

Déjouer le terrorisme chimique

L'apport des nanotechnologies et des détecteurs de gaz toxiques

Simon Clavaguera, Momar Toure, Alexandre Carella et Jean-Pierre Simonato

Résumé L'avènement du terrorisme international implique de se prémunir au mieux des attaques potentielles, et notamment de celles utilisant des composés chimiques mortels tels que les composés organophosphorés. L'utilisation de toxiques chimiques peut induire une déstabilisation sociale et politique, avec des effets psychologiques profonds et un impact médiatique fort comme en témoigne la tristement célèbre attaque au sarin dans le métro de Tokyo en 1995. La détection rapide de gaz de combat nécessite l'existence de capteurs possédant une fonction d'alerte extrêmement efficace et idéalement spécifique du type de gaz utilisé, afin de pouvoir déclencher immédiatement les procédures adéquates de protection et d'intervention. Cet article décrit certaines des techniques commercialisées aujourd'hui pour la détection d'agents neurotoxiques organophosphorés, et quelques axes de développement, basés notamment sur les nanotechnologies, qui pourraient apporter des avancées décisives en regard des techniques existantes.

Mots-clés **Capteur, toxiques de guerre, sarin, nanotechnologies, agents neurotoxiques.**

Abstract **Nanotechnologies and nerve gas sensors against chemical terrorism**
Organophosphorus compounds represent one of the most important and lethal classes of chemical warfare agents. The ease of manufacturing organophosphorus compounds based on inexpensive starting materials makes them a weapon of choice for terrorist attacks. As a consequence, the rapid detection of these nerve agents requires highly sensitive and selective sensors in order to alert and launch adequate safety procedures. Some commercially available sensors for organophosphorus nerve agents are presented in this article, as well as promising approaches based on nanotechnologies that should give rise to advanced sensors highly competitive when compared to current technologies.

Keywords **Sensor, warfare agents, sarin, nanotechnologies, nerve agents.**

La première utilisation d'armes chimiques remonte certainement au temps des chasseurs-cueilleurs qui trempaient les pointes de leurs flèches dans des venins de scorpions, de serpents ou d'extraits végétaux toxiques. De célèbres descriptions mythologiques illustrent ce point, notamment les flèches enduites du poison de l'Hydre de Lerne qui permirent à Héraclès de tuer Nessos⁽¹⁾. Depuis les Grecs et les Romains, de nombreux récits rapportent l'utilisation sporadique d'armes chimiques sans que jamais, jusqu'à la Première Guerre mondiale, une utilisation massive et systématique n'en soit faite. Ainsi, c'est au cours du XX^e siècle que la grande majorité des armes chimiques a été découverte, produite et utilisée à des fins militaires par de nombreux pays. En 1993, la convention sur l'interdiction des armes chimiques (CIAC) a été signée afin d'exclure l'utilisation de telles armes. Mais même si cela reste un élément majeur dans l'évolution du droit international, certains pays n'ont toujours pas ratifié cette convention. De plus, la situation géopolitique a fortement évolué et l'utilisation de toxiques chimiques par des organisations terroristes devient désormais un risque majeur. Cela s'est notamment concrétisé lors d'attentats perpétrés par la secte Aum Shinrikyo, dont la tristement célèbre et meurtrière attaque au sarin dans le métro de Tokyo en 1995 [1].

Parmi les armes chimiques, on distingue différentes familles selon leurs modes d'actions (agents suffocants, vésicants, hémotoxiques ou neurotoxiques – voir *tableau I*).

La fabrication relativement aisée de ces composés ainsi que leur très forte toxicité en font des armes de choix pour les organisations terroristes ; c'est pourquoi le développement de capteurs capables de détecter *rapidement* et *sélectivement* ces agents est devenu un enjeu prioritaire. Cet article ne pouvant être exhaustif, nous nous intéresserons particulièrement aux composés neurotoxiques tels que le sarin, qui sont particulièrement problématiques car assez facilement accessibles et extrêmement toxiques.

Étude des composés organophosphorés neurotoxiques

La découverte des agents neurotoxiques les plus puissants a été le fruit d'importantes recherches menées notamment en Allemagne dans les années 1930 afin d'augmenter les rendements agricoles à l'aide de nouveaux pesticides synthétiques, plus économiques et plus sélectifs. C'est ainsi que le tabun a été synthétisé en 1937 par Gerhardt Schrader. Sous sa direction, un ensemble de composés toxiques ont été développés, généralement répertoriés sous le terme d'agents G (G pour German). En 1938, les chimistes Schrader, Ambros, Rüdiger et van den Linde découvraient le sarin.

