

N° 472 - AVRIL 2022

l'actualité chimique

LE JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE FRANCE



**RÉPONDRE
AUX MENACES**

**DES MODÈLES
FÉMININS**

**LA MÉTHODE
PIT-SLOPE**

This conference is endorsed by



ICNI Strasbourg

2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON NONCOVALENT INTERACTIONS

18th-22nd July, 2022 | University of Strasbourg, France

in persona conference

sponsored by



*Make the History,
Join the ICNI!*



Vivian Yam

Giuseppe Resnati



Jean-Marie Lehn

Alexander Tkatchenko



Angela Casini

...and many other distinguished scientists !

- van der Waals Prize laureate lectures
- Cross-cutting lectures
- Plenary lectures
- Keynote Lectures
- Oral Communications
- Poster Sessions
- Satellite IUPAC workshop "Interactions involving elements of groups 11, 14, 15, 16 and beyond"

Registration Deadlines: Early bird: April 16th 2022 - Normal: June 4th 2022 - Late: July 2nd 2022

Information, Registration and Abstract Submission:

<http://icni2021.unistra.fr>

l'actualité chimique

Édité par la Société Chimique de France
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
Tél. 01 40 46 71 60 – scf@societechimiquedefrance.fr
www.societechimiquedefrance.fr
Directeur de la publication : Stanislas Pommeret
Partenariats : CNRS, Fondation de la Maison de la Chimie

RÉDACTION

SCF, 28 rue Saint-Dominique, 75007 Paris
Tél. : 01 40 46 71 64 – redaction@lactualitechimique.org
www.lactualitechimique.org

Rédactrice en chef : Patricia Pineau
Rédactrice en chef adjointe : Roselyne Messal
Responsable de L'Actualité Chimique Découverte :
Minh-Thu Dinh-Audouin

COMITÉ DE RÉDACTION

J. Barrault, X. Bataille, C. Bresson, K. Cariou, P. Colomban,
C. de Novion, K. Fajerweg, D. Fauque, J.-P. Foulon, J. Fournier,
E. Gras, N. Griffete, C. Houée-Levin, F. Launay, J. Livage,
E. Marceau, V. Marvaud, M.-T. Ménager, C. Monneret, N. Moreau,
J.-M. Paris, P. Pichat, A. Picot, A.-V. Ruzette, S. Tencé, H. This,
H. Toulhoat, L. Valade, P. Walter, S. Younes

Publication analysée ou indexée par :
Chemical Abstracts, base de données PASCAL

ABONNEMENT

SCF, Martine Maman
250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris
Tél. : 01 40 46 71 60/66
abonnement@lactualitechimique.org

FABRICATION

MAQUETTE : Redouane Sahih, sahih.redouane@gmail.com
Mag Design, www.magdesign.fr, mag.design@me.com
IMPRESSION, ROUTAGE : N. Fortin & ses fils imprimeurs
94800 Villejuif, fortimprimerie@wanadoo.fr

PUBLICITÉ

FFE, 15 rue des Sablons, 75116 Paris
Tél. : 01 53 36 20 40 – www.ffe.fr
aurelie.vuillemin@ffe.fr

ISSN version papier 0151 9093
ISSN version électronique 2105 2409

© SCF 2022 – Tous droits de reproduction réservés
Dépôt légal : avril 2022

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, fait sans le consentement de l'auteur, ou des ayants droits, ou ayant cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies et les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration.



Quand l'improbable s'invite au quotidien

Il y a un an, lorsque nous avons programmé la publication d'un dossier sur la gestion des menaces et des risques « NRBCE » (nucléaire, radiologique, biologique, chimique, explosif), nous ne pouvions pas imaginer qu'une guerre allait surgir en Ukraine. Cependant, les articles abordent des thèmes qui résonnent avec l'actualité : la détection des explosifs, le déminage et les crises sanitaires comme celles du Covid ou des incendies.

L'intelligence collective

Pour faire face à l'horreur, préparer les réparations des dégâts et anticiper les conséquences humaines, nos auteurs, tous experts de ces sujets, sont impliqués dans des réunions au sommet. Et il y en a beaucoup d'autres dans le domaine des soins, de la médecine, de la protection, de la logistique, du renseignement, etc. Tous méritent notre admiration et un grand merci. Le passé nous a montré que l'espoir et l'intelligence collective sont des leviers pour reconstruire et grandir.

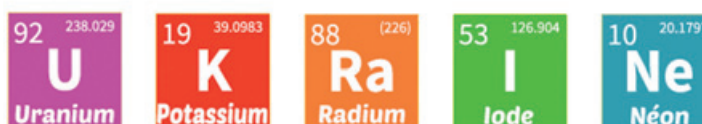
Les femmes en sciences le valent bien

Tous les ans, en mars, tombent les statistiques sur la représentation des femmes en sciences. Beaucoup de pays, d'institutions, d'industriels agissent pour que les résultats s'améliorent. Les jeunes chimistes de la SCF ont mené l'enquête et nous livrent leur point de vue : il faut encore agir, alors impliquez-vous toutes et tous.

Le mot de la fin : U K Ra I Ne

Nous, chimistes, avons un alphabet particulier, défini par Mendeleïev et qui s'est enrichi avec le temps ; il nous permet de rendre hommage aux chimistes ukrainiens avec un code unique que j'ai découvert lors d'une insomnie. À noter le trio surprenant « Uranium, Radium et Iode ». Un numéro de *L'Actualité Chimique* dont nous nous souviendrons tous...

Patricia Pineau
Rédactrice en chef



sommaire

N° 472- AVRIL 2022

ÉDITORIAL	1
Quand l'improbable s'invite au quotidien, par P. Pineau	1
CLIN D'ŒIL ÉTYMOLOGIQUE	3
À propos du furfural, par P. Avenas	3
LE GRAIN DE SEL DU RJ-SCF	4
Moins de femmes dans les sciences, comment inverser la tendance ?, par F. Le Floch et N. Griffete	4
RÉPONDRE AUX MENACES : EXPLOSIFS, DÉMINAGE ET MANAGEMENT DE CRISES	7-49
<i>Coordinateurs : Lionel Hairault et Marie-Thérèse Ménager</i>	
Répondre aux menaces : explosifs, déminage et management de crises, par E. Billon-Denis , L. Hairault et M.-T. Ménager	7
Explosifs	
Les traces d'explosifs : SYMOPREP®, un nouvel outil efficace pour le prélèvement de particules, par A Bry , N. Eloy , D. Poullain , S. Beaugrand , X. Archer , L. Barthe , P.-A. Pelegrin et D. Gardebas	9
L'odeur des explosifs attire les T-REX, par C. Ambard , C. Bossuet et D. Poullain	13
Explosives detection: it's all connected, par O. van der Jagt , H. Onnerud et D. Poullain	17
Déminage	
Les effets retard des guerres du XX ^e siècle. Regard sur l'état de la pollution pyrotechnique en France, par E. Schnell	21
Trois questions à propos de la pollution pyrotechnique en France, par E. Schnell	27
Risques et management de crises	
Management du risque sanitaire : retour d'expérience de la pandémie Covid-19, par J.-L. Gala	30
Management du risque chimique : interventions de l'Ineris sur l'incendie de Lubrizol/NL Logistique, par S. Lim Thiébot , B. Truchot , L. Rouïl , S. Chaumette et K. Perronnet	39
Les SDIS répondent à la pandémie de Covid-19, par C. Poirier	45
RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT	50
Principes et substances actifs	
Nouveaux principes actifs pharmaceutiques et nouvelles substances actives phytopharmaceutiques, par J. Fournier et J.-M. Paris	50
EN BREF	52
LIVRES ET MÉDIAS	57
AGENDA	59
ACTUALITÉS DE LA SCF	60
UN POINT SUR	63
Fiche n° 94 : La « PIT-slope », une méthode simple et rapide pour classer les tensioactifs selon leur véritable « HLB », par J. F. Ontiveros , C. Pierlot , M. Ortega , J.-M. Aubry et V. Nardello-Rataj	63



Couverture :

Août 2016 : désamorçage d'une bombe d'aviation américaine de 250 kg larguée en 1944 sur Guebwiller (68). © Sécurité civile - Déminage Colmar.
Conception graphique : magdesign.fr

À propos du furfural

Le chimiste allemand Döbereiner est connu pour sa loi des triades d'éléments chimiques. Dès 1829, ces triades préfiguraient les colonnes du futur tableau périodique, qui serait esquissé par Chancourtois en 1862 et développé par Mendeleïev en 1869. Or Döbereiner s'est intéressé à d'autres domaines de la chimie, ce qui l'a conduit en particulier à découvrir le furfural.

De l'acide formique au furfurol



Le son des céréales a aussi des vertus.

Alors qu'il étudiait la production d'acide formique à partir de sucre ou d'amidon, Döbereiner obtenait en 1831 une huile volatile, d'odeur intermédiaire entre cannelle cassia et amande amère. Il nommait ce sous-produit de l'acide formique de synthèse *huile artificielle de fourmis*, nom jugé « fantaisiste » par le chimiste écossais Stenhouse. Celui-ci reprenait en effet ce sujet d'étude en 1840, montrant que cette huile s'obtenait par attaque sulfurique de toutes sortes de végétaux.

Enfin, un autre chimiste britannique, Fownes, a retrouvé cette huile, en particulier à partir du son des céréales. Dans sa publication de 1845, il écrit : « *J'ai les plus grands doutes sur le nom le plus approprié à donner à ces curieuses substances, et ce doute subsistera tant que l'on n'en saura pas plus sur l'origine réelle de l'huile* ». Ensuite, il écrit que la co-production avec l'acide formique est fortuite, et il observe que l'huile « *semble être produite le plus facilement et en abondance la plus grande à partir du son de céréale* ». D'où sa proposition, présentée modestement : « *Peut-être le nom « Furfurol » (de furfur, son, et oleum) pourrait être appliqué provisoirement* ». Un provisoire qui dure puisque *furfurol* est toujours en usage, au suffixe près, venant donc du latin *furfur*, désignant de son du blé ou d'une autre céréale.

Le son des céréales

Le latin *furfur* est un mot à redoublement exprimant un son répétitif (cf. par exemple le latin *turtur*, « tourterelle »), une sorte d'onomatopée évoquant peut-être le battement du tamis qui sépare le grain de son enveloppe, le *son*. Le tableau suivant montre l'homonymie fortuite en français avec le *son*, au sens de bruit, dont les noms viennent du latin dans les langues romanes ainsi qu'en anglais, et d'une racine germanique (cf. l'anglais *loud*, « sonore ») en allemand.

Latin	Français	Italien	Espagnol	Anglais	Allemand
<i>sonus</i>	<i>son</i>	<i>suono</i>	<i>sonido</i>	<i>sound</i>	<i>Laut</i>
<i>furfur</i>	<i>son</i>	<i>crusca</i>	<i>salvado</i>	<i>bran</i>	<i>Kleie</i>

A *contrario*, le son des céréales a des noms très différents dans les cinq langues modernes, sans rapport avec son nom latin. Ces noms actuels se relient le plus souvent à la notion de déchet, de rebut du tamisage, mais aucun d'entre eux n'a



Grains de blés débarrassés du son par le van.

de sens étymologique tout à fait certain. L'italien *crusca*, d'origine germanique, fait penser à l'*Accademia della Crusca*, fondée à Florence en 1583 dans le but initial d'éliminer les impuretés de la langue italienne (le toscan à l'origine), comme le grain de blé est débarrassé du son.

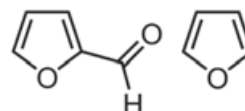
Mais il est temps de revenir à la chimie.

Du furfurol au furfural

Le chimiste français Cahours montre en 1848 que ce furfurol, s'il était plus stable chimiquement, devrait avoir des « *dérivés analogues à ceux que forment d'ordinaire les aldéhydes* ». Ce nom *aldéhyde* avait été créé par Liebig en 1935, en allemand *Aldehyd*, du latin scientifique *al(cohol)dehyd(rogenatus)*, selon le schéma ci-après.



La fonction aldéhyde de ce furfurol ayant été confirmée, Berthelot le renomme, en 1860, *aldéhyde furfurique*, ou *furfural*, avec le suffixe *-al*, qui sera plus tard généralisé pour les aldéhydes.



Furfural et furane.

Du furfural au furane

Le chimiste allemand Baeyer a développé une chimie des composés *furfuriques*, basés sur le radical qu'il nomme *furfur*, associé par exemple à la fonction aldéhyde dans le furfural. Pour la molécule obtenue en remplaçant la fonction aldéhyde par un atome H, il crée en 1878 le nom *furfurane*, de *furfur* et suffixe *-ane* (en allemand *Furfuran*). Par la suite, *furfurane* sera abrégé en *furane*, attesté en 1897.

Épilogue

Les dictionnaires usuels du français donnent *furfural* et *furane* (avec la variante *furrane*), ainsi que l'adjectif *furfuracé*, « qui a l'apparence du son de céréale », terme utilisé en médecine par exemple à propos des pellicules du cuir chevelu. Cette ressemblance était déjà constatée par les Romains puisque le latin *furfur*, « son », désignait aussi par analogie ces pellicules désagréables, nommées *forfora* en italien.

Pierre AVENAS,
ex directeur de la R & D dans l'industrie chimique.
pier.avenas@orange.fr

Moins de femmes dans les sciences, comment inverser la tendance ?

Le constat de la faible représentation des femmes dans le milieu scientifique est mondial. Pendant longtemps, elles ont été sous-représentées dans les sciences en raison d'un manque de liberté et de considération. Bien que leur statut ait bien évolué, le chemin à parcourir reste long pour déconstruire les stéréotypes et attirer les femmes vers les sciences. Les actions se multiplient à l'initiative d'associations, d'entreprises et de laboratoires publics pour tendre vers l'égalité femmes-hommes dans les sciences.

État des lieux

En sciences, seules vingt-trois femmes ont vu leurs travaux récompensés par un prix Nobel, soit 4 % des lauréats depuis 1901. Marie Curie fut la première à l'obtenir, successivement en 1903 et 1911 ; plus récemment, les recherches d'Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna ont été récompensées par le prix Nobel de chimie en 2020, et celles de Frances Arnold en 2018. Cependant, « l'effet Mathilda » a touché de nombreuses femmes au cours de l'histoire [1]. Bien qu'elles aient contribué à de grandes découvertes conduisant au prix Nobel, elles ont été évincées quelques années plus tard. La tendance persiste, puisque les femmes scientifiques sont moins bien représentées, aussi bien en nombre que par la qualité des articles qui leur sont consacrés, notamment sur Wikipédia. C'est le constat tiré par WikiProject Women Scientists qui vise à fournir des biographies de femmes scientifiques et/ou à améliorer la qualité des articles déjà existants [2].

Autre constat troublant : plus les sciences sont théoriques, plus la proportion de femmes diminue. Pourtant, il y a plus de filles diplômées que de garçons en France. Selon une enquête réalisée en 2015 par la Chaire de recherche sur l'intérêt des jeunes à l'égard des sciences et de la technologie (CRIJEST), les filles tendent à se percevoir comme moins douées [3]. Bien qu'elles obtiennent de meilleurs résultats que les garçons, il est prouvé qu'elles s'arrêtent plus vite à cause du phénomène d'auto-censure. Corinne Aubert, directrice exceptionnelle au CNRS et ancienne directrice de l'Institut parisien de chimie moléculaire (IPCM) à Sorbonne Université, pense que « ce phénomène d'auto-censure persiste tout au long de la carrière, et notamment lors des concours de promotion dans le milieu académique ».

Par rapport à d'autres sciences, la chimie fait partie des bons élèves, avec plus de la moitié des postes occupés par des femmes (56 % en 2016). Bien que la proportion des filles soit majoritaire durant les études supérieures jusqu'à bac + 5 (60 % des jeunes diplômés de master et 58 % en licence), le « syndrome du tuyau percé » s'amorce à partir du doctorat où la proportion d'étudiantes diminue (46 %) avant de laisser fuir les chercheuses qui ne représentent pas plus de 35 % [4].

Des modèles féminins pour susciter l'intérêt dès le plus jeune âge

Pour Corinne Aubert, « tout se joue dès le plus jeune âge. Le faible nombre de femmes dans les sciences est lié à l'ancrage des stéréotypes depuis plusieurs siècles. Le manque de

représentations des femmes restreint les projections des femmes dans les carrières scientifiques ». L'enquête de la CRIJEST révèle une différence d'intérêt pour les domaines scientifiques entre les filles et les garçons du secondaire [3]. Ainsi, les sciences doivent être rendues plus attrayantes pour les filles depuis l'école primaire. Arrivées en secondaire, elles auront ainsi déjà une perception positive de l'univers des sciences. C'est pourquoi certaines associations ciblent les jeunes dès six ans. C'est le cas de l'association « Femmes & Sciences », créée en 2000 par Huguette Delavault et plusieurs autres femmes scientifiques, qui mène diverses actions dans ce sens [5]. Elle a notamment développé un livret destiné aux enseignant(e)s pour lutter de manière efficace contre les idées reçues sur les études et l'orientation des filles et des garçons. En partenariat avec d'autres associations, telles que « Les Chemins Buissonniers », des rencontres avec des professeures et étudiantes en sciences sont organisées dans des écoles élémentaires pour stimuler l'intérêt et représenter des modèles concrets et accessibles pour les jeunes filles.

Multiplier les voies de sensibilisation pour toucher toutes les générations

Au-delà du cadre scolaire, les actions sont diverses afin de susciter l'intérêt pour les sciences auprès des femmes. De l'article pour un magazine jeunesse au roman graphique, les parcours de chercheuses sont racontés. Des canaux de diffusion tels que les albums *Culottées* ou le podcast « Femmes de sciences » permettent de parler d'une autre génération de jeunes femmes.

En partenariat avec le CNRS, l'association Femmes & Sciences a mis en place une exposition, « La science taille XX elles », qui valorise le parcours et les métiers de femmes scientifiques au travers de portraits. Après une première édition en 2018 à Toulouse, elle est déclinée chaque année dans plusieurs régions de France [6].

Depuis 2015, l'association Femmes & sciences soutient un programme de mentorat qui accompagne durant douze mois les doctorantes dans leur projet de carrière, en construisant celui-ci avec l'aide de personnes expérimentées et de confiance.

Elle met aussi à disposition des vidéos témoignages évoquant les parcours de femmes scientifiques et leurs conseils pour les encourager à oser se diriger vers la carrière scientifique. Les femmes sont représentées en ingénierie. Ainsi, au travers d'une série de vidéos « innovantes », les éditions Techniques de l'Ingénieur donnent la parole à des ingénieures, chercheuses, entrepreneuses, pour favoriser leur visibilité en mettant en avant leurs travaux et innovations. Plusieurs initiatives visant à montrer que les métiers scientifiques sont tous plus enthousiasmants les uns que les autres existent : le programme « L'Oréal-UNESCO For Women in Science », qui couvre le monde entier [7], et plus modestement, quelques vidéos « Témoignages de chimistes » réalisées par la SCF [8].

Des prix et des quotas pour promouvoir les femmes ?

À l'occasion de la Journée internationale des droits des femmes 2022, la Commission européenne a publié un « Results Pack » qui entend sensibiliser l'importance d'une perspective de genre dans la recherche et l'innovation [9]. La Commission a réaffirmé son engagement envers l'égalité de genre en faisant de la mise en place d'un plan en faveur de l'égalité femmes-hommes un critère d'éligibilité pour les établissements d'enseignement supérieur et les organismes de recherche qui demandent à pouvoir bénéficier du programme-cadre Horizon Europe. Un autre objectif d'Horizon Europe consiste à améliorer l'égalité de genre dans l'ensemble du programme, en visant un taux de 50 % de femmes dans les conseils d'administration, groupes d'experts et comités d'évaluation concernés.

Certains pays, tels que l'Écosse, ont opté pour promouvoir l'égalité des genres dans les filières scientifiques via des programmes, et notamment des subventions pour les employeurs destinées à embaucher autant de femmes que d'hommes. En Allemagne, des quotas existent pour des postes scientifiques réservés aux femmes afin de rétablir l'équilibre entre chercheuses et chercheurs. En France, des lois ont déjà été mises en place afin de réduire les disparités, avec des quotas dans les conseils d'administration, mais aussi un index d'égalité professionnelle mis en place depuis septembre 2018 dans les entreprises, basé sur des critères tels que les écarts de rémunération à poste et âge comparables, le potentiel de promotion et d'augmentation. Les industries chimiques et pharmaceutiques font à nouveau partie des bons élèves, avec L'Oréal, Sanofi, Danone ou encore Michelin se démarquant et s'inscrivant dans le top 10 tous secteurs confondus [10].

Comme nous l'indique Corine Aubert, « dans les structures publiques, la situation évolue aussi suite à un accord relatif à l'égalité professionnelle entre les femmes et les hommes dans la fonction publique depuis 2018 sous tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI). Des plans d'actions sont mis en place pour une meilleure parité dans les instances dirigeantes des universités et le recrutement d'enseignant(e)s-chercheur(euses). Et on constate une réelle évolution lors des concours de la fonction publique ; il y a d'une part une parité dans les jurys, et d'autre part une réelle volonté de tenir compte du parcours des femmes qui ont dû s'arrêter quelques mois pour leur grossesse, pour s'occuper de leurs enfants, et en toute rigueur ces éléments entrent en compte dans notre sélection ».

Envie d'agir ?

Au-delà de la Journée internationale des droits de la femme, les actions se poursuivent tout au cours de l'année pour promouvoir l'égalité des femmes et hommes en sciences. Envie d'œuvrer pour déconstruire les stéréotypes ? Voici quelques pistes d'actions :

- créer ou enrichir la biographie de femmes scientifiques via WikiProject Women Scientists ou « Les sans pagEs » en français [11] ;
- accompagner une jeune scientifique en tant que mentor ;
- intervenir auprès d'écoles en partageant votre parcours ;
- rejoindre une association, telle que Femmes & Sciences [5] ;
- organiser des événements en rejoignant le Conseil des femmes en chimie du Réseau des Jeunes chimistes de la SCF (RJ-SCF) [12].





Intervention de Nébéwia Griffete (RJ-SCF) le 28 février 2022 au collège Nicolas Untersteller de Stiring Wendel (57) : un exemple pour promouvoir les métiers de la recherche et susciter l'intérêt des jeunes filles (une centaine de collégien.nes étaient présent(e)s).

- [1] L'effet Matilda, ou les découvertes oubliées des femmes scientifiques (franceculture.fr).
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:WikiProject_Women_scientists
- [3] <http://recherchesnumeriques.ca/regroupement/chaire-de-recherche-sur-linteret-des-jeunes-legard-des-sciences-et-de-la-technologie>
- [4] <http://jetravailledanslachimie.fr/le-tableau-de-bord-de-emploi-national-edition-2017>, Rapport de France Chimie.
- [5] www.femmesetsciences.fr
- [6] www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-science-taille-xx-elles
- [7] www.forwomeninscience.com
- [8] www.youtube.com/user/SocChimFrance
- [9] <https://cordis.europa.eu/article/id/435706-gender-in-research-tackling-inequalities-for-an-inclusive-european-research-area/fr>
- [10] www.usinenouvelle.com/article/tableau-votre-entreprise-est-elle-inegalitaire-avec-les-femmes.N811045
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Projet:Les_sans_pagEs
- [12] Contact : relation.scf.rjscf@societechimiquedefrance.fr

Podcast vis ma chimie



En collaboration avec la Fédération Gay-Lussac, le Réseau des Jeunes chimistes de la SCF (RJ-SCF) lance une série d'interviews de jeunes chimistes.

Venez découvrir le premier épisode : Laure Fillaud, maître de conférences à Sorbonne Université, nous explique son parcours, son quotidien et sa passion.

• <https://anchor.fm/rj-scf>

Fannie LE FLOCH

Docteure en physico-chimie des polymères et médiatrice scientifique.

Nébéwia GRIFFETE

Maître de conférences au Laboratoire PHENIX, Sorbonne Université.

* fannie.lefloch@universcience.fr ; nebewia.griffete@sorbonne-universite.fr

DES QUOTAS EN SCIENCES...



CLED'12.

Répondre aux menaces : explosifs, déminage et management de crises

Depuis plusieurs dizaines d'années, la menace terroriste est une constante qui s'inscrit désormais dans la durée. Le terrorisme NRBCE – nucléaire, radiologique, biologique, chimique et explosif – teste clairement la résilience nationale des sociétés démocratiques. Pour y répondre, les États ont réagi en développant des programmes nationaux et internationaux portant sur la détection et l'identification des agents, la protection et la décontamination des populations civiles et des intervenants ainsi que de l'environnement, les contre-mesures médicales, et enfin la gestion du risque et des crises. La recherche duale (civile et défense) peut apporter des solutions technologiques innovantes pour répondre à cet enjeu de résilience étatique face à la menace, en protégeant les populations civiles et les forces déployées en opérations extérieures.

Dans leurs articles parus en 2015 et 2017 dans *Biofutur* [1-2], D. Gillet et C. Bossuet ont rappelé l'historique de la mise en place des programmes nationaux de recherche dans le domaine du NRBCE [1]. Sous l'égide du Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) et en liaison avec la Direction générale de l'armement (DGA), le programme interministériel NRBC est lancé en 2005 pour doter l'État français de moyens de lutte contre les risques émergents dans les domaines du nucléaire, du radiologique, du biologique, du chimique et des explosifs. La détection des explosifs, la gestion du déminage concernant les restes des explosifs de guerre, ainsi que le management de crises aux niveaux médical, environnemental et opérationnel font l'objet de ce dossier, associé à la tenue de la cinquième édition de la conférence internationale CBRNE qui se tiendra à Lille du 3 au 6 mai 2022.

Afin de se prémunir de la menace terroriste liée aux explosifs, il apparaît essentiel de bien la connaître. Plus précisément : quelle est la nature des explosifs, comment les fabriquer, quels sont les précurseurs, quels sont les moyens pour les amorcer, quels sont les scénarios d'emploi ? Dès lors, la capacité de répondre à ces questions permet de définir des stratégies pour détecter ces explosifs ou engins improvisés, mettre en place des protocoles sécurisés d'intervention, et déterminer les moyens techniques efficaces pour les prélèvements et analyses des preuves. Devant la diversité des explosifs et leurs modalités d'emploi, il est impossible de pouvoir les détecter efficacement dans toutes les situations avec un moyen unique. Ainsi, une combinaison de technologies au sein d'un système est nécessaire pour permettre une détection efficace. C'est pourquoi depuis une trentaine d'années on constate l'émergence de différentes technologies comme les détecteurs de rayons X, les détecteurs de type IMS (spectroscopie à mobilité ionique), les détecteurs de vapeurs basés sur des capteurs chimiques, ou encore des équipes cynotechniques de mieux en mieux entraînées. Le croisement de toutes ces techniques et approches apporte une efficacité de détection.

L'aspect « multi-facettes » de la menace est présenté dans ce dossier, car il faut pouvoir détecter un nombre important d'explosifs différents qui sont utilisables dans des engins improvisés plus ou moins sophistiqués.

Le premier article expose les objectifs de la recherche de preuves (forensic) post-attentats. L'IRCGN (Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale), le LCPP (Laboratoire central de la préfecture de police de Paris) et le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) travaillent ensemble pour améliorer les techniques de prélèvement des traces, point critique pour une recherche efficace. Ces collaborations associant les chercheurs et les équipes opérationnelles ont permis le développement du dispositif de prélèvement de particules SYMOPREP.

Le deuxième article présente un dispositif innovant capable de détecter des vapeurs d'explosifs ou de précurseurs, le détecteur T-REX, développé par le CEA grâce à ses différentes unités alliant compétences dans la chimie des matériaux, la microélectronique, l'intégration mécanique et le traitement du signal.

Enfin un dernier article fixe les principaux objectifs et stratégies de la détection des explosifs. Il met en avant les collaborations existantes au niveau européen entre différents partenaires tels que le CEA (France), le FOI (Swedish Defence Research Agency), le TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) et l'ENEA (Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable).

Un focus sur une activité essentielle pour la protection contre la menace « explosifs », le déminage, est proposé en deuxième partie. Différentes facettes de ce métier sont présentées telles que l'origine et les caractéristiques des différentes catégories d'obus et autres objets à neutraliser, ou encore leurs processus de dégradation physico-chimique et les risques qui y sont associés. Ce sujet mobilise des compétences tant historiques, géographiques et géologiques que médicales et techniques. Les conséquences médicales et atteintes physiques des découvertes fortuites par des civils peuvent être de la même nature et de la même ampleur que celles liées à l'utilisation contemporaine d'armes chimiques. Les travaux de la collectivité scientifique NRBCE sur le sujet sont nombreux ; certains ont déjà été présentés en 2019 dans le précédent dossier de *L'Actualité Chimique* [3-4]. Les conséquences environnementales de la pollution pyrotechnique sont extrêmement complexes et nécessitent une approche via le domaine de l'analyse des risques, tout en prenant en compte les cinétiques de dégradation en fonction des milieux et de la libération des substances chimiques encapsulées dans le temps [5].

La dernière partie de ce dossier est consacrée à la gestion de crise et aux avancées récentes dans ce domaine liées à l'actualité. Trois cas concrets de management du risque sont ainsi présentés : la gestion d'une pandémie du point de vue

médical, la contribution à la gestion d'un accident industriel majeur par un opérateur de l'État, et la gestion de crise par les professionnels des Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS).

Dans le domaine de la santé, un article très complet revient sur la crise Covid-19 qui a touché le monde ces deux dernières années. Le focus se fait principalement d'un point de vue européen et présente de manière exhaustive en quoi cette pandémie est si particulière et a soulevé de nouveaux défis. De nombreux thèmes essentiels y sont abordés tels que la coordination européenne de la gestion de crise, l'information et la communication défaillantes, la mise en difficulté des scientifiques dans leurs pratiques, la diversité et l'abondance des données avec un manque de centralisation, les impacts socio-économiques, les problèmes logistiques avec les défauts d'approvisionnements, le tryptique « test-dépistage-traçage », les équipements de protection individuels, les contre-mesures médicales, et enfin la nécessité de la mise en place d'une éducation sanitaire des populations.

Le management du risque chimique est présenté du point de vue du retour d'expérience de l'Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques) suite à son implication dans le cadre de l'incendie de l'usine Lubrizol. Les évolutions pour renforcer la protection des populations contre les accidents industriels tant en phase d'urgence qu'en phase post-accidentelle sont significatives. Des modifications réglementaires sur ce type d'installations industrielles et la mise en place d'un organe d'enquête indépendant en découlent. La gestion de crise est au cœur du métier des SDIS. La structuration d'outils de commandement pour faire face à des événements d'ampleur impactant la sécurité civile fait l'objet d'un cadre réglementaire. L'ampleur de la pandémie, qui a

nécessité un travail entre différents services de l'État, a mis en évidence l'absence de cadre commun avec éventuellement des bases différentes d'information. Cette prise de conscience devrait permettre une évolution de la gestion de crise à court terme.

Ces trois exemples sont riches d'enseignements et soulignent la nécessité du renforcement d'interactions pérennes entre les différents acteurs nationaux et internationaux, qu'ils soient primo-intervenants, ingénieurs, chercheurs, décideurs ou industriels du domaine. C'est dans cet esprit que la communauté pluridisciplinaire du NRBC se retrouve dans le cadre de la conférence internationale CBRNE qui se tiendra à Lille en mai 2022.

- [1] D. Gillet, C. Bossuet, Dix années de recherche française en biodéfense, *Biofutur*, **2015**, 363, p. 26.
- [2] C. Bossuet, Le programme interministériel R & D NRBC-E, *Biofutur*, **2017**, 384, p. 30.
- [3] C. Piérard, N. Taudon, F. Fenaille, T. Douki, Les biomarqueurs de l'intoxication à l'ypérite, *L'Act. Chim.*, **2019**, 440, p. 19.
- [4] F. Dorandeu, F. Nachon, X. Brazzolotto, J. Dias, Contre-mesures médicales des agents chimiques de guerre et de terrorisme, *L'Act. Chim.*, **2019**, 440, p. 46.
- [5] E. Schnell, Vieillesse des munitions chimiques de la Première Guerre mondiale en France. État des lieux et analyse des risques. Propositions pour une meilleure prévention des accidents, Mastère spécialisé Gestion des risques et menaces NRBC, ENSCM-ENSOSP-SERFA, **2014**.

Emmanuelle BILLON-DENIS*, Département des maladies infectieuses, Institut de recherche biomédicale des armées (IRBA), **Lionel HAIRAUT**, CEA DAM - Le Ripault, Monts, et **Marie-Thérèse MÉNAGER**, CEA, Direction de la recherche fondamentale.

* ebillondenis.irba@gmail.com

5th international conference
LILLE FRANCE
May 3rd - 6th 2022
www.cbrneconference.fr
Registration opening : Oct 01, 2021
Abstracts submission deadline : Feb 10, 2022

DETECTION – IDENTIFICATION
Field sampling & analysis
Detection technologies
Forensics
Explosives

MEDICAL COUNTERMEASURES
Epidemiology - Health surveillance
Drug development
Comprehensive approaches
Diagnosis - Biomarkers

PROTECTION – DECONTAMINATION
Human & environmental
Infrastructure
Smart textiles & surface
Skin, wounds, hair & eyes

RISKS & CRISES MANAGEMENT
Preparedness - Education & training
Threat and risk assessment
Crisis communication
Transborder cooperation

Logos: cea, Fédération Nationale des Armateurs de France, Service de santé des armées, AGENCE INNOVATION DÉFENSE, SDIS NORD, DGA

Les traces d'explosifs

SYMOPREP®, un nouvel outil efficace pour le prélèvement de particules

Résumé L'échantillonnage de traces d'explosifs peut être un défi analytique pour les laboratoires, en particulier lorsque des particules, petites et invisibles, doivent être échantillonnées sur des surfaces larges ou rugueuses. Pour pallier cette difficulté, le CEA a développé un outil de prélèvement innovant, SYMOPREP®, capable de collecter des particules solides d'environ trois microns de diamètre jusqu'à un millimètre, avec un rendement intéressant. Le prototype, portable et facile à utiliser, offre une nouvelle alternative pour échantillonner de petites particules, invisibles, sur des surfaces grandes ou spécifiques avec un contact de surface souple, pour la caractérisation et l'identification en laboratoire.

Mots-clés Explosifs, prélèvement, traces, analyse, outil, SYMOPREP®.

Abstract Explosives traces: SYMOPREP®, a new tool for efficient particles sampling

Sampling for traces of explosives can be an analytical challenge for laboratories, particularly when small and invisible particles must be sampled from large or rough surfaces. To overcome this difficulty, CEA has developed an innovative sampling tool, SYMOPREP®, able to collect solid particles of about three microns' diameter up to one millimeter with an interesting yield. The prototype is portable and easy to use and offers a new alternative to laboratories to sample small particles, invisible ones, from specific or large surfaces with soft surface contact for in-laboratory characterization and identification.

Keywords Explosives, sampling, traces, analysis, tool, SYMOPREP®.

Des poussières précieuses à collecter

Les investigations sur une scène d'explosion sont complexes, les dégâts matériels et humains sont souvent très importants et la recherche des causes (accidentelles, intentionnelles) et de l'origine (atmosphère, chimique, mécanique) passe nécessairement par l'analyse de prélèvements réalisés au niveau de l'épicentre. La présence de traces d'explosifs dans un lieu peut être un indice essentiel pour les investigations menées. Comme pour toute activité d'analyse, la qualité du prélèvement influence directement la fiabilité du résultat final de détection. C'est encore plus vrai dans les activités de recherche d'indices où chaque prélèvement est réalisé dans des conditions différentes des précédentes concernant la matrice, les supports, l'environnement, la température ou encore l'hygrométrie. Comme ce prélèvement est incomplètement standardisable devant la diversité des situations possibles, l'échantillonnage du milieu d'étude demande alors une attention et une adaptation particulières des opérateurs. Pour anticiper ces opérations, il est nécessaire d'optimiser en amont les étapes-clés comme le protocole de prélèvement, la préparation des échantillons collectés, et bien entendu les conditions d'analyses chromatographiques ou spectrométriques [1].

La nature chimique des explosifs recherchés influe sur les outils utilisés pour leur prélèvement. Des explosifs comme l'hexogène (1,3,5-trinitro-1,3,5-triazinane, RDX) ou la pentrite (1,3-dinitrato-2,2-bis(nitratométhyl)propane, PETN) disposent d'une pression de vapeur de sublimation très faible autour de quelques pptv (parties par tri-milliard 10^{-12}). Il devient alors important de focaliser le protocole de prélèvement sur l'état thermodynamiquement prédominant des molécules recherchées, comme la forme solide dans les cas RDX et PETN. En particulier, les petites particules solides représentent une excellente cible de prélèvement si l'on tient compte de leur

propension à se disperser autour de leur zone d'origine [2]. La taille moyenne des particules d'explosifs dispersées naturellement dans l'environnement est d'environ $10 \mu\text{m}$ [3]. Grâce à cette propriété de dispersion et donc de se déposer sur diverses surfaces, un protocole approprié doit permettre d'en collecter une part représentative.

