet E., Montméat P., Moreau J., Lère-Porte J.-P., Wakim S., Serein-Spirau F., brevet FR 04 50719, 9 avril **2004**.



S. Clavaguera



C. Véron



F. Parret



P. Montméat



L. Hairault

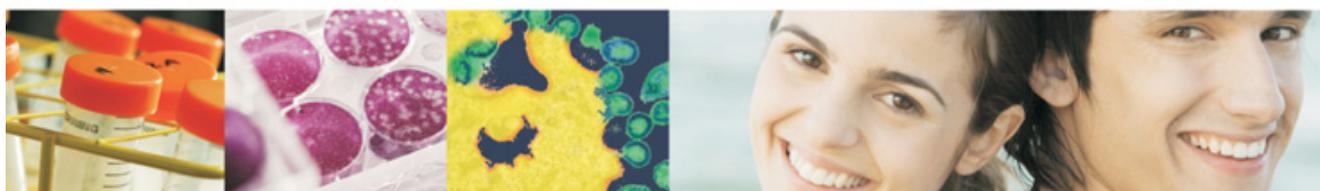
Simon Clavaguera a effectué sa thèse de doctorat au CEA Le Ripault et au laboratoire AM₂N (Architectures moléculaires et matériaux nanostructurés) de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier, et **Clément Véron** y a fait son stage d'IUT Mesures Physiques.

Frédéric Parret est post-doctorant, **Pierre Montméat** est ingénieur de recherche,

et **Lionel Hairault*** (*auteur correspondant*) est chef du laboratoire physico-chimie au CEA Le Ripault.

Jean-Pierre Lère-Porte est professeur au laboratoire AM₂N de l'ENSC Montpellier.

* CEA Le Ripault, BP 16, 37260 Monts.
Courriel : lionel.hairault@cea.fr



IDENIX

Le siège du groupe Idenix est situé à Cambridge, Massachusetts, USA.
Idenix a également une unité de Recherche et Développement à Montpellier, France,
et une unité de Recherche à Cagliari, Italie.