Très rapidement, la très forte toxicité de ces composés intéresse les militaires et d'importantes quantités sont produites (plusieurs milliers de tonnes). Il semble qu'ils n'aient

Tableau I - Les différents types d'armes chimiques.

Source : Bureau des affaires du désarmement des Nations unies, UNIDIR.

Agent suffocant (<i>choking agent, asphyxiant</i>)	Il s'agit généralement d'un gaz ou d'un liquide très volatil qui, lorsqu'il est inhalé, provoque une irritation et de graves lésions au niveau des bronches et des poumons. Ces derniers se remplissent progressivement de liquide provenant de la circulation du sang. Ce mécanisme bloque l'arrivée d'oxygène dans l'organisme et entraîne une mort par asphyxie. Les suffocants les plus courants sont le chlore, la chloropicrine et le phosgène.
Agent vésicant (<i>blister agent, vesicant</i>)	Irritant. Il s'agit généralement de liquides huileux qui provoquent des brûlures ou des cloques sur la peau quelques heures après l'exposition. Le contact avec les yeux entraîne des lésions rapides et peut provoquer une inflammation, voire la cécité. Les lésions des voies respiratoires ressemblent à celles provoquées par les suffocants. Les agents vésicants les plus connus sont l'ypérite, les moutardes à l'azote, les lewisites et l'oxime de phosgène.
Agent hémotoxique (<i>blood agent</i>)	Bloque l'absorption de l'oxygène dans le sang, entraînant une mort par asphyxie. Les agents hémotoxiques entrent généralement dans l'organisme par les voies respiratoires ou la peau. Ils agissent très rapidement. Comme ils sont très instables, ils sont généralement considérés comme n'étant pas adaptés pour des opérations militaires de grande envergure. Les agents hémotoxiques les plus connus sont l'acide cyanhydrique et le chlorure de cyanogène.
Agent neurotoxique (<i>nerve agent</i>)	Il s'agit d'un liquide incolore, insipide et inodore qui perturbe le fonctionnement normal des muscles et du système nerveux. Les agents neurotoxiques figurent parmi les armes chimiques les plus mortelles. Il en existe deux catégories : les agents G et les agents V. Ils regroupent plusieurs centaines de composés organophosphorés qui sont stables et très toxiques, et qui ont des effets rapides lorsqu'ils sont inhalés ou absorbés par la peau. Les principaux agents neurotoxiques sont le sarin (GB), le soman (GD), le tabun (GA) et le VX.

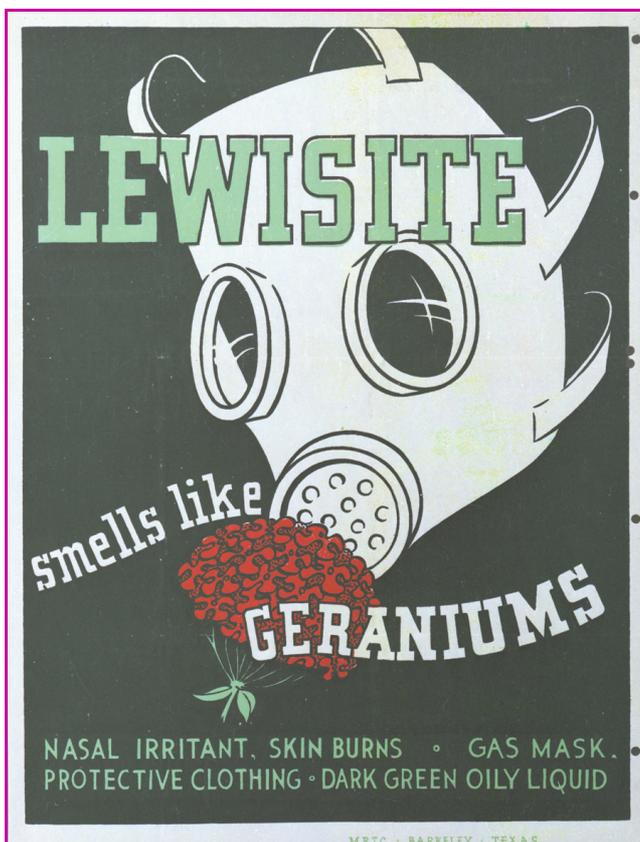


Illustration gracieusement fournie par le National Museum of Health and Medicine, Otis Historical Archives, Washington DC (<http://nmhm.washingtondc.museum/index.html>).