Lorsque des objets peuvent être directement collectés sur place et envoyés au laboratoire, il s'agit du meilleur protocole à appliquer. Pour des objets intransportables, il est nécessaire d'en réduire la taille par un échantillonnage *in situ*. Les protocoles standards utilisent des frottis manuels humides ou secs pour transférer les traces éventuelles d'explosifs de la surface échantillonnée vers le frottis [4]. L'outil utilisé habituellement peut être de la gaze ou des lingettes en coton [5]. La technique du frottis apparait plus efficace sur des surfaces lisses comme celles du verre, du métal ou des surfaces peintes [6]. Malheureusement, cette technique est moins efficace sur des surfaces rugueuses [7] ou poreuses comme le béton, des surfaces fibreuses comme certains vêtements, ou encore des surfaces avec des cavités non accessibles au frottis. De grandes surfaces de plusieurs mètres carrés deviennent impossibles à échantillonner convenablement par frottis car ces surfaces généralement texturées endommagent les frottis et les assèchent de leur solvant, conduisant à en utiliser beaucoup et causant des difficultés d'exploitation au laboratoire.

Ces situations demandent l'usage de protocoles adaptés [8]. Des environnements d'échantillonnage variés et inconnus sont des situations classiques pour ce domaine de la détection en intérieur ou en extérieur, que les surfaces soient ou non poreuses, petites ou grandes. Pour dépasser ces limitations des protocoles de prélèvement dans le cas des surfaces texturées ou de grandes dimensions, un nouvel outil de prélèvement a été testé dans des conditions réelles de recherches



Figure 1 - Le dispositif SYMOPREP®.

de traces d'explosifs. Appelé SYMOPREP®, cet outil a été conçu pour collecter les petites particules par aspiration (figure 1).

SYMOPREP®, comment ça marche ?

Les méthodes de prélèvement sous vide sont particulièrement recommandées pour des surfaces rugueuses [8]. Le dispositif de prélèvement polyvalent SYMOPREP® peut opérer en intérieur ou en extérieur, que les conditions soient sèches ou humides.

Le but de cet outil est de collecter des particules de surface par succion et de les piéger dans un réceptacle grâce à une filtration cyclonique. De l'air comprimé à 7 bar produit en traversant un orifice Venturi un débit d'aspiration de 120 à 170 L/mn. Le dimensionnement du cyclone permet la collecte de particules jusqu'à quelques microns de diamètre avec un rendement fonction de la densité de ces mêmes particules. L'alimentation en air comprimé peut s'effectuer via un réservoir portable du commerce (10 bar), une bouteille d'air respirable portable (ARI, 200 bar), une bouteille d'air comprimé de grande capacité (200 bar), un compresseur portable du commerce ou un réseau d'air comprimé (7 bar) (figure 2).

L'outil SYMOPREP®, breveté par le CEA, est approvisionné auprès de la société AMGD (Tremblay-en-France).

Il est alimenté par un réservoir d'air comprimé. D'un volume de 6 litres pour une pression de 280 bar, il est posé à terre ou

Une surface suspecte qui semble propre à l'œil nu peut contenir suffisamment de matière pour permettre la détection de traces d'explosifs.



SYMOPREP®
Système Mobile de
Prélèvement Rapide
d'Explosif Particulaire



Aspiration par effet venturi à l'aide d'air comprimé



Filtration cyclonique des particules aspirées



Ejection en partie haute de l'air épuré



Collecte des particules d'intérêt en partie basse

Figure 2.

porté en sac à dos pour plus de maniabilité. Il s'agit des mêmes bouteilles que celles utilisées par exemple par les pompiers ou les plongeurs sur lesquelles SYMOPREP® s'interconnecte simplement sur la sortie accessoire de 7 bar du réservoir. Entre chaque point de prélèvement important, l'outil est entièrement démonté et nettoyé intérieurement à l'aide d'acétonitrile par exemple. Les échantillons collectés sont extraits en laboratoire à l'aide d'un solvant adapté aux cibles recherchées, puis le surnageant est analysé.

À la recherche de traces invisibles après explosion d'une voiture

Une expérience a été menée pour évaluer cet outil dans des conditions les plus proches possibles de la réalité. Elle avait pour objectif de comparer SYMOPREP® avec des moyens standards de prélèvement sur des explosifs organiques.

Une voiture a été utilisée pour simuler une situation post-explosion pour recherche de traces. L'expérience a été réalisée dans un site extérieur avec une température ambiante de 1° C et un temps humide. Deux types d'explosifs ont été utilisés : 20 g de PG2 (hexogène ou RDX, comme constituant majoritaire), et 20 g de pentrite (PETN). Le premier a été centré au milieu du coffre sous le tapis, juste au-dessus de la roue de secours ; le second a été caché dans la console avant de la voiture (figure 3).



Figure 3 - Photos de l'expérience après les deux explosions.

Tableau I - Résultats des détections d'explosifs menées sur les prélèvements.

Cibles	Aire prélevée	Surface	Outil	Institut 1	Institut 2	
				HPLC/MS	GC/TEA	GC/MS
RDX	Coffre	Tapis	SYMOPREP®	RDX	RDX	RDX
			Standard	RDX	RDX	RDX
		Plaid	SYMOPREP®	RDX	RDX	0
			Standard	RDX	0	0
PETN	Sièges avant	Pullover	SYMOPREP®	PETN	PETN	PETN
			Standard	PETN	PETN	PETN

Tableau II - Comparaison des performances de collecte des traces d'explosifs par les trois outils.

Aire prélevée	Ratio	Institut 1	Institut 2
Coffre (RDX)	SYMOPREP®/Standard	4	30
Pullover (PETN)	SYMOPREP®/Standard	100	1/4

Trois équipes de prélèvement appartenant à trois instituts indépendants – le Laboratoire central de la préfecture de Police de Paris (LCPP), l'Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale (IRCGN), le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) – ont été mobilisées pour cet essai. Dans le but de comparer ce nouvel outil de prélèvement avec les outils standards, un protocole de prélèvement particulier a été défini pour réserver à chaque technique et chaque intervenant des aires de prélèvement dédiées. Chaque équipe a utilisé un moyen de prélèvement différent qu'elle maîtrisait : frottis coton humide ; frottis coton sec ; SYMOPREP®.

Le LCPP et l'IRCGN ont analysé leurs propres prélèvements ainsi que celui réalisé avec SYMOPREP® pour comparaison. Chacune des deux aires de prélèvement a été divisée en quatre zones équivalentes :

- Prélèvement SYMOPREP® pour le LCPP ;
- Prélèvement SYMOPREP® pour l'IRCGN ;
- Prélèvement frottis pour le LCPP ;
- Prélèvement frottis pour l'IRCGN.

Entre les deux explosifs différents, SYMOPREP® a été nettoyé manuellement à l'acétonitrile. Des blancs de prélèvement ont été réalisés avant les explosions avec les trois outils. Les molécules ciblées n'ont pas été détectées dans les blancs par les trois instituts.

Chaque prélèvement SYMOPREP® réalisé par le CEA dure une minute. Après obtention, les échantillons obtenus sont immédiatement fournis au LCPP et à l'IRCGN pour stockage avant transport vers l'analyse. Le LCPP et l'IRCGN ont analysé les échantillons de façon indépendante :

- LC/MS (chromatographie liquide/spectrométrie de masse) ;
- GC/TEA et GC/MS (chromatographie gazeuse/analyseur à énergie thermique et chromatographie gazeuse/spectrométrie de masse).

Le *tableau I* montre les résultats obtenus. Les deux instituts ont détecté le RDX sur le tapis de coffre ainsi que la PETN sur le pullover avec les deux protocoles de prélèvement.

Les résultats concernant le plaid sont plus dispersés. Un institut détecte seulement le RDX dans un prélèvement SYMOPREP® et pas dans son prélèvement standard. L'autre institut détecte le RDX dans les deux protocoles de prélèvement. Cette dispersion est expliquée par le fait que le plaid reposait sur la plage arrière avant l'explosion et cette dernière

a projeté le tout sur les sièges arrières, rendant inhomogène la répartition des particules sur la surface du plaid.

Pour comparer l'efficacité des différents protocoles, les rapports d'aires obtenues après analyse entre SYMOPREP® et la méthode standard ont été calculés (*tableau II*).

En une minute, SYMOPREP® échantillonne de quatre à trente fois plus de traces de RDX que la méthode standard. Dans le cas de la PETN, pour un institut, l'outil permet de collecter cent fois plus de traces d'explosif que la méthode standard et pour l'autre seulement un quart. Ce résultat, en apparence contradictoire, est attribué une nouvelle fois à la dispersion inhomogène des particules d'explosif entre le pullover situé sur le siège à droite de la console avec celui situé à gauche de la console. De plus, les prélèvements entre SYMOPREP® et la méthode standard n'ont pas pu être réalisés symétriquement à cause du souffle de l'explosion qui a projeté les deux parties du pullover vers les portières. Cette observation similaire à celle du plaid suggère que dans ce type de scène, les objets mobiles doivent être échantillonnés à 100 % de leur surface pour être certain de la représentativité du prélèvement et qu'il ne s'agit donc pas des meilleures surfaces pour des comparaisons précises entre différentes techniques.

SYMOPREP®, une alternative aux limitations des frottis ?

Le nouvel outil SYMOPREP® peut efficacement prélever des traces d'explosifs organiques tels que le RDX ou la PETN. Une minute de prélèvement est suffisante pour collecter des échantillons représentatifs de résidus d'explosions de PETN ou RDX pour une bonne détection de ces molécules par les analyseurs de laboratoire. Le prélèvement sous vide tel que le pratique SYMOPREP® collecte uniquement les particules labiles sans contact fort avec la surface, ce qui évite de prélever de la matrice surfacique causant comme pour les frottis des effets de matrices problématiques lors des analyses. Le mode d'interaction de l'outil avec la surface à échantillonner peut être qualifié de « doux » comparé aux techniques par frottis dont l'action est plus « dure », plus agressive pour la surface. Dans la plupart des cas, les prélèvements SYMOPREP® réalisés sur des surfaces artificielles donnent une signature d'explosif plus intense que celles obtenues avec les protocoles standards et permet donc une probabilité supérieure de

détection d'explosif. Il est particulièrement efficace sur des surfaces grandes ou rugueuses en comparaison des protocoles standards de prélèvement.

Ce nouvel outil est donc bien une alternative aux protocoles standards de prélèvement pour rechercher des traces de RDX, de PETN, mais également certainement d'autres molécules aux propriétés thermodynamiques similaires.

[1] M. Cortese, M.R. Gigliobianco, F. Magnoni, R. Censi, P. Di Martino, Compensate for or minimize matrix effects? Strategies for overcoming matrix effects in liquid chromatography-mass spectrometry technique: a tutorial review, *Molecules*, **2020**, *25*, 3047.

[2] DG. HOME, *EU Guidance on Operating Procedures for Explosive Detection Dogs in Public Spaces*, **2019**.

[3] J.R. Verkouteren, Particle characteristics of trace high explosives: RDX and PETN, *J. Forensic Sci.*, **2007**, *52*, p. 335-340.

[4] J.M.E. Glackin, R.N. Gillanders, F. Eriksson, M. Fjällgren, J. Engblom, S. Mohammed, I.D.W. Samuel, G.A. Turnbull, Explosives detection by swabbing for improvised explosive devices, *Analyst*, **2020**, *145*, p. 7956-63.

[5] T.m. Sung, J.H. Lee, J.-i. Cho, Introduction of a novel swabbing material of a wiper and establishment of an optimal method for the collection of organic explosive residues, *Analytical Science and Technology*, **2017**, *30*(6), p. 319-328.

[6] K. Kottapalli, I.V. Novosselov, Aerodynamic resuspension and contact removal of energetic particles from smooth, rough, and fibrous surfaces, *Talanta*, **2021**, *231*, 122356.

[7] H.A. Yu, T. Becker, N. Nic Daeid, S.W. Lewis, Fundamental studies of the adhesion of explosives to textile and non-textile surfaces, *Forensic Sci. Int.*, **2017**, *273*, p. 88-95.

[8] ENFSI, *Best Practice Manual for the Forensic Recovery, Identification and Analysis of Explosives Traces*, **2015**.

Alain BRY*, **Nathalie ELOY**, **Didier POUILLAIN** et **Sandrine BEAUGRAND**, CEA, DAM, Le Ripault, Monts.

Xavier ARCHER et **Laetitia BARTHE**, Laboratoire central de la préfecture de Police (LCPP), Paris.

Pierre-Adrien PELEGRIN et **Dominique GARDEBAS**, Institut de recherche criminelle de la Gendarmerie nationale (IRCGN), Cergy-Pontoise.

* alain.bry@cea.fr



Avril 2022 : munitions des deux guerres, rassemblées sur un terrain de destruction, prêtes à être détruites. © Sécurité civile – Démonstration Colmar.

L'odeur des explosifs attire les T-REX

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

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

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

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

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

Sentir la menace

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

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

Afin d'apporter une réponse complémentaire aux technologies de détection de traces, le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) a développé un appareil de détection de vapeurs d'explosifs portable appelé T-REX (Technologie de Reconnaissance d'Explosifs).

Issu du programme interministériel de recherche et développement pour la lutte contre le terrorisme NRBC-E confié au CEA par les pouvoirs publics, ce dispositif est le fruit d'une collaboration entre la Direction des applications militaires (DAM) et la Direction de la recherche technologique (DRT) du CEA. L'objectif porté par les équipes était de développer



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

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

Détection de traces d'explosifs

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

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

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

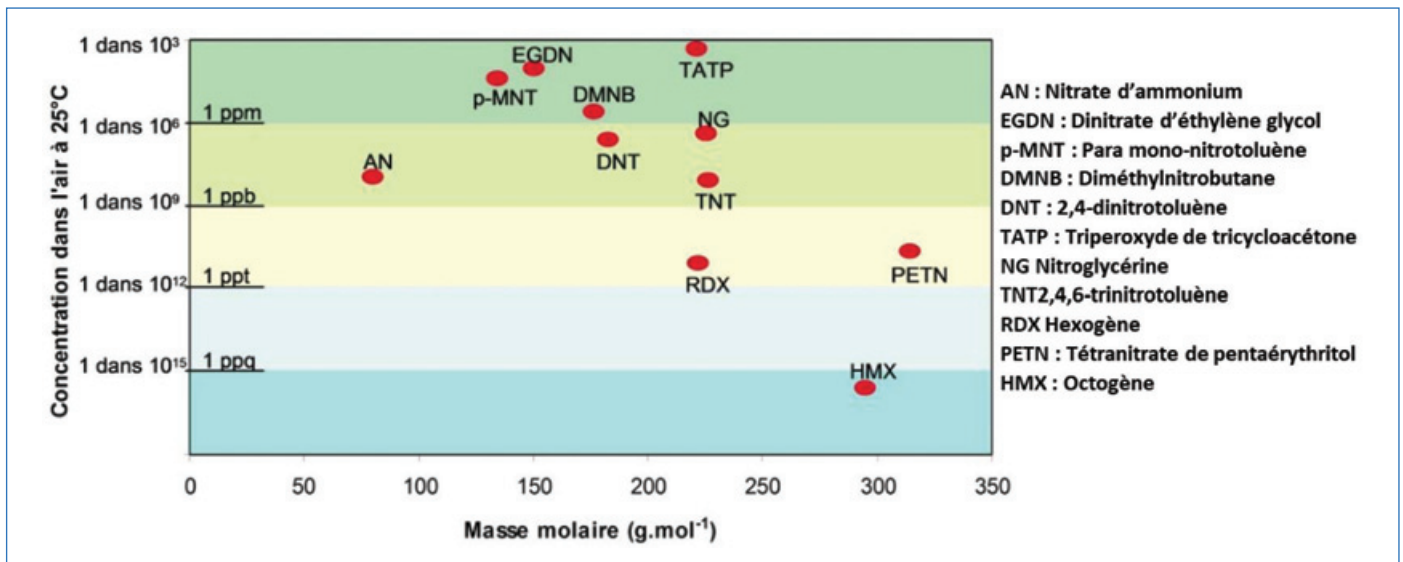


Figure 2 - Concentrations des vapeurs d'explosifs dans l'air saturé à 25 °C.

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

T-REX : comment ça marche ?

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

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

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

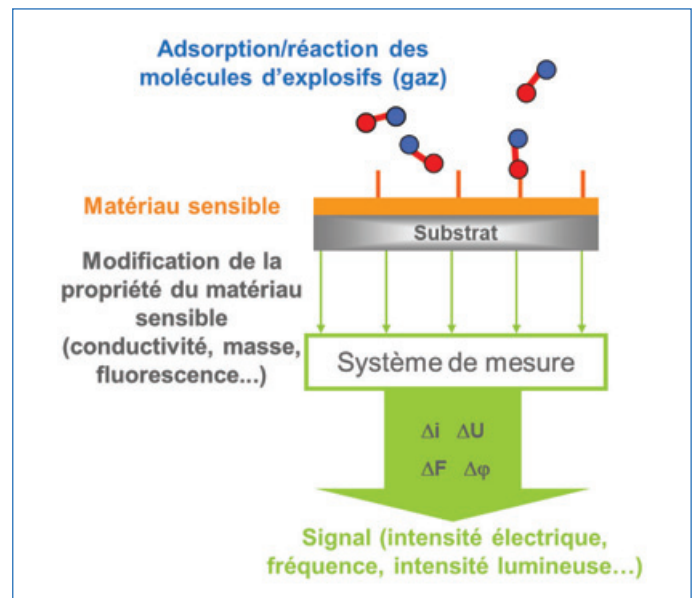


Figure 3 - Principe de fonctionnement d'un capteur chimique de gaz.

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

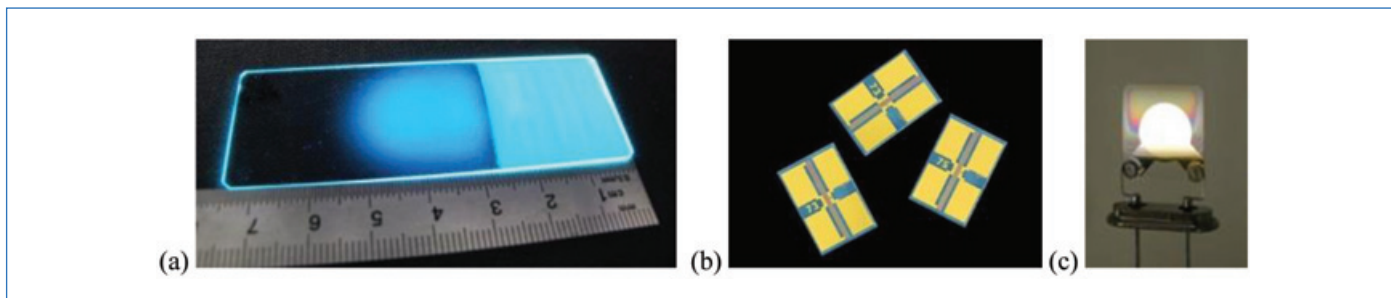


Figure 4 - Les trois types de capteurs utilisés dans T-REX : (a) lame déposée de matériaux sensibles fluorescents, (b) capteurs à ondes acoustiques de surface, et (c) microbalance à quartz piézoélectrique.

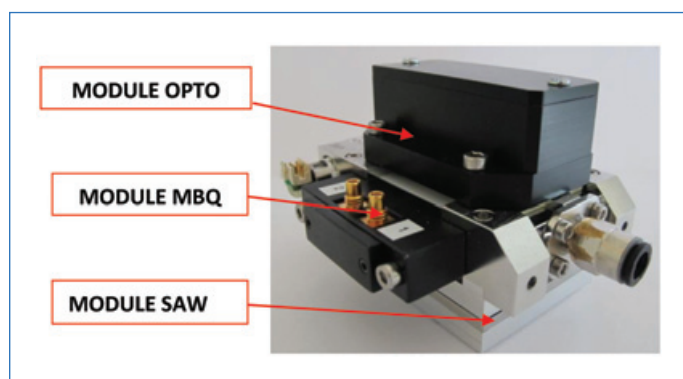


Figure 5 - Chambre de détection du T-REX.

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

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

L'aventure continue

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

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

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

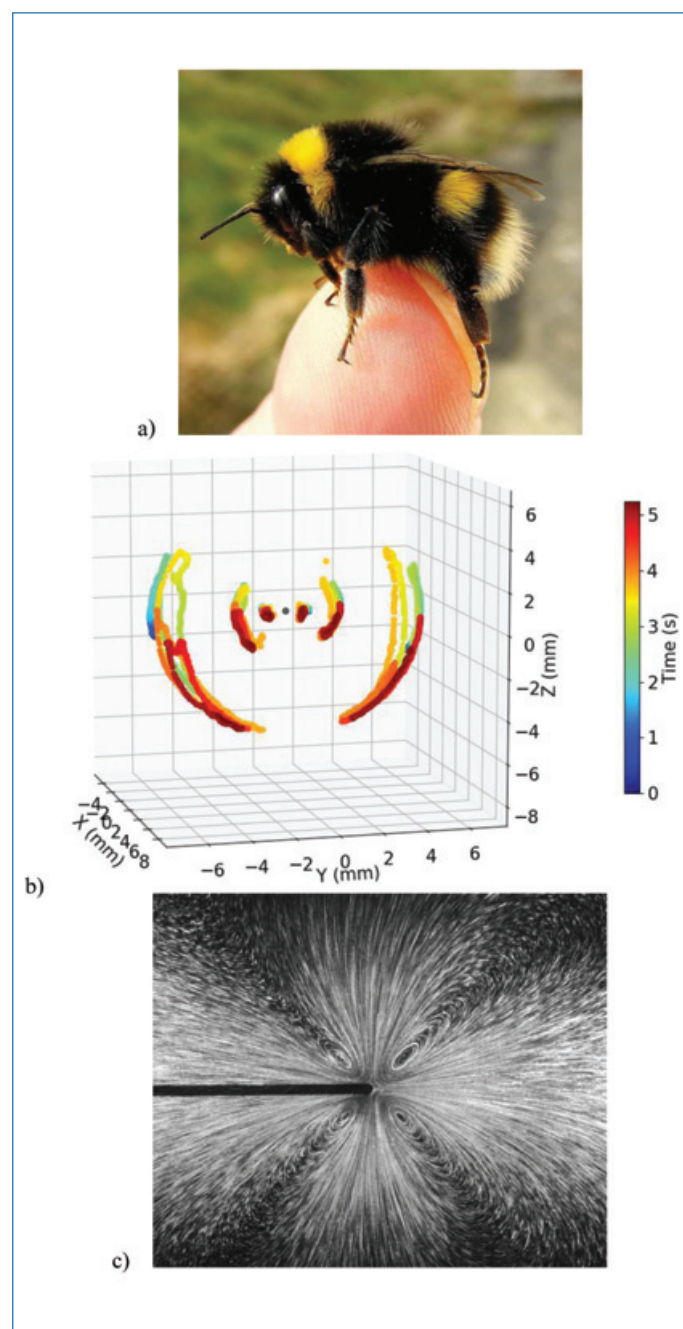


Figure 6 - Bioinspiration pour la détection de traces d'explosifs : a) bourdon, b) reconstruction 3D du mouvement des antennes du bourdon, c) visualisation de la circulation acoustique des flux d'air d'une antenne robot bioinspirée par le bourdon.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

* chrystel.ambard@cea.fr



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

Explosives detection: it's all connected

Abstract This article links the main challenges in explosives detection to terrorist scenarios, and provides a view on future opportunities for explosives detection systems and technological developments as a part of a comprehensive counter terrorism approach. A few trends and highlights are given with a focus on European multidisciplinary research collaborations.

Keywords Explosives, terrorism, detection, research, European collaboration.

Résumé La détection d'explosifs : tout est lié

Cet article relie les principaux défis de la détection d'explosifs aux scénarios terroristes et donne un aperçu des opportunités futures pour les systèmes de détection d'explosifs et les développements technologiques dans le cadre d'une approche globale de lutte contre le terrorisme. Quelques tendances et points forts sont présentés, mettant l'accent sur les collaborations de recherche multidisciplinaires européennes.

Mots-clés Explosifs, terrorisme, détection, recherche, collaboration européenne.

Explosives are used since long in terrorist attacks and have inflicted human suffering and generated dramatic material damage. Major events occurred at the end of the 80s and the 90s in western countries, for instance the attack on the Pan Am plane which crashed over Lockerbie, and the attacks at the federal building in Oklahoma city and the Paris metro [1]. These events led to an increase in security measures, especially at airports. But it were the attacks in Madrid (2001) and London (2005) [1] which can be considered, especially in Europe, as the starting point of extensive research and development programs of new explosives detection technologies.

The physical and chemical properties of explosives, or its precursors, together with the terrorist scenario/modus operandi ("red side") and the operational environment in which the explosive threat should be detected ("blue side") are critical aspects to be understood and explored in order to select the proper detection solution to enable intervention of terrorism activities and counter the explosive threat (*figure 1*).

Explosive threats

Explosives can be classified in different categories. For instance, explosives can be liquid or solid and there are many more ways to categorize. From a technological perspective, a relevant distinction is to discriminate between two different threat amount categories, which are trace and bulk amounts of explosives. Besides detecting the explosive substance (or its precursors) directly, one can also look for other improvised explosive device (IED) components, such as detonators, timing or trigger devices, shrapnel or wires.

There is no scientific consensus on the definition of "trace" or "bulk" amounts, but in general trace amounts are defined such as what cannot be seen by the naked eye. The amount of explosive for traces is in the range of picograms up to about 0.1 milligrams. Bulk amounts can be categorised ranging from parts of a milligram up to many kilograms or even tons of explosives. Sometimes a small amount of explosive material, still visible to the naked eye, is defined as residue. There is no direct relation between the presence of a trace amount of explosives and the presence of a bulk amount of explosives. Nevertheless, the detection of a trace amount of explosives, especially vapour, may indicate the presence of a bulk amount of explosives. *Figure 2* illustrates the difference between trace and bulk amounts of explosives.

Scenario and modus operandi

The timeline of a terroristic activity contains several phases, together describing a high-level scenario, that can have a wide span over years or smaller time windows such as weeks and days [2].

- Preparation phase (including IED assembly): the time needed for the preparation phase will depend on the type and amount of explosive, e.g. a home made explosive (HME), the way to obtain this explosive or its precursors and the time to manufacture the IED. In any case, there is time available for countermeasures such as explosives detection.

- Transport phase: once the IED is packaged, it will be transported to the target and the time available for intervention will be shorter.



Figure 1 - Interlinked aspects of countering the explosive threats.

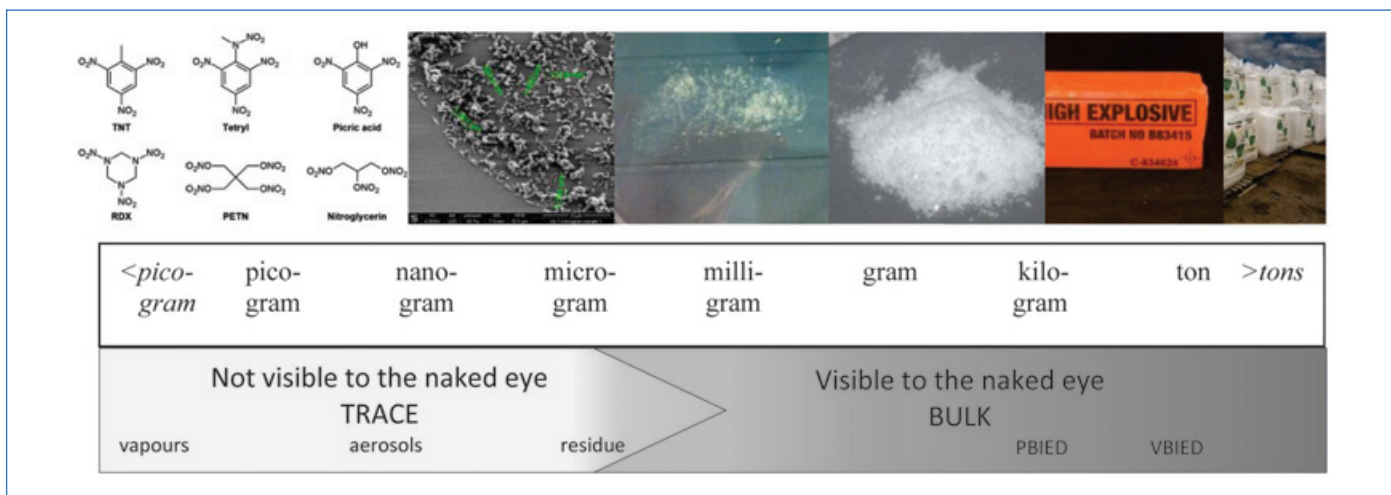


Figure 2 - Illustration of traces and bulk amounts of explosives (PBIED: personal borne IED; VBIED: vehicle borne IED). Based on information in [14].

- Execution phase: initiation of the IED is imminent on arrival at the target location, though the IED may be time delayed by the terrorist with the purpose to achieve a certain effect.

Going further into detail, the methods for producing homemade explosives (HMEs) and IEDs [3] and modus operandi of the terrorists are as wide as their imagination. The production can take place in different environments ranging from urban to rural. A few important main modus operandi categories can be distinguished as related to the transport and execution phase: the personal borne IED (PBIED), the bag/package "leave behind" IED and the vehicle borne IED (VBIED). Each of these has sub-categories. For instance a leave behind object could be a bomb hidden or disguised in bags or rubbish sacks, or could be carried to the attack location by a person (or possibly with a vehicle) and left there by the person who subsequently leaves the location. VBIEDs are bombs in vehicles, to be detonated either in suicide attacks or parked and subsequently detonated. Scenarios include vehicles that are parked at the street or in car parks, and vehicles that are moving slowly or are briefly stopped. In each of these phases, opportunities are present to detect the explosive and thus preventing the attack. In general, the time available for intervention and counteracting an attack decreases as the respective timeline phases approaches the execution phase.

Explosives detection technology

Two performance characteristics are important in explosives detection: sensitivity and selectivity. Sensitivity relates to the minimum amount of an explosive material required for detection. The detection device must be able to detect sufficiently small amounts of explosives related to a certain scenario. Selectivity is the ability of a system to correctly provide information on the type of explosive. Sensitivity is highly related to the probability of detection, while selectivity is highly related to the probability of false positives. For both trace, bulk and anomaly detection various technologies exist, each with its own pros and cons, both in detection performance characteristics, as in operational use.

Operational context

The applications of explosives detection technologies are diverse. Each operational environment involves specific

operational conditions and detection devices must be suitable for the situation. Especially the combination of the situational control and the expected modus operandi of the terrorist are of importance to the situation at hand. This combination leads to a certain technology need.

From an operational perspective, situational control is the degree to which law enforcement and security personnel can control the aspects relating to the successful detection of an explosive or IED, like weather, available time and cooperation of people. Situational ranges from high, like in an aviation security checkpoint, to low, like in an open crowded urban place. Some typical operational settings are entrances to critical infrastructure (CI), aviation security checkpoints, land and sea border checkpoints, mass transportation, crowded places and HME/IED production locations. The general tendency in this list is from high to low situational control.

It's all connected

On a high level some of the main technology needs can be identified beforehand. As stated in the previous section on detection technology, a high sensitivity is associated with a high probability of detection. High sensitivity is needed in situations where minimising false negative results is important. A high selectivity is associated with a low number of false positives. High selectivity is of importance for situations where false positives have a large adverse effect on the flow of screened persons or objects, since each positive result needs to be resolved, which takes time and burdens the person in the event of person screening. While the time to obtain a result from detection equipment should be as short as possible in any situation, it is more pressing in the execution phase of the terrorist plot, when the attack is imminent. Stand-off⁽¹⁾ (people) screening is an application where the distance is 10-100 metres or more, in order to screen people or objects and carry out interdiction at a sufficient distance to provide for some protection for the target and/or the screener against the explosion effects. In some specific situations it is desirable to screen persons or objects while moving. With walk-by people screening, preferably at a modest stand-off distance, e.g. 1-5 metres, formation of queues and consequent disruption to commerce and everyday life is reduced or even avoided. Other situations require the availability of mobile, transportable equipment, for instance in the event of a leave behind IED or in the

detection and location of an HME production location. To summarize research and development should be driven by threat assessments in the context of the operational environment of the detection technology. Of course operational and cost drivers should be considered.

Multidisciplinary European research collaborations

Collaborative research efforts are crucial and typically involve a broad range of expertise that in a multidisciplinary fashion creates an exhaustive approach for addressing complex issues. A selection of previous and on-going European research projects⁽²⁾ is presented in which CEA, FOI (Swedish Defence Research Agency) and TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) took part, together or individually. The projects are sorted by the terrorist scenario phases as described earlier: preparation, transportation, execution.

HMEs take time to produce and can create dispersions of used chemicals to the surroundings. For example in the London bombings in 2005, the bomb factory was located in an urban apartment where hydrogen peroxide was used as an ingredient. The handling and preparation of this volatile compound disperses vapours to the surroundings through e.g. ventilation exhausts.

In the LOTUS project [4], this scenario was explored by testing (mobile) detection devices mounted on vehicles. The devices were calibrated for different precursors and also contained a GPS so that the type and amount of the substance detected could be tied to a timestamp and the location presented on a map. The idea was to develop and test a capability that could detect e.g. hydrogen peroxide from a certain distance and with sufficient selectivity and sensitivity. The results from the trials were promising and the research on localisation of bomb factories was continued in the EMPHASIS project [5], which focussed on a different concept of using static sensors with the capability to scan the air over large distances for monitoring precursors using spectroscopic techniques.

The common denominator for all IEDs is the explosive. There will arise needs to transport explosives to e.g. a safe haven, a storage space between the point of acquisition and the manufacturing location, or the transport of the assembled IED to the place of execution. When explosives are acquired outside the border of Europe or outside a country border where the attack is aimed for, these need to be transported via border controls with an apparent risk of being detected. The use of HMEs in attacks are common, probably because consumer chemicals can be purchased in the geographical proximity of the execution.

The project XP-DITE [6] aimed to develop, demonstrate and validate a comprehensive, passenger-centred approach to the design and evaluation of integrated security checkpoints at airports. The project EFFISEC aimed at providing a higher security level of identity and luggage control of pedestrians and passengers inside vehicles, at land and maritime checkpoints, by the integration of a set of existing and complementary technologies (biometrics, e-documents, signal recognition and image analysis, trace and bulk detection of substances, etc.). The project TRESSPASS [7] progressed the concept of risk-based screening at border checkpoints.

The ability to detect explosives from a distance is an apparent and desired function in explosive detection. This is called "standoff detection" and might be defined as that "individuals and vital assets should be outside the zone of severe damage".

The use of standoff detection can be for interrogating a left-behind object and understand if it has explosive traces on the surface that indirectly indicate that it can contain an explosive charge or at least have been in contact with such materials. The detection may be based on laser spectroscopic techniques and requires a free line of sight to the target to be interrogated.

In the project HYPERION [8], two prototypes based on Raman and infrared spectroscopy were tested in a controlled area for detection of trace amounts of explosives between 10 to 20 metres from the object with promising results. The NATO STANDEX project [9] also addressed explosive detection from a distance. In this case detection combined microwave imaging to Raman spectroscopy.

What's the future?

The way explosives detection aspects are connected and interlinked, leaves only one way forward for enhancing the countering of the explosive threat, and that is: **collaboration**. Threats are not limited to the explosive substance. It should be broadly considered as a combination of material, IED configuration and operational scenarios. Before developing detection technologies, researchers must collaborate with the counter measures community. Law enforcement, intelligence services, operators and end-users are privileged partners to provide elements regarding the threat and its evolution. Deploying one or more detection technologies is always a trade-off between the expected threats, the desired security level, health and safety issues, inconvenience for the screened person, staff effort and operational burden, and last but not least cost.

From the detection point of view, no single technology is an answer to the multiplicity of threats and configurations. The way to enhance the efficiency of the deployed technologies or imagine new ones is the orthogonal combination of technologies at the image of checkpoints in airports (metal detection, millimetre wave and X-ray imaging, trace detection). Limiting the impact on free flow of people or goods and compliance with privacy legislation are other important requirements for a good acceptance of a new technology. These difficult challenges involve crucial need of collaborative research between industry and research technological organisations. Besides projects described above and on-going ones [10-11], an example of successful collaboration which can be considered as the origin of several research collaborative projects is the network on detection of explosives (NDE) [12]. It associated experts from eight governmental research organisations in five countries in order to support the European Commission on questions related to explosives detection.

Finally, detection activities to counter explosive threats has more aspects than only explosives detection, like for example the monitoring of suspicious money transactions or dubious travel patterns for the planning and financing phases which also need a close collaboration between law enforcement agencies, policy makers, universities, research organisations, forensic laboratories, standardisation organisations, operational users and industry. The project EXERTER [13], a network of explosives specialists, in which twenty five stakeholders are working together to counter explosive threats, is an excellent example of European cooperation, connecting almost all aforementioned categories. It's all connected.

(1) Stand-off definition: see National Research Council, *Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques*, The National Academies Press, **2004**.

(2) All mentioned projects are in the FP7, Horizon 2020 or Horizon Europe framework, unless stated otherwise.

[1] J. Smith, *Brodie's Bombs and Bombings*, 4th ed., Charles C Thomas Publisher Ltd, Springfield (IL), **2016**.

[2] European Commission, "ENTRAP", H2020, 2017-2020, <https://cordis.europa.eu/project/id/740560> (accessed 20 Jan. 2022).

[3] J. Ledgard, *The Preparatory Manual of Explosives: Radical, Extreme, Experimental Explosives Chemistry*, UVKCHEM, **2010**.

[4] European Commission, "LOTUS", FP7, 2009-2011, <https://cordis.europa.eu/project/id/217925> (accessed 20 Jan. 2022).