toutefois pas été utilisés pendant la Seconde Guerre mondiale. La période d'après-guerre ainsi que la guerre froide ont été propices à de très importantes recherches, menées notamment par les Britanniques, les Américains et les Russes. Une nouvelle génération d'agents organophosphorés a été développée, dont le VX est probablement le composé le plus connu (*tableau II*). Depuis la ratification du traité

sur l'interdiction des armes chimiques en 1997, la plupart des pays signataires se sont engagés à arrêter la production et à détruire leurs stocks d'agents neurotoxiques. Il apparaît cependant depuis une vingtaine d'années que ces composés intéressent les organisations terroristes.

Par définition, les composés organophosphorés comportent toujours un atome de phosphore, des atomes de carbone et très généralement des atomes d'oxygène et/ou d'azote. Cette catégorie comprend essentiellement deux sous-familles, les phosphates organiques et les phosphonates, qui se différencient selon les substituants de l'atome de phosphore (*figure 1*). Ce sont des esters de l'acide phosphorique dans lesquels R^1 et R^2 sont des substituants de nature organique et X un nucléofuge. Les substituants R peuvent être aliphatiques (alkyl- ou alkyloxy-) et/ou aromatiques (aryloxy-). Le substituant X peut être par exemple un atome de fluor, un groupement cyano ou un dérivé soufré.

Les neurotoxiques organophosphorés existent sous forme liquide à pression atmosphérique et température ambiante. Ils ne présentent généralement pas d'odeur ou de couleur particulière. Les principaux vecteurs d'intoxication sont la pénétration percutanée (phase liquide) et l'inhalation (phase gazeuse). Le mode d'intoxication dépend donc grandement des propriétés physico-chimiques de chaque molécule toxique ; par exemple, la grande volatilité du sarin le rend particulièrement dangereux par inhalation.

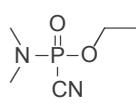
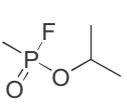
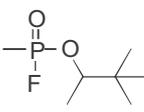
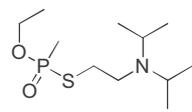
Toxicité, mécanisme d'action et antidotes

Les agents neurotoxiques organophosphorés tels que les agents G (sarin, soman, tabun...) et les agents V (VX étant le plus connu) sont de puissants inhibiteurs des sérines protéases, et plus particulièrement de l'acétylcholine estérase (AChE) qui est une enzyme essentielle au fonctionnement du système nerveux central et périphérique [2]. L'AChE est responsable du métabolisme de l'acétylcholine (ACh) dans la synapse après que ce neurotransmetteur a été libéré par le neurone présynaptique (*figure 2*). L'ACh est un des seuls neurotransmetteurs dont l'activité physiologique est arrêtée après métabolisation en deux produits inactifs (acétate et

Tableau II - Propriétés physico-chimiques d'agents neurotoxiques [2].

*Exposition par inhalation.

LCt50 (concentration létale 50) : concentration du toxique dans l'air inspiré et causant la mort de 50 % des sujets exposés.

	Agent organophosphoré			
	Tabun (GA)	Sarin (GB)	Soman (GD)	VX
Structure chimique				
Masse molaire	162,3 g.mol ⁻¹	140,1 g.mol ⁻¹	182,2 g.mol ⁻¹	267,4 g.mol ⁻¹
Volatilité (20 °C)	328 mg.m ⁻³	16 100 mg.m ⁻³	3 900 mg.m ⁻³ (25 °C)	10,5 mg.m ⁻³ (25 °C)
Concentration maximum dans l'air	75 ppmv	3 800 ppmv	520 ppmv	0,93 ppmv
LCt50*	400 mg.min.m ⁻³	100 mg.min.m ⁻³	70 mg.min.m ⁻³	100 mg.min.m ⁻³

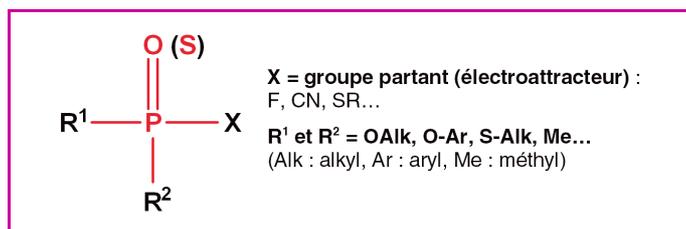


Figure 1 - Structure générale des composés organophosphorés.