[5] European Commission, "EMPHASIS", FP7, 2011-2015, <https://cordis.europa.eu/project/id/261381/results> (accessed 20 Jan. 2022).

[6] European Commission, "XP-DITE", FP7, 2012-2017, <https://cordis.europa.eu/project/id/285311> (accessed 20 Jan. 2022).

[7] European Commission, "TRESSPASS", H2020, 2018-2021, <https://cordis.europa.eu/project/id/787120> (accessed 20 Jan. 2022).

[8] European Commission, "HYPERION", FP7, 2012-2015, <https://cordis.europa.eu/project/id/284585> (accessed 20 Jan. 2022).

[9] NATO, "Detecting suicide attacks – from research to reality", STANDEX, 30 Oct. 2013, www.nato.int/cps/en/natohq/news_104536.htm

[10] European Commission, "CERIS – Community for European Research and Innovation for Security", https://ec.europa.eu/home-affairs/secure-safe-resilient-societies/index_en (accessed 13 Jan. 2022).

[11] European Commission, "CORDIS", <https://cordis.europa.eu/projects/fr> (accessed 13 Jan. 2022).

[12] NDE, "NDE Final Report", NDE, **2013**.

[13] FOI, "EXERTER", **2018**, www.exerter-h2020.eu (accessed 20 Jan. 2022).

[14] US Homeland Security, IED Attack – Improvised Explosive Devices – Fact Sheet, The National Academies.

Oscar VAN DER JAGT¹, Senior Consultant Countering Explosive Threats, **Hans ONNERUD**², Deputy Research Director, and **Didier POUILLAIN**^{3*}, International Scientific Advisor.

¹TNO, Ypenburgse Boslaan 2, 2496 ZA, The Hague (NL).

²FOI, Olof Arrhenius väg 31, 137 94 Norra Sorunda (SE).

³CEA, DAM, Le Ripault, F-37260 Monts.

* didier.poullain@cea.fr

"Made in Europe for the World" Oui, avec vos contributions !



Les journaux de Chemistry Europe*
*Chemistry Europe regroupe 16 sociétés de chimie européennes, dont la SCF

- Analysis & Sensing
- Analytical Sciences Advances
- Chemistry - A European Journal
- Chemistry - Methods
- Electrochemical Science Advances
- EurJIC
- EurJOC

WILEY-VCH

- Batteries & Supercaps
- ChemBioChem
- ChemCatChem
- ChemElectroChem
- ChemMedChem
- ChemPhotoChem
- ChemPhysChem
- ChemPlusChem
- ChemSusChem
- ChemSystemsChem
- ChemistryOpen
- ChemistrySelect
- ChemViews

Analytical and Bioanalytical Chemistry
Springer

L'Actualité Chimique
Société Chimique de France

Pour montrer la vitalité de la chimie française, toutes ces revues attendent vos communications.

Les effets retard des guerres du XX^e siècle

Regard sur l'état de la pollution pyrotechnique en France

Résumé Les faits de guerre génèrent une forme de pollution spécifique, hétérogène et complexe. En France, les conséquences de plusieurs conflits se sont superposées. En 2020, le service de déminage de la Sécurité civile a effectué 12 235 opérations, concernant essentiellement des munitions de la Première et de la Seconde Guerre mondiale. Les objets pyrotechniques dispersés sont nombreux et dans la grande majorité des cas, difficiles à localiser. Ils vieillissent et se dégradent selon des scénarios très variables. Les questions de dépollution et de déminage relèvent d'un champ d'activités pluridimensionnel. Il existe une multitude de facteurs combinés et de situations différentes sur le terrain, et à chaque cas correspond une ou plusieurs nuisances potentielles.

Mots-clés **Démînage, pollution pyrotechnique, explosifs de guerre, obus, bombardements, chargements chimiques, vieillissement des munitions, zones rouges.**

Abstract **The delayed effects of the wars of the 20th century: a look at the state of pyrotechnic pollution in France**
Acts of war generate a specific, heterogeneous and complex form of pollution. In France, the consequences of several conflicts overlapped. In 2020, the Civil Security Mine Clearance Service carried out 12,235 operations, mainly concerning munitions from the First and Second World Wars. Scattered pyrotechnic objects are numerous and in the vast majority of cases difficult to trace. They age and degrade according to highly variable scenarios. Depollution and demining issues fall within a multidimensional field of activities. There are a multitude of combined factors and different situations on the site and each case corresponds to one or more potential nuisances.

Keywords **Demining, pyrotechnic pollution, war explosives, shells, bombardments, chemical loads, aging of ammunition, red zones.**

Les conflits armés de l'ère moderne sont des guerres d'industries. À partir de la seconde moitié du XIX^e siècle, l'homme, en tant que valeur élémentaire du champ de bataille, voit son rôle se transformer et progressivement se dissoudre dans un environnement technologique de plus en plus dense. Le premier conflit mondial symbolise cette transition. En 1914, les codes traditionnels de la guerre viennent littéralement s'éventrer sur la puissance des armes nouvelles. Les drones, les satellites de renseignement, les missiles hypersoniques sont les marques actuelles de cette course née il y a plus d'un siècle et demi, et qui se poursuit...

Guerre d'industrie signifie guerre d'énergie, et par voie de conséquence, guerre de la chimie. Dès le milieu du XVII^e siècle, la question de l'approvisionnement en azote fut une préoccupation majeure pour de nombreux pays. Sans nitrate de potassium, c'est-à-dire sans salpêtre, la fabrication de la poudre noire était impossible. À cette époque, la France était étroitement dépendante du salpêtre des Indes anglaises. À l'instar de pays tels que la Suède ou la Prusse, le Roi Louis XVI exigea en 1775 la création d'une filière de production nationale de salpêtre. Un an plus tard, les « nitrières royales » voyaient le jour. Ces mesures n'empêchèrent toutefois pas la pénurie de poudre noire sous la Révolution. C'est à cette période que se produisit ce qui demeure encore aujourd'hui comme la plus grande catastrophe industrielle en France (après la catastrophe minière de Courrière en 1906) : le 31 août 1794 à 7 h 15, la Poudrerie de Grenelle près de Paris, qui centralisait les réserves révolutionnaires, explosa. Selon les sources, entre 30 et 150 tonnes de poudre noire déflagrèrent, entraînant le décès d'au moins 600 personnes.

Au cours de la Première Guerre mondiale, la question stratégique de l'azote, et plus largement de la chimie des explosifs, prit une autre forme. Il était indispensable de disposer de ressources suffisantes en ammoniac afin de répondre à l'accroissement considérable de la demande en explosifs. Cette bataille fut gagnée par l'industrie allemande qui, grâce au procédé Haber Bosch, permit de compenser le blocus maritime qu'elle subissait sur les importations de nitrate du Chili. Cette guerre dans la guerre fut, elle aussi, accompagnée ou suivie de catastrophes industrielles exceptionnelles. Au Canada, le 6 décembre 1917, le cargo français Mont Blanc, qui transportait vers l'Europe 2 400 tonnes d'explosifs, pulvérisa accidentellement le port et la ville d'Halifax en provoquant la mort de près de 2 000 personnes. En Allemagne, le 21 septembre 1921, ce furent 450 tonnes d'un stock de sulfate d'ammonium et de nitrate d'ammonium mélangés qui furent à l'origine de la tristement célèbre destruction du site industriel d'Oppau ; l'explosion fit 561 morts.

Les progrès industriels ont de tout temps été accompagnés d'une part d'effets délétères. Il s'agit de la fameuse balance « bénéfiques/risques ». Sous l'angle physico-chimique, l'inconvénient majeur de la pyrotechnie réside dans le fait que les risques sont souvent de même nature que les bénéfices et qu'ils se mesurent sur une même échelle de force. À quelques rares exceptions près, si une substance pyrotechnique ne se transforme pas au bon endroit et au bon moment, si un projectile n'explose pas en temps de guerre par exemple, son potentiel vulnérant reste intact une fois la paix revenue. Grenelle, Halifax, Oppau sont quelques noms choisis sur une longue liste de catastrophes exceptionnelles. Ils représentent

quelques exemples de libérations instantanées d'énergie considérable. Mais indépendamment de ces événements spectaculaires, il est aussi intéressant de se poser la question de ce qu'il advient des potentiels énergétiques dispersés. Que deviennent les objets pyrotechniques isolés qui n'ont pas rempli leur fonction ? Quel destin ont les molécules et les énergies excédentaires ? Celles qui, pour de multiples raisons, ne se sont pas exprimées en temps voulu et qui entraînent des désordres secondaires, latents et parfois complexes ?

Une forme de pollution spécifique et probablement unique dans l'histoire des guerres modernes

Les faits de guerre génèrent une forme de pollution spécifique, hétérogène et complexe. Sur Internet, les mots clés « pollution pyrotechnique » ou « déminage » conduisent à un champ thématique extrêmement vaste : accidents, faits divers, menaces environnementales, immersions en mer, munitions périmées, marquage d'eau potable, bilans carbone de conflits récents..., les articles ne manquent pas. Évidemment, notre pays qui a supporté sur son sol une grande part de l'intensité des combats du XX^e siècle est concerné par plusieurs de ces sujets.

Mais avant tout, un constat s'impose. La France représente probablement un cas unique dans l'histoire des guerres modernes. En effet, ce sont les conséquences de deux conflits majeurs qui se sont superposés sur notre territoire. Ces conflits ont chacun fait appel à un éventail d'armes considérable. Sans entrer dans un inventaire détaillé, on rappellera pour mémoire : les centaines de millions d'obus de 14-18, dont une partie était chargée en gaz de combat (*figure 1*) ;

les bombardement aériens massifs de 39-45 visant les grandes villes, les industries et les infrastructures de transport (*figure 2*) ; l'emploi des premières sous-munitions ; le minage systématique des espaces maritimes, des côtes, puis du territoire dans son ensemble ; la mise en œuvre des premiers missiles ; et finalement les millions d'engins explosifs et de pièges divers, parfois de très petites tailles, cachés, enfouis, ou simplement abandonnés sur le terrain. Mis à part la Belgique, aucun autre pays européen, sur la même période de référence, n'a eu à subir sur son sol un tel cumul d'armes différentes et dans de telles proportions. En matière de comptabilité sinistre, les 7 millions de tonnes de bombes de la guerre du Vietnam font souvent référence. Ce chiffre, si terrible qu'il soit, se situe pourtant bien en deçà des 15 millions de tonnes de munitions d'artillerie employées au cours de la seule Première Guerre mondiale, et dont la majeure partie a été tirée sur le sol français.

Un autre aspect majeur de la problématique relève de considérations géographiques et économiques. Les guerres européennes du XX^e siècle furent des conflagrations générales. En France, aucun territoire ne fut épargné. Schématiquement, la moitié nord du pays fut bien plus atteinte que la moitié sud, mais chaque département français a, dans la Grande histoire, son histoire particulière. Les combats se sont souvent déroulés dans des régions où les activités humaines étaient nombreuses et variées. Pour des motifs à la fois économiques et techniques, à la fin des hostilités, les reprises d'activités eurent lieu sur des terres faiblement ou partiellement dépolluées. Ces espaces, sur lesquels la densité de population a continué à croître, représentent aujourd'hui des enjeux économiques multiples en continues mutations. L'impact des guerres se mesure moins aux tonnages d'explosifs



Figure 1 - Guerre 14-18 : les obus sortent du four. © Galica.bnf.fr/Bibliothèque nationale de France.



Figure 2 - Le Havre, déblaiement après les bombardements de la Seconde Guerre mondiale. © Galica.bnf.fr/Bibliothèque municipale du Havre.

ou de munitions employés qu'aux dynamiques sociales, économiques et écologiques des territoires sur lesquels elles se déroulent. De ce point de vue, l'Europe, et en particulier la France, ont été très fortement et durablement impactées.

Évolutions sociétales et redéfinition des enjeux

La pollution pyrotechnique du territoire a tout d'abord été perçue sous l'angle des risques directs qu'elle faisait courir sur les populations. Après-guerre, les accidents consécutifs au fonctionnement intempestif de munitions furent nombreux. Dans les années cinquante, on comptait en France, en moyenne, un accident grave par semaine. En 1975, on enregistra vingt-huit accidents graves pour un bilan total de douze morts (dont sept enfants) et trente-quatre blessés. Les statistiques n'ont régressé que très lentement jusqu'à atteindre leur niveau actuel. De nos jours, on déplore une dizaine d'accidents par an, faisant en moyenne une douzaine de victimes, dont un tiers de cas mortels. Dans cette accidentologie, il est intéressant de noter que trois accidents sur quatre sont le fait d'imprudences caractérisées et de fautes de comportement graves commises dans un cadre généralement privé (manipulations hasardeuses après découvertes, tentatives de démontage, essais de mise à feu, etc.). Les accidents fortuits dans un contexte professionnel sont pour leur part minoritaires.

Dans les années 1980, une autre conséquence de la pollution pyrotechnique a commencé à être prise en compte dans certains secteurs d'activités. Dans le domaine des travaux publics en particulier, le risque économique que représentent les interruptions de chantiers en cas de découverte fortuite de restes explosifs de guerre a cherché à être mieux maîtrisé.

Les mises à jour de grosses bombes d'aviation par exemple peuvent entraîner des évacuations et une paralysie temporaire de vastes zones urbaines (20 000 personnes déplacées à Nantes en 2006). Il en va de même pour les stocks de munitions abandonnées qui, redécouverts, peuvent par endroit provoquer des retards de plusieurs mois sur les chantiers. Désormais, face à ces aléas spécifiques, de plus en plus de porteurs de projets systématisent les études historiques et le contrôle préventif des sols en amont de leurs phases travaux.

Au début des années 2000, c'est l'aspect environnemental qui a commencé à mobiliser les attentions. Les munitions dispersées ne sont pas que des réserves d'énergie au sens physique. Elles représentent aussi des réservoirs chimiques dont les cinétiques d'évolutions sont extrêmement variables et très interdépendantes des milieux dans lesquels ils se trouvent. Un objet pyrotechnique est généralement constitué d'un couple contenu-contenant sur lequel il est intéressant de se pencher.

Le couple contenu-contenant : une combinaison d'incertitudes

Du point de vue des contenus, les plus courants sont des chargements explosifs. Ce sont des produits très divers pour la plupart basés sur la chimie organique de l'azote. Il s'agit de composés nitroaromatiques tels que le trinitrotoluène (TNT) ou le trinitrophénol (mélinite), de nitramines telles que le tétryl, de polymères nitrés tels que la nitrocellulose. Les agents comburants sont des nitrates d'ammonium et de potassium, des chlorates et des perchlorates... Ces chargements, purs ou en mélanges, peuvent être introduits dans les munitions

à l'état pulvérulent ou au contraire à l'état fondu. En refroidissant, ils prennent alors la forme de blocs compacts. Toutes ces substances présentent du point de vue de leurs structures et de leurs textures des caractéristiques physico-chimiques très variées. Parmi les composés nitroaromatiques, le trinitrophénol à l'état pulvérulent est connu pour être très soluble dans l'eau et donc très mobile dans l'environnement. À l'inverse, les blocs coulés de trinitrotoluène qui sont retrouvés en pleine terre après plusieurs décennies présentent des états de stabilité physique et chimique remarquables, y compris dans des milieux complètement saturés en eau.

Les chargements ne sont pas exclusivement explosifs. Toute une cohorte d'autres produits chimiques ont été introduits dans les munitions en raison de leurs effets particuliers. Certains sont fumigènes, comme l'hexachlorohexane ou le trioxyde de soufre en mélange. D'autres sont toxiques, comme le sulfure d'éthyle dichloré (la tristement célèbre ypérite) ou l'oxychlorure de carbone (phosgène). Il existe également des agents incendiaires tels que le phosphore... Seuls ceux qui entrent dans le registre des produits pyrotechniques contiennent un potentiel énergétique rapide réellement significatif, mais tous représentent, à des degrés divers, un potentiel concret de nuisances chimiques sur leurs milieux. Du côté des contenants, la variabilité est toute aussi grande. Les enveloppes sont fabriquées à partir de métaux divers, d'alliages, avec présence ou non de métalloïdes toxiques. Leurs épaisseurs peuvent être comprises entre quelques dixièmes de millimètre et plusieurs centimètres. Certaines architectures de munitions font appel à des combinaisons de matériaux tels que le plomb ou le verre, réputés pour leur état chimique stable et peu altérable dans le temps. Ces enveloppes vont se dégrader selon des modèles différents mais connus et bien documentés. Un corps d'obus monobloc en fonte aciérée par exemple résistera à la corrosion pendant des siècles, alors qu'au même endroit, un système de mise à feu en alliage de zinc se transformera en poussière en quelques décennies. D'innombrables facteurs externes, électriques, chimiques, ou même biologiques, vont faire varier les scénarios de vieillissement. Parmi ces facteurs, on peut noter : l'hygrométrie, le PH, la température, la résistivité des sols, les caractéristiques des espèces ioniques dissoutes dans l'eau des milieux (les carbonates en particulier), l'activité des micro-organismes (qui font varier le CO₂ disponible), etc. Ils jouent tous un rôle dans les multiples déclinaisons possibles de décompositions de ces objets pyrotechniques dispersés.

La perception des cinétiques de désintégration des munitions peut être approchée concrètement au travers de l'exemple de l'obus français de 75 mm. Il fut le plus fabriqué du côté des alliés au cours de la Première Guerre. Son enveloppe en acier, qui mesure environ 1 cm d'épaisseur, mettra, dans un sol profond, homogène, non perturbé par l'activité humaine, entre sept et huit siècles pour perdre son intégrité. Le même engin en surface, à moitié découvert, en conditions défavorables dans un milieu perturbé, acide, humide et aéré, sera percé par la corrosion en à peine plus d'un siècle.

D'autres variables encore viennent malheureusement alourdir cette addition déjà longue d'interférents. Les substances pyrotechniques ne se décomposent pas toutes selon les mêmes régimes. Certaines brûlent, d'autres déflagrent ou détonnent en générant des produits de transformation très divers. Accidentellement, lors du dysfonctionnement d'une chaîne d'amorçage par exemple, un objet destiné à détonner peut n'atteindre qu'un régime de déflagration

ou de détonation incomplète. Là où la matière solide aurait dû se convertir en gaz et en une énergie redoutable, à plusieurs milliers de mètres par seconde, elle ne va finalement se transformer que partiellement, plus lentement, à quelques centaines de mètres par seconde en dispersant des fragments d'explosifs intacts dans le milieu.

Un travail de recherche fastidieux, inscrit dans la durée

Mais pour en revenir à l'aspect plus concret de la dépollution de notre territoire, qu'en est-il aujourd'hui ? Au risque d'une divergence avec le point de vue des historiens, les guerres du XX^e siècle ne sont pas finies. Au rythme de 400 à 500 tonnes par an, le sol et le sous-sol français ne cessent de régurgiter les stigmates de conflits qui au sens technique du terme sont bien loin d'être terminés. En 2020, le service de déminage de la Sécurité civile a effectué 12 235 opérations sur le territoire national, concernant essentiellement des munitions de la Première et de la Seconde Guerre mondiale. Autre source d'étonnement : le nombre de demandes d'interventions ne décroît que très faiblement au fil du temps. Au cours des dix dernières années, les tonnages annuels d'engins éliminés sont restés sensiblement stables.

Pourquoi une telle rémanence ? Une réponse facile serait d'affirmer que peu de choses ont été réalisées en matière de dépollution pyrotechnique à la fin des deux guerres et que le problème n'a pas été porté à la hauteur des enjeux qu'il représentait. Toutes les études historiques sérieuses, corroborées par des archives récemment rendues publiques, démontrent l'inverse. Les périodes de reconstruction ont été économiquement dynamiques et accompagnées de dispositions exceptionnelles en matière de déminage, non pas en raison d'un choix politique particulier, mais parce que cela relevait d'une absolue nécessité. Il fallait remettre le pays en situation de produire. Entre les deux guerres, le dispositif français s'est appuyé sur des moyens privés surveillés et coordonnés par l'autorité militaire. À partir de 1945, l'État a repris à sa charge l'intégralité des opérations, se dotant de moyens spécialisés. Ce n'est pas en direction d'un déficit de moyens qu'il faut rechercher les causes de la décroissance très lente de cette pollution.

Le tout premier facteur qui explique la rémanence de la pollution pyrotechnique en France est quantitatif. Les objets pyrotechniques dispersés sur le terrain sont nombreux et dans la grande majorité des cas, difficiles à localiser. Selon l'étude Prentis de 1937, pour le seul conflit de 14-18, 1 389 millions d'obus, toutes catégories confondues, auraient été tirés sur l'ensemble des fronts. Ce chiffre a été révisé depuis et les historiens s'accordent aujourd'hui autour du chiffre d'un milliard. À lui seul, le territoire français aurait « accueilli » les deux tiers de ces engins. Il est couramment admis que 10 % d'entre eux n'auraient pas fonctionné et qu'une autre fraction, de 10 à 15 %, aurait été purement et simplement abandonnée sur le terrain sans avoir été utilisée. Ces valeurs relèvent de l'approximation et ne reposent sur aucune étude sérieusement documentée. Compte tenu du nombre de systèmes, de modèles pyrotechniques produits et de la liste de tous leurs disfonctionnements imaginables, la marge d'erreur de cet indice de pollution varie probablement du simple au double. Quoiqu'il en soit, ce sont bien des millions d'engins explosifs de toute nature qui attendent encore d'être éliminés.



Figure 3 - Première Guerre : machine utilisée pour remettre en état les sols ravagés par les obus. © Galica.bnf.fr/Bibliothèque nationale de France.

Un regard dirigé vers le sol nous permet d'appréhender une autre dimension du problème. Les munitions qui restent aujourd'hui à traiter sont difficiles à localiser pour de multiples raisons. Tout d'abord, une grande partie d'entre elles se sont profondément enterrées. L'exemple des bombardements aériens est parlant. Au cours de la Seconde Guerre mondiale, plus de 600 000 tonnes de bombes ont été déversées sur la France. Ces bombes, larguées à haute altitude ou à grande vitesse par les avions, ont impacté le sol avec des énergies considérables. Celles qui n'ont pas explosé sont parfois descendues à des profondeurs surprenantes. Un document du Service de déminage de la Protection civile de 1971 indique que 60 % des bombes aériennes (de 250 kg et plus) sont retrouvées à plus de 4,5 mètres de profondeur. Dans le même registre, les obus d'artillerie pénètrent dans la terre en suivant, en moyenne, un cheminement de trois fois leur longueur. Ainsi, en terrain favorable, un obus de 155 mm mesurant soixante centimètres de long et pesant un peu plus de 40 kilos suivra un parcours de près de deux mètres dans le sol avant de s'immobiliser. Ces valeurs sont corroborées par les observations des archéologues qui retrouvent régulièrement ces engins lors de leurs travaux.

Il existe de nombreuses autres raisons qui expliquent l'enfouissement des munitions sur les zones de combats. Les pilonnages d'artillerie et les bombardements de toute nature ont contribué à de profondes modifications de la morphologie des sols. Pour la seule offensive allemande du printemps 1918 entre Cambrai et Saint-Quentin, 3,5 millions d'obus ont été tirés en cinq heures. Les cratères et les gerbes de terre se sont superposés et ont recouvert les munitions défectueuses. La guerre des « mines », qui consistait à placer des charges d'explosifs de plusieurs tonnes dans des galeries creusées

sous les tranchées ennemies, a également fortement marqué le paysage. En explosant, ces mines provoquaient des cratères de 10 à 90 mètres de diamètre, de 10 à 20 mètres de profondeur, et les déblais en conséquence. Plus loin, ce sont de gigantesques réseaux de tranchées qui ont labouré les sols. En Champagne-Ardenne, on estime que chaque kilomètre de front a généré 113 kilomètres de boyaux et de galeries diverses.

À l'armistice en novembre 1918, près de deux millions d'hectares sont entièrement dévastés. Des travaux titanesques vont alors être réalisés afin que les terres agricoles puissent être rendues à leur vocation première (figure 3). Le nivellement des surfaces va nécessiter, selon les endroits, entre 80 et 2 500 m³ de remblais rapportés à l'hectare. En 1925, 1,8 million d'hectares produisent à nouveau. Mais sous les cultures, en profondeur, les munitions intactes et les résidus pyrotechniques sont toujours là, mélangés à un enchevêtrement d'autres déchets militaires (éclats, fils de fer barbelés, pieux métalliques, blindages...). Là où les situations sont les plus inextricables, les terrains sont tout simplement laissés en l'état et inscrits au périmètre des « zones rouges ». En 1927, ces zones rouges représentent encore 48 820 hectares qui vont être majoritairement reboisés et confiés à l'administration des eaux et forêts. Détail intéressant : pendant des années, les travaux de récupération d'épaves et de métaux vont être interdits dans les zones rouges afin de protéger les plantations. Sur ces espaces peu fréquentés, les derniers indices de surface vont progressivement disparaître sous les herbes et la broussaille...

Dans une moindre mesure, les combats de 39-45 ont généré des scénarios d'enfouissements de même nature. Quelques décennies plus tard, entre 1955 et 1975, c'est le remembrement

général du territoire, cette fois, qui viendra gommer le paysage. Les haies sont arrachées, les talus sont arasés et les fossés sont comblés, avec souvent pour résultat une épaisseur de terre supplémentaire sur ces objets dispersés, au potentiel physico-chimique encombrant...

Une combinaison complexe de paramètres et quelques siècles de travail en perspective

Les questions de pollution pyrotechnique et de déminage relèvent d'un champ d'activités pluridimensionnel. L'approche « source, flux, cible », très usitée dans le domaine de l'analyse de risque, permet de résumer la problématique.

La source n'est pas unique ; elle présente un degré d'hétérogénéité exceptionnel par rapport à d'autres domaines de pollution. On note des variations importantes concernant la forme et la taille des objets, la composition et les potentiels physico-chimiques des contenus, le niveau de sensibilité des produits et les dangers associés. L'une des singularités de cette pollution est le caractère souvent « encapsulé » des éléments qui la composent. En raison de la cinétique de dégradation des enveloppes, les scénarios de libération des substances chimiques dans l'environnement s'inscrivent dans des temporalités aléatoires qui s'étendent parfois sur plusieurs siècles.

Le flux est tout aussi incertain ; il est étroitement dépendant de la variabilité des milieux. Il peut être solide, liquide et/ou gazeux comme dans le cas des munitions chimiques. Il peut suivre une cinétique rapide, voire quasi instantanée en cas d'explosion, ou au contraire relever de processus dilués, extrêmement lents si on se réfère à certains scénarios de pollution des sols. S'agissant en réalité d'un mélange de sources, on aura presque systématiquement une superposition de flux différents, potentiels ou réalisés, qui s'exprimeront selon leur propre mode de transit dans l'environnement.

Pour leur part, les cibles se partagent en quatre catégories classiques : les risques d'atteintes humaines, les risques d'atteintes aux biens, les risques économiques, et les risques sur l'environnement. Chacune de ces quatre catégories se décline elle-même en différents niveaux de dommages possibles, avérés ou pressentis...

En France, les activités de neutralisation et d'élimination des objets pyrotechniques sont regroupées sous les vocables de « déminage » ou de « dépollution pyrotechnique ». Ces appellations ne reflètent en réalité que très partiellement la diversité et la complexité d'un champ d'activité très élargi. Il existe une multitude de facteurs combinés et de situations différentes sur le terrain. À chaque cas correspond une ou plusieurs nuisances potentielles. Certaines sont identifiées, cernées et maîtrisées ; d'autres relèvent d'hypothèses ou d'incertitudes qui doivent encore être étudiées. La gestion de la pollution pyrotechnique repose donc sur une approche transversale. Elle nécessite une combinaison de ressources et de moyens variés tels que des capacités d'expertise pour la surveillance de l'évolution des objets pyrotechniques, le recours à des

procédés géophysiques et géomatiques pour la caractérisation des zones de risques, des capacités de sensibilisation et de formation des catégories sociales et socio-professionnelles potentiellement exposées, etc.

Au point de confluence de toutes ces actions se situent les acteurs chargés de l'élimination de la menace. Notre pays a le triste privilège d'avoir supporté des conflits qui furent parmi les plus durs de l'histoire. Il est également dans une position exceptionnelle en matière d'observation, d'analyse, de capitalisation d'expérience et de résilience. Les engins vieillissent, les connaissances scientifiques s'affinent, les exigences environnementales se renforcent, les attentes sociétales évoluent... Les 360 démineurs de la Sécurité civile qui ont en charge la dépollution du territoire national n'ont pas terminé leur guerre (figure 4). Ils s'adaptent en permanence à l'évolution de tous ces paramètres... et savent qu'ils ont encore devant eux plusieurs siècles de travail.



Figure 4 - Août 2020 : l'auteur en intervention sur un chantier dans la commune d'Ammertwiller (68).
© Sécurité civile – Déminage Colmar.

Bibliographie

- J. Akhavan, *The Chemistry of Explosives*, RSC Publishing, 1998.
- J. Calzia, *Les substances explosives et leurs nuisances*, Dunod, 1969.
- CGARM/DGA, *Les armes de la Grande Guerre – Histoire d'une révolution scientifique et industrielle*, Éditions Pierre de Taillac, 2018.
- J.-R. Duguet, *Les Explosifs primaires et les substances d'initiation*, Masson, 1984.
- Inspection Générale des Poudres, Auteur inconnu, *Historique de la fabrication des explosifs pendant la guerre*, non daté.
- M.-A. Fillion, *Évaluation du devenir et comportement environnemental d'une nouvelle formulation explosive insensible PAX48*, *Mémoire de l'Université du Québec*, 2020.
- D. Hubé et al., *Pyrotechniques, Explosifs & Propulseurs. Volet 1 : Historique, usages et comportement environnemental : état des connaissances*, BRGM, 2015 (non publié).
- T.F. Jenkins et al., *Characterization of explosives contamination at military firing ranges*, US Army Corps of Engineers, 2001.
- E. Nodot, *Détection et caractérisation d'objet anthropiques par méthodes géophysiques et en particulier par méthode magnétique*, Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 2014.
- Parc régional de réparation et d'entretien du matériel de Metz, *Récupération et désobusage sur le territoire de la 6^{ème} Région, Cahier des charges spéciales*, 1933.
- A. Passagez, *Les grands problèmes de paix et de guerre. L'azote et le pétrole*, Dechenne, 1924.
- A.M. Prentiss, *Chemicals in war, a treatise on chemical warfare*, McGraw-Hill Book Company Inc., 1937.
- T.L. Davis, *The chemistry of powder and explosives*, Angriff press, 1943.
- P. Taborelli et al., *Typologie et organisation spatiale des « polémo-formes » de la Grande Guerre révélées par l'outil LiDAR et les Plans directeurs. Application à la Champagne et à l'Argonne*, *Revue de géographie historique*, 10-11, 2017.
- D. Voldmann, *Le déminage de la France après 1945*, Odile Jacob, 1998.
- ADEME, *Guide des méthodes géophysiques pour la détection d'objets enfouis sur les sites pollués*, 2017.
- INRAP, *La géophysique : un outil à la disposition des archéologues*, 2017/2021, www.inrap.fr/la-geophysique-un-outil-la-disposition-des-archeologues-13426

Eric SCHNELL,

Ingenieur principal, chef démineur, Direction générale de la Sécurité civile et de la gestion des crises, Groupement d'Intervention du déminage, Centre de déminage de Colmar.

* eric.schnell@interieur.gouv.fr

Trois questions à propos de la pollution pyrotechnique en France

Résumé En raison de son aspect multidimensionnel, la question de la pollution pyrotechnique en France est assez difficile à cerner. Sous forme de questions réponses, cet article présente quelques clés pour mieux comprendre la situation.

Mots-clés Munitions, explosifs, France, pollution, environnement, bilan.

Abstract Three questions about pyrotechnic pollution in France

Due to its multidimensional aspect, the issue of pyrotechnic pollution in France is quite difficult to define. In the form of questions and answers, here are some keys to better understand the situation.

Keywords Ammunition, explosives, France, pollution, environment, assessment.

Combien reste-t-il de munitions à neutraliser ?

Il n'est pas possible de répondre à cette question. Il existe de nombreuses catégories de munitions (grenades, obus, roquettes, bombes, etc.). À chaque catégorie correspond des centaines de modèles. Si on tient compte des époques, des nationalités, des disciplines (infanterie, artillerie, aviation...), ce sont en réalité des milliers d'objets différents qui ont été mis au point, fabriqués en séries et utilisés lors des combats. Les obus de DCA par exemple intègrent parfois des mécanismes d'horlogerie, des bombes allemandes sont munies de dispositifs électriques, etc. Chaque objet combine plusieurs sources de défaillances possibles. Elles peuvent être mécaniques au niveau du système de mise à feu, ou chimiques dans la chaîne pyrotechnique. Les ratés de tirs peuvent aussi résulter de problèmes balistiques ou être la conséquence de facteurs humains... Dans ces conditions il est impossible

d'affecter un taux de dysfonctionnement global à un ensemble d'objets aussi différents les uns des autres. Par défaut, les chiffres de 10 % de munitions défectueuses et de 15 % de munitions abandonnées sans avoir été utilisées sont avancés. Ce ratio de 25 %, soit environ une munition sur quatre finissant délaissée sur le terrain après les conflits, ne semble pas incohérent. Il s'agit toutefois d'une approximation dont il faut user avec beaucoup de prudence.

Il y a ensuite un problème de comptabilité. On ne sait pas très bien combien de munitions ont été produites lors de chaque conflit. Pour les seuls obus de 14-18, on observe des écarts de plus de 60 % entre les principales études de référence (figure 1). On ne sait pas non plus combien de munitions ont été éliminées entre les deux guerres. Des données parcellaires attestent d'activités industrielles soutenues. L'usine Pickett & Fils de Dannes-Camiers (Pas-de-Calais), avec une capacité de destruction de 1 000 tonnes par semaine aurait contribué,



Figure 1 - Fabrication des obus de 75 mm durant la Première Guerre mondiale. © Galica.bnf.fr/Bibliothèque nationale de France.

à elle seule, à l'élimination de près de 110 000 tonnes de munitions au cours des années 1920. À la même époque, la société Clere & Schwander aurait assuré la destruction de 1,5 million d'obus chimiques à Spincourt (Meuse). Malgré ces exemples, il n'existe aucun bilan global de ces activités avant 1945. Et le véritable modèle de dispersion sur le terrain reste inconnu...

La seule vraie certitude est que le différentiel estimé entre ce qui a été abandonné sur place et ce qui a été éliminé à ce jour se chiffre encore par millions d'objets de toutes natures.

Quelles sont les conséquences de la pollution pyrotechnique sur l'environnement ?

Un explosif peut se disperser dans l'environnement de différentes manières.

Si tout se passe normalement, en explosant, l'explosif va brutalement se transformer en gaz et être restitué à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau, d'hydrogène, d'oxydes de carbone, d'oxydes d'azote, etc. (figure 2). Ces gaz seront accompagnés de quelques particules macroscopiques d'explosifs imbrulés. Pour le TNT, cette fraction représente environ 0,1 % de la masse initiale. À proximité du point d'explosion, la pollution de l'air sera immédiate mais localisée. Les sols ne seront atteints que par une quantité limitée de résidus explosifs finement dispersés. C'est le cas le moins impactant pour l'environnement.

Si l'énergie délivrée par l'amorçage n'est pas assez forte, l'explosif peut ne détoner que partiellement. C'est un cas fréquemment observé lors d'explosions accidentelles de stocks de munitions : plusieurs engins explosent ensemble, par sympathie, mais certains d'entre eux ne reçoivent pas assez d'énergie pour se décomposer convenablement. On appelle ces situations des « explosions partielles » ou des « détonations de bas ordre ». Les munitions concernées se disloquent. Une partie de leurs chargements s'éparpille en fragments centimétriques et des morceaux d'explosifs se retrouvent alors directement mélangés à la terre : c'est le scénario de pollution le plus défavorable.

Lorsque qu'une munition n'explose pas après avoir été tirée, ou lorsqu'elle est simplement abandonnée sur le terrain, la mobilité de l'explosif vers l'environnement va dépendre en premier lieu de la vitesse de décomposition de son contenant. Une fois libérées dans le sol, les substances explosives vont évoluer selon des modalités de déplacement et de transformation qui leur sont propres.

Les chlorates ou perchlorates utilisés dans la fabrication de certains explosifs sont réputés très solubles dans l'eau (> 100 g/l). Ils ne sont que très peu retenus ou absorbés par les minéraux et les substances organiques des sols. Libérés de leurs enveloppes, les explosifs chloratés/perchloratés sont potentiellement parmi les plus aptes à migrer par ruissellement vers les cours d'eau et les réserves aquifères. Ils ont souvent été employés pour le chargement de munitions



Figure 2 - Mai 2021 : destruction contrôlée sur la plaine d'Alsace de 400 kg de munitions provenant des deux dernières guerres. © Sécurité civile – Déminage Colmar.

à grandes capacités et à enveloppes minces. Ils étaient stabilisés dans des mélanges à base de vaseline et/ou de paraffine (matrices hydrophobes). Les parois internes de ces engins étaient étanchéifiées avec du brai de houille. Il est donc difficile dans ces conditions de modéliser leurs scénarios de diffusion dans l'environnement et de quantifier leur contribution à la pollution de milieux souvent déjà fortement impactés par d'autres activités, industrielles ou agricoles.

Au cours de la Première Guerre mondiale, les industries françaises ont produit 103 459 tonnes d'explosifs chloratés et perchloratés, soit près de 10 % de la production nationale d'explosifs de guerre.