Il existe des antidotes pour limiter les effets d'un empoisonnement avec des agents neurotoxiques qui agissent sur deux aspects :

- l'usage d'un antagoniste cholinergique (atropine) permet de stopper la stimulation continue des récepteurs de l'ACh lorsqu'il y a accumulation d'ACh dans la synapse ;
- l'activité enzymatique de l'AChE peut être régénérée par une déphosphorylation du résidu sérine à l'aide de nucléophiles forts à effet α (oximes tels que la pralidoxime).

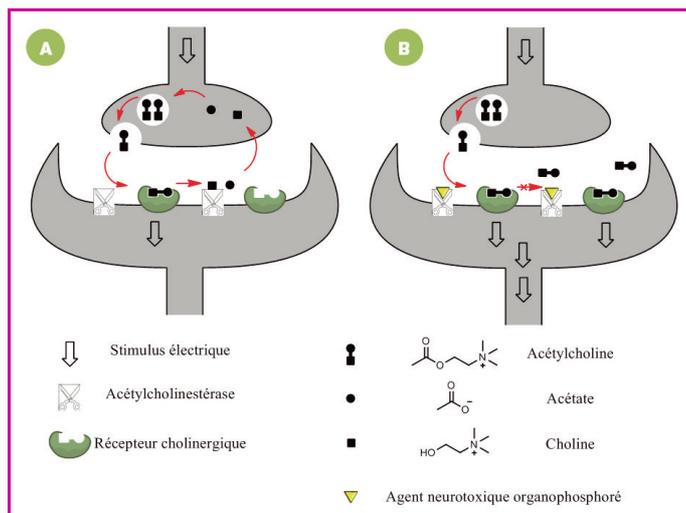


Figure 2 - Hydrolyse intrasynaptique de l'acétylcholine : A) transmission normale de l'impulsion dans la synapse cholinergique ; B) présence d'agent neurotoxique organophosphoré qui inhibe l'acétylcholinestérase et se traduit par une accumulation d'acétylcholine et par la stimulation continue des récepteurs cholinergiques.

choline) plutôt que par recapture par le neurone présynaptique.

Les agents neurotoxiques présentent une réactivité vis-à-vis des nucléophiles. C'est cette réactivité chimique qui leur confère leur extrême toxicité en phosphorylant le groupement hydroxyle du résidu sérine du site catalytique de l'AChE, inhibant ainsi l'activité enzymatique. En conséquence, l'inhibition de l'AChE se traduit par une accumulation d'ACh au sein de la synapse qui provoque une stimulation continue des récepteurs post-synaptiques. La toxicité de certains composés comme le VX est telle que la dispersion de quelques microlitres sur la peau peut entraîner la mort.

Moyens de détection commerciaux de composés neurotoxiques organophosphorés

La capacité à détecter rapidement, et idéalement à identifier, les agents toxiques chimiques en général et les organophosphorés en particulier est d'une importance cruciale, aussi bien sur les terrains d'interventions militaires que pour la sécurité des populations civiles. Un grand nombre de paramètres sont à prendre en compte pour évaluer la pertinence de chacune des techniques possibles ainsi que leur adaptabilité selon les conditions d'utilisation visées. Les facteurs principaux sont par exemple la sélectivité, la sensibilité, le temps de réponse, le taux de faux positifs et la facilité d'utilisation. Il existe à ce jour un certain nombre de dispositifs basés sur différentes technologies chimiques, enzymatiques ou physiques permettant de détecter la présence de composés organophosphorés. Parmi ces techniques, on peut citer la spectroscopie de mobilité ionique, la photométrie de flamme, les spectroscopies infrarouge et Raman, les capteurs à fluorescence, les indicateurs colorimétriques, les détecteurs à semi-conducteurs, etc. Un état de l'art complet ne peut être présenté ici, mais une revue récente des détecteurs commercialement disponibles aujourd'hui est accessible sur Internet [3]. Nous présentons ci-après quelques uns des dispositifs les plus utilisés actuellement pour la détection de ces agents.

Spectroscopie de mobilité ionique

La technique de détection la plus répandue est sans doute la spectroscopie de mobilité ionique (IMS). Le principe de détection permet de distinguer des molécules ionisées selon leurs masses, charges et mobilités dans la phase gazeuse, en présence d'un champ électrique. L'arrivée des

ions sur le détecteur électrique génère un signal caractéristique qui est comparé avec une base de données pour éventuellement déclencher une alarme [3-4]. Les principaux avantages de cette technique résident en une relativement grande simplicité de fabrication et d'utilisation des appareils, notamment en raison de leur portabilité, pour un coût modéré et une sensibilité jusqu'à des concentrations de l'ordre du ppb. Néanmoins la sélectivité observée est relativement médiocre en raison du processus d'ionisation non discriminant qui conduit à des faux positifs.

Photométrie de flamme

La photométrie de flamme par émission est particulièrement appropriée pour détecter les composés organophosphorés : les dérivés organophosphorés et soufrés contenus dans l'air émettent chacun une radiation de couleur différente après passage dans une flamme air/hydrogène. Un spectromètre appelé « appareil portatif de contrôle de la contamination » (AP2C) a été développé pour contrôler une contamination potentielle aux armes chimiques, ou pour vérifier l'efficacité d'une décontamination (figure 3). Il est capable de détecter les composés comportant un groupement phosphoré et/ou soufré à l'état de vapeur ou d'aérosol tels que les neurotoxiques organophosphorés ou l'ypérite (agent vésicant contenant du soufre). Cet appareil est très performant, mais il est relativement encombrant et sa très grande sensibilité à toute trace de phosphore peut s'avérer problématique car il existe un grand nombre de sources de phosphore et de soufre dans l'environnement (fumées d'échappement, pesticides, engrais, solvants, soufre et phosphore inorganiques...). L'AP2C détecte la présence du sarin à une concentration de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (environ 8 ppb) en deux secondes [3].



Figure 3 - Appareil portatif de contrôle de la contamination (AP2C) (www.mondial-defence.com/Products/Individual_Products/AP2C.html).

D'autres techniques physiques telles que la photométrie infrarouge, la spectroscopie Raman, la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse donnent également des systèmes performants, mais elles sont difficilement miniaturisables et ne répondent pas aujourd'hui au cahier des charges d'un capteur nomade.

Techniques chromogéniques (figure 4)

Le papier détecteur triple usage est également très répandu. Ce système de détection des vésicants et neurotoxiques est basé sur une technique chromogénique. Le papier détecteur de type PDF1 contient trois colorants



Figure 4 - Techniques de détection chromogéniques : A) papier PDF1 ; B) détecteur NAVD ; C) M256A1 Chemical Agent Detector Kit, US Army.

différents qui permettent de détecter la présence d'agents neurotoxiques G et V ou de vésicants. Il en est de même pour le papier de détection M8/M9, mais ce type de détecteur n'est utilisable que sur les liquides et génère de nombreux faux positifs (liquide de frein, antigel, antimoustique...).

Le procédé utilisé par le test détecteur de vapeurs neurotoxiques (NAVD) est basé sur une réaction enzymatique dont la réponse requiert plusieurs minutes. Si ce composant peut être utile, il ne réagit pas à tout et son temps de réaction est rédhibitoire pour une détection rapide. Une analyse similaire est valable pour la trousse américaine M256 qui est multi-agents (agents neurotoxiques, hémotoxiques et vésicants) mais dont le temps d'analyse est de quinze minutes. On peut également citer d'autres systèmes commerciaux tels DETINDIV, Hazcat Kit, LODITOX, etc., qui se rapprochent des techniques susmentionnées.

Les capteurs chimiques en développement

Les détecteurs actuellement disponibles sur le marché présentant des inconvénients notables, de nouvelles méthodes de détection sont aujourd'hui à l'étude, notamment dans le cadre du développement des nanosciences et nanotechnologies.