Le comportement des composés organonitrés tels que le trinitrophénol (mélinite) ou le trinitrotoluène (TNT) sont bien documentés. La plupart d'entre eux se dégradent lentement au fil d'interactions physico-chimiques et microbiologiques complexes et leurs sous-produits persistent longtemps dans le sol (voir tableau). La mélinite en particulier est caractérisée par une solubilité dans l'eau (14 g/l à 20°) et une mobilité plus élevées que celles des autres nitrés aromatiques dans l'environnement. Le TNT pour sa part à une solubilité dans l'eau beaucoup plus faible (101,5 mg/l à 25°) et une persistance plus longue. Soumis à des processus d'adsorption, il est nettement moins mobile dans les sols à forte teneur en matière organique. Globalement, il se décompose en surface sous l'action de la lumière (photolyse), puis dans les sols par réduction chimique et par biodégradation, en fonction des combinaisons de microfaunes et de microflore présentes dans la matière organique. Sous certaines conditions, les plantes aquatiques et terrestres sont en capacité d'absorber et de métaboliser le TNT avec des effets de bioaccumulation relativement limités, principalement concentrés au niveau des systèmes racinaires. Le TNT et ses métabolites atteignent parfois les parties supérieures de certains végétaux.

L'Allemagne a généralisé l'emploi du TNT dans l'artillerie au cours de la Première Guerre mondiale. En 39-45, le Troisième Reich en a produit 800 000 tonnes.

Tableau - Classement de divers explosifs et de substances comburantes au regard de trois caractéristiques physico-chimiques.

ClO₃⁻ : chlorates ; ClO₄⁻ : perchlorates ; DNT : dinitrotoluène ; HMX : octogène ; NC : nitrocellulose ; NG : nitroglycérine ; NO₃⁻ : nitrates ; RDX : hexogène ; TNP : trinitrophénol ; TNT : trinitrotoluène.

Sorption	ClO ₄ ⁻ < TNP < RDX < HMX < TNT < DNT
Solubilité	ClO ₄ ⁻ > ClO ₃ ⁻ > NO ₃ ⁻ > TNP > NG > HMX > RDX > DNT > TNT > NC
Persistance	NC > ClO ₄ ⁻ > ClO ₃ ⁻ > NO ₃ ⁻ > HMX > RDX > TNP > DNT > TNT

Certains types d'explosifs ne sont présents dans les munitions qu'en très faibles quantités. C'est le cas des explosifs primaires situés dans les détonateurs des chaînes de mise à feu. Au cours de la Première Guerre mondiale, les amorçages français faisaient appel au fulminate de mercure ; chacun d'entre eux en contenait deux grammes.

En explosant, le fulminate de mercure se transforme en monoxyde de carbone, en azote, et surtout en mercure élémentaire qui, après avoir été vaporisé dans l'atmosphère à haute température, retombe au sol. Lors de chaque explosion, les obus français ont ainsi théoriquement « vectorisé » 0,705 g de mercure sur le champ de bataille, soit environ un litre de métal pour 20 000 tirs. Dans la réalité, ce mercure est divisé et dispersé en fractions infimes sur des surfaces kilométriques. Il existe un lien entre les combats de 14-18 et le mercure, mais il est difficile à quantifier et à démontrer sur le terrain car les émissions de mercure dans l'environnement ont des origines diverses qui se superposent. Les émissions imputables aux faits de guerres s'additionnent aux autres sources. Des taux anormaux de mercure ont toutefois été relevés et des liens de causalité ont été démontrés sur le terrain, au droit de certains sites industriels d'époque, dans certaines buttes de tirs d'exercice et à proximité d'anciennes installations de démantèlement de munitions.

Ces quelques exemples choisis attestent encore une fois du caractère protéiforme et excessivement complexe de la pollution pyrotechnique. Il est toutefois intéressant de noter qu'une grande majorité des scénarios de diffusions adoptent des cinétiques lentes à très lentes. Il s'agit d'un facteur globalement plutôt favorable à la gestion au long court de la problématique.

Pourquoi ne retire-t-on pas plus vite ces munitions du sol ?

L'élimination des munitions dispersées sur le terrain suppose évidemment qu'elles soient préalablement repérées. Chaque année, une grande partie d'entre elles sont simplement découvertes en surface par des promeneurs ou détérées fortuitement lors de travaux. Elles sont alors éliminées au cas par cas, selon des procédures adaptées au niveau de risque qu'elles représentent. Le service de déminage de la Sécurité civile réalise annuellement plus de 10 000 opérations de ce type sur le territoire national.

Dans d'autres cas, ces munitions sont localisées au cours d'opérations de recherches préventives. Les techniques mises en œuvre pour ces travaux reposent sur des technologies et des procédés géophysiques variés, majoritairement centrés sur la détection du métal.

Certains systèmes comme les détecteurs électromagnétiques sont dits actifs. Une bobine émettrice produit un champ magnétique qui provoque des courants de Foucault dans les métaux rencontrés. Une seconde bobine capte en retour la magnétisation rémanente de ces métaux qui sera convertie en signaux qui pourront être interprétés.

D'autres systèmes, dits passifs, comme les magnétomètres, détectent directement les perturbations que provoquent les métaux ferreux dans le champ magnétique terrestre. Ils sont plus efficaces que les détecteurs actifs pour des recherches en profondeur.

La performance de ces différents systèmes de détection dépend étroitement de six variables : la forme géométrique

de l'objet recherché, sa masse, sa position dans le sol (verticale, horizontale...), la nature de son métal (ferreux, non ferreux...), sa profondeur d'enfouissement, et la nature du sol dans lequel il est enterré (conductivité). À ces variables de base s'additionnent d'autres paramètres tels que la densité de la pollution ferromagnétique, c'est-à-dire le nombre d'anomalies par unité de sol exploré, ou le niveau d'ionisation spécifique de chaque objet lié à son stade de corrosion. On comprend bien, en tenant compte de toutes ces données, qu'il n'est pas possible de garantir un résultat constant en matière de recherche ferromagnétique. Les opérations de détection permettent d'éliminer une grande part des objets recherchés, mais pas tous. En fonction des circonstances, certains échappent aux contrôles.

D'autres technologies électromagnétiques telles que le géoradar (GPR, « ground penetrating radar ») peuvent être déployées en substitution ou en complément des méthodes classiques. La superposition des technologies permet d'améliorer le résultat des recherches, mais on se heurte alors à des problèmes de coûts qui peuvent rapidement devenir prohibitifs.

Sur le terrain, la solution passe par le déploiement des bonnes méthodes et l'utilisation de bons outils aux bons endroits. Pour ce qui concerne les recherches préventives, il est nécessaire d'objectiver les risques. Les analyses historiques et l'exploitation de données cartographiques (type LiDAR par exemple) permettent en général de savoir ce que l'on risque de trouver et sur quels périmètres. En fonction des enjeux et du résultat des analyses de risque, il est ensuite préconisé de bâtir une stratégie modulée autour de trois axes : diligenter des recherches par détecteurs là où elles sont nécessaires, recommander aux différents acteurs économiques des pratiques de moindres risques (méthodes moins dangereuses, outils moins intrusifs, etc.), et sensibiliser tous les opérateurs aux risques que représentent les engins de guerre... Il n'est pas inutile de rappeler, une fois encore, que trois accidents sur quatre sont causés par des imprudences caractérisées, bien après le stade de la découverte.

Les moyens de détection ferromagnétiques n'ont commencé à apparaître véritablement sur le terrain qu'à la toute fin de la Seconde Guerre mondiale. Les travaux de remédiation de l'entre-deux-guerres se sont faits sans eux. Après les armistices, des millions d'hectares impactés ont été rendus à leurs activités premières sans être entièrement dépollués. Au cours de ces dernières décennies, les techniques de recherche et de détection ont fait des progrès très significatifs, mais compte tenu des aspects élargis et multifactoriels de la pollution pyrotechnique en France, il n'existe malheureusement pas de solution immédiate et globale à mettre en face de ce problème. Nous sommes donc contraints, sur un temps long, à une gestion pragmatique et attentive des effets retardés de nos guerres...

Eric SCHNELL,

Ingenieur principal, chef démineur, Direction générale de la Sécurité civile et de la gestion des crises, Groupement d'Intervention du déminage, Centre de déminage de Colmar.

* eric.schnell@interieur.gouv.fr

Management du risque sanitaire : retour d'expérience de la pandémie Covid-19

Résumé Face à la pandémie liée au Covid-19, les pays européens se sont efforcés d'apporter une réponse rapide et cohérente. La société et les autorités ont toutefois été confrontées à une crise de longue durée dont la nature inhabituelle et le caractère ininterrompu ont engendré une multitude de défis nouveaux, mettant en évidence les vulnérabilités des réponses nationales et de la coordination européenne. Deux ans après la déclaration officielle de la pandémie par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), des données et observations consolidées et actualisées permettent de mieux comprendre les conséquences et les défis posés en termes de gestion de crise sanitaire majeure, qualifiée comme urgence de santé publique de portée internationale (USPPI) par l'OMS. Cet article présente une analyse des principaux constats ainsi que les recommandations pour une meilleure gestion des risques au niveau européen.

Mots-clés Covid-19, pandémie, risque sanitaire, gestion de crise, vulnérabilités, coordination européenne.

Abstract Health risk management: feedback from the Covid-19 pandemic

Facing the Covid-19 pandemic, European countries have attempted to respond quickly and consistently. However, society and government were confronted with a long-term crisis whose unusual and unbroken nature created a slew of new challenges, highlighting the vulnerabilities of national responses and European coordination. Two years after the World Health Organization (WHO) declared the pandemic, consolidated and updated data and observations provide a better understanding of the consequences and challenges of managing a major health crisis classified as a public health emergency of international concern (PHEIC) by the WHO. This article analyses the main findings and makes recommendations for better risk management at the European level.

Keywords Covid-19, pandemic, health risk crisis management, vulnerabilities, European coordination.

Les épidémies successives (Ebola en Afrique de l'Ouest entre 2013 et 2016) et des précédentes pandémies de grande ampleur comme la grippe espagnole de 1918, la grippe de Hong Kong en 1968, le SARS en 2003 et la grippe aviaire en 2005, ont constitué autant de signaux d'alerte nous informant sur l'ampleur des répercussions d'un agent infectieux virulent se propageant rapidement.

Le 30 janvier 2020, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) déclarait comme urgence mondiale l'apparition d'une épidémie coronavirus d'un type nouveau responsable d'une pneumonie d'un caractère inhabituel à Wuhan, province chinoise du Hubei. Le 24 février 2020, l'OMS reconnaissait le potentiel de propagation pandémique de ce nouveau virus, le SARS-CoV-2. Le 11 mars 2020, l'OMS déclarait que le Covid-19 était une pandémie [1-2].

La réponse mondiale à la pandémie de Covid-19 et la comparaison avec la gestion de crise en Asie montrent que l'Amérique et les pays européens ont souvent omis de tirer tous les enseignements utiles des avertissements antérieurs. La gestion de crise a également fait l'objet de politiques très variables au sein des États membres européens. Sans prétendre à l'exhaustivité, il est opportun de tenter de dresser les principaux constats de cette crise.

Quels sont les constats majeurs que l'on peut dresser à propos de la gestion du risque sanitaire ?

Cette pandémie singulière et son évolution progressive sont associées à une succession de défis nouveaux, jamais rencontrés auparavant

Il apparaît désormais clairement que cette pandémie d'un type nouveau représente un défi majeur en raison de la nature singulière de sa cause, le coronavirus SARS-CoV-2,

notamment en termes de mode de transmission, de contagiosité, d'apparition et de sévérité des symptômes (*figure 1*) [1-2]. Actuellement, nous sommes en mesure de répondre à un certain nombre de questions sur le virus et les risques associés :

- absence de caractère saisonnier franc ;
 - mode de contamination préférentielle par voie aérienne, impactant principalement les zones à haute densité de population et les grandes villes ;
 - délai moyen de quatre à cinq jours entre la contamination et l'apparition des symptômes : la contagiosité précède l'apparition des symptômes (*figure 1*) ;
 - variabilité des symptômes chez les personnes contaminées, avec une coexistence de contaminations asymptomatiques et symptomatiques de gravité variable, déterminés par l'âge et une série de facteurs de comorbidité bien identifiés (obésité, diabète, hypertension, maladie cardiovasculaire, néoplasique et dysimmunitaire) ;
 - spectre de symptômes prolongés compliquant une infection aiguë appelée pour cette raison « covid long » ou « syndrome post-covid » ;
 - évolution génétique progressive et rapide du virus : cette évolution génétique se traduit par l'émergence rapide de variants aux quatre coins du monde, de sévérité variable, chacun avec une dynamique de transmission propre, se superposant aux autres et se chevauchant dans le temps [3].
- L'intrication de ces facteurs épidémiologiques avec une dynamique pandémique complexe explique que la gestion de crise ait occupé le devant de la scène de manière quasi ininterrompue depuis décembre 2019. Plus de deux ans après la première notification, elle requiert toujours de la part des autorités et de la communauté scientifique et médicale internationale une attention soutenue et des efforts constants

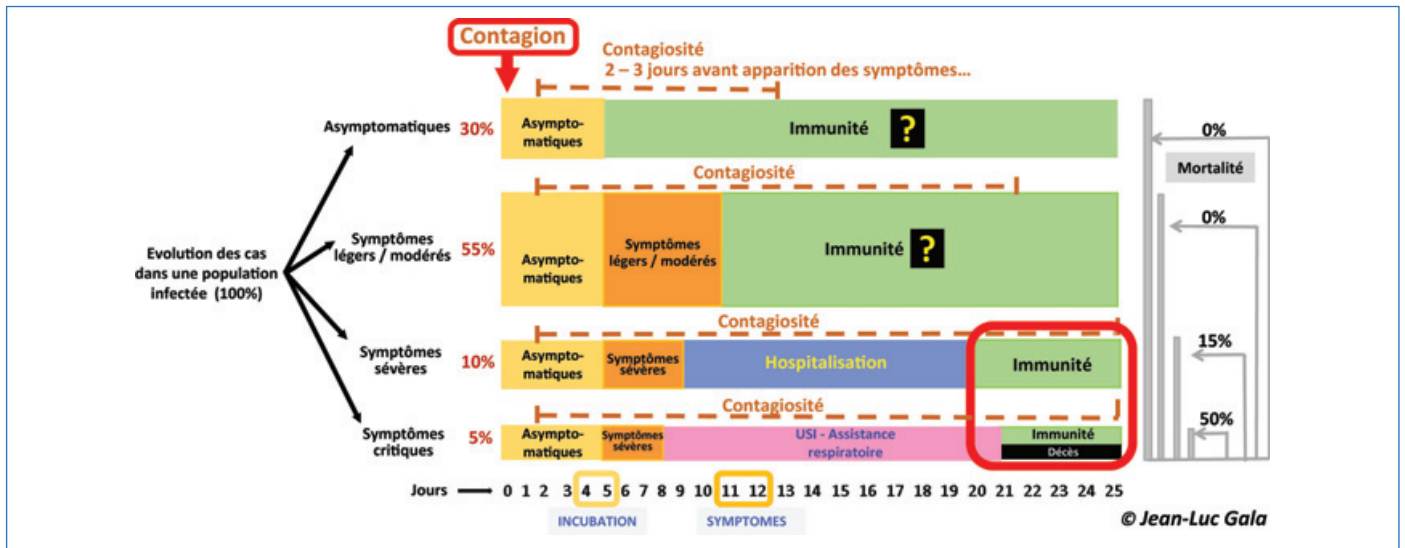


Figure 1 - Distribution des cas asymptomatiques et symptomatiques de sévérité variable, et évolution en termes d'apparition d'une immunité post-infection et mortalité associée aux symptômes.

pour évaluer au mieux les différents impacts et peser le coût-bénéfice des mesures prises souvent dans l'urgence. Tenter de prévoir l'évolution de la pandémie sur la base de modèles prévisionnels est devenu un exercice obligé visant à prévenir ou à endiguer la répétition des vagues pandémiques et à protéger à la fois l'économie et la population. Le projet PANDEM-2 (Pandemic Preparedness and Response – Horizon Europe 2020), qui a débuté le 1^{er} février 2021 et dont la durée est de vingt-quatre mois, a pour objectif d'identifier les principaux indicateurs [4].

Impact socio-économique de la pratique des fermetures, des mesures de confinement successives et de l'imposition du télétravail : opter pour un confinement global ou sélectif ?

En réaction à la progression rapide et incontrôlable de cette pandémie, une des principales mesures adoptées par la plupart des pays a été l'adoption d'une politique temporaire de confinement partiel ou généralisé et l'application généralisée du télétravail dès que cette mesure pouvait être implémentée. L'objectif était de freiner l'expansion des contaminations observées lors des pics épidémiques et de prévenir une saturation totale des hôpitaux et des soins intensifs, avec paralysie complète du système de soins de santé. Les décisions relatives aux mesures de confinement ont systématiquement été motivées par la réapparition de pics successifs, eux-mêmes favorisés par une combinaison de facteurs sociétaux (e.g. périodes associées à la migration de touristes et aux retours de vacances [5], ou à la rentrée des classes [6] et rentrée académique), et climatiques (rafraîchissement des températures en période automnale et hivernale et variation du taux d'humidité de l'air) [7-8]. Aucun de ces facteurs ne pouvait toutefois expliquer, à lui seul, ces récurrences épidémiques. Un facteur majeur de la dynamique pandémique a été l'émergence successive de variants de sévérité variable mais de contagiosité croissante par voie aérienne (figure 2). Depuis le début de cette crise, de nombreux variants se sont succédés. Bien qu'un nombre limité de ceux-ci se soient rapidement propagés à travers toute l'Europe, l'impact lié à leur propagation transfrontalière et transcontinentale rapide a été déterminant dans les décisions de fermeture de secteurs entiers d'activité et de confinement de la population. La succession des variants d'intérêt alpha (B.1.1.7), delta (B.1.617.2) et

omicron (B.1.1.529) ont eu un impact majeur sur le mode de vie des citoyens de l'Union européenne [4]. Les mesures de confinement consécutives aux pics épidémiques récurrents ont sévèrement affecté les secteurs de la culture, de la restauration, du tourisme, des activités récréatives et de l'éducation [9-11].

Les conséquences économiques sur les grandes industries, l'hôtellerie, la construction, les arts et le divertissement ont été majeures. La transformation numérique dans le domaine des ventes avec un développement rapide du commerce en ligne a été bénéfique pour des groupes tel que Amazon, mais fatale pour les petits détaillants qui n'étaient pas résilients face à un événement aussi inattendu [12].

Les effets négatifs sur le bien-être humain ont également été majeurs. Les pertes d'emploi, l'isolement et le manque de perspective associés à la durée de la pandémie, au caractère drastique et répété des mesures prises par les autorités en réponse à la crise, ont entraîné des répercussions psychologiques sévères (angoisse, anxiété, lassitude, burn-out, dépression, suicide), touchant toutes les catégories d'âge [13-15]. Ces effets négatifs ont nourri un sentiment croissant qui a traversé toutes les couches de la société, générant une opposition croissante aux mesures imposées. Les conditions d'obtention du passe sanitaire puis vaccinal comme condition d'accès à diverses activités et la nécessité de répéter les vaccinations à intervalle régulier ont été ressenties comme arbitraires par une frange croissante de la population, engendrant une perte de confiance et d'adhésion aux mesures imposées. Ces ressentiments ont été amplifiés par le débat sur la vaccination obligatoire des enfants au-dessus de six ans et, pour les non-vaccinés, l'obligation de répéter les tests de dépistage comme condition d'accès aux mêmes activités que les vaccinés.

Plusieurs modèles tendent à démontrer que l'adoption de confinements ciblés permet une meilleure protection des citoyens et de l'économie [16-19].

Omniprésence des médias, des experts et des réseaux sociaux : la quantité plutôt que la qualité ?

Cette pandémie a bénéficié d'une couverture médiatique sans précédent. Les développements de cette crise ont été commentés quasiment en temps réel, plusieurs fois par jour par les médias traditionnels (presse écrite, radio et télévision)

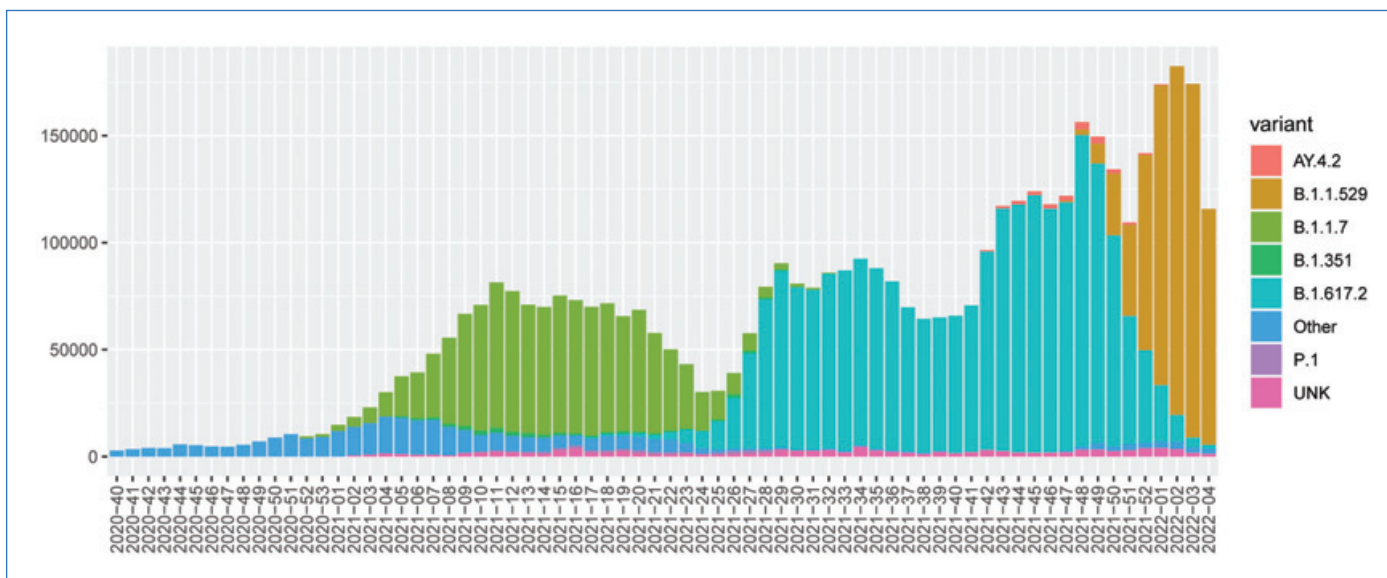


Figure 2 - Évolution de la propagation des variants du SARS-CoV-2 en Europe au cours de la pandémie : succession des variants alpha (B.1.1.7), delta (B.1.617.2) et omicron (B.1.1.529) (source : ECDC [4]).

et les réseaux sociaux [20-22]. L'attention s'est focalisée sur l'interprétation quasi journalière des indicateurs d'évolution de la pandémie, entre autres le nombre de cas par jour, semaine ou mois, le taux de contamination par région ou par pays, le taux de décès, l'occupation des lits d'hospitalisation et de soins intensifs, et les mesures de confinement, les codes couleurs et la fermeture des frontières pour n'en citer que quelques-uns. La recherche d'immédiateté, de sensationnalisme et de scoop privilégiant souvent, sinon systématiquement, les annonces au caractère dramatique, s'est opposée au besoin de recul et de calme nécessaire pour une analyse plus objective et nuancée et une réponse appropriée à l'anxiété des populations.

Le travail de vulgarisation des journalistes exige, paradoxalement, une connaissance approfondie du sujet. Dans un monde médiatique devenu ultra compétitif, les journalistes sont cependant de plus en plus confrontés au besoin de couvrir des domaines très variés et de devenir des généralistes de l'information. Le recours aux « experts » est donc devenu une pratique courante dans cette pandémie, certains témoignant d'un niveau de connaissance ou d'expertise insuffisant pour les sujets traités, et présentant un argumentaire qui ne faisait pas toujours clairement la distinction entre l'expression de leur opinion et celle des données scientifiques disponibles. Reconnaître que l'absence d'évidences scientifiques ne permettait tout simplement pas de donner de réponses précises à certaines questions d'actualité est une attitude qui a souvent fait défaut.

Enfin, notons aussi la mise à l'index croissante de scientifiques exprimant des opinions divergentes par rapport à la ligne défendue par les autorités et leurs propres conseillers. Le principe de la liberté académique a donc été mis à rude épreuve : cette crise en a révélé les limites [23-24].

Ces controverses ont généré une « infodémie », donnant lieu à une suite ininterrompue de débats médiatiques où se discutaient des opinions tranchées et divergentes, diluant les messages utiles d'intérêt général et compliquant le décodage d'une crise mondiale aux aspects tellement complexes. Cette infodémie a contribué à accroître la confusion générale, y compris dans le corps médical, et à alimenter l'anxiété du grand public [20-22].

Crise sanitaire complexe et difficulté d'une communication et d'une gestion de crise rapide, claire, cohérente et compréhensible

Le cyclone médiatique et l'infodémie évoqués ci-dessus ont particulièrement mis en relief les effets délétères d'une communication officielle tardive ou contradictoire. Les faiblesses dans la communication officielle ont largement contribué aux ravages de la désinformation dans le grand public. Les messages utiles et pertinents ont en effet été confrontés à la désinformation et aux thèses complotistes très présentes dans les réseaux sociaux [25-29].

Les analyses et commentaires, souvent déforcés par un manque de recul et l'absence de réponses scientifiques claires aux questions principales, ne pouvaient éviter un manque de clarté et d'objectivité dans l'évaluation des mesures proposées ou imposées. Ceci n'a fait qu'accentuer la perte de confiance d'une partie croissante de la société dans la pertinence des mesures trop souvent adoptées puis modifiées dans l'urgence.

Cette crise a souligné plus que jamais l'importance d'une communication rapide, précise, simple, univoque, pragmatique, inclusive, cohérente et compréhensible de tous les citoyens. Adaptés aux conditions rapidement évolutives de la pandémie, ces critères sont les garants du maintien de la confiance de la société civile dans ses institutions et un élément clé de cohésion sociale et d'adhésion des citoyens aux mesures proposées. Les mesures proposées par les autorités ont difficilement percolé à travers les différentes communautés ethniques des grandes villes, par manque de compréhension des mesures ou en raison de facteurs culturels et sociétaux incompatibles avec les mesures proposées.

Les jeunes générations, nettement moins concernées par les complications médicales du Covid-19, ont elles aussi payé un lourd tribut à cette pandémie en raison de l'impact de la gestion de la crise sur le système éducatif et leur vie sociale.

À l'inverse de la plupart des pays européens où la gestion peut être qualifiée de « politique », certains pays, comme la Suède, ont opté pour une réponse « dirigée par des experts » avec un gestionnaire de crise clairement identifié et assumant les prises de décisions [30]. À défaut d'avoir complètement

protégé ce pays des conséquences néfastes de la pandémie, cette politique a eu le mérite de clarifier le processus décisionnel en le rendant transparent.

Coordination européenne dans la gestion de crise : entre absence et présence

L'organisation des services de santé et de la fourniture des soins médicaux est et reste une compétence nationale. En matière de santé, l'Union européenne n'a donc qu'une « compétence d'appui » aux États membres – art. 6 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, aussi appelé traité de Rome (TFUE) –, et une « compétence partagée » avec les États sur les « enjeux communs de sécurité en matière de santé publique » (art. 4 et 168 TFUE).

L'Union européenne dispose cependant de mécanismes et de compétences permettant une gestion de crise plus coopérative. Rappelons que le partage des ressources telles que les équipements, les infrastructures et le personnel fait partie des mesures prises par la Commission par le biais du mécanisme européen de protection civile (EUCPM) et du rescEU, ainsi que de la réserve européenne de capacités supplémentaires, et du rôle de facilitateur de l'OMS pour la mise en œuvre opérationnelle pratique. Le soutien opérationnel est assuré par les opérations européennes de protection civile et d'aide humanitaire (DG ECHO), tandis que la planification et la supervision de la recherche sont dirigées par la Direction générale de la migration et des affaires intérieures (DG HOME). Dans cette crise sanitaire, l'Union européenne a été active dans les domaines de la recherche sur le Covid-19 (Programme Horizon 2020), la certification et les autorisations de mise sur le marché par l'Agence européenne des médicaments de nouveaux dispositifs de détection et d'identification du virus SARS-CoV-2, et dans l'échange d'informations sur l'évolution de la pandémie via l'Agence européenne de contrôle des maladies (ECDC).

Cependant, il est bon de souligner que la pandémie a révélé les conséquences délétères d'un manque de coordination européenne, notamment dans la politique de gestion des frontières de l'espace Schengen et de la coopération entre pays à l'acmé de la crise pandémique. Au cours de la pandémie de Covid-19, de nombreuses lacunes ont été observées en ce qui concerne la coopération multilatérale en matière de recherche et de partage des informations, de développement et de déploiement des vaccins, et de politique de voyage [31-37]. Les États ont répondu à cette crise de manière autonome, décidant seuls des mesures de confinement en privilégiant l'intérêt personnel à l'intérêt collectif. Dans ce type de crise, les réponses apportées par un pays ont souvent un impact sur les autres pays. Pour obtenir de meilleurs résultats individuellement et collectivement, une coordination entre les pays est préférable.

La science aux avant-postes mais pas toujours avec les réponses adéquates, ni conformes aux règles éthiques

L'impact de la pandémie de Covid-19 sur les études scientifiques (fondamentales, appliquées ou cliniques) et les chercheurs a été majeur. La pandémie a donné lieu à la publication d'une énorme quantité de recherches scientifiques, en phase avec l'impact médiatique du sujet, le besoin de financement et de visibilité des équipes, mais aussi la nécessité de fournir le plus rapidement possible des informations utiles pour la prise de décision et la gestion de crise. Parmi ces publications, on retrouve un nombre substantiel de publications non révisées

par les pairs, mises à disposition en accès libre de manière extrêmement rapide. Elles constituent une littérature abondante, mais sans les filtres et sans les contrôles de qualité assurés par les éditeurs et les évaluateurs indépendants, associés à l'accélération du processus de révision [38].

En ce qui concerne les essais cliniques visant à repositionner des médicaments existants et à identifier ceux qui pourraient avoir une activité anti-Covid cliniquement démontrée [41-43], ils ont le plus souvent été menés au niveau national, s'exposant au risque d'inclusion d'un nombre trop restreint de patients et donc d'une puissance statistique insuffisante. Parfois diffusées trop rapidement, certaines de ces études ont provoqué des débats passionnés, et au final engendré une grande confusion sur les effets réels ou hypothétiques de médicaments anti-Covid. Ceci s'est fait au prix d'efforts fournis en pure perte et d'une perte de temps considérable dans l'identification de traitements efficaces.

L'augmentation du taux de publication a entraîné une augmentation du taux de rétractation. Des études cliniques publiées dans des revues prestigieuses telles que *The Lancet* ou *The New England Journal of Medicine* ont également fait l'objet de critiques virulentes sur le manque de transparence dans la collecte, l'analyse des données et la validité des résultats obtenus, obligeant ces revues et leurs auteurs à se rétracter et à retirer la publication [35-37]. Tirant les leçons du passé récent, la Commission européenne soutient à présent activement la mise en place d'études multicentriques de qualité afin d'identifier plus rapidement les substances actives répondant aux critères de qualité souhaités.

Quant à l'identification d'un traitement efficace anti-Covid, on ne peut que regretter l'absence de mise en place d'études multinationales de grande ampleur, coordonnées au niveau européen. DisCoVeRy, une étude de phase 3, est la seule étude clinique multicentrique transnationale initiée en 2020. La majorité des patients ayant été recrutés en France – dont une institution coordonnait l'étude –, elle a révélé la difficulté d'inclure des patients à l'échelle européenne et illustre bien les nombreux obstacles réglementaires, juridiques, financiers contrariant la conduite efficace des essais cliniques [44-45].

L'Europe, en dépit de sa diversité, doit être capable de résoudre ce type de défi et de répondre unanimement et rapidement aux épidémies/pandémies en établissant une collaboration médicale efficace.

Diversité des sources de données et des indicateurs : manque d'harmonisation, de standardisation et d'échanges des données de monitoring de la pandémie

• *Absence de lien entre les différentes bases de données et les indicateurs d'évolution et de monitoring de la pandémie*

Après deux ans de crise, le nombre d'indicateurs et de bases de données en ligne disponibles est impressionnant. Cependant, les données disponibles sont disparates et peu exploitables. Les organismes européens comme l'ECDC (European Center for Disease Prevention and Control) chargés du suivi et de l'exploitation des données épidémiologiques du Covid-19 donnent un accès public à de nombreuses bases de données mais chacune est spécifique d'un nombre limité d'indicateurs (par exemple la base de données de VOC (« variant of concern ») par État membre européen) et sans lien relationnel possible entre les différentes bases de données. La crise actuelle a mis en évidence la nécessité de développer les analyses de séquençage à haut débit afin d'identifier et de

suivre l'évolution des variants et de leurs caractéristiques génétiques (mutations, délétions, insertions, etc.).

L'amélioration de nos connaissances sur les effets des différents variants en termes de contagiosité, de pathogénicité, de sévérité et d'échappement immunitaire à une protection vaccinale ou secondaire à une infection naturelle, nécessite impérativement le croisement de l'ensemble des données du patient. Actuellement, très peu d'institutions sont capables d'établir un lien entre la base de données des variants préoccupants (VOC) et les bases de données cliniques, biologiques et épidémiologiques, que l'on appelle les « métadonnées contextuelles ». Établir un tel lien nécessite un identifiant unique propre à chaque individu (numéro national, numéro de sécurité social, numéro de code fiscal, selon les pays) et aux résultats de ses analyses, des traitements, de sa vaccination et de son évolution dans le temps. Il est donc techniquement possible de relier entre eux tous les indicateurs d'un patient associés à sa maladie mais cela ne peut se faire qu'à la source, avec le concours des praticiens hospitaliers ou privés, déjà surchargés de travail et épuisés. La contribution des instituts de santé publiques nationaux est également indispensable car ils centralisent les informations transmises par le corps médical ; ils ont dès lors accès à l'ensemble des données. Établir ce type de relation est donc complexe et énergivore.

• *La contribution du projet H2020 PANDEM-2 à la collecte et au partage transfrontalier d'indicateurs de pandémie utile pour la surveillance et la réponse*

Le projet européen PANDEM-2 a pour objectif de renforcer la collecte et le partage des données entre les acteurs de santé œuvrant sur le terrain et les agences nationales de santé publique via un tableau de bord (« dashboard ») afin d'améliorer la surveillance et la gestion des pandémies [3]. Ceci implique une digitalisation, une normalisation et un partage de différents types de données (publiques et nationales) entre pays européens lors de crises sanitaires transfrontalières. L'objectif est de pouvoir disposer d'indicateurs essentiels et de les exploiter au moyen de systèmes de requêtes spécifiques, tout en garantissant la protection des données personnelles.

En réponse aux lacunes évoquées ci-dessus, un des développements spécifiques menés dans PANDEM-2 est d'établir des liens relationnels entre différentes bases de données. Ce travail vise notamment à permettre des analyses détaillées sur l'impact du virus dans les différentes catégories de patients (comorbidité, groupe d'âge), leur statut vaccinal, sur l'efficacité de nouveaux traitements anti-Covid, sur le taux d'hospitalisation et le taux de décès. À défaut de pouvoir l'implémenter sur les bases de données existantes, le projet examine ce type de relation en développant des outils permettant de simuler de manière réaliste cette interaction en exploitant les données réelles disponibles dans les bases de données publiques. Le simulateur crée une connexion entre bases de données indépendantes en utilisant un jeu de données (« test set ») que l'on va enrichir en lui ajoutant une métadonnée contextuelle additionnelle (« training set »). Une des applications de ce simulateur est d'intégrer de manière réaliste les données génétiques des variants aux données cliniques et biologiques anonymisées (figure 3).

Des efforts sont également déployés pour partager les données au niveau international en construisant cette voie analytique intégrative et en la rendant utilisable et à valeur ajoutée pour différentes catégories de parties prenantes dans

l'Union européenne et au-delà dans une approche transfrontalière. Cela nécessite une collaboration étroite avec les institutions de santé publique, les laboratoires et les praticiens de première ligne au niveau national, ainsi qu'une interaction étroite entre les organismes européens concernés tels que le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Ce simulateur permettra de développer les fonctionnalités nécessaires pour l'intégration de ces données dans le tableau de bord global lorsque ces données seront proposées par les instituts de santé publique et par les organisations européennes et internationales.

Problèmes d'interprétation et d'analyse des différents indicateurs

Les chiffres rapportant le « nombre de cas » en fonction du temps tels que commentés par les médias ont souvent alimenté la confusion, surtout pendant la première année de crise et la succession des premières vagues pandémiques. L'absence de nuance et de considération pour les différences pourtant essentielles entre « contamination », établie sur la base d'un test diagnostique positif, et d'« infection », se traduisant par une symptomatologie clinique modérée ou sévère, était notoire.