À titre d'exemple peuvent être cités les travaux sur la détection par fluorescence de R.S. Pilato [5], J. Rebek [6], T.M. Swager [7] et A.M. Costero [8]. Les sondes présentent un fluorophore conjugué dont la fluorescence est inhibée par un mécanisme de transfert d'électron photoinduit (PET) qui implique un atome d'azote tertiaire. Les molécules sensibles contiennent un atome d'azote situé à proximité spatiale d'un alcool primaire afin de permettre deux réactions successives avec les composés organophosphorés (figure 5). Ces réactions aboutissent à des composés cycliques dont l'atome d'azote est quaternaire. Il n'y a ainsi plus de mécanisme de type PET et la fluorescence augmente fortement. Le principe de détection d'agents organophosphorés par fluorescence repose donc sur la réactivité chimique des molécules cibles. La réaction d'estérification conduit à un bon groupement partant qui favorise l'attaque nucléophile de l'azote et libère

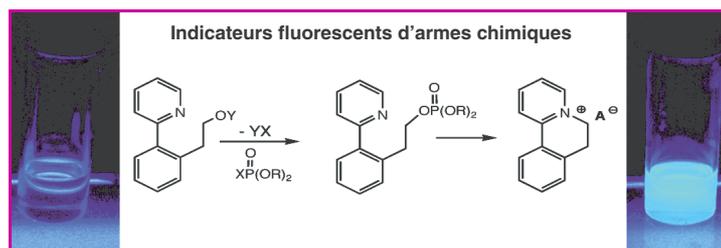


Figure 5 - Mécanisme de la réaction de la sonde organique avec les composés organophosphorés [7].

le nucléofuge phosphoré correspondant. Cette alkylation conduit à la formation de l'ammonium cyclique favorisant la fluorescence. Bien qu'intéressante, cette méthode requiert un système de détection de fluorescence difficilement miniaturisable et autonome.

Les nanomatériaux tels que les nanotubes de carbone, les nanofils ou les nanorubans de silicium sont à la base d'intenses recherches pour des applications dans le domaine des capteurs. Ils sont notamment utilisés comme matériaux semi-conducteurs dans des transistors à effet de champ ou pour la fabrication de « chemoresistors » ou « chemocapacitors ». Ces dispositifs ont démontré une extrême sensibilité à une modification électrostatique de leur environnement. Les équipes de L. Kong [9], T. Swager [10] ou de E. Snow [11] ont proposé des chemoresistors ou chemocapacitors à partir de nanotubes de carbone, mais ces systèmes pâtissent de la trop grande sensibilité intrinsèque des nanotubes qui induit de fait une sélectivité insuffisante. Les auteurs utilisent le caractère de base de Lewis du phosphonyle pour générer des liaisons hydrogène entre le matériau sensible donneur de liaison H et les composés organophosphorés accepteurs de liaison H. Les matériaux développés sont par exemple des nanotubes de carbone ou des polymères conjugués fonctionnalisés par des groupements *p*-hexafluoroisopropanol (figure 6). Dans ces méthodes de détection, la réactivité des composés organophosphorés n'est pas prise en compte, seul le caractère de base de Lewis est suivi et cela se traduit inévitablement par une faible sélectivité.

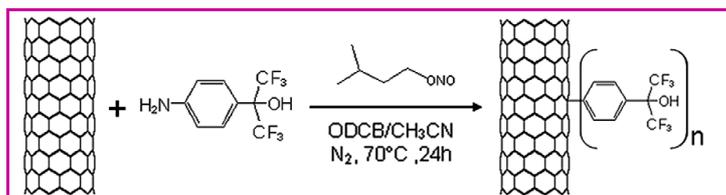


Figure 6 - Fonctionnalisation de nanotubes de carbone [9].

La fonctionnalisation de transistors à effet de champ à base de nanorubans de silicium a été réalisée avec des récepteurs organiques similaires à ceux développés par Rebek [6]. Ces nanomatériaux hybrides présentent une excellente réactivité pour les composés organophosphorés qui a été très récemment explorée [12]. Les molécules réceptrices greffées par hydrosilylation sur le nanoruban de silicium ($\sim 3 \times 10^{14}$ récepteurs.cm⁻²) réagissent avec les composés organophosphorés pour produire un ammonium quaternaire. La génération de charge à proximité du nanoruban de silicium entraîne quasiment instantanément une modification des performances électriques du transistor, ce qui en fait un signal de transduction facile à utiliser (figure 7). Ces dispositifs, extrêmement sensibles, permettent la détection très rapide de molécules simulant le sarin à des concentrations inférieures au ppm. Le simulant choisi, le diphenylchlorophosphate (DPCP), est un composé organophosphoré ayant une réactivité chimique comparable à celle du sarin (liaison phosphore-halogène) mais ne possédant pas sa toxicité, probablement en raison de son encombrement stérique qui lui interdit l'accès au site actif de l'acétylcholine estérase.

Lors de l'exposition au DPCP, le courant entre la source et le drain des transistors à base de nanorubans de silicium fonctionnalisés augmente drastiquement. Ces dispositifs se montrent *a priori* bien sélectifs, le test de plus de vingt interférents potentiels n'ayant donné aucun faux positif.

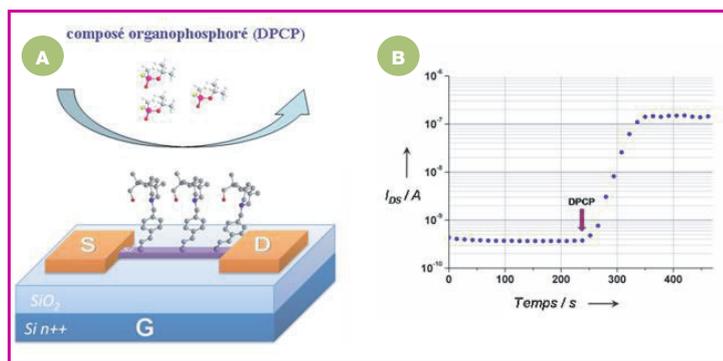


Figure 7 - A) Représentation d'un transistor à nanoruban de silicium fonctionnalisé, exposé à des molécules organophosphorées. B) Évolution de l'intensité du courant entre la source et le drain lors de l'exposition au DPCP.

L'intégration de ces dispositifs dans un démonstrateur simple possédant une électronique d'acquisition et de traitement du signal a été effectuée (figure 8). Ce démonstrateur de laboratoire permet l'étude du fonctionnement du capteur dans des situations proches de celles pouvant être rencontrées sur le terrain. Il a été démontré une sensibilité et une sélectivité comparables aux puces testées au laboratoire, et une miniaturisation plus poussée est en cours d'étude.



Figure 8 - Prototype de détection de composés organophosphorés neurotoxiques développé par les auteurs.

Conclusion et perspectives

L'avènement du terrorisme international implique de se prémunir au mieux des attaques potentielles, et notamment de celles utilisant des espèces chimiques mortelles telles que les composés organophosphorés. Il existe aujourd'hui de nombreux dispositifs sensibles aux gaz toxiques, mais ceux-ci souffrent de certains défauts qui peuvent réduire considérablement leur intérêt selon le concept d'utilisation déterminé. De nouvelles approches en rupture avec les technologies existantes apparaissent, mais les dispositifs issus de ces techniques devront être évalués en comparaison aux matériels utilisés aujourd'hui et montrer leur supériorité ou *a minima* leur intérêt spécifique. À titre d'exemple, les dispositifs issus des nanotechnologies permettent de réaliser des dispositifs de très petites tailles ; ils pourraient donc être idéalement incorporés à des vêtements techniques (pompiers, militaires...) et/ou placés à des endroits stratégiques afin de parfaire la surveillance de lieux publics. Pour traiter rapidement l'information issue de ces capteurs, il est tout à fait envisageable de leur adjoindre une unité de communication radiofréquence afin de propager au mieux l'information d'alerte en cas de présence de toxiques chimiques. Leur faible consommation électrique estimée permet d'envisager des capteurs autonomes.

Il ne fait aucun doute que de nouveaux capteurs performants vont voir le jour dans les années à venir. La

demande en ce sens est forte et certaines (nano)technologies arrivent à maturité pour répondre aux besoins exprimés.