Le vaste sujet de la diversité des tests développés et utilisés et leur sensibilité et spécificité propres a été largement discuté dans la littérature [46-47]. Il est important de mettre l'accent sur l'interprétation des résultats des tests d'amplification génique du virus SARS-CoV-2, communément appelés « PCR », car la communication du résultat et son interprétation ont aussi donné lieu à de nombreuses controverses liées à une simplification abusive et à une interprétation excessive des résultats [48]. On peut regretter que la communication des résultats PCR se soit trop souvent limitée à une réponse de type « positif » ou « négatif », sans communication de la charge virale, communément appelée « cycle threshold » (Ct). L'absence de données quantitatives a compliqué l'appréciation du risque sanitaire réel posé par les patients positifs. Cette situation a conduit à maintenir inutilement à l'hôpital ou en isolement des individus dont la très faible valeur de Ct indiquait l'absence de risque de transmission du virus. À cette confusion s'ajoute le manque d'appréciation de la nature même d'un résultat PCR, celui-ci amplifiant des morceaux de génome du virus mais n'indiquant pas sa viabilité, donc sa contagiosité éventuelle. Vu leur coût et leur complexité, les analyses de viabilité n'ont pu être intégrées dans les procédures de routine mises en place par les autorités pour l'évaluation et le suivi des cas positifs [49]. En conséquence, les données recueillies au cours de cette pandémie se sont souvent avérées partielles, incomplètes, hétérogènes ou insuffisamment fiables, empêchant toute exploitation détaillée. Et n'oublions pas que l'émergence rapide de nouveaux variants du virus SARS-CoV-2 oblige en permanence à réévaluer la performance des tests de diagnostic Covid-19 [50].

Problèmes logistiques : ruptures des chaînes d'approvisionnement

Tout au long de cette pandémie, les besoins identiques aigus et massifs exprimés au même moment par l'ensemble des pays affectés par la crise ont engendré une pénurie brutale en composants ou matériaux essentiels et en matières premières critiques tels que par exemple : fourniture de masques à la population, réactifs pour tests diagnostiques à large échelle,

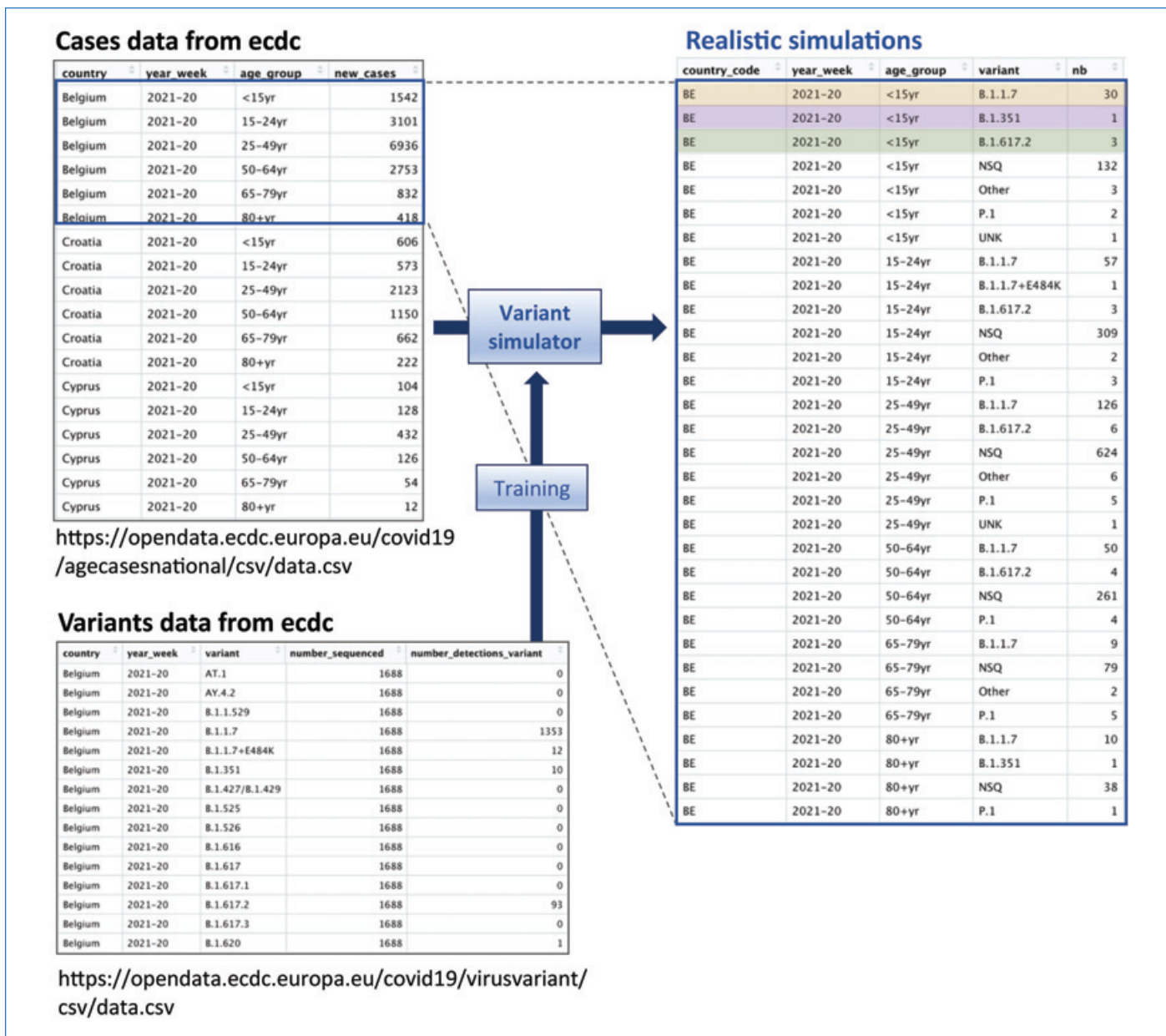


Figure 3 - Le simulateur développé dans PANDEM-2 [3] connecte les données « cas » de l'ECDC aux données « variants » de l'ECDC [4]. Il fonctionne sur des données existantes qui sont agrégées dans les bases de données ; toutefois, le simulateur peut désagréger les données pour simuler les caractéristiques génétiques propres au variant d'un cas individuel.

écouvillons pour prélèvements nasopharyngés, gants et équipements de protection pour le nursing et le personnel médical, respirateurs, et plus récemment réactifs de séquençage pour l'analyse des VOC [51-52]. Les tests PCR étaient pourtant indispensables pour identifier les « clusters de patients infectés » et pour faciliter leur confinement ciblé, une politique de loin préférable aux épisodes répétés de confinement généralisé dont les conséquences économiques et sociétales désastreuses sont de plus en plus apparentes.

Ces difficultés d'approvisionnement en masques et réactifs de laboratoire ont empêché tout screening de masse lors du début de la pandémie et ont ralenti considérablement ou totalement compromis la prise de mesures pourtant essentielles pour une bonne gestion de crise. La perte d'autonomie de production de matériaux et de composants essentiels au sein de l'Union européenne est apparue clairement, mettant la plupart des pays européens en situation de dépendance par rapport aux lignes de production industrielle délocalisées en Asie, notamment en Chine et en Corée du Sud. Cette crise a donc révélé l'insuffisance de production européenne en

constituants essentiels en cas de crise majeure et la nécessité de réduire ce type de dépendances dans un certain nombre de secteurs clés dont fait partie le domaine de la santé. Sont actuellement à l'étude la mise en œuvre de mécanismes de stockage stratégique et de diversification des approvisionnements et une nouvelle politique industrielle d'autonomie stratégique ouverte (ASO), visant à combler les déficits européens dans une série de domaines critiques [53].

Impossibilité de comparer les chiffres de mortalité entre pays

La mortalité est un indicateur essentiel de l'impact d'une pandémie. Selon les estimations les plus récentes du mois de janvier 2022, les chiffres de mortalité de la pandémie sont de l'ordre de 5 à 6 millions de décès depuis fin décembre 2019. On observe des variations importantes entre l'Asie, l'Amérique du Sud, l'Amérique du Nord, l'Inde, l'Afrique et l'Europe (figure 4a), et des variations importantes entre différents pays au sein d'une même région (figure 4b). L'Europe de l'Ouest et les Amériques ont payé jusqu'à maintenant le plus lourd tribut

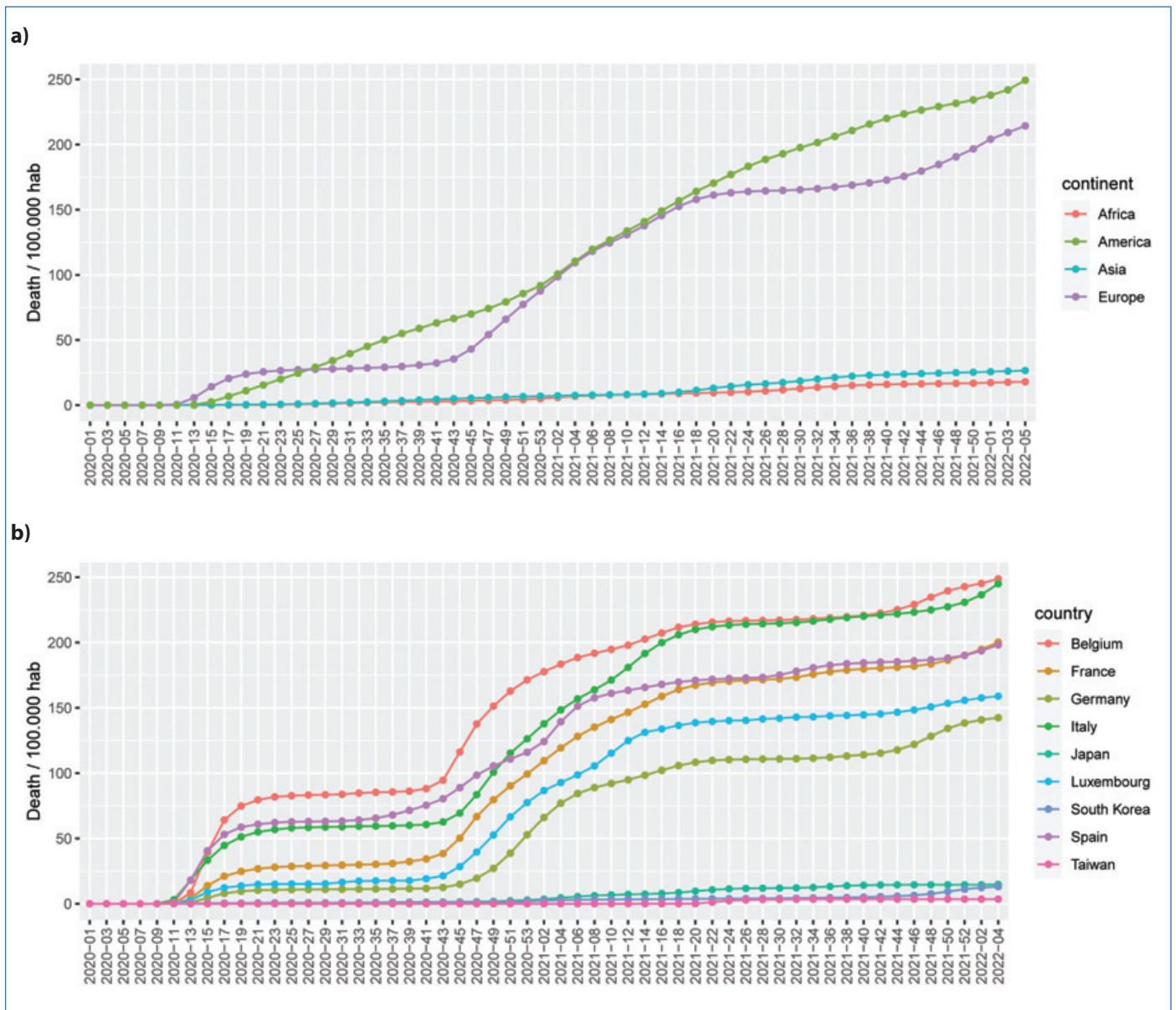


Figure 4 - a) Évolution de la mortalité cumulative (mortalité par 100 000 habitants) par continent pendant la pandémie. Représentation graphique des chiffres de mortalité de quatre continents, de janvier 2020 à février 2022, basée sur les données de ECDC, Stockholm (Suède). b) Évolution de la mortalité cumulative (mortalité par 100 000 habitants) par pays. Représentation graphique des chiffres de mortalité de huit pays européens et trois pays asiatiques, de janvier 2020 à février 2022, basée sur les données de ECDC, Stockholm (Suède). (www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/data-national-14-day-notification-rate-covid-19).

à la pandémie, tandis que l'Asie et l'Afrique enregistrent beaucoup moins de décès par rapport à leur population [54]. Rappelons le caractère très approximatif et non exhaustif des chiffres de mortalité. Ces approximations sont liées au mode de calcul et d'attribution des décès, et à des politiques différentes en matière de dépistage et de déclaration des cas. Les statistiques officielles de nombreux pays excluent les victimes qui n'ont pas été testées positives au coronavirus avant leur décès – un facteur responsable d'une sous-estimation majeure là où les capacités de dépistage sont limitées, et nous savons à quel point elles l'ont été en Europe pendant l'année 2020.

Ajoutons que se concentrer uniquement sur les décès liés au Covid ne fournit aucune information sur les effets indirects de la pandémie attribuables à la perturbation des services de santé et aux changements économiques, sociaux et comportementaux plus larges au sein de la population ; et enfin que la pandémie a rendu plus difficile pour les médecins de traiter d'autres pathologies et a découragé les gens de se rendre

à l'hôpital, ce qui peut avoir indirectement causé une augmentation des décès.

Une limitation de l'accès aux soins liée aux mesures de confinement et à la priorisation des lits Covid dans les institutions hospitalières et les soins intensifs ont entraîné un report de consultations et d'interventions chirurgicales [55]. Cette limitation d'accès aux soins pour les patients non-Covid peut avoir indirectement engendré une augmentation des décès dus à des maladies autres que la Covid-19, notamment chez ceux présentant une pathologie cancéreuse. La sous-estimation de la mortalité liée au Covid en maison de retraite, que ce soit par déficit de recensements des institutions privées de petite taille (un facteur très présent en Angleterre) et l'absence de dépistage dans ces institutions au début de la pandémie, est un autre facteur de biais. En Belgique, la mortalité en maison de repos a vraisemblablement été surestimée en début de pandémie suite à l'inclusion comme décès lié au Covid de tout décès survenu en maison de repos en l'absence de test de confirmation.

L'évaluation de la surmortalité permet de mieux quantifier l'impact de cette pandémie sur la mortalité [56]. Selon l'OMS, la surmortalité directe et indirecte est vraisemblablement deux à trois fois plus élevée que les chiffres de mortalité. Cette évaluation se heurte à l'absence de données comparatives robustes entre continents. Des indicateurs de surmortalité par pays sont toutefois accessibles en ligne pour certains d'entre eux [57-59].

Recours massif au tryptique tests, dépistage et traçage

L'interruption rapide des chaînes de transmission du virus et les progrès technologiques rapides au cours de la pandémie ont entraîné une adaptation progressive de la stratégie de tests, dépistage et traçage. Des tests systématiques et répétés ont été introduits pour détecter les personnes infectées et assurer le suivi de leurs contacts. Au cours de la pandémie, les tests PCR salivaires, moins contraignants pour les individus, ont été proposés, suivis par les autotests diagnostiques basés sur la détection antigénique du virus, ou des anticorps anti-SARS-CoV-2 pour le suivi de l'immunité humorale résiduelle post-infection naturelle ou post-vaccinale. Les développements technologiques se sont rapidement multipliés, proposant une automatisation des tests de détection et de lecture des résultats [46, 60]. De nouveaux tests rapides basés sur la spectroscopie sont actuellement développés pour fournir un diagnostic rapide type « point-of-care », capables de détecter de faibles charges virales dans les échantillons et de permettre un dépistage de masse sur les ARN [61] ou les particules virales de l'échantillon [62].

Des mesures de contrôle préventives des contaminations ont été appliquées par les compagnies aériennes afin d'assurer une meilleure maîtrise du risque de propagation virale via le trafic aérien. Le « passenger locator form » (PLF) à remplir avant l'embarquement et associé à une obligation de test à l'atterrissage est devenu une obligation pour certaines destinations ou lors de retour d'une zone jugée à risque [63-64]. On sait en effet depuis la grippe de Hong Kong que le trafic aérien est un facteur d'amplification important des phénomènes épidémiques et pandémiques. Certains aéroports et des compagnies aériennes ont imposé un programme de tests pour des destinations internationales spécifiques comme le Japon et l'Amérique du Nord. L'expansion de ce modèle nécessite des méthodes de dépistage peu coûteuses, faciles à réaliser, donnant un résultat rapide (quelques minutes) et fiables. Les développements technologiques actuels vont dans ce sens. L'application de ce modèle pourrait donc très prochainement être étendue aux frontières, aux ports et aux grandes gares ferroviaires ayant des liaisons internationales, contribuant ainsi à une meilleure surveillance et à un meilleur contrôle des risques de résurgence du virus.

À cela s'ajoute le développement d'applications à charger sur son téléphone portable [65], destinées à informer les individus de la possibilité d'un contact à haut risque dans leur environnement immédiat. L'implémentation s'est toutefois avérée difficile et n'a pas engendré une adhésion suffisante auprès des populations pour en garantir l'efficacité [66].

Protection individuelle et collective : rapides développements

Des mesures appelées « gestes barrières » ont été rapidement proposées en termes d'hygiène des mains et de distanciation sociale. Initialement controversé, le port du masque s'est généralisé et est devenu une mesure obligatoire lors de tout

rassemblement dans des lieux confinés. Le champ d'application de la mesure a cependant varié au cours du temps, avec une application plus stricte et généralisée en fonction des pics de contamination. Notons toutefois que les autorités ont consacré peu d'attention à l'aspect éducatif du port du masque et à son contrôle. Quel type de masque choisir ? Comment le porter correctement ? Combien de temps ? Comment l'entretenir ? Autant de questions peu ou pas abordées par les autorités.

Les mesures de décontamination des locaux et infrastructures diverses fréquentés par le grand public et les protections en plexiglas ont vu leur généralisation, notamment chez les distributeurs de services, les chaînes de supermarchés, les bouchers et les restaurants. Associés à une bonne ventilation, les purificateurs d'air ont été rapidement adoptés par le secteur HoReCa (hôtellerie, restauration et cafés), les locaux pour activités récréatives (cinémas, salles de sports, piscines) et les institutions culturelles, dans l'espoir d'échapper aux mesures de fermeture associées aux confinements successifs [67-69]. Plus récemment, le monitoring du taux de gaz carbonique au moyen de capteurs de CO₂ a été proposé dans les écoles afin de s'assurer d'une ventilation suffisante [70].

Les recherches actuelles tentent à présent de combler le manque d'évaluation en temps réel de la qualité de l'air et de la présence d'agents pathogènes. Ces instruments de mesure devraient contribuer à une meilleure maîtrise des risques de transmission dans les espaces confinés et permettre une action corrective rapide.

Trop peu d'attention et de moyens pour les soins en première ligne

Au cours de cette crise sanitaire, les autorités ont consacré quasiment toute leur attention à l'impact de la pandémie sur le système hospitalier et les unités de soins intensifs. Ce constat est paradoxal si l'on tient compte des mesures d'économie et du désinvestissement croissant dans le système des soins de santé en Europe ces vingt dernières années.

Cette crise a cependant aussi mis en lumière la nécessité de renforcer et de valoriser la médecine dite de terrain. La contribution des médecins généralistes et des pharmaciens, essentielle dans la gestion d'une crise de cette ampleur, a trop souvent été réduite à sa portion congrue [71-72]. Pourtant, ce secteur largement négligé par les autorités au cours de cette crise est et reste la première et meilleure ligne de défense pour protéger les hôpitaux en traitant les patients à domicile autant que possible, et en évitant ou retardant l'impact du pic épidémique sur les hôpitaux. Ce constat va de pair avec l'identification de traitements efficaces et non toxiques pouvant être administrés en dehors des hôpitaux, ce qui, à l'heure actuelle, reste un besoin non satisfait et est l'objet de nombreuses controverses [73-74].

La production de vaccins anti-Covid en un temps record mais pas disponibles pour tous : qui vacciner ?

Un programme de vaccination efficace à grande échelle est un des déterminants fondamentaux d'une réponse rapide et proportionnée à une maladie épidémique et de l'interruption des chaînes de transmission virale. Ce programme intervient en complément d'une intensification du dépistage et de la recherche des contacts. Dans la crise du coronavirus, le laps de temps pour le développement, la production et la mise en service des vaccins à ARN a été extrêmement court [75]. Ce nouveau type de vaccin a en effet bénéficié des études

précédentes entamées lors de l'épidémie de SARS CoV-1 qui a sévi en 2003. La disparition rapide du SARS avait toutefois empêché la réalisation d'études de population. Ceci a pu être rapidement réalisé en exploitant les acquis technologiques existants et a permis d'accélérer la préparation de vaccin à ARN (Pfizer-BioNTech, Moderna) et ADN (Astra Zeneca, Janssen-Johnson & Johnson). Pour les vaccins à ARN, le recours au gène d'une petite partie de la protéine virale appelée « spike » que l'on pouvait produire synthétiquement de manière très contrôlée et très rapide, et le fait de pouvoir court-circuiter une grande partie du processus de développement et de production des vaccins traditionnels ont considérablement accéléré leur mise à disposition. L'importance des fonds attribués à la recherche vaccinale, la vitesse de circulation du virus dans la population pendant la pandémie et le raccourcissement des délais réglementaires lors des essais cliniques ont permis d'obtenir plus rapidement des résultats d'efficacité, contribuant au délai de mise à disposition extraordinairement court des vaccins anti-Covid.

Cette mise à disposition rapide ne s'est toutefois pas faite sans susciter de nombreux débats dans la société, notamment sur la liberté ou pas de se faire vacciner, sur les effets secondaires à moyen et long termes des nouveaux vaccins à ARN, sur leur efficacité contre les nouveaux variants, sur l'obligation vaccinale des enfants et des jeunes adultes, sachant qu'ils n'en sont pas les premiers bénéficiaires sur le plan sanitaire [76].

Ces débats éthiques et parfois juridiques se sont encore intensifiés avec la mise en place du certificat Covid numérique de l'Union européenne (CST, « Covid safe ticket »), indispensable pour l'accès à certains lieux et activités (musées, restaurants, théâtres...), et donc perçue comme une pression inacceptable à se faire vacciner et vécue par les non-vaccinés comme une discrimination à leur égard [77].

Et l'évolution actuelle de la pandémie pose à présent le problème de la revaccination compte tenu de l'émergence de variants pouvant échapper à la protection immunitaire et de l'atténuation assez rapide de cette protection immunitaire, sans compter une distribution largement inégale des vaccins, avec un déficit notoire de vaccination dans les pays en voie de développement.

Nécessité d'une éducation sanitaire de la société civile

Un autre enseignement de cette crise est la nécessité d'une éducation sanitaire de la société civile. En effet, on constate que ces connaissances de base sur le risque infectieux ont progressivement disparu du fait de l'amélioration constante des conditions sanitaires dans nos sociétés modernes. En revanche, cette éducation, encore très présente dans les pays régulièrement touchés par des crises sanitaires, augmente considérablement leur résilience face à des situations de crise rapidement évolutives. L'éducation à la santé consiste à réapprendre les modes de transmission des agents pathogènes, l'utilité des mesures individuelles de prévention et de protection telles qu'évoquées ci-dessus [78-79]. L'enseignement de ces principes devrait faire partie des nouveaux programmes éducatifs dans les écoles et les universités, où les étudiants constituent sans aucun doute un facteur d'amplification majeur de la transmission virale. Il pourrait également être utile de dispenser ces connaissances de base dans les établissements d'enseignement supérieur dont les participants sont une cible privilégiée du virus compte tenu du dynamisme de leur vie sociale. Il serait également bénéfique de mettre à disposition des modules d'enseignement dans

les quartiers ou les villages et de décentraliser l'application du mode d'enseignement « train the trainer ».

Vers une meilleure gestion des risques

Ces quelques constats témoignent du niveau d'impréparation de notre société occidentale face à ce type de crise majeure, en dépit de crises antérieures attirant l'attention sur les risques de cette impréparation. La gestion de crise du Covid s'est davantage définie comme une approche réactive au niveau national et au coup par coup, plutôt qu'une approche préventive, coordonnée au niveau européen. De nombreux aspects de la gestion de cette crise ont touché aux libertés fondamentales et entraîné des débats éthiques incessants, faisant l'objet d'une abondante littérature qui sort cependant du cadre de cette revue [80-84]. L'impréparation et la faiblesse de l'approche réactive ont contribué à renforcer, dans la population et les professionnels des différents secteurs impactés par les mesures imposées, la perception d'une gestion quelque peu chaotique, menant parfois au rejet de mesures perçues comme « à géométrie variable », et au renforcement des mouvements d'opposition et à la désinformation.

Cette pandémie met en exergue le besoin d'une bonne coordination européenne avec un renforcement de la participation des États membres [85]. L'importance des contrôles transfrontaliers et la difficulté de les implémenter de manière coordonnée sont apparues clairement. La mise en place d'une collaboration harmonisée transnationale avec échange d'indicateurs harmonisés ou standardisés permettant une comparaison de données est apparue comme une nécessité – c'est un des principaux objectifs de PANDEM-2. Dans le futur, il est impératif que les réponses d'urgence à une menace sanitaire aillent au-delà des efforts nationaux et poursuivent activement des approches soutenant la collaboration transfrontalière. Même s'ils ont été trop peu exploités pendant cette crise pandémique, l'Union européenne a mis en place une série de mécanismes et de compétences permettant ce mode de gestion globale. L'objectif est donc de privilégier une gestion plus globale des risques au niveau européen. Il est également nécessaire d'éviter autant que possible les conflits d'objectifs entre la protection de la santé et la protection de la vie économique et sociale. Les recommandations actuelles soulignent toutes la nécessité de mesures flexibles, compréhensibles, adaptées à des situations changeantes et donc proportionnées, mais aussi justes et justifiées sur la base de la science ou de preuves, sans oublier les leçons de l'histoire et l'empathie à l'égard des citoyens [86].

L'auteur remercie Axelle Lorient pour la conception de la figure 3 et Jérôme Ambroise pour la compilation des figures 4a et b exploitées dans le projet PANDEM-2 (Pandemic Preparedness and Response, H2020-SU-SEC-2019, ref 883285). Le matériel présenté et les opinions exprimées ici n'engagent que l'auteur. La Commission européenne n'est pas responsable de l'utilisation qui est faite des informations présentées.

Les références de cet article sont consultables en ligne sur www.lactualitechimique.org (page liée à cet article).

Jean-Luc GALA,

Professeur, M.D., PhD, directeur du Centre de Technologies Moléculaires Appliquées (CTMA), Université catholique de Louvain (Belgique).

* jean-luc.gala@uclouvain.be

Management du risque chimique : Interventions de l'Ineris sur l'incendie de Lubrizol/NL Logistique

Résumé L'incendie qui a eu lieu en septembre 2019 sur le site de Lubrizol/NL Logistique à Rouen a fortement mobilisé les compétences de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) en appui des services de l'État. Après un bref rappel de la chronologie de l'événement, cet article revient sur les interventions de l'Ineris au cours des différentes phases de la gestion de crise, avec un focus sur les enjeux associés à la modélisation de la dispersion des panaches de fumée générés par des accidents industriels de grande ampleur. Les enseignements pour l'Institut et les évolutions, notamment réglementaires, consécutives à cet accident sont finalement exposés.

Mots-clés Lubrizol/NL Logistique, incendie, urgence, dispersion, modélisation, post-accidentel.

Abstract **Management of chemical risk: Ineris' involvement on the Lubrizol/NL Logistique large-scale fire**
The large fire on September 26th 2019 on the Lubrizol/NL Logistique plant sites at Rouen (France) involved the competencies of the National Institute on Industrial Environment and Risks (Ineris) supporting the State services. After a short reminder of the timeline of the event, this article reviews the interventions of Ineris during the different phases of the crisis management, especially on the challenges associated to the modelling of the dispersion of the smoke plumes generated by large-scale industrial accidents. The lessons learnt for the Institute and the evolutions, in particular regulatory ones, following this accident are finally presented.

Keywords Lubrizol/NL Logistique, large-scale fire, emergency, dispersion, modelling, post-accidental.

Le jeudi 26 septembre 2019, à 2 h 40, un départ de feu a lieu dans un périmètre comprenant la zone de stockage extérieur du site de Lubrizol, site Seveso seuil haut, et l'angle de deux bâtiments du site voisin Normandie Logistique, implantés près de Rouen. En moins de deux heures, l'incendie se propage sur plus de 3 hectares, embrase près de 5 250 tonnes de produits chimiques entreposés à l'extérieur et dans deux bâtiments de stockage chez Lubrizol, et implique également 4 550 tonnes de produits sur le site de Normandie Logistique.

Une gestion de crise exceptionnelle pour un accident de grande ampleur

Les secours, arrivés rapidement sur le site de Lubrizol, déploient un important dispositif humain et matériel et parviennent à maîtriser totalement l'incendie vers 13 h et à éteindre les derniers points chauds vers 15 h. L'étendue du panache de fumée visible (environ 22 km de long sur 6 km de large) et les nuisances olfactives causées par l'incendie ont été à l'origine de fortes interrogations de la population environnante sur les effets potentiels sur la santé et l'environnement (figure 1). L'incendie n'a généré aucun décès ni blessé direct [1]. Ainsi l'incendie de Lubrizol/NL Logistique se caractérise :

- par l'ampleur de la quantité et la diversité des produits impliqués dans l'incendie : si l'entreprise Lubrizol avait une connaissance du type de produits, elle n'avait pas la connaissance détaillée des substances impliquées et de leur inventaire en temps réel [2]. De la même manière, chez Normandie Logistique, la nature des produits impliqués n'a été identifiée que bien après ;
- par l'ampleur des distances constatées avec des observations du panache jusqu'aux Pays-Bas [3], des retombées de suies, jusqu'à 100 km, notamment chez des particuliers, conduisant la préfecture de Seine-Maritime à prendre des mesures de

restrictions sanitaires de mise sur le marché de produits laitiers durant 19 jours, et pour le miel, œufs et poissons d'élevage durant 23 jours sur 216 communes [4] ;

- par l'ampleur des moyens déployés par les services de secours pour maîtriser l'incendie : près de 276 pompiers impliqués (de Seine-Maritime, des départements limitrophes et une colonne de la région parisienne), l'intervention nécessitant plusieurs replis devant la violence du feu et une attaque massive à la mousse requérant des moyens en solution moussante et en émulseurs très importants, 46 engins mobilisés, 15 km de tuyaux établis, 3 remorqueurs-pompes et l'utilisation de plus de 20 000 m³ d'eau [4-5] ;

- par la forte attente de la population vis-à-vis des services de la préfecture qui, malgré les communiqués et les conférences de presse quotidiennes, n'ont pas su surmonter la défiance de la population dans les heures et les jours qui ont suivi le sinistre ;

- par le caractère exceptionnel de la gestion post-accidentelle du sinistre avec des enjeux sanitaires et environnementaux forts sur un territoire étendu, ayant mis en œuvre des moyens de prélèvements conséquents sur le terrain ainsi que des outils de modélisation de la dispersion des panaches de fumée dont la combinaison a permis, malgré certaines incertitudes, d'estimer l'exposition des populations et l'impact environnemental du sinistre.

L'Ineris en appui à la gestion de crise

L'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) a mobilisé ses équipes pour apporter son appui en gestion de crise puis au dispositif local post-accident, piloté par la préfecture de Seine-Maritime. L'Institut est ainsi intervenu sur les différentes étapes de la gestion de l'événement, tant lors de la phase d'urgence que lors de la gestion de crise et de la phase post-accidentelle.



Figure 1 - Intervention des services de secours lors de l'incendie de Lubrizol (© SDIS 76).

Dans un premier temps, lors de la phase d'urgence, la Cellule d'appui aux situations d'urgence de l'Institut (CASU, voir encadré 1) est intervenue pour préciser les risques immédiats, thermiques, toxiques ou de suraccident pour les services d'intervention et pour les populations riveraines. Ainsi, dès 6 h ce 26 septembre 2019, la CASU a été sollicitée par le SDIS 76 (Service départemental d'incendie et de secours) pour préciser les risques liés au pentasulfure de phosphore présent sur le site et stocké à proximité du foyer, mais également sur la nature et la toxicité des fumées. Enfin, elle est intervenue sur sollicitation de la DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) pour guider les premiers prélèvements dans l'environnement à partir d'une première simulation de panache réalisée dès le jeudi 26 septembre.

Lors de la phase de gestion de crise, l'Ineris est intervenu en appui de la gestion post-accidentelle, donc au-delà des missions de la CASU. En effet, du fait de l'ampleur de l'événement et de la nature des demandes des autorités, l'Institut s'est mobilisé sur quatre aspects principaux : l'analyse des matières stockées et des sources potentielles d'émissions, la modélisation du panache de fumée, les prélèvements environnementaux et leur analyse.

Encadré 1

La CASU, cellule d'appui aux situations d'urgence

Créée en 2003, la CASU, dont les missions ont été définies dans la circulaire du 15 juillet 2005 co-signée par le ministère en charge de l'Écologie et le ministère de l'Intérieur, met à disposition 24 h/24 et 7 j/7 l'expertise de l'Ineris au profit des pouvoirs publics (préfectures, services de secours, DREAL, etc.) afin de fournir des avis techniques en cas de survenue d'un événement impliquant des substances chimiques.

Analyse des matières stockées et des sources potentielles d'émissions

Une analyse succincte des matières stockées ayant servi d'aliment au feu et des sources potentielles d'émissions sur la base de la liste des matières indiquées comme ayant été détruites lors de l'incendie a été effectuée, dans le cadre de la saisine du 4 octobre 2019 [6].

L'analyse a mis en évidence le fait que le feu a été essentiellement alimenté par une forte base d'hydrocarbures dont le potentiel calorifique était relativement important (apport des huiles minérales notamment et des autres composants oléfiniques). Cette analyse, consolidée par l'examen des fiches de données de sécurité (FDS) des 479 produits stockés, a été faite dès la phase d'urgence en préparation de la phase post-accidentelle, et a confirmé qu'il n'y avait pas de produits halogénés tels que le fluor et le brome, excepté du chlore en faible quantité (0,7 % de la quantité stockée totale) dans l'inventaire.

Toutefois, l'ensemble des paramètres qui caractérisent la complexité d'un incendie de grande ampleur, tels que la dynamique du feu, l'ordre d'implication des matières impliquées dans l'incendie, les gradients de température, la contribution des autres aliments du feu comme les emballages, palettes, installations électriques, ce qui relève des équipements et structures concernées ou encore les agents d'extinction, n'a pas pu être pris en compte dans cette analyse.

En plus de l'évaluation des risques immédiats (potentiel de danger du pentasulfure de phosphore, potentiel de combustion et de décomposition des autres produits stockés), la CASU a été saisie pour évaluer les risques de dispersion d'amiante suite à la ruine des toits en fibrociment amianté des deux bâtiments pris dans l'incendie et pour expertiser les modalités de traitements des fûts encore présents sur le site. Pour appuyer l'avis de la cellule, un expert de l'Ineris s'est rendu sur site le lundi 30 septembre. L'examen des résidus de toiture

sur site et fragments de fibrociment a montré que les toitures n'ont pas été dégradées thermiquement mais mécaniquement avec l'explosion des fûts présents dans le bâtiment et qu'elles ont ensuite été projetées et emportées dans le panache sous forme de morceaux de fibrociment et non de fibre. Les campagnes de prélèvements spécifiques réalisées dans l'environnement de 300 m à 15 km dans la direction du panache confirment que l'incendie n'a pas diffusé de fibres d'amiante dans l'air [7].

Modélisation du panache

Les enjeux liés à la modélisation et à la représentation du panache à différents moments d'une gestion de crise, en situation d'urgence et en situation post-accidentelle, ont amené l'Ineris à employer une gamme de différents outils et expertises.

La CASU a pu réaliser en situation d'urgence des premières modélisations de « transport/dispersion et dépôts » tout d'abord dans le champ proche (moins de 10 km) pour évaluer les potentiels effets létaux et irréversibles à court terme. Le logiciel de modélisation utilisé est basé sur un modèle de dispersion de type intégral permettant d'appréhender de façon simple la répartition des concentrations des composés émis et d'en déduire des distances d'impact maximales qui constituent des premières réponses à l'urgence, sous réserve que celles-ci n'excèdent pas la dizaine de kilomètres [3].

La CASU a aussi utilisé un autre modèle dans le champ intermédiaire pour simuler des panaches afin d'accompagner et anticiper les premières actions de la phase post-accidentelle en cartographiant, en première approche, les zones plus et moins exposées aux concentrations en polluants et aux retombées. Ces modèles simples et rapides de type gaussien sont souvent utilisés pour fournir une analyse préliminaire du panache sur de moyennes distances de la source (1 à 20 km environ). La *figure 2* présente une simulation du panache de l'incendie de Lubrizol/NL Logistique dans les heures qui ont suivi le sinistre, obtenue avec le modèle gaussien « Atmospheric Dispersion Modelling System » (ADMS) [8]. Cet outil permet, à partir d'hypothèses sur la nature des polluants dispersés (traceurs gaz et particules), de représenter des distributions de dépôts ou concentrations exprimés en pourcentage de la valeur maximale simulée.

Face à l'ampleur de l'incendie de Lubrizol, la démarche de caractérisation du panache et de ses impacts potentiels s'est poursuivie. La temporalité différente de la phase post-accidentelle et le type de décisions associées ont amené l'Ineris à mettre en œuvre d'autres outils numériques. Ainsi, afin de répondre aux interrogations des riverains et des autorités des départements et régions voisines de Rouen, l'analyse initiale de l'Institut a été complétée les jours suivant le sinistre par des simulations « grande échelle » à partir d'une version « accident » du modèle de chimie-transport Chimère [9], développé conjointement par l'Ineris, l'Institut Pierre-Simon Laplace, l'École polytechnique et le CNRS afin de cartographier les zones impactées à plus longue distance par les retombées du panache, dans l'objectif de définir le futur plan de surveillance et de limiter la consommation de certains produits dans des zones potentiellement contaminées [3].

En effet, la circulaire du 20 février 2012 relative à la gestion des impacts environnementaux et sanitaires d'événements d'origine technologique en situation post-accidentelle prévoit la mise en place de plans de surveillance environnementale reposant sur « la mise en œuvre des premières actions de

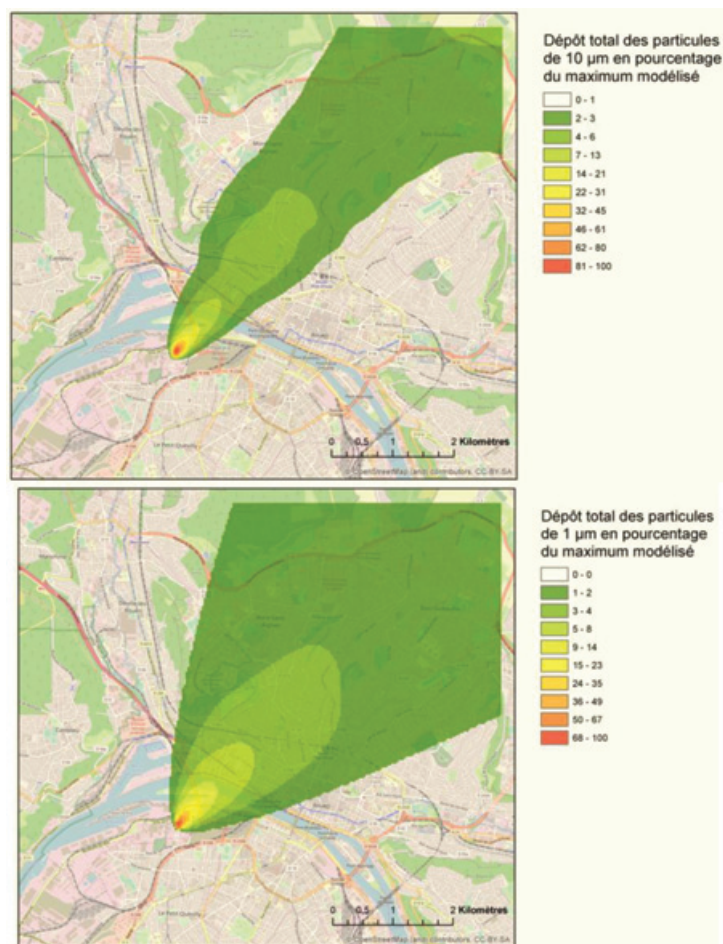


Figure 2 - Cartographie de premier niveau du panache de fumées de l'incendie Lubrizol (26 septembre 2019) simulée avec le modèle « Atmospheric Dispersion Modelling System » (ADMS) dans les heures qui ont suivi l'accident. Distributions de dépôts cumulés sur la période 3 h-23 h (29 septembre 2019) pour les PM₁₀ (10 micromètres) et PM₁ (1 micromètre).

prélèvements, d'analyses et d'expertises nécessaires à la détermination des impacts de l'accident sur l'environnement et sur la santé ». L'Ineris a d'ailleurs, en capitalisant sur son expertise post-accidentelle acquise sur plus de quinze ans [10], publié un *Guide sur la stratégie de prélèvements et d'analyses à réaliser suite à un accident technologique – cas de l'incendie* pour aider à sa mise en œuvre [11].

Les résultats obtenus avec Chimère confirment que les fumées et suies du panache ont bien été transportées sur de longues distances, jusqu'aux Pays-Bas. La *figure 3* illustre ainsi les dépôts totaux des suies, assimilés à des particules de diamètre inférieur à 10 micromètres (PM₁₀) sur la période estimée de l'incendie, d'une douzaine d'heures [3].

Dans ces modélisations de dispersion, en situation accidentelle, autant les données météorologiques constatées ou prévues (pour anticiper les comportements du panache dans le temps) sont fournies aisément en étroite collaboration par Météo France, autant la définition du « terme source » [12] s'avère d'une extrême complexité, notamment dans le cas de Lubrizol où plus de 470 produits étaient stockés. Pour obtenir un panache le plus pertinent possible au regard des incertitudes, la démarche de reconstitution du terme source, utilisée notamment pour l'incendie de Notre-Dame [13], a été appliquée dans une phase d'analyse « à froid » de l'incendie de Lubrizol/NL Logistique. Sur la base d'hypothèses et d'analyses météorologiques affinées, cette méthode a consisté à reconstituer le panache au moyen du modèle eulérien « Fire Dynamics Simulator » (FDS), développé par le

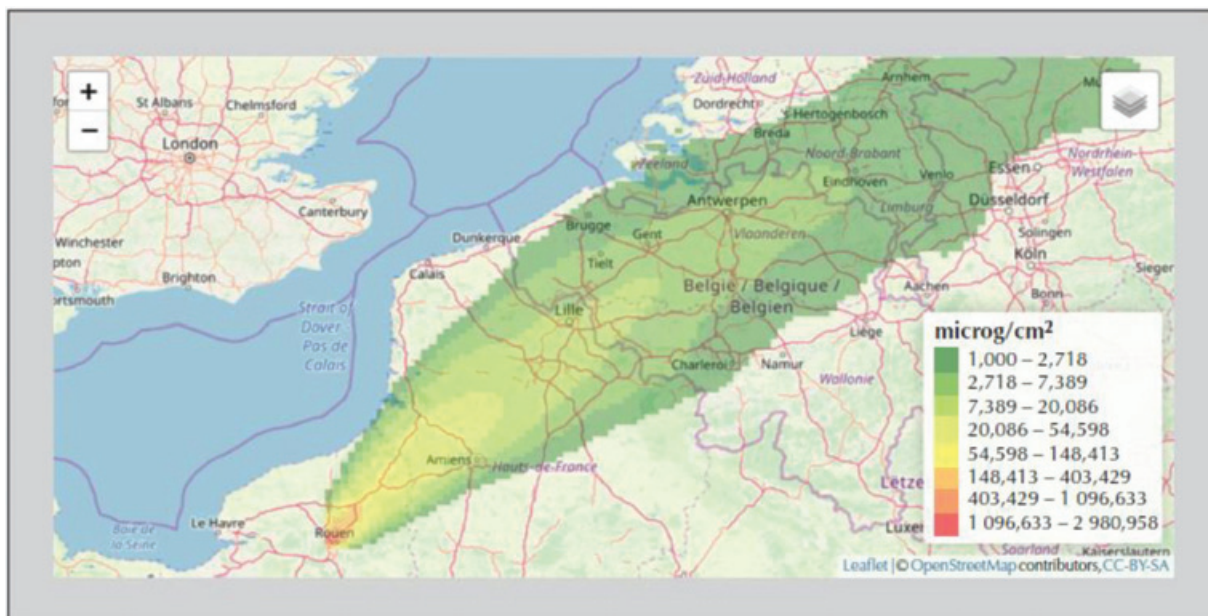


Figure 3 - Simulation de l'étendue du panache issu de l'incendie de Lubrizol par le modèle régional de chimie-transport Chimere. Dépôts totaux de suies assimilées à des particules PM10 pendant la période durant laquelle l'incendie était actif (3 h-15 h, heure locale) [3].

National Institute for Standard and Technology (NIST), puis à réaliser des simulations des dépôts aux échelles régionales et locales avec le modèle lagrangien « Parallel Micro Swift Spray » (PMSS), développé par la société Aria Technologies [3]. Ces travaux avaient notamment pour objectif de mieux qualifier le comportement du panache en prenant mieux en compte la topographie et l'occupation du sol, ainsi qu'une description fine de la météorologie issue des sorties 3D analysées (c'est-à-dire corrigées avec les observations) du modèle AROME de Météo France. La figure 4 illustre les résultats de cette modélisation 3D par le modèle PMSS, permettant d'obtenir une distribution géographique plus précise des impacts cumulés.

Prélèvements environnementaux

Sur la base des modélisations du panache en champ intermédiaire, des prélèvements quasi immédiats d'air et de dépôts destinés à la préparation de la phase post-accidentelle ont pu être réalisés.

Des prélèvements sur différentes matrices (air, sols, végétaux, eau destinée à la consommation humaine, produits agricoles) ont été effectués. De nombreux organismes publics et privés ont été mobilisés dès les premières heures de l'incendie : plusieurs SDIS, Atmo Normandie (association agréée de surveillance de la qualité de l'air), Bureau Veritas (membre du RIPA – Réseau des intervenants en situation post-accidentelle, voir encadré 2).

Encadré 2

Le RIPA, réseau des intervenants en situation post-accidentelle

Le réseau RIPA, piloté par l'Ineris, a été mis en place suite à la circulaire de février 2012 sur la gestion des situations post-accidentelles. Il regroupe sur le territoire plusieurs organismes accrédités COFRAC ou certifiés NF X 31-620 (« Qualité des sols - Évaluation des sols et des sites et dépollution des sols »), capables de prélever et/ou analyser des échantillons dans différents milieux (eau, air, sol, végétaux, suies) en situation post-accidentelle.

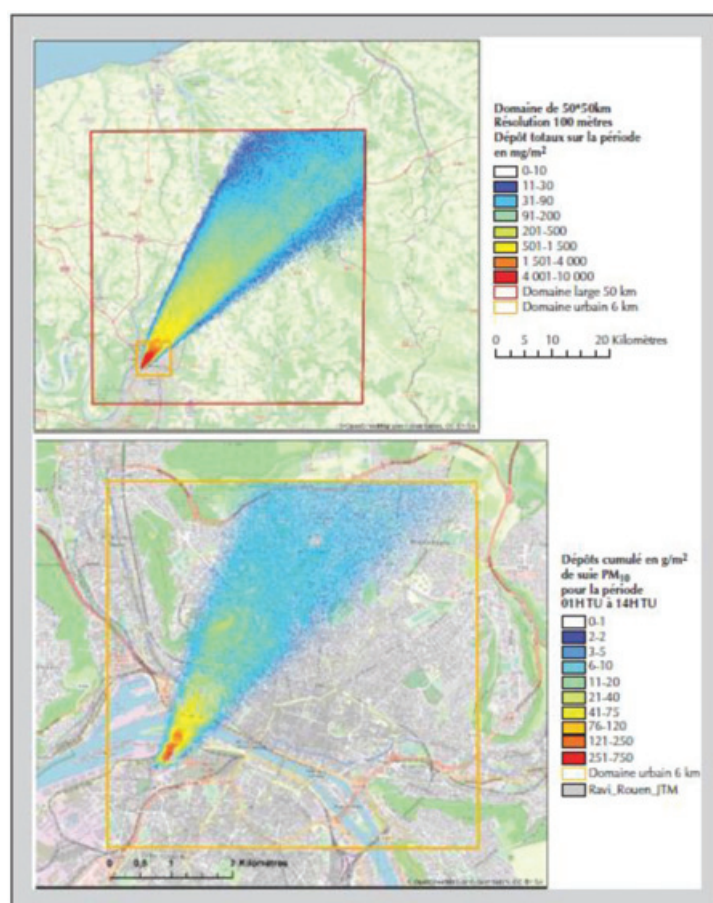


Figure 4 - Modélisations 3D du panache émis par l'incendie de l'usine Lubrizol par le modèle lagrangien « Parallel Micro Swift Spray » (PMSS) à l'échelle régionale (en haut, domaine de 50 km*50 km) et à l'échelle locale (en bas, domaine de 6 km*6 km) [3].

Toutefois, plusieurs difficultés ont été identifiées sur cette phase de prélèvements [14] :

- connaissance inégale des méthodes de prélèvements les plus pertinentes par les intervenants ;
- manque de disponibilité de matériels de prélèvements (lingettes, canisters), notamment dans les premières heures de l'incendie ;

- manque de clarté sur la transition entre la phase d'urgence et la phase post-accidentelle à proprement parler pour l'évaluation des milieux ;
- difficulté de caractérisation du terme source à l'origine des suies et des eaux d'extinction.

Analyses des prélèvements environnementaux

À la demande des pouvoirs publics, l'Ineris a analysé les premiers prélèvements d'air réalisés sur zone et a pu produire des premiers résultats dès le lendemain de l'incendie. L'Institut a poursuivi l'analyse d'une grande partie des échantillons (canisters, sacs Tedlar et lingettes) fournis par les différents organismes publics et privés, pendant les quinze jours suivant l'incendie. Les analyses de dioxines ont été sous-traitées à un laboratoire membre du RIPA [3].

Concernant les études d'interprétation de l'état des milieux (IEM) réalisées en 2019-2020 par les deux exploitants, sur la base de prélèvements des sols et de végétaux potagers, les résultats pour la Seine-Maritime ne montraient aucune anomalie particulière, mis à part quelques traces de plomb et de benzo(a)pyrène, polluants déjà présents dans certains sols de la région du fait de son passé industriel et dont la présence ne peut être imputée à l'incendie. De la même manière, pour les Hauts-de-France, les analyses soulignent diverses pollutions locales et historiques, mais pas d'incompatibilité d'usage liée à l'incendie [4].

Par ailleurs, l'Ineris a récemment réalisé la tierce-expertise de l'évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) associée à l'incendie qui était prescrite aux deux exploitants dans leur arrêté préfectoral respectif du 28 octobre 2020. Cette étude et les résultats de la tierce-expertise ont notamment été présentés lors d'une réunion du Comité de transparence et de dialogue (CTD), mis en place sur deux ans (septembre 2019-décembre 2021) par la préfecture de Seine-Maritime [15].

Toutefois, les limites d'application des prélèvements surfaciques et de quantifications de certains résultats d'analyses amènent à mener une réflexion plus large sur le pilotage et l'organisation (astreintes) du RIPA qui sont à renforcer dans de telles situations.

Évolutions pour renforcer la protection des populations contre les accidents industriels

L'ampleur dans le temps et l'espace prise par l'événement, la forte mobilisation des services de l'État, la perception et les attentes du public quant à ses impacts potentiels sur la santé et l'environnement et sa forte couverture médiatique ont amené l'Assemblée nationale à mettre en place le 9 octobre 2019 une mission d'information [7] et le Sénat à créer, dès le 10 octobre 2019, une commission d'enquête chargée d'évaluer ses conséquences, mais aussi de proposer des pistes d'amélioration de la politique de contrôle des installations classées et de prévention des risques industriels [16]. Le Directeur général de l'Ineris a été auditionné pour cette mission d'information et cette commission d'enquête afin de revenir sur les actions de l'Institut durant l'événement. Une note tirée de ses premiers enseignements [16-17] leur a été également transmise et portait sur cinq points principaux :

- des données forcément incomplètes sur les matières stockées et les polluants issus de la combustion ;
- des valeurs toxicologiques de référence peu comprises ;
- un référentiel à compléter pour interpréter les valeurs dans les milieux ;

- un volet impact sur l'environnement déconnecté de la partie impact sur la santé et sans doute moins structuré ;
- des circuits d'échanges complexes sur la diffusion des données.

Les rapports de l'Assemblée nationale et du Sénat ont permis de mettre en lumière les éléments positifs mais également les dysfonctionnements, les manques et les besoins au niveau local ou national pour améliorer la gestion d'un événement industriel majeur. Les recommandations du Sénat portent ainsi sur [16] :

- la création d'une véritable culture du risque industriel dans la population ;
- l'amélioration de la politique de prévention des risques industriels, notamment concernant la gestion des stocks sur les sites industriels ;
- l'amélioration de la gestion de crise au niveau de la doctrine de communication de l'État (information du public, système d'alerte) ;
- la meilleure coordination entre l'État et les collectivités territoriales ;
- la réflexion sur les moyens de prise en compte de l'intégralité des préjudices subis pour les victimes ;
- un véritable suivi sanitaire des populations touchées par un accident industriel.

Par ailleurs, au niveau du ministère de la Transition écologique, un plan d'actions gouvernemental a été présenté un an après l'incendie de Lubrizol/NL Logistique sur cinq axes dont l'un fixait pour objectif d'« anticiper et faciliter la gestion de crise », exigeant des industriels qu'ils tiennent un inventaire des matières stockées et puissent identifier à l'avance les produits susceptibles d'être émis pendant un incendie. Ainsi, l'analyse de risques, la sélection de scénarios pertinents dans le plan d'opération interne (POI), mais également la prise en compte des conditions opératoires au moment de l'accident (comme la prise en compte des quantités de produits stockés), sont désormais essentiels pour la maîtrise des risques et la gestion des situations d'urgence.

Ce plan d'action s'est traduit au niveau réglementaire par des arrêtés et décrets du 24 septembre 2020, renforçant les obligations des sites Seveso et les prescriptions relatives à la prévention des risques d'incendie et à la limitation de leurs conséquences, dans les stockages de liquides inflammables et combustibles ainsi que dans les entrepôts.

Ainsi, le décret n° 2020-1168 et l'arrêté du 24 septembre 2020 « relatif aux règles applicables aux installations dans lesquelles des substances dangereuses sont présentes dans des quantités telles qu'elles peuvent être à l'origine d'accidents majeurs » modifiant l'arrêté du 26 mai 2014 adaptent et complètent les dispositions communes aux installations classées pour l'environnement (ICPE) susceptibles de créer des accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, en application de la directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite « Seveso 3 ». Ce texte clarifie notamment les objectifs et le contenu des plans d'opération interne et complète le contenu du rapport post-accident. Il indique également que les études de dangers devront mentionner les principaux types de produits de décomposition susceptibles d'être émis en cas d'incendie.

L'arrêté du 24 septembre 2020 relatif au stockage en récipients mobiles de liquides inflammables et l'arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 3 octobre 2010 renforcent les prescriptions relatives au stockage de liquides inflammables et combustibles en récipients mobiles

Encadré 3

Le BEA-RI, bureau d'enquêtes sur les accidents industriels

Rattaché au Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), le BEA-RI a été officialisé par l'arrêté du 9 décembre 2020 portant création et organisation du Bureau d'analyses sur les risques industriels. Les enquêteurs du BEA-RI sont chargés de mobiliser les compétences existantes au sein de l'administration, des établissements publics (Ineris, BRGM, LCPP, etc.) et dans le privé, et de piloter ces enquêtes pour rechercher les causes des accidents, formuler publiquement les recommandations et en assurer le suivi.

et en réservoirs fixes et les prescriptions relatives aux moyens de lutte incendie.

Le décret n° 2020-1169 et l'arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 11 avril 2017 renforcent les prescriptions pour les installations de la filière logistique relevant de la rubrique généraliste 1510 entrepôts couverts et de rubriques spécifiques à certaines matières entreposées. Cet arrêté introduit en particulier la notion de liquides et solides liquéfiables combustibles et impose une gestion des risques en adéquation.

Le décret n° 2020-1168 du 24 septembre 2020 renforce les pouvoirs du préfet pour assurer la sécurité des sites nouvellement soumis à la réglementation ICPE, tandis que l'arrêté du 24 septembre 2020 modifiant l'arrêté ministériel du 4 octobre 2020 introduit, au-delà des dispositions générales sur l'état des matières stockées, des dispositions spécifiques pour les sites Seveso, les sites de tri-transit et regroupement des déchets dangereux, les principaux entrepôts (autorisation et enregistrement) et les sites de stockage de liquides inflammables. La loi n° 2020-1525 du 7 décembre 2020 d'accélération et de simplification de l'action publique a permis également de faire évoluer l'article L514-8 du Code de l'environnement sur le principe de pollueur-payeur, mettant à la charge de l'exploitant les dépenses engagées par l'État dans le cadre de la gestion ou du suivi des impacts et conséquences d'une situation accidentelle.

L'autre action forte consécutive à l'incendie de Lubrizol/NL Logistique et qui a été proposée par la mission d'information de l'Assemblée nationale et la commission d'enquête du Sénat est la création d'un Bureau d'enquêtes sur les accidents industriels (BEA-RI, voir encadré 3) afin de constituer une équipe nationale spécialisée dans les enquêtes techniques d'accidents et indépendante des services chargés de la réglementation et du contrôle afin :

- de professionnaliser cette fonction d'enquêteur technique pour la rendre plus efficace ;
 - de pouvoir consacrer suffisamment de temps et d'énergie à l'enquête technique en étant détaché de la gestion de crise et des conditions de redémarrage ;
 - d'assurer une plus grande crédibilité par son indépendance.
- Le BEA-RI a déjà rendu des conclusions pour une dizaine d'enquêtes et a ouvert plusieurs enquêtes techniques ; l'Ineris a participé et participe actuellement à huit enquêtes.

Améliorer la gestion des risques industriels

L'Ineris a été fortement mobilisé pour l'incendie de grande ampleur de Lubrizol/NL Logistique au profit des services de l'État dans la phase d'urgence, puis dans la phase de gestion post-accidentelle pour l'évaluation des impacts potentiels

pour la santé et l'environnement. L'Institut a pu répondre aux attentes de l'État (identification du terme source, modélisations du panache, analyses d'échantillons d'air et de dépôts surfaciques) en démontrant la qualité de ses expertises, la maturité de ses modèles numériques et sa disponibilité.

La réponse à l'événement a mis en valeur des difficultés qui existaient déjà en situation d'urgence, notamment pour pouvoir apporter dès le début d'un événement des réponses fines, à savoir les incertitudes sur la connaissance du terme source avec la question de la gestion des stocks des sites industriels, ou encore la difficulté dans un incendie d'avoir une pleine connaissance du comportement des produits qui seront soumis au feu (imbrûlés, effet cocktail, etc.). Les modélisations de dispersion de panache effectuées en première approche ont été affinées par la suite et les modélisations réalisées *a posteriori*, nécessitant des temps de mise en œuvre plus importants, ont permis de confirmer et de conforter les avis fournis par l'Ineris. Ainsi, à l'Ineris, des travaux ont débuté en 2020 pour améliorer la connaissance du terme source et améliorer les capacités de modélisations de la dispersion du panache et de l'estimation des retombées des dépôts mises en œuvre en situation d'urgence et post-accidentelle.

Les enseignements de cet événement au niveau national ont permis d'apporter des évolutions réglementaires sur des installations équivalentes et de doter l'État d'un nouvel organe indépendant d'enquêtes, qui contribueront à l'amélioration de la prévention des risques industriels.

[1] G. Carcaly, Lubrizol, une crise hors-norme, *Face au Risque*, 2019, 557, p. 24-27.

[2] G. Marlair, B. Truchot, Anticiper la gestion de crise lors d'incendies de stockage multiproduits. Retour d'expérience du cas Lubrizol/NL Logistique, *Environ. Risque Santé*, 2021, 20, p. 111-117.

[3] L. Rouil et al., Dispersion et impact des panaches de fumées d'incendies industriels : le cas de Lubrizol, *Environ. Risque Santé*, 2021, 20, p. 126-133.

[4] Incendie sur deux sites industriels aux zones d'entreposage mitoyennes, 26 sept. 2019, Rouen et Petit-Quevilly (Seine-Maritime), *Fiche ARIA 54441*, MTES/DGPR/SRT/BARPI, sept. 2020.

[5] R. Dosne, Lubrizol : autopsie de l'incendie, *Face au Risque*, 2019, 557, p. 28-30.

[6] Analyse de l'Ineris suite à la saisine du 2 oct. 2019 sur la gestion post-accidentelle de l'incendie sur l'usine Lubrizol à Rouen, *Ineris-DRC-19-200506-07144A*, 4 oct. 2019.

[7] Rapport d'information déposé en application de l'article 145 du Parlement par la Mission d'information sur l'incendie d'un site industriel à Rouen présenté par M. Christophe Bouillon, Président et M. Damien Adam, Rapporteur, enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 12 fév. 2020.

[8] Cambridge Environmental Research Consultants (CERC), *ADMS 5. Atmospheric Dispersion Modelling System User Guide*, 2016, www.cerc.co.uk/environmental-software/user-guides.html

[9] www.lmd.polytechnique.fr/chimere

[10] P. Hubert, M. Ramel, M. Durif, L'expertise post-accidentelle : les origines au cas du site Lubrizol/NL Logistique, *Environ Risque Santé*, 2021, 20, p. 118-125.

[11] *Guide sur la stratégie de prélèvements et d'analyses à réaliser suite à un accident technologique – cas de l'incendie*, INERIS-DRC-15-152421-05361C, version 2.0, 2015, www.ineris.fr/fr/guide-strategie-prelevements-analyses-realiser-suite-accident-technologique-cas-incendie

[12] On appelle « terme source » l'ensemble des paramètres qui définissent la quantité de polluants rejetée et la dynamique d'émission (hauteur d'émission, flux, température, etc.).

[13] F. Tognet, B. Truchot, Modélisation de la dispersion des particules de plomb du panache de l'incendie de Notre Dame, *Rapport Ineris*, 2019.

[14] Intervention de l'Ineris sur l'incendie de Lubrizol (Rouen) : décryptage, www.ineris.fr

[15] www.seine-maritime.gouv.fr/layout/set/print/Actualites/Incendie-Lubrizol-et-NL-Logistique-du-26-septembre-2019/Travaux-du-Comite-de-transparence-et-de-dialogue/Travaux-du-Comite-de-transparence-et-de-dialogue

[16] Commission d'enquête chargée d'évaluer l'intervention des services de l'État dans la gestion des conséquences environnementales, sanitaires et économiques de l'incendie de l'usine de Lubrizol à Rouen, Rapport de Mme Christine Bonfanti-Dossat, sénateur de Lot-et-Garonne, et Mme Nicole Bonnefoy, sénatrice de la Charente, *Rapport n° 480*, 2019-2020.

[17] www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/intervention-ineris-incendie-lubrizol-rouen-decryptage

Samantha LIM THIÉBOT*, coordinatrice Sécurité globale, **Benjamin TRUCHOT**, chargé de mission Approche intégrée de l'observation à la simulation, **Laurence ROUÏL**, directrice de la Stratégie, de la politique scientifique et de la communication, **Sylvain CHAUMETTE**, responsable de la Cellule d'appui aux situations d'urgence, et **Karen PERRONNET**, ingénieure à l'unité Impact sanitaire et exposition, Ineris.

* samantha.lim@ineris.fr

Les SDIS répondent à la pandémie de Covid-19

Résumé La pandémie de Covid-19 a conduit les Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) à décliner une organisation spécifique pour répondre à la situation. Leur préparation en prévision d'événements d'ampleur a largement favorisé la réaction et l'adaptation de ces services. Ils ont pu s'appuyer sur la doctrine de gestion opérationnelle et de commandement utilisée au quotidien en opération. Pour autant, cette crise a dépassé comme pour nombre d'institutions le cadre habituel de leurs missions. Elle a donc nécessité une forte adaptation pour garantir la continuité des missions tout en préservant la santé des sapeurs-pompier exposés et des personnels administratifs et techniques sollicités en soutien fonctionnel.

Mots-clés Crise, Covid-19, SDIS, gestion opérationnelle et commandement, poste de commandement.

Abstract The SDIS respond to the Covid-19 pandemic

The Covid-19 pandemic led the Fire and Rescue Services to adopt a specific organization. Their preparedness to face major accident helped them to adaptively respond to this crisis. They basically use their command and operational management doctrine. However, as for other institutions, this crisis has gone beyond the usual framework of their missions. A strong adaptation was required to guarantee the continuity of their missions while preserving the workers health.

Keywords Crisis, Covid-19, command and operational management, command post.

Les Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) prennent une large part dans les différentes cellules de crise activées pour faire face à un événement majeur. Présents dans les différents postes de commandement, les sapeurs-pompier déclinent une organisation spécifique inspirée du monde militaire et enseignée à l'École nationale supérieure des officiers de sapeurs-pompier (ENSOSP). Le pilotage de crise de sécurité civile sur un territoire relève d'un directeur de crise, le directeur des opérations de secours (DOS), assisté d'un commandant des opérations de secours (COS). Il s'agit d'un officier de sapeurs-pompier spécifiquement formé selon l'ampleur de l'événement à prendre en compte.

Sur le plan opérationnel, les SDIS sont structurés à partir d'un ensemble de règles de gestion et d'organisation pour répondre aux situations de crise (voir encadré). La crise sanitaire a conduit chaque SDIS à apporter des réponses adaptées aux besoins et aux caractéristiques de leur territoire. Cette pandémie les a obligés à prendre des mesures d'une part pour contribuer à la réponse globale auprès des populations, et d'autre part pour garantir la continuité de leurs activités aussi bien opérationnelles que fonctionnelles. Ils s'inscrivent ainsi dans la gestion d'une crise par subrogation (la pandémie) et dans l'évitement d'une crise intrinsèque à leur structure [1].

Les SDIS face à une opération majeure

Dans le cadre de leur activité opérationnelle et plus spécifiquement dans la prise en compte d'événement d'ampleur, les SDIS peuvent se référer au Guide de doctrine opérationnelle intitulé « Exercice du commandement et conduite des opérations » [2]. Ce référentiel de mai 2019 reprend des éléments réglementaires d'organisation des SDIS, expose la structure du commandement, la préparation opérationnelle et les postures de chef.

Dans le cadre de la prise en compte d'un événement majeur par un SDIS, nous allons cibler le rôle du chef de site à travers ses missions et les outils mis à sa disposition.

Encadré

Situation administrative des SDIS sur le plan opérationnel

Les SDIS ont la particularité de dépendre pour leur partie administrative et financière d'un Conseil d'administration composé de conseillers départementaux et d'élus issus des communes ou communautés de communes. Sur le plan opérationnel, les sapeurs-pompier des SDIS interviennent sous les ordres du préfet. Ils s'organisent en application du Code général des collectivités territoriales (CGCT) et du Code de la sécurité intérieure. Leur réponse opérationnelle s'inscrit dans le cadre d'un règlement, conformément à l'article R.1424-42 du CGCT.

En intervention, le commandement des opérations de secours (COS) est assuré par un sapeur-pompier sous les ordres du directeur des opérations de secours (DOS), en l'occurrence le préfet du département ou le maire de la commune concernée par l'événement. De manière générale, le maire assure la direction des opérations de secours sur le territoire de sa commune tant qu'il dispose des capacités pour faire face à l'événement et tant que la situation se limite à son territoire de compétences. Dans le cas contraire, le préfet prend les fonctions de DOS. Dans ce rôle, précisé dans l'article 12 de la loi Matras [13], le préfet dispose des moyens du plan ORSEC (organisation de la réponse de sécurité civile) départemental lui permettant notamment de :

- recenser et mobiliser les acteurs publics et privés et leurs capacités ;
 - réquisitionner au besoin les personnes physiques et morales et leurs capacités ;
 - fixer et coordonner les objectifs à atteindre ;
- pour répondre aux opérations de secours constituées d'un ensemble d'actions caractérisées par l'urgence qui visent à soustraire les personnes, les animaux, les biens et l'environnement aux effets dommageables des événements redoutés.

Le chef de site est un officier du grade de commandant à colonel qui dispose sur le terrain d'un poste de commandement ou qui intègre un poste de commandement interservices (figure 1). Le poste de commandement sapeur-pompier de niveau site comprend les fonctions suivantes : le renseignement, les moyens, l'action, l'anticipation, les transmissions

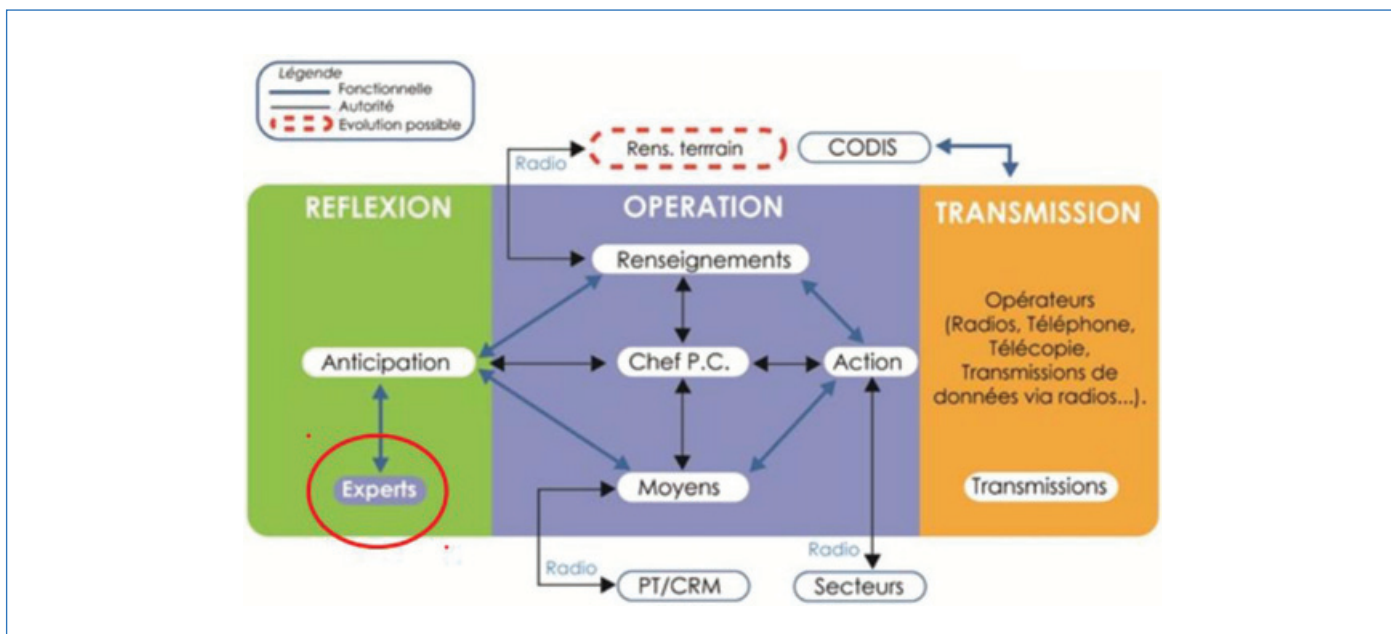


Figure 1 - Organisation possible d'un PC de site (ENSOSP). Ce schéma fait apparaître les interactions indispensables entre acteurs et peut ainsi guider l'organisation spatiale des différentes fonctions dans une cellule de crise.

Signification		Ordre Initial	Questions du raisonnement tactique
S	Situation	Description de la situation initiale	Quoi ? Où ? Par où ?
A	Anticipation	Solution envisageable, évolution possible	Jusqu'où ? Contre quoi ?
O	Objectif	Buts à atteindre	Quoi faire ?
I	Idée de manœuvre	Techniques envisagées pour atteindre l'objectif	Comment faire ?
E	Exécution	Répartition des tâches, sectorisation	Avec quoi ?
L	Logistique	Moyens nécessaires : soutien sanitaire, éclairage...	Quels besoins ?
C	Commandement	Transmission, position du COS, adjoint du COS, mesures de sécurité individuelle et collective...	Quelles règles ?

Tableau I - Ordre initial du chef de site sur la base du SAOIELC (situation, anticipation, objectifs, idées de manœuvre, exécution, logistique et commandement).

et le chef PC. Le rôle de chaque personnel chargé de ces fonctions est clairement défini et fait l'objet d'une formation adaptée.

Le chef PC (officier formé au niveau chef de site) a un rôle de coordinateur des différentes cellules en application des objectifs que le COS aura fixé dans son ordre initial. L'ordre initial, outil central pour le COS, s'appuie sur le raisonnement tactique (tableau I). Cet ordre est reporté sur un tableau au sein du PC afin de garantir le partage des informations à l'ensemble des acteurs.

Les équipes spécialisées en risque chimique, les drones, les ressources fournies par le service d'information géographique en lien avec le service numérique se retrouvent en complément des équipes chargées de l'attaque du sinistre. En complément, le suivi médical des équipes intervenantes est assuré sur le terrain par le Service de santé et de secours médical (SSSM) composé de médecins, infirmiers, ou encore pharmaciens sapeurs-pompier.

La réponse des SDIS face à la pandémie

Les SDIS, en s'appuyant sur les modèles connus au quotidien pour répondre à des événements redoutés d'ampleur, ont décliné une organisation territoriale pour faire face à la pandémie. Contrairement aux événements habituellement gérés, la première difficulté réside dans la durée de cette crise relativement longue (plusieurs années) en opposition aux crises de durée courte (de quelques heures à quelques jours). Les retours d'expérience permettent d'illustrer les différents modes de fonctionnement mis en place face à une situation inédite qui dure dans le temps.

La planification

Dans le cadre de la pandémie, les SDIS vont s'appuyer notamment sur le plan national de prévention et de lutte « pandémie grippale » d'octobre 2011, qui a pour objectif de protéger la population et de préserver le fonctionnement de la société et des activités économiques [3].