Note et références

- (1) L'utilisation d'un tel poison se retourna ensuite contre Héraclès, provoquant indirectement sa mort.
- [1] D'Agostino P.A., Chenier C.L., DRDC Suffield TM 2009-027, Defence R&D, Canada - Suffield, Oct. **2009**.
- [2] De Revel T., Gourmelon P., Vidal D., Renaudeau C., Menace terroriste, Approche médicale, **2005**, Éditions John Libbey Eurotext, Esher, R.-U.
- [3] Sferopoulos R., A review of chemical warfare agent detector technologies and commercial-off-the-shelf items, Defense Science and Technology Organisation, Australia Government, **2008**, DSTO-GD-0570. Disponible sur www.arrowtechinc.com/ap2c.htm
- [4] Zimmermann S., Barth S., Baether W.K.M., Ringer J., *Anal. Chem.*, **2008**, *80*, p. 6671.
- [5] Van Houten K.A., Health D.C., Pilato R.S., *J. Am. Chem. Soc.*, **1998**, *120*, p. 12359.
- [6] Dale T.J., Rebek J. Jr., *J. Am. Chem. Soc.*, **2006**, *128*, p. 4500.
- [7] Zhang S.W., Swager T.M., *J. Am. Chem. Soc.*, **2003**, *125*, p. 3420.
- [8] Costero A.M., Gil S., Parra M., Mancini P.M.E., Martínez-Mañez R., Sancenón F., Royo S., *Chem. Commun.*, **2008**, p. 6002.
- [9] Kong L., Wang J., Fu X., Zhong Y., Meng F., Luo T., Liu J., *Carbon*, **2010**, *48*, p. 1262.
- [10] Wang F., Gu H., Swager T.M., *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, *130*, p. 5392.
- [11] Snow S., Perkins F.K., Houser E.J., Badescu S.C., Reinecke T.L., *Science*, **2005**, *307*, p. 1942.
- [12] a) Carella A., Simonato J.-P., Brevet EP215452, 29/07/2008 ;
b) Clavaguera S., Carella A., Caillier L., Celle C., Pécaut J., Lenfant S., Vuillaume D., Simonato J.-P., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2010**, *49*, p. 4063.



S. Clavaguera



A. Carella



M. Toure

Simon Clavaguera et Alexandre Carella sont chercheurs, **Momar Toure** a été stagiaire ingénieur (il est actuellement doctorant à l'Institut des Sciences Moléculaires de Marseille), et **Jean-Pierre Simonato** (auteur correspondant) est responsable du groupe CAN (Chimie Appliquée aux Nano-objets), au Département des Technologies des NanoMatériaux du Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux (LITEN) au CEA-Grenoble*.



J.-P. Simonato

* Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, LITEN/DTNM/LCRE, 17 rue des Martyrs, F-38054 Grenoble Cedex 9.

Courriels : simon.clavaguera@cea.fr ;

alexandre.carella@cea.fr ; jean-pierre.simonato@cea.fr

Faculté des Sciences et Technologies
Dpt Chimie - Biochimie

UFR Lyon 1

La Chimie-Biochimie de Lyon 1 c'est environ :

- 1300 étudiants de Bac à Bac+5
- 121 Enseignants-Chercheurs
- 90 Personnels Techniques, Administratifs, Ouvriers de service
- 250 personnels CNRS
- 8 UMR-CNRS, 1 équipe d'accueil
- 1 fédération de recherche : Institut de Chimie de Lyon
- 3 écoles doctorales (Chimie, Matériaux et Sciences-Santé)

Les formations proposées par le Département

<p>Licences Sciences, Technologies, Santé</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mention Biochimie - Mention Chimie <p>Licences Professionnelles</p> <ul style="list-style-type: none"> - Transformation des métaux - Plasturgie et matériaux composites - Énergie et génie climatique (en partenariat avec le département de physique) - Ecoconception des Matières plastiques (en préparation) 	<p>Masters Sciences, Technologies, Santé</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analyse et contrôle physico-chimiques - Biochimie (co-habilitation INSA) - Chimie (partenariat CPE, INSA, ENS Lyon) - Matériaux (co-habilitation INSA, ECL) - Sciences de la matière (co-habilitation ENS)
--	--

Directrice : Professeur Héléne Parrot – Bâtiment E. CHEVREUL - 6 Rue Victor Grignard,
Université Claude Bernard Lyon1
43, boulevard du 11 Novembre 1918 - 69622 VILLEURBANNE CEDEX
<http://fst-chimie.univ-lyon1.fr>

Les formations sont adossées aux compétences des laboratoires de recherche sur les thèmes suivants :

- Chimie pour la santé**
 - Biochimie • Biologie et chimie des protéines •
 - Reconnaissance et transduction moléculaire •
 - Infectiologie • Molécules Bioactives •
 - Chimie bio et supramoléculaire • Hydrazine •
- Chimie environnement et catalyse**
 - Catalyse • Environnement • Chimiométrie
 - Formulation • Sciences analytiques
- Chimie des matériaux**
 - Multimatériaux • Matériaux polymères •
 - Biomatériaux •