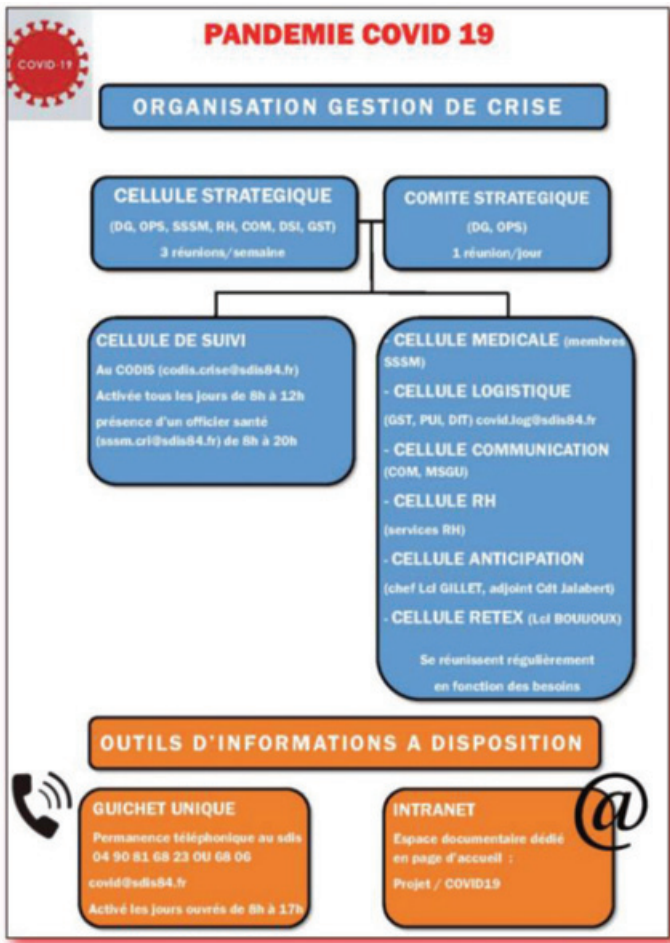


Figure 2 - Organisation gestion de crise, SDIS 84 [6].

Dès le début de la crise, les SDIS ont activé leur Plan de continuité d'activité. Les objectifs définis dans le PCA du SDIS 31, par exemple, fixaient la ligne directrice pour la première phase de la pandémie [4] :

- assurer la protection du personnel contre la contamination ;
- recentrer les actions du SDIS sur les missions prioritaires ;
- assurer la permanence du commandement ;
- optimiser les ressources humaines engagées sur les opérations et en soutien.

L'organisation de la gestion de crise

L'architecture du dispositif de crise est propre à chacune des organisations, comme le montrent les figures 2 et 3. « Il est impossible de fixer a priori une architecture définitive, y compris pour une même organisation [...], les formes à retenir sont naturellement différentes selon la nature et la dynamique de la crise » précise Patrick Lagadec, chercheur spécialiste de la gestion du risque et des crises [5]. Le cadre de base des organisations de crise prévoit une cellule « Direction générale », une cellule « Gestion », une cellule « Communication », une cellule « Appui logistique » [5].

Les SDIS ont décliné des organisations à partir des modèles adaptés aux opérations d'ampleur, complétés par l'intégration des activités fonctionnelles quotidiennes. Nous retrouvons ainsi des cellules administratives

ou ressources humaines en complément des cellules habituelles.

Dans les différents RETEX (retour d'expérience), la place du SSSM (Service de santé et de secours médical) est soulignée. En effet, le SSSM a répondu par la mise en place de ressources spécifiques dans le Centre de traitement des appels avec les officiers de santé. Ces personnels ont permis d'apporter des réponses adaptées aux personnels sur le terrain, d'assurer les recensements des différentes situations Covid dans les structures opérationnelles, et de venir en soutien des opérateurs sur la prise en charge des appels liés à la pandémie en particulier.

Parallèlement, les personnels des pharmacies à usage intérieur et de la logistique médicale se sont largement mobilisés pour faire face aux besoins logistiques en termes d'équipements de protection individuelle (EPI) et de solutions hydro-alcooliques (SHA). En partenariat avec des facultés de pharmacie, ils sont allés jusqu'à produire des SHA dans les périodes de pénurie.

Le SSSM a également joué un rôle essentiel dans le conseil auprès des décideurs des SDIS et dans la communication interne. Mobilisé depuis le premier jour, le SSSM répond encore aujourd'hui à travers des actions de vaccination pour la troisième dose et dans la mise en place de dispositifs de dépistage sur le territoire. En mettant à contribution les associations agréées de sécurité civile, le SSSM a renforcé les coopérations et apporté une réponse adaptée aux nombreuses sollicitations.

Les outils

Chaque structure exploite des indicateurs qui permettent de réajuster les dispositions mises en œuvre et d'évaluer les impacts opérationnels et les ressources disponibles pour y répondre.

La figure 4 permet de suivre l'évolution de l'activité de secours d'urgence aux personnes (SUAP) par rapport à l'évolution du nombre d'interventions pour « suspicion de coronavirus ». Sur la période de confinement (partie grisée et rosée des graphiques), nous pouvons constater que dans ce SDIS, l'activité opérationnelle liée au SUAP s'est maintenue au niveau habituel les trois premières semaines, portée par les interventions liées aux suspicions de coronavirus. Cette activité a ensuite significativement diminué jusqu'à la fin du confinement le 11 mai 2020, en corrélation avec la baisse des interventions « suspicion coronavirus ».

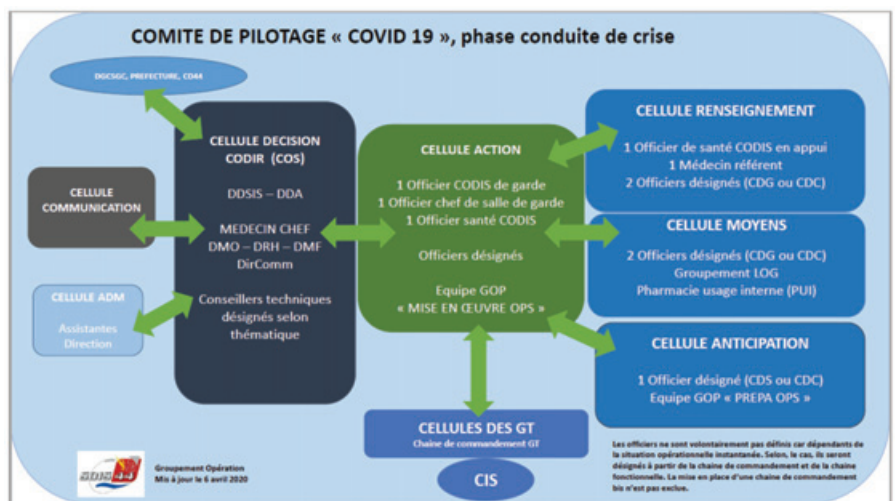


Figure 3 - Schéma d'organisation du SDIS 44.



Figure 4 - Évolution du secours d'urgence aux personnes (SUAP) par rapport aux interventions pour suspicion de Coronavirus.

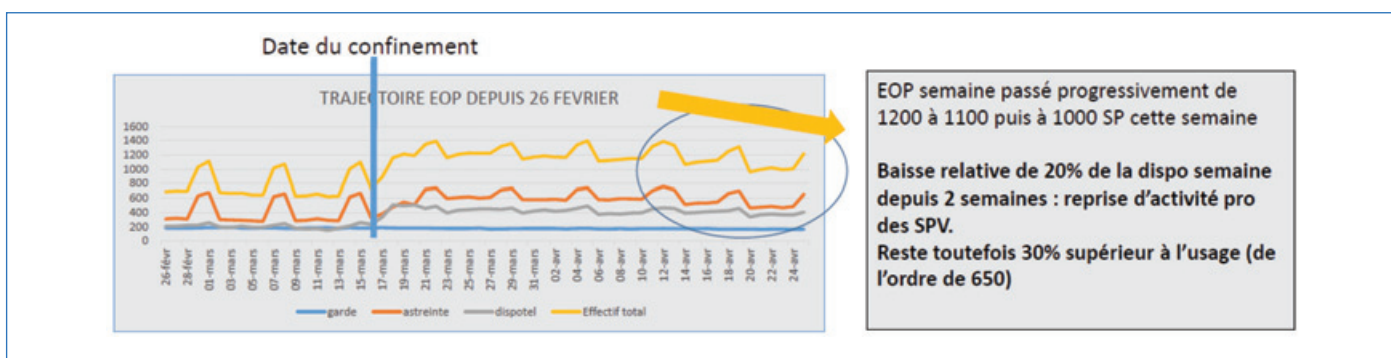


Figure 5 - Évolution des effectifs opérationnels de permanence (EOP) en 2020.

Le confinement mis en place à partir du 16 mars 2020 a entraîné un renforcement des effectifs opérationnels de permanence illustré pour un SDIS sur la figure 5. Cette évolution s'explique par une augmentation de la disponibilité des sapeurs-pompiers volontaires, confinés à leur domicile. Plusieurs SDIS ont également décidé de renforcer significativement l'écoute et la communication. Certains d'entre eux ont mis en place un guichet unique pour tous les sujets liés à la Covid-19 [6] ; d'autres ont positionné un officier de santé au CODIS (Centre opérationnel départemental d'incendie et de secours). À titre d'exemple, le SDIS 31 a créé une cellule d'écoute, de suivi et de soutien des expositions à risque et une plateforme d'orientation, de soutien et d'accompagnement [4].

Des lettres d'informations Covid ont été éditées de manière régulière pour diffuser largement les mesures de prévention, l'état de la situation, les nouvelles mesures applicables, les ressources disponibles en soutien aux personnels...

L'anticipation

Les outils « GOC » (gestion opérationnelle et commandement) ont pu être exploités pour décliner les DTA (différentes tâches à accomplir) dans le domaine fonctionnel. L'exemple illustré dans le tableau II porte sur le travail d'anticipation réalisé au sein d'un service informatique et transmission qui a dû prendre en compte la bascule en télétravail de l'ensemble des personnels éligibles d'un SDIS en l'espace de 24 heures. Dans ce contexte de pandémie, il faut, en premier lieu, garantir le maintien des activités critiques des SDIS, puis rapidement permettre la continuité des activités administratives et techniques. La transposition d'outils opérationnels est simple et adaptée aux problématiques rencontrées en service fonctionnel. Cela permet de prioriser les actions à mener, d'évaluer les moyens et les délais nécessaires pour réaliser les idées de manœuvre et atteindre les objectifs. Les points de

blocage et les ressources manquantes apparaissent grâce à l'exploitation des outils. L'exemple du tableau II illustre la possibilité d'utiliser des outils de gestion opérationnelle et commandement habituellement exploités en intervention dans un cadre fonctionnel.

L'absence de cadre commun : une limite

Le modèle des outils GOC des SDIS permet aux officiers de sapeurs-pompiers de s'appuyer sur un cadre pour conduire leurs opérations. La gestion de la crise sanitaire au sein des SDIS a pu s'appuyer sur cette expérience. En effet, les SDIS ont exploité les règles d'organisation opérationnelle et les outils associés pour assurer la gestion de l'événement.

À l'instar d'autres institutions et services publics, les SDIS ont dû à la fois répondre aux sollicitations de la population dans un contexte sanitaire dégradé et garantir une continuité de service dans la durée en préservant les ressources humaines, en anticipant les besoins logistiques et en renforçant les actions de communication.

Au-delà de l'organisation mise en place par les SDIS, la crise sanitaire a obligé les différents acteurs à travailler en interservices. Des difficultés apparaissent alors, comme l'indique Patrick Lagadec, lorsque chacun des acteurs dispose de plans d'action qui ne sont pas intégrés et qu'ils agissent de façon séparée [7]. Ces difficultés sont renforcées lorsque « les uns et les autres interviennent sur des bases différentes d'information ». Au sein d'une cellule de crise, les acteurs s'appuient sur des modèles propres à leur organisation lorsqu'ils existent. Des travaux récents montrent les limites de l'absence de cadre commun au sein d'une cellule interservices [8]. Des propositions sur la base d'outils développés au sein de l'Armée de terre permettraient d'exploiter un schéma commun lors du pilotage de crise interservices. La méthode d'élaboration de décision opérationnelle (MEDO) pourrait apporter cette référence. Elle

N°	IDEE DE MANGÈVRES RETENUES PAR LE COS/DOS	N° DTA	DTA	Qui ?	Où ?	Quand ?
1	1.1 Renforcer la veille, la prod...	1.1.1	Réaliser le contrôle de production matinal	CAU	Gesvrine	Quotidien
		1.1.2	Identifier les dysfonctionnements et rétablir le fct normal	ISS	Télév	Quotidien
	1.2 Évaluer la capacité du réseau et répondre à sa montée en charge	1.2.1	Surveiller le réseau et sa capacité de réponse	A/R	Télév	Quotidien
		1.2.2	Adapter les besoins avec notre opérateur	A/R	Télév	Permanent
	1.3 Assurer la continuité de la téléphonie mobile	1.3.1	Préparer les GSM pour backup et accessoires	A/R	Gesvrine	Permanent
		1.3.2	Solliciter les prestataires pour récupérer des équipements	A/R ISS	Télév	Mardi 17/03
2	2.1 Identifier les besoins par entité en présentiel et à distance	2.1.1	Recenser les ressources disponibles et les besoins par entités	ADM	Télév	Hebdomadaire
		2.1.2	Tenir à jour l'état des effectifs et des arrêts en lien avec les RH	ADM	Télév	Quotidien
	2.2 Planifier une programmation sur plusieurs mois	2.2.1	Identifier les contraintes et planifier les prochaines semaines	ADM	Télév	
3	3.1 Permettre le télétravail pour le maximum de personnels	3.1.1	Préparer les postes de travail : PC fixes, PC portables	CAU / A/R	Gesvrine	
		3.1.2	Préparer les connectiques et accessoires adaptés			
	3.2 Mettre à disposition les applis	3.2.1	Poursuivre le déploiement des applis critiques en télév	ISS	Gesvrine/ Télév	
	3.3 Accompagner les utilisateurs sur Teams et la connectique des PC fixes	3.3.1	Informers les personnels sur les usages de Teams et sur les règles de bonne conduite en télév	AUN	Gesvrine	
3.4 Dépanner et accompagner les utilisateurs à distance	3.4.1	Prendre en compte les sollicitations au 83, 33	CAU	Gesvrine + Télév		
	3.4.2	Répondre aux mails de sollicitations : installations et dépannages informatiques				

Tableau II - Outil dédié à la fonction « anticipation » exploité dans un service fonctionnel de SDIS.

permet en effet une prise de décision partagée entre différents acteurs aux métiers et aux modes de fonctionnement différents. Cette méthode intègre les contraintes, les forces et faiblesses des acteurs dans l'élaboration des ordres.

Au sein d'une cellule de crise interservices, seuls des objectifs partagés et compréhensibles par chacun des acteurs favorisent la conduite de crise. La méthodologie développée au sein des postes de commandement constitue une base indispensable qui doit se développer et s'adapter ensuite aux caractéristiques du pilotage de crise en interservices. Des outils issus d'autres institutions pourraient utilement compléter le cadre d'action des SDIS lors de participation à une cellule de crise interservices.

La démarche de retour d'expérience et le partage de ces expériences – nationales [4, 6, 9] et internationales [10] – constituent des perspectives de progrès dans la gestion de crises. Le résultat de ces démarches est un révélateur de forces et faiblesses existantes [10]. L'exploitation des rapports [11-12] doit permettre de faire évoluer la gestion de crises dans les domaines de la planification, de la préparation, de l'activation, du pilotage de crise et du retour d'expérience.

[1] C. Poirier, C. Judek, *Étude des dangers menaçant le processus de conduite de crise. Quels apports de l'analyse cindynique ?*, 9^e éd. des Entretiens du risque, 16-17 nov. 2021.

[2] *Guide de doctrine opérationnelle « Exercice du commandement et conduite des opérations »*, DGSCGC/DSP/SDDRH/BDFE/NP, mai 2019.

[3] Plan national de prévention et de lutte « pandémie grippale », Document d'aide à la préparation et à la décision, n° 850/SGDSN/PSE/PSN, oct. 2011.

[4] SDIS 31, *Retour d'expérience Covid-19, PCA-PRA*, juillet 2020.

[5] P. Lagadec, *Cellules de crise, les conditions d'une conduite efficace*, Éditions d'Organisation, 1997.

[6] SDIS 84, *Retour d'expérience Pandémie Covid-19, janvier à juin 2020*, nov. 2020.

[7] P. Lagadec, *La gestion des crises. Outils de réflexion à l'usage des décideurs*, Ediscience international, 1992.

[8] D. Ajagamelle, C. Chislard, F. Jaulin, P. Vasseur, *Continuum de formation en gestion d'événements majeurs, de situations sensibles et de crises*, Mémoire chef de groupement, 2021.

[9] SDIS 73, *Covid-19 : RETEX phase, 12 mars-10 mai 2020*, 2020.

[10] A. Guidat, S. Garandel, C. Denisan, R. Guidat, *Services de santé et de secours, quel RETEX à l'épreuve de la crise Covid ?*, Les Entretiens du risque 2021, Paris, nov. 2021.

[11] R. Lizurey, A. Puccinelli, *Rapport de la mission relative au contrôle qualité de la gestion de crise sanitaire*, 2020.

[12] D. Pittet et al., *Mission indépendante nationale sur l'évaluation de la gestion de la crise Covid-19 et sur l'anticipation des risques pandémiques*, mars 2021.

[13] Loi n° 2021-1520 du 25 novembre 2021 visant à consolider notre modèle de sécurité civile et valoriser le volontariat des sapeurs-pompiers et les sapeurs-pompiers professionnels.

Christophe POIRIER,

Coordinateur de l'équipe NRBCe du SDIS de Loire-Atlantique.

* christophe.poirier@sdis44.fr

Nouveaux principes actifs pharmaceutiques

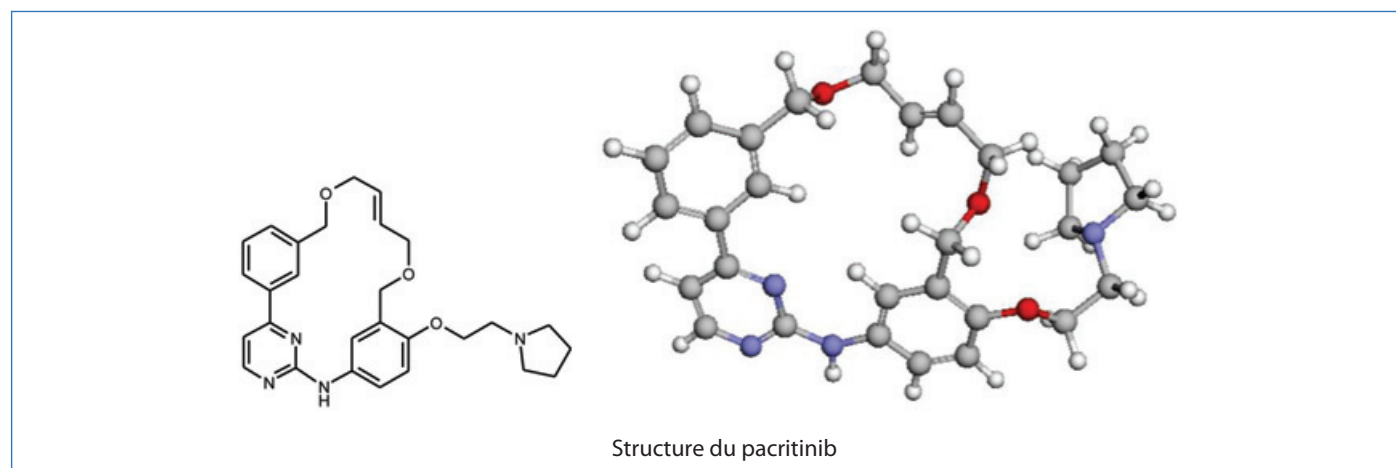
Bilan des approbations FDA en janvier et février 2022

Au cours de cette période, quatre nouvelles molécules de synthèse et trois molécules d'origine biologique ont été approuvées.

Molécules de synthèse

Principe actif	Compagnie	Indication
Daridorexant hydrochloride	Idorsia Pharmaceuticals Ltd	Insomnie
Abrocitinib	Pfizer	Dermatite atopique
Mitapivat sulfate	Agios Pharms Inc.	Anémie hémolytique
Pacritinib	Cti Biopharma Corp.	Splénomégalie myéloïde

Le **pacritinib** est une molécule anticancer développée pour le traitement de la splénomégalie myéloïde, une maladie rare du sang caractérisée par un envahissement de la moelle osseuse par du tissu fibreux collagène conduisant à une transformation myéloïde (transformation du tissu normal lymphoïde en tissu myéloïde) de la rate. Le pacritinib agit par inhibition des Janus kinase 2 (JAK2) et Fms-like tyrosine kinase 3 (FLT3). Cette molécule est constituée d'un macrocycle original formé par une réaction de métathèse cyclisante.



N° CAS : 937272-79-2 ; nomenclature : (16E)-11-[2-(1-pyrrolidinyl)ethoxy]-14,19-dioxa-5,7,26-triazatetracyclo[19.3.1.12.6.18,12]heptacos-1(25),2(27),3,5,8(26),9,11,16,21,23-decaene.
*La représentation 3D provient du site Drugbank⁽¹⁾ (https://go.drugbank.com/structures/small_molecule_drugs/DB11697).

Le **daridorexant** est le troisième médicament agissant sur les récepteurs à orexine mis sur le marché pour le traitement de l'insomnie ; ce mécanisme, différent de celui des benzodiazépines, agit sur le maintien du sommeil.

Molécules d'origine biologique

Principe actif	Type de molécule	Compagnie	Indication
Tebentafusp-tebn	Protéine de fusion	Immunocore Ltd	Mélanome de la choroïde
Faricimab-svoa	Anticorps monoclonal bispécifique	Genentech Inc.	DMLA et rétinopathie diabétique
Sutimlimab-jome	Anticorps monoclonal	Bioverativ Therapeutics Inc.	Maladie des agglutinines froides

Le **faricimab** est le premier anticorps monoclonal bispécifique à cibler à la fois le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (VEGF) et l'inhibiteur de l'angiopoïétine 2 (Ang-2). En ciblant ces voies, le faricimab stabilise les vaisseaux sanguins de la rétine. Il est administré par injection intravitréenne (injection dans l'œil). Un anticorps monoclonal bispécifique est une protéine artificielle qui peut se lier simultanément à deux types différents d'antigène ou à deux épitopes différents sur le même antigène ; les anticorps naturels ne ciblent généralement qu'un seul antigène.

⁽¹⁾ Drugbank est une banque de données sur les principes actifs accessible sur Internet : D.S. Wishart *et al.*, DrugBank 5.0: a major update to the DrugBank database for 2018, *Nucleic Acids Res.*, 2018, 46, p. D1074-D1082, <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1037>

Nouvelles substances actives phytopharmaceutiques

Retraits d'AMM

On enregistre en février (mois du Salon de l'agriculture) le retrait de six insecticides (l'un étant aussi acaricide et fongicide), vingt-sept fongicides, deux herbicides, une substance de croissance et deux adjuvants.

Les substances actives concernées sont l'abamectine et l'huile essentielle d'orange (pour les insecticides), le tébuconazole seul ou associé au prochloraze, le dazomet, l'amisulbrom, le folpel, la fenpropidine, le triticonazole, la trifloxystrobine, le fluopyram (pour les fongicides), la clomazone et la pendiméthaline (pour les herbicides), des esters méthyliques d'acides gras et la lécithine de soja (pour les adjuvants), le 1-décanol (pour la substance de croissance).

En mars, Le *Bulletin* de l'ANSES fait état du retrait de trois fongicides, trois substances de croissance, huit herbicides, deux insecticides et un adjuvant.

Les fongicides sont : l'un à base d'azoxystrobine, un autre à base de famoxadone associée au cymoxanil, et un produit à base de soufre.

Les substances de croissance sont une souche du virus de la mosaïque jaune Zucchini, et deux produits à base de trinéxapac-éthyl.

Les herbicides sont à base de phenmédiaphame, de glyphosate seul ou associé au MCPA et au dichlorprop P 2-éthylhexyl ester, ou au MCPA et au diflufénicanil, de tribénuron-méthyl et de mécoprop-P, deux sont à base d'azimsulfuron.

Les insecticides sont à base d'acrinathrine et de benzoate d'émamectine.

L'adjuvant est un mélange de polymères d'amines grasses et de polysorbate 20.

Nouvelles autorisations

En février, ces AMM concernent quatre herbicides dont trois pour grandes cultures, à base d'amidosulfuron, de thiencarbazone associée au méfenpyr-diéthyl et au mésosulfuron, et de flufénacet associé au diflufénicanil, l'un à base de sels de diméthylammonium de dicamba et de 2,4-D, ayant aussi des propriétés d'engrais et n'étant utilisable qu'en zones non agricoles. Un attractif phéromone par confusion sexuelle est à base de (Z)-9-hexadécenal associé au (Z)-11-hexadécenal et au (Z)-13-octadécenal et est utilisable en grandes cultures. Trois sont des fongicides dont l'un à base d'une souche de *Bacillus subtilis* pour zones non agricoles, l'un exclusivement pour cultures légumières, à base d'oxathiapropiline associé au benthiavalicarbe isopropyl, et un autre à base de méfentriponazole, pour grandes cultures, cultures légumières et cultures porte-graines, tropicales, plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires.

On note deux autorisations de produits pour amateurs : un fongicide-acaricide-insecticide à base d'huile essentielle d'orange, sous forme de microémulsion, utilisable pour toutes cultures autres que grandes cultures, et un fongicide à base de soufre, sous forme de suspension concentrée, pour cultures ornementales.

En mars, deux nouvelles autorisations sont délivrées à deux fongicides à base d'azoxystrobine en suspension concentrée : l'un est utilisable en zone non agricole, l'autre est destiné aux grandes cultures, aux cultures porte-graines, tropicales,

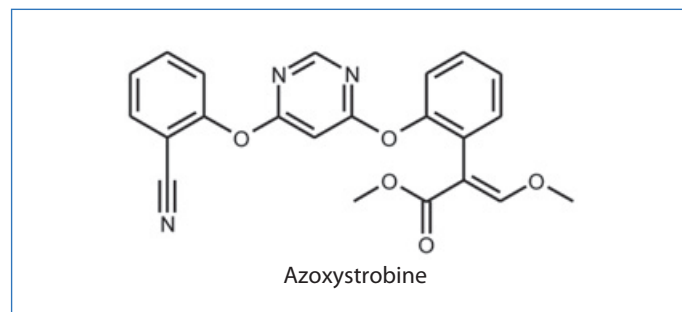
plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires.

Renouvellements et modifications d'AMM

En février, les AMM de trois herbicides sont renouvelées après réapprobation d'une substance active (mésotrione et bentazone). Les AMM de trois herbicides (à base de fluroxypyr-méthyl associé au metsulfuron-méthyl, de flufénacet associé au flufénicanil, et à base de flufénacet associé au flufénicanil et à l'aclofène) sont renouvelées avec modification des conditions d'emploi. Un herbicide à base de mésotrione, et un nématicide-fongicide à base de fluopyram, sont renouvelés avec extension d'usage mineur. Un fongicide à base d'isofétamine est renouvelé avec extension d'usage majeur. Deux rodenticides à base de phosphore de zinc subissent des modifications des conditions d'emploi. Un stimulateur de défenses naturelles à base de cérévisane et un attractif phéromone bénéficient d'une extension d'usage mineur.

En mars, quatre renouvellements se font avec des extensions d'usage majeur. Ils concernent un acaricide insecticide à base de maltodextrine, trois sont des fongicides dont deux sont à base de soufre et l'un à base d'hydrogénocarbonate de potassium. Deux sont des extensions d'usage mineur : l'un est un fongicide à base de fludioxonil, l'autre est un herbicide à base de diflufénicanil associé au cloquintocet-mexil, à l'iodosulfuron-méthylsodium et au florasulame.

Un herbicide à base de diflufénicanil associé à la métribuzine est renouvelé avec retrait d'usage.



Diastéréoisomère (E)-2-[2-[6-(2-cyano phénoxy)pyrimidin-4-yloxy]phényl]-3-méthoxycrylate de méthyle. CAS : 131860-33-8.

L'**azoxystrobine** est un fongicide de la famille des strobilurines, commercialisé par Zeneca Agrochemicals (Syngenta) en 1996. L'Index phytosanitaire 2021 recense dix-neuf spécialités vendues en France (hors associations). Ce fongicide inhibe la respiration mitochondriale en bloquant le transfert d'électrons entre cytochromes. C'est un inhibiteur de la germination des spores et de la croissance mycélienne.

Cette rubrique est coordonnée et alimentée par **Josette FOURNIER**, qui a présidé de 2007 à 2010 le comité d'orientation et de prospective scientifique de l'Observatoire des résidus de pesticides (ORP) (josette.fournier4@orange.fr), et **Jean-Marc PARIS**, ancien directeur de recherche pharmaceutique dans le groupe Rhône-Poulenc et ancien directeur scientifique de la chimie organique et biotechnologies de Rhodia (jeanmarc.paris@free.fr).

Prix et distinctions

L'Académie des technologies a élu 23 nouveaux académiciens

Chaque année, l'Académie des technologies* recrute de nouveaux membres afin d'élargir ou d'approfondir son champ d'expertise, de réflexion et d'action, dans le cadre d'une procédure de sélection exigeante, qui prend en compte l'excellence des personnes et le rayonnement international de leurs travaux.

Parmi les personnalités élues le 9 février dernier figurent :

- **Bernard Bigot**, directeur général d'ITER Organization Normalien, agrégé de sciences physiques, docteur ès sciences, professeur des universités, Bernard Bigot a occupé différentes fonctions de direction à l'École normale supérieure de Lyon, puis au sein du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Haut-commissaire à l'Énergie atomique, puis administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), il a développé les recherches dans les domaines de l'énergie, du calcul intensif, de la microélectronique et de l'imagerie médicale avec transfert de technologie vers l'industrie. Directeur général du programme international de recherche ITER sur la fusion de l'hydrogène depuis 2015, il a contribué à la décision d'implanter en France ce projet qui associe tous les grands pays scientifiques du monde.

- **Florence Lambert**, présidente de Genvia

Diplômée de l'INP Grenoble, Florence Lambert rejoint l'Institut national pour l'énergie solaire (INES), où elle initie la première plateforme relative au stockage stationnaire de l'énergie en Europe. Elle développe ensuite la division transport du CEA-LITEN (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux), axée sur l'intégration des batteries lithium-ion et des piles à combustible. Nommée directrice du LITEN, elle coordonne les activités dans différents domaines technologiques comme le solaire, les batteries, l'hydrogène, la biomasse et les matériaux nanostructurés. Elle prend ensuite en charge la construction des plans nationaux pour le stockage de l'énergie, en lien avec les ministères de l'Économie et de l'Environnement. Depuis mars 2021, elle est présidente de Genvia, spin-off du CEA dans les technologies de l'hydrogène décarboné.

- **Alain Marty**, directeur scientifique chez Carbios

Titulaire d'un doctorat en génie biochimique de l'INSA de Toulouse, Alain Marty a débuté sa carrière d'enseignant-chercheur au sein de l'INSAT et du Laboratoire d'ingénierie des systèmes biologiques et des procédés. Spécialiste en génie enzymatique et bioprocédés, il a toujours eu à cœur de mener des recherches de haut niveau ayant un réel impact socio-économique. En 2011, son équipe collabore avec Carbios lors du projet Thanaplast et il prend en 2015 la direction scientifique de la société. Il est également co-directeur du Laboratoire PopLab, laboratoire mixte Carbios/Toulouse Biotechnology Institute, dédié à trouver des solutions biologiques à la fin de vie des plastiques.

- **Marie-Noëlle Semeria**, directrice de la R&D de TotalEnergies Docteur en physique, ancienne auditrice de l'IHES, Marie-

Noëlle Semeria débute sa carrière à Sagem, puis elle intègre la startup PixTech. Après dix ans dans l'industrie, elle rejoint le CEA où elle exerce différents postes à responsabilité en microélectronique au Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information), puis est directrice scientifique de la Direction de la recherche technologique du CEA. Elle prend la direction du Leti en 2014 où elle porte en particulier le développement à l'international à travers des partenariats entre les grandes entreprises et les grandes universités technologiques du semiconducteur et du numérique. Elle crée un concours interne pour la création de startups. Cette même année, elle est élue présidente de l'Association des instituts Carnot. Elle est directrice de la R&D de TotalEnergies depuis novembre 2017, où elle pilote la stratégie de recherche et d'innovation et sa mise en œuvre au sein du groupe.

*L'Académie des technologies est un établissement public placé sous la tutelle du ministre chargé de la Recherche. Sa mission est de conduire des réflexions, formuler des propositions et émettre des avis sur les questions relatives aux technologies et à leur interaction avec la société. Depuis janvier 2022, l'Académie des technologies est présidée par Denis Ranque, ancien PDG de Thales et président d'Airbus.

www.academie-technologies.fr

Prix Pierre Potier 2023



Appel à candidatures

Créé en 2006 par le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, et porté aujourd'hui par la Fondation de la Maison de la Chimie et France Chimie, le prix Pierre Potier a pour objectif de valoriser et encourager les innovations des entreprises de la chimie (grands groupes, ETI, PME, PMI, startups) en faveur du développement durable.

Les entreprises peuvent candidater dans l'une des trois catégories suivantes :

- conception, fabrication et commercialisation de produits en faveur de l'environnement, et/ou du développement durable pour un progrès notable au profit de la société ;
- utilisation d'un procédé, processus ou système respectueux de l'environnement ;
- création d'une entreprise ou d'une startup dont les technologies relèvent de la chimie verte.

Inspiré du « Goncourt des lycéens » et initié par le ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, la Fondation de la Maison de la Chimie, France Chimie et le Réseau des jeunes chimistes de la Société Chimique de France (RJ-SCF), le prix Pierre Potier des lycéens met en lumière et récompense des projets d'entreprises de la chimie en faveur du développement durable. Ouvert aux classes de seconde, de première et terminale des filières générales, technologiques et professionnelles, il se déroule sur l'ensemble de l'année scolaire.

Les **dossiers de candidatures** doivent être adressés par courriel à la Fondation internationale de la Maison de la Chimie **au plus tard le 30 avril 2022***.

*www.francechimie.fr/les-prix-pierre-potier

Mission Rosetta : deux sources distinctes d'oxygène moléculaire



Mosaïque d'images prises le 3 février 2015 par la mission Rosetta depuis une distance de 28,7 km du centre de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. © ESA.

Une équipe de recherche internationale, dans laquelle figurent des scientifiques d'Aix-Marseille Université, du CNRS, de Sorbonne Université et de l'ENSC de Rennes, a montré, via l'analyse des données de la mission Rosetta concernant la coma de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko, que le dégazage de l'oxygène moléculaire (O_2) pouvait être corrélé avec ceux du dioxyde de carbone (CO_2) et du monoxyde de carbone (CO), contredisant l'opinion dominante selon laquelle la libération d' O_2 est toujours liée à l'eau (H_2O).

L'une des plus grandes surprises de la mission Rosetta a été la détection de grandes quantités d'oxygène moléculaire dans la coma de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. La détermination de la source de l'abondance étonnamment élevée de cette molécule, fondamentale pour l'évolution chimique, a posé un défi. Tous les scénarios proposés jusqu'ici dépendaient de l'hypothèse d'un dégazage simultané de l'oxygène et de l'eau au fil du temps. Par l'analyse des variations des rejets au cours de la révolution de la comète, ils ont pu, au contraire, démontrer l'existence de deux réservoirs distincts d' O_2 dans 67P/Churyumov-Gerasimenko. Le premier, dont le dégazage n'est pas corrélé à celui de l'eau, est une source primitive située en profondeur dans l'intérieur du noyau et datant d'avant la formation de la comète. Le second, qui constitue une source directement corrélée à l'eau, s'est formé au contact de la glace d'eau pendant le dégazage du réservoir primitif et au cours de l'évolution thermique du noyau.

Ces nouveaux résultats impliquent que l'oxygène moléculaire observé dans 67P/Churyumov-Gerasimenko a été formé par un mécanisme chimique qui a pu avoir lieu dans la nébuleuse protosolaire ou bien dans le milieu interstellaire. Un processus similaire a pu se produire dans d'autres comètes comme 1P/Halley où la présence d'oxygène moléculaire a été confirmée à des niveaux semblables à ceux mesurés dans 67P/Churyumov-Gerasimenko.

• Source : Aix-Marseille Université, 10/03/2022.

Réf. : A. Luspay-Kuti, O. Mousis, F. Pauzat, O. Ozgurel, Y. Ellinger, J.I. Lunine, S.A. Fuselier, K.E. Mandt, K.J. Trattner, S.M. Petrinec, Dual storage and release of molecular oxygen in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Nature Astronomy*, sous presse, <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01614-1>

Lancement d'un nouveau laboratoire commun entre le CNRS et Murata

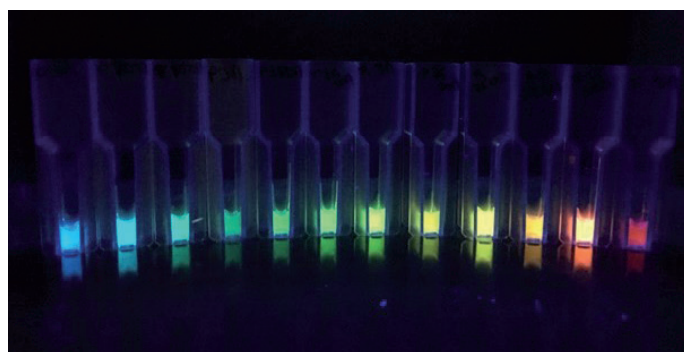
Trois laboratoires de l'Université de Caen Normandie (CIMAP, CRISMAT et GREYC*) se sont associés à la filiale française de Murata, fabricant japonais de composants électroniques, pour développer les nouvelles générations de composants électroniques passifs au sein du laboratoire commun de dispositifs passifs intégrés de Normandie (« **Integrated Passive Device of Normandy** »).

Le CRISMAT collabore depuis plusieurs années avec l'entreprise caennaise Murata Integrated Passive Devices (anciennement IPDiA). Plus récemment, le CIMAP et le GREYC ont rejoint cette collaboration. Les trois laboratoires apportent respectivement leurs compétences en physique des matériaux, chimie des matériaux, et caractérisation électrique des dispositifs. Cet ensemble de compétences permet une approche scientifique transversale, depuis l'étude de nouveaux matériaux jusqu'à l'analyse et le test des composants. Environ 45 personnes participent aux travaux, parmi lesquelles une trentaine sont issues des trois laboratoires de recherche. L'approche pluridisciplinaire menée par le consortium est un atout majeur pour le développement de futurs produits industriels.

• Source : Université de Caen Normandie, 08/03/2022.

*CIMAP : centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique (CNRS/CEA/ENSICAEN/UNICAEN) ; CRISMAT : laboratoire de cristallographie et sciences des matériaux (CNRS/ENSICAEN/UNICAEN) ; GREYC : groupe de recherche en informatique, image, automatique et instrumentation de Caen (CNRS/ENSICAEN/UNICAEN).

Un marqueur fluorescent caméléon pour l'étude des cellules



Tel un caméléon, ce rapporteur fluorescent chimogénétique peut émettre de la lumière de couleur variée en utilisant différents chromophores fluorogéniques. © Arnaud Gautier.

En biologie cellulaire, les protéines sont étudiées en les couplant à des marqueurs fluorescents qui révèlent, en temps réel, leur présence et leur comportement lors d'observations au microscope. Il existe parmi ces marqueurs fluorescents des marqueurs chimogénétiques, composés d'un tag protéique et d'un fluorophore. Composés d'une partie protéine, ces marqueurs chimogénétiques peuvent être combinés, grâce à des techniques de biologie moléculaire, à virtuellement n'importe quelle protéine cellulaire pour donner des protéines artificielles, dites chimériques ou de fusion. L'information génétique permettant la synthèse de ces protéines de fusion peut facilement être insérée dans la cellule pour qu'elle produise elle-même la protéine modifiée, que l'on souhaite étudier.

Bien que ces marqueurs chimogénétiques permettent de détecter une cible en utilisant différents types de microscopes, certaines approches d'imagerie telles que la microscopie à super-résolution ou la biodétection par des techniques de FRET (transfert d'énergie entre molécules fluorescentes) nécessitent des marqueurs toujours plus innovants et performants. Des

chercheurs du Laboratoire des biomolécules (LBM, CNRS/ENS/Sorbonne Université), du laboratoire Processus d'activation sélectif par transfert d'énergie uni-électronique ou radiatif (PASTEUR, CNRS/ENS/Sorbonne Université), de l'Institut de biologie de l'École normale supérieure (IBENS, CNRS/ENS/INSERM), de l'Institut de psychiatrie et neurosciences de Paris (IPNP, INSERM/Université de Paris) et de l'Institut de génétique et développement de Rennes (IGDR, CNRS/Université Rennes 1) ont conçu un tag protéique extrêmement versatile, capable de s'associer à une palette de fluorophores couvrant la majorité du spectre visible. En les combinant, les scientifiques n'ont alors plus qu'à choisir le fluorophore en fonction des besoins de la technique d'observation utilisée. Les chercheurs ont montré que cette méthode de marquage permet d'observer des protéines dans différentes cellules par microscopie conventionnelle et de super-résolution, et de facilement optimiser des biocapteurs FRET.

Le tag de ce marqueur a été développé par évolution dirigée. Cette technologie innovante permet de générer, grâce à des techniques de biologie moléculaire, des bibliothèques de plusieurs millions de variants et d'identifier ceux présentant les propriétés souhaitées. Ces variants sont exprimés individuellement dans des cellules de levure, afin d'identifier par des techniques de tri cellulaire à haut débit les tags protéiques qui se lient aux fluorophores avec une meilleure affinité et donnent la plus forte brillance. Les biologistes n'ont plus qu'à piocher dans la large palette de fluorophores compatibles celui qui possède les propriétés spectrales et spectroscopiques les plus appropriées au microscope utilisé, et de le combiner au tag protéique pour obtenir le marqueur chémogénétique adéquat. Les chercheurs comptent encore pousser le contrôle des propriétés spectrales, afin que ces marqueurs soient compatibles avec un maximum de techniques d'observation des mécanismes internes des cellules.

• Source : CNRS, 15/02/2022.

Réf. : H. Benaïssa, K. Ounoughi, I. Aujard, E. Fischer, R. Goïame, J. Nguyen, A.G. Tebo, C. Li, T. Le Saux, G. Bertolin, M. Tramier, L. Danglot, N. Pietrancosta, X. Morin, L. Jullien, A. Gautier, Engineering of a fluorescent chemogenetic reporter with tunable color for advanced live-cell imaging, *Nature Communications*, 2021, 12, article nr 6989, www.nature.com/articles/s41467-021-27334-0

Molécules, terres rares et lumière

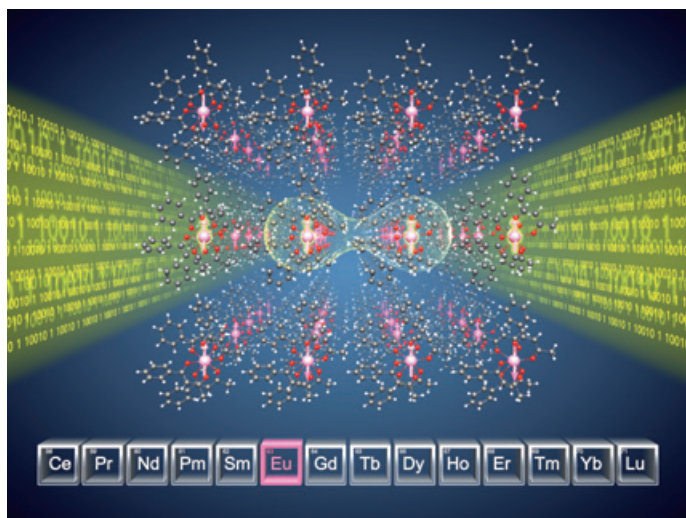


Illustration représentant un ordinateur quantique utilisant un cristal moléculaire d'europium.
© Christian Grupe.

Si les technologies quantiques promettent une révolution dans l'avenir, elles restent encore complexes à mettre en œuvre. Par exemple, les systèmes quantiques permettant des

interactions avec la lumière pour créer des fonctionnalités de traitement et de communication de l'information, notamment par fibres optiques, sont encore rares. En effet, une telle plateforme doit idéalement inclure une interface avec la lumière, mais aussi des unités de stockage de l'information, c'est-à-dire une mémoire. Le traitement de l'information devrait également être possible dans ces unités, qui se présentent sous la forme de spin. Développer des matériaux dans lesquels un lien entre spins et lumière peut être établi au niveau quantique se révèle être particulièrement difficile. Dans ce contexte, une équipe de scientifiques du CNRS et de l'Université de Strasbourg, avec le soutien de Chimie ParisTech-PSL et en collaboration avec des équipes allemandes du KIT (Karlsruher Institut für Technologie), a réussi à démontrer l'intérêt des cristaux moléculaires d'europium (une terre rare) pour les communications et les processeurs quantiques grâce à leurs transitions optiques très étroites permettant des interactions optimales avec la lumière. Ces cristaux résultent de la combinaison de deux systèmes déjà utilisés dans le domaine quantique : des ions de terres rares (dont fait partie l'europium) et des systèmes moléculaires.

Les cristaux de terres rares sont connus pour leurs excellentes propriétés optiques et de spin, mais sont complexes à intégrer dans des dispositifs photoniques. Les systèmes moléculaires sont, quant à eux, généralement dépourvus de spins (unités de stockage ou calcul) ou, dans le cas contraire, présentent des raies optiques trop larges pour établir un lien fidèle entre spins et lumière. Les cristaux moléculaires d'europium représentent une avancée majeure, car ils sont dotés de raies optiques très étroites. Cela se traduit par des états quantiques de grande durée de vie qui ont été exploités pour démontrer le stockage d'une impulsion lumineuse à l'intérieur de ces cristaux moléculaires. Une première brique d'un ordinateur quantique contrôlé par la lumière a également été obtenue.

Ainsi, ce nouveau matériau pour les technologies quantiques offre des propriétés inédites et ouvre la voie à de nouvelles architectures d'ordinateurs ou de mémoires quantiques dans lesquelles la lumière jouerait un rôle central. Ces résultats ouvrent également la voie à de vastes perspectives de recherche grâce aux très nombreux composés moléculaires qu'il est possible de synthétiser.

• Source : CNRS, 07/03/2022.

Réf. : D. Serrano, S.K. Kuppusamy, B. Heinrich, O. Fuhr, D. Hunger, M. Ruben, P. Goldner, Ultra-narrow optical linewidths in rare-earth molecular crystals, *Nature*, 9 mars 2022, DOI : [10.1038/s41586-021-04316-2](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04316-2)

Industrie

Croissance économique modeste attendue pour l'industrie chimique européenne



Selon de nouvelles données, le Cefic (Conseil européen de l'industrie chimique) prévoit une croissance de la production chimique de l'UE27 de 2,5 % en 2022, après une croissance d'environ 6 % en 2021.

En 2021, la croissance de la demande a été élevée dans les secteurs des biens de consommation (meubles, appareils électriques, textiles), et une croissance supérieure à la moyenne a été enregistrée dans l'industrie alimentaire et des boissons ainsi que dans le secteur européen de la construction. La demande d'exportations semble également se redresser ; les exportations vers les pays hors UE27 ont augmenté de plus de

15 % (de janvier à octobre) par rapport à 2020, s'élevant à plus de 160 milliards d'euros.

La croissance modérée prévue en 2022 devrait être tirée par une demande supplémentaire du secteur manufacturier. En particulier, l'industrie automobile européenne devrait se redresser, car les problèmes de chaîne d'approvisionnement devraient s'atténuer au cours de l'année. Pourtant, les perspectives à long terme restent incertaines. La forte inflation des prix à la consommation et la flambée des prix de l'énergie et des matières premières constituent un risque pour la croissance.

«The recovery in 2021 has been better than expected, bringing the industry back on track. Facing the huge transition investments expected from the industry in the next decades, a solid economic basis is very important. It will be crucial for the decision to not only develop new chemistries and technologies in general, but to invest these new sources for growth also in Europe. The 2022 outlook is positive but moderate, overseeing the many uncertainties Europe and the industry faces today. The chemical industry is however extremely resilient as shown during the COVID crisis. With the right policy choices made in the next two years, the chemical industry, as part of all strategic value chains, will have a key role to play in Europe.» (Marco Mensink, Cefic Director General).

• Source : CEFIC, 17/02/2022.

Projet de construction en France d'une première usine de biorecyclage de PET

Carbios, société pionnière dans le développement de solutions enzymatiques dédiées à la fin de vie des polymères plastiques et textiles, et Indorama Ventures, un des leaders mondiaux de la production de PET (polyéthylène téréphtalate*), annoncent leur collaboration pour la construction d'une usine sur le site de production d'Indorama Ventures à Longlaville (Meurthe-et-Moselle) exploitant la technologie de biorecyclage de Carbios. Ce procédé unique au monde, appelé C-ZYME™, convertit le PET en ses monomères de base, qui peuvent ensuite être utilisés pour fabriquer du PET 100 % recyclé et entièrement recyclable. Après avoir démarré avec succès son démonstrateur industriel à Clermont-Ferrand, Carbios franchit désormais une étape clé vers l'industrialisation et la commercialisation de son procédé en s'associant à Indorama Ventures. L'objectif est de construire et d'exploiter en France la première usine au monde, qui aura une capacité de traitement estimée à environ 50 000 tonnes de déchets PET post-consommation par an, soit l'équivalent de 2 milliards de bouteilles ou 2,5 milliards de barquettes.

Après les résultats positifs de l'analyse menée au cours des derniers mois par Indorama Ventures sur la viabilité technique du procédé, les deux parties sont convenues de mener les diligences préalables à l'industrialisation de la technologie Carbios. Sous réserve de la réussite des évaluations techniques et économiques, Indorama Ventures co-investira dans le projet. L'investissement requis pour le projet est estimé à 150 millions d'euros pour la technologie Carbios, comprenant notamment une étape de purification supplémentaire, qui a été intégrée au procédé. En parallèle, un investissement estimé à 50 millions d'euros sera alloué à la préparation des infrastructures du site. Le projet devrait créer environ 150 emplois directs et indirects à plein temps.

Cette collaboration répondra aux besoins croissants des consommateurs et des grandes entreprises de biens de consommation en emballages plus durables, dont les partenaires et actionnaires de Carbios (L'Oréal, Michelin, L'Occitane, Nestlé Waters, PepsiCo, Suntory Beverage & Food Europe).

• Source : Carbios, 23/02/2022.

*Le polyéthylène téréphtalate (PET) est le plastique le plus utilisé aujourd'hui (bouteilles, barquettes, textiles), avec une production mondiale estimée à 82 millions de tonnes par an (IHS Markit, 2020).

Elkem poursuit ses investissements dans la production de silicones

Elkem, qui fait partie des lauréats du dispositif « Résilience » du Plan France Relance, accélère ses investissements sur son site de production de silicones de spécialité à Saint-Fons (Rhône), afin de répondre à la croissance et aux évolutions de la demande sur plusieurs marchés de haute technologie alignés aux enjeux du développement durable*.

Ces investissements visent notamment à augmenter les capacités de production tout en les automatisant, optimiser la qualité et la pureté des produits, et améliorer la performance environnementale de certaines unités-clés de l'usine de Saint-Fons. Ils seront réalisés en 2022 et 2023 avec une enveloppe de 15 à 20 millions d'euros.

Les silicones apportent des propriétés et des performances uniques et indispensables à de multiples marchés de spécialités, notamment les batteries pour la mobilité propre, l'assemblage des semi-conducteurs, les textiles techniques, les revêtements anti-adhérents, les adhésifs, ainsi que les soins de santé et les dispositifs médicaux.

• Source : Elkem Silicones, 17/02/2022.

*Les activités d'Elkem en France génèrent environ 1 200 emplois directs et indirects en région lyonnaise et dans l'Isère. Les deux principaux sites de la division Silicones du groupe en Europe se trouvent sur les plateformes chimiques de Roussillon (production amont), et de Saint-Fons (innovation, production aval et formulation). L'entreprise emploie environ 150 chercheurs en France et a inauguré un nouveau centre de recherche mondial en région lyonnaise en 2021.

Solvay et Veolia lancent le projet « Dombasle Énergie » pour la transition énergétique

Solvay et Veolia lancent « Dombasle Énergie », un projet d'écologie industrielle qui vise à remplacer le charbon par des combustibles solides de récupération (CSR) pour la production d'énergie propre et compétitive à l'usine de Dombasle-sur-Meurthe.

Le projet consiste à remplacer trois chaudières à charbon par une chaufferie équipée de deux fours fonctionnant à base de CSR constitués de déchets qui ne peuvent être recyclés, ce qui permettra de diviser par deux l'empreinte carbone de l'activité industrielle et d'arrêter l'importation annuelle de 200 000 tonnes de charbon. Le site de Dombasle-sur-Meurthe disposera ainsi d'une unité de cogénération qui valorisera 350 000 tonnes de CSR par an, fournis par Veolia dès 2024.

La nouvelle installation, construite par Solvay et exploitée par Veolia, aura une capacité de 181 mégawatts (MW) thermiques et 17,5 MW électriques réutilisés dans le processus industriel. Ce projet, qui nécessitera un investissement de 225 millions d'euros, avec une mise en service prévue pour 2024, bénéficiera d'un soutien de la Région Grand Est et de l'ADEME.

Le projet Dombasle Énergie – une première en France – permettra de créer une boucle vertueuse d'économie circulaire via :

- la réduction de l'empreinte environnementale du site (diminution des émissions de CO₂ d'environ 50 %, soit une réduction de 240 000 tonnes de CO₂ par an) ;
- la sortie des énergies fossiles en remplaçant un charbon importé de l'étranger par des CSR produits en France (prioritairement dans la Région Grand Est et les régions limitrophes) ;
- la création d'un nouveau débouché pour des déchets non recyclables qui seront transformés en énergie verte ;
- la réduction des prélèvements d'eau de 7 %.

Ce projet confirme la détermination de Solvay de transformer l'industrie européenne du carbonate de soude pour le rendre plus durable et compétitif. Cette conversion constitue également un réel atout pour l'usine face à la volatilité du prix des combustibles fossiles et aux taxes imposées par la réglementation européenne pour l'utilisation de charbon. Ce gain de compétitivité permettra la pérennisation du site et la préservation du bassin d'emploi, soit 1 000 emplois directs et indirects.

• Source : Solvay, 16/02/2022.

Enseignement et formation

Deep Red, l'intelligence artificielle au service de l'imagerie infrarouge

La Fondation Grenoble INP lance Deep Red, une nouvelle chaire d'enseignement et de recherche, en partenariat avec LYNRED, un leader mondial dans le développement et la production de technologies infrarouges de haute qualité. Cette chaire a pour mission de soutenir des activités de recherche répondant aux enjeux futurs de l'intelligence artificielle (IA) au service de l'imagerie infrarouge, ainsi que de dispenser des actions d'enseignement en lien avec son expertise. Que ce soit pour la surveillance des gaz à effet de serre ou la sécurité pour l'aide à la conduite de nuit, l'imagerie infrarouge joue un rôle capital. L'objectif est de développer des algorithmes avancés de traitement numérique des données afin d'en optimiser les potentialités, pour l'analyse automatique ou une meilleure interprétation visuelle.

D'une durée initiale de cinq ans, Deep Red est adossée aux écoles Grenoble INP-Ense³ et Grenoble INP-Phelma pour la formation, et au Gipsa-lab pour la recherche. Jocelyn Chanussot, enseignant à Grenoble INP-UGA et chercheur au Gipsa-lab en est le titulaire.

Côté recherche, différentes stratégies seront explorées au sein de Deep Red afin d'améliorer la lisibilité des scènes imagées,

que ce soit par un opérateur humain ou par un algorithme de traitement visant, par exemple, à détecter des anomalies ou des objets.

La chaire favorisera le développement d'échanges et de réflexions entre LYNRED, les élèves-ingénieurs, les doctorants et les étudiants des masters de Grenoble INP-UGA. Ils seront formés et sensibilisés au potentiel et aux enjeux de l'imagerie infrarouge dans le cadre des cours, bureaux d'études ou travaux pratiques de leur formation et pourront également devenir acteurs des développements dans le cadre de projets d'ingénierie et de stages sur ces thématiques.

• Source : Fondation Grenoble INP/LYNRED, 10/02/2022.

Chimie ludique

Jouer aux cartes avec « Chemical links »



Dans le cadre de ses 200 ans d'existence, l'École nationale supérieure de chimie de Mulhouse (ENSCMu) propose un nouveau jeu de cartes (les élèves ingénieurs ont travaillé à la conception du jeu dans le cadre de leur projet personnel de première année).

Chemical links est un jeu coopératif avec quatre niveaux de difficulté possibles pour un public varié. Les joueurs relient chaque carte « Indice » à une carte « Mot ». Les 52 cartes Mot abordent plusieurs thèmes de la chimie (verrerie, molécules, chimie du quotidien, matériaux, minéraux, colorants, phénomènes chimiques, méthodes, famille chimique et personnalités). En fin de partie, il reste une carte Mot dont il faut vérifier le code pour savoir si la partie est gagnée.

Le jeu est disponible en français ou en anglais au tarif unitaire de 5 € (hors frais de port)*.

*<https://www.enscmu.uha.fr/wp-content/uploads/2022/03/formulaire-commande-chemical-links-ENSCMu-2022.03-France.pdf>

Des notions de chimie pour mieux cuisiner...

À la demande d'amis cuisiniers, Hervé This s'est lancé dans la rédaction de billets qui présentent les bases utiles de la chimie et de la physique pour le monde culinaire (et pour celles et ceux qui n'ont pas appris la chimie ou l'ont oubliée...). Sont expliqués ainsi les termes choc thermique, assemblage, réaction, catalyse, polymérisation... ; les protéines, les sucres et leurs cousins, la couleur des carottes...

• www2.agroparistech.fr/-Des-notions-de-chimie-pour-mieux-cuisiner-.html



Mercredi 9 Février 2022

Chimie et Notre-Dame

La science au service d'une résurrection



Retrouvez l'intégralité du colloque en rediffusion :

https://www.youtube.com/watch?v=HWI46h40urY&list=PL_2_MQVjgfgYDN0iffKGwSbKPDMiCB87_

À signaler



Chemistry for sustainable technologies A foundation (2nd ed.)

N. Winterton
812 p., 125 €
Royal Society of
Chemistry, 2021

Suite au succès de la première édition, ce livre a été complété et remis à jour. Son premier objectif est de fournir aux jeunes chimistes de quoi comprendre, défendre et promouvoir le rôle joué par la chimie et ses acteurs pour mieux gérer et améliorer son impact sur l'écosphère. Les concepts, réalisations, défis et applications dans le contexte de son impact environnemental – passé, présent et futur –, sont replacés ainsi que les changements nécessaires pour faire émerger un monde plus durable. Sont examinés également les complexités et défis supplémentaires découlant des attitudes du public et des médias à l'égard de la science.

Ce livre, initialement destiné aux étudiants, intéressera tout public (scientifique ou non).



Dernières nouvelles de Mars

F. Rocard
176 p., 12 €
Flammarion, 2020

Grâce aux sondes automatiques, on sait que de l'eau a coulé à la surface de Mars, que cette dernière est émaillée de volcans géants et qu'elle a jadis subi un terrible changement climatique. Mais pourquoi n'a-t-elle pas évolué comme la Terre ? Aurait-elle abrité la vie ? Mystère... Pour répondre à ces questions et à bien d'autres encore, l'objectif scientifique est aujourd'hui de rapporter des échantillons de la planète rouge. Mais un autre programme d'une tout autre nature se dessine, sous la pression inédite d'acteurs privés : y envoyer un jour des hommes. Défi colossal ! Concevoir un atterrisseur, se protéger des radiations meurtrières, trouver des ressources sur place, gérer la psychologie humaine durant l'interminable voyage, etc. Ce qui paraît impossible est pourtant déjà en préparation.

À l'heure où le retour d'échantillons s'amorce, l'auteur nous propose un tour d'horizon, aussi fascinant que documenté, de cette ambition spatiale sans précédent.

Cet ouvrage a été récompensé par le Prix Roberval 2021, catégorie « Grand public ».



Good chemistry Methodological, ethical, and social dimensions

J. Mehlich
432 p., 75 €
Royal Society of
Chemistry, 2021

Les chimistes sont confrontés à un certain nombre de considérations éthiques telles que l'impact potentiel sur l'environnement d'un nouveau procédé, la décision de travailler sur des produits chimiques qui pourraient être transformés en armes. En gardant à l'esprit ces considérations, les chimistes peuvent renforcer leur propre crédibilité, contribuer à la confiance du public dans les sciences chimiques et faire de la science qu'elle profite au monde.

Divisé en trois parties – aspects méthodologiques, éthique de la recherche, et implications sociales et environnementales –, ce livre présente des outils et des concepts pour aider les chimistes à reconnaître les dimensions éthiques et sociales de leur propre travail et à agir de manière appropriée.

Ce livre comprend des questions pratiques et des exemples de situations pertinentes qui aideront les étudiants en chimie à s'engager et à se préparer à leur future vie professionnelle dans le milieu universitaire, l'industrie ou la fonction publique.



Le marathon du messager Histoire des vaccins à ARN messenger

J. et N. Lemonnier
248 p., 22 €
EDP Sciences, 2022

Une course contre la montre est en train de se jouer tout autour du globe, dont les principaux protagonistes sont, d'un côté le Sars-CoV-2, et de l'autre les chercheurs – et tout spécialement ceux spécialistes des vaccins à ARN messenger. L'histoire de ces vaccins inédits est avant tout européenne, grâce aux travaux

décisifs de chercheurs allemands et français, commencés dès 1993 et poursuivis jusqu'à nos jours. Contre la pensée unique ambiante, ces chercheurs ont en effet imposé un nouveau concept thérapeutique, en définissant les clés biotechnologiques qui allaient ouvrir la voie à la préparation de l'ARN messenger thérapeutique dans la lutte contre les cancers et les infections virales. Toutefois, revues scientifiques et leaders d'opinion américains taisent cette vérité. En s'appuyant sur le succès incontestable des vaccins anti-Covid mis sur le marché par Pfizer et Moderna, ils donnent une vision clairement déformée de l'histoire de ces nouveaux vaccins. Face à cette manipulation – voire cette usurpation – il est grand temps que les Européens rétablissent la vérité, en rappelant le rôle essentiel qui a été le leur dans la mise au point des vaccins à ARN messenger.

Cet ouvrage s'adresse aux scientifiques comme au grand public.



Les atomes de nos vies

Fer, potassium, cuivre...
Les surprenants pouvoirs des éléments du tableau périodique

A. Røyne
272 p., 19,90 €
Dunod, 2022

Certains éléments chimiques attirent toute l'attention : l'or scintillant, l'uranium radioactif – des matériaux que nous appelons « précieux » parce qu'ils sont très rares. Mais qu'est-ce qui pourrait être plus précieux que les éléments indispensables à nos vies, de l'oxygène de l'air au carbone de tous les êtres vivants ?

D'autres atomes sont par ailleurs essentiels à nos sociétés technologiques, comme l'arsenic des téléphones, le bore et le gallium de nos ordinateurs, l'indium et l'étain des écrans tactiles, ou encore le lithium des batteries.

Anja Røyne, physicienne et chercheuse à l'université d'Oslo, entraîne le lecteur dans un étonnant voyage à la découverte des éléments dont nous, les humains, et tout ce qui existe dans le monde, sommes faits. Elle explique pourquoi l'homme a besoin de fer, de phosphore de silicium, de potassium et de bien d'autres éléments en quantité

suffisante. Elle montre aussi où sur la planète se cachent ces précieux éléments, comment ils sont extraits et quels sont les stocks encore disponibles.

En mettant en lumière ces héros silencieux du quotidien, l'auteure aide le lecteur à comprendre à quel point l'équilibre de nos sociétés est précaire et éclaire sur la nécessité de mieux gérer les ressources planétaires.



Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables (2^e éd.)

B. Robyns, A. Davigny,
B. François, A. Henneton,
J. Sprooten
382 p, 74 €
Lavoisier, 2021

Les enjeux énergétiques et environnementaux sont à l'origine d'une forte croissance de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables depuis le début du XXI^e siècle. Le concept de développement durable et le souci des générations futures nous interpellent au quotidien permettant l'émergence de nouvelles technologies de production d'énergie, et de nouveaux comportements d'utilisation de ces énergies. Ce livre a pour but de contribuer à une meilleure connaissance de ces nouvelles technologies de production d'électricité en s'adressant à un public varié. Il présente les enjeux, les sources et leurs moyens de conversion en électricité suivant une approche générale et développe les notions scientifiques de base permettant d'en appréhender les principales caractéristiques techniques avec une vision d'ensemble. Plusieurs exercices sont proposés au lecteur à des fins d'évaluation.



Réaliste Soyons logiques autant qu'écologiques

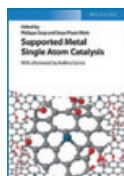
B. Picard
180 p, 18 €
Stock, 2021

Avec sa double identité de psychiatre et d'explorateur, Bertrand Picard, président de la Fondation Solar Impulse, publie un nouvel ouvrage de réflexion. Son but est de redonner de l'espoir, de sortir du dilemme entre ceux qui prônent la décroissance pour protéger l'environnement, et ceux qui croient que la croissance illimitée est le seul moyen de faire fonctionner notre société. L'auteur

présente une vision pleine de réalisme à tous ceux qui sont prêts à remettre en question leurs certitudes pour assurer l'avenir de l'humanité.

Il affirme ainsi que remplacer ce qui pollue par ce qui protège l'environnement est une opportunité à saisir et représente le marché industriel du siècle. Pour montrer que cette vision n'est pas un vœu pieux, mais une réalité concrète intégrant tous les acteurs, il a identifié, avec la Fondation Solar Impulse, plus de 1 300 solutions propres, efficaces et capables de créer de la richesse et de l'emploi. Elles sont la preuve qu'un nouveau scénario est possible.

Bertrand Picard nous emmène ainsi à une autre altitude, pour aborder différemment la protection de l'environnement. De ses souvenirs d'enfance qui ont forgé sa sensibilité écologique à son action d'aujourd'hui comme « psychiatre du climat », il invite le lecteur dans son engagement en faveur d'une action « réaliste ».



Supported metal single atom catalysis

P. Serp, D. Pham Minh (eds)
688 p., 199 €
Wiley-VCH, 2022

La catalyse à un seul atome est l'un des domaines de recherche les plus innovants et les plus dynamiques dans le domaine de la catalyse. Les catalyseurs métalliques supportés sont largement utilisés dans l'industrie chimique, allant de la production chimique fine à la pétrochimie. Les catalyseurs à un seul atome (SAC) combinent les avantages des catalyseurs homogènes et hétérogènes (stabilité du catalyseur, activité

et dispersion élevée de la phase active). Ce livre très complet couvre la synthèse et la préparation, les méthodes de caractérisation, la modélisation ainsi que les applications des SAC. Cet ouvrage est une ressource inestimable pour les chercheurs académiques et industriels qui travaillent en particulier dans les domaines de la catalyse, de la chimie du solide, de la science des matériaux et de la spectroscopie.



The chemistry of explosives

J. Akhavan
194 p., 27,99 £
Royal Society of Chemistry, 2022

Ce livre concis et facile à lire décrit les principes de base pour comprendre les mécanismes chimiques de l'explosion. Écrit pour les étudiants n'ayant aucune connaissance préalable des explosifs mais une certaine compréhension des réactions chimiques, il emmène le lecteur à travers l'histoire des explosifs et présente les concepts d'explosifs, de propulseurs et de pyrotechnie. Combustion, déflagration et détonation ; inflammation, initiation et décomposition thermique ; thermochimie, thermodynamique et cinétique figurent au sommaire, avec des formulations détaillées et des réactions présentées avec des calculs thermochimiques pour faciliter la compréhension. Cette édition comprend également la législation environnementale et son impact sur les explosifs, ainsi qu'une section sur les risques.

Bulletin de l'Union des professeurs de physique et de chimie (« Le Bup »)

La rédaction de *L'Actualité Chimique* a sélectionné pour vous les articles suivants :



N° 1041 (février 2022)

- Autonomie en physique-chimie : point de vue d'un représentant de l'institution : un pas vers l'étude des éventuels décalages entre les attentes de l'institution et les pratiques enseignantes, par S. El Hage et A. Maigret.

- Modélisation 3D d'une maille cristalline CFC à l'aide d'un langage de programmation : module graphique VPython, par O. Oreggia.

- Physique-chimie : les profs à la rencontre des chercheurs, par G. Utard.



N° 1042 (mars 2022)

- Les arguments en faveur d'un enseignement des sciences fondé sur l'investigation, par W. Harlen et P. Léna.

• Sommaires complets, résumés des articles et modalités d'achat sur www.udppc.asso.fr

Agenda

26-27 avril 2022

Journées franco-italiennes de chimie

Toulon

Voir *L'Act. Chim.*, 471, p. 57.
<https://jfic2022.univ-tln.fr>

8-12 mai 2022

16th EFMC short course on medicinal chemistry

Oegstgeest (Pays-Bas)
www.efmcshortcourses.org

15-20 mai 2022

SECO 59

59^e Semaine d'études en chimie organique

La Londe-les-Maures

Voir *L'Act. Chim.*, 470, p. 62.
www.congres-seco.fr

16-19 mai 2022

CFCF 2022

3^e Colloque français de chimie du fluor

Forges-les-Eaux

Voir *L'Act. Chim.*, 471, p. 57.
<https://cfcf2022.sciencesconf.org>

18-20 mai 2022

GFSV 2022

28^e Journées du Groupe français de spectroscopie vibrationnelle

Nivelles (Belgique)

www.gfsv.net

19-20 mai 2022

Journées de chimie supramoléculaire

Lyon

Voir *L'Act. Chim.*, 470, p. 62.
laurent.vial@univ-lyon1.fr

19-21 mai 2022

Chimie & Terroir

Guéret

Voir *L'Act. Chim.*, 471, p. 58.
www.chimieetsociete.org/chimie-et-terroir/644-chimie-terroir-sera-a-gueret-en-mai-2020.html



30-31 mai 2022

Colloque Analyse et environnement

Villeurbanne

Voir p. 61.
<https://analyse-enviro.sciencesconf.org>

30 mai-3 juin 2022

FFCat 2022

French conference on catalysis

Ronce-les-Bains

Voir *L'Act. Chim.*, 470, p. 62.
<https://fccat2022.sciencesconf.org>



2 juin 2022

Journée scientifique en la mémoire de François Couty

Versailles

Voir p. 61.
<https://francoiscouty.sciencesconf.org>

3 juin 2022

11^e Journée scientifique du médicament

Grenoble

Thème : Défis en analyse et diagnostic.
<https://dpm.univ-grenoble-alpes.fr/jsm/jsm-home>

6-9 juin 2022

IX Ciamician photochemistry school

Bologne (Italie)

<https://eventi.unibo.it/ciamician-photochemistry-school>

6-10 juin 2022

SPEA 11

11th European conference on solar chemistry and photocatalysis

Turin (Italie)

www.spea11.unito.it



7-8 juin 2022

SP2P'22

Journées de la subdivision Photochimie, photophysique et photosciences

Gif-sur-Yvette

new.societechimiquedefrance.fr/divisions/photochimie-photophysique-et-photosciences/journees-de-printemps-2022



9-10 juin 2022

Club Emulsion 2022

Paris

Voir p. 61.
<https://club-emulsion.web.app/home>

9-10 juin 2022

Journées du GDR CNRS Synth Flux

Orléans

frederic.buron@univ-orleans.fr

12-16 juin 2022

CS2FE

Chemistry summer school on f-elements

Aussois

<https://felements.fr/cs2fe-2022>

13-16 juin 2022

Summer school MRM

4th Thematic school magnetism and magnetic resonance

Toulouse

Voir *L'Act. Chim.*, 471, p. 58.
<http://divchimiephysique.wixsite.com/sitedcp/-magnetisme-resonance-magnetique>

13-17 juin 2022

ICTAC 2022

International conference

on theoretical aspects of catalysis

Lyon

<http://ictac2022.univ-lyon1.fr/fr/pages/ictac-2022-home>

14-17 juin 2022

SCTE 2022

International conference on solid compounds of transition elements

Talence

<https://scte2022.sciencesconf.org>

15-17 juin 2022

MemPro

Intégration des membranes dans les procédés

Montpellier

<http://mempro7.fr>

16 juin 2022

Journée de la section régionale Rhône-Alpes

Le Bourget du Lac

Voir *L'Act. Chim.*, 471, p. 58.
<https://scfrhonealp2022.sciencesconf.org>

En raison des mesures sanitaires liées au Covid-19, certaines manifestations peuvent être annulées, modifiées et/ou reportées. Vous trouverez de nombreuses autres manifestations sur le site de la SCF : new.societechimiquedefrance.fr/Events

En direct du Bureau

La campagne des Prix 2022 est lancée

Comme chaque année, la SCF lance sa campagne d'appel à propositions afin de décerner ses **Grands Prix** – Prix Joseph Achille Le Bel, Prix Pierre Süe – et 2022 étant une année paire, les **Prix binationaux** franco-allemand (avec la Gesellschaft Deutscher Chemiker), franco-portugais (avec la Sociedade Portuguesa de Química), franco-espagnol (avec la Real Sociedad Española de Química) et franco-chinois (avec la Chinese Chemical Society).

Les Grands Prix et Prix binationaux seront attribués par un jury constitué de personnalités internationalement reconnues dans leur domaine, sur proposition des présidents des divisions et/ou sections régionales. Ces propositions seront examinées à la mi-juin par le jury (dont la composition a été validée par le Bureau élargi du Conseil d'administration lors de sa réunion du 9 mars dernier). Le classement se fera lors de la réunion du Conseil d'administration prévue le 28 juin 2022.

Pour le prix franco-chinois, la procédure diffère de celle des autres prix ; la SCF est chargée cette année de collecter les dossiers de trois scientifiques français qui seront ensuite soumis en fin d'année à la sélection du jury chinois.

Prix des entités 2022

Division Chimie industrielle

Appel à candidatures

La division attribuera le prix de la DCI (1 500 €) à une personne ayant accompli un travail remarquable dans le domaine de la chimie industrielle, notamment dans la création ou le développement d'une nouvelle entreprise en chimie.

Date limite pour candidater : 30 avril 2022.

• <https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/chimie-industrielle/prix-dci-2022>

Interdivision Énergie

Appel à candidatures

Quatre prix seront décernés cette année :

- **Un prix Chercheur confirmé** (1 200 €) : ce prix récompensera un(e) chercheur(e), enseignant(e) chercheur(e) ou ingénieur(e) dont les travaux sont bien engagés et reconnus dans leur domaine. Les travaux de recherche peuvent être de nature fondamentale ou appliquée, et doivent avoir un lien avec le domaine de l'énergie.

- **Un prix Chercheur junior** (800 €) : ce prix récompensera un(e) jeune chercheur(e), enseignant(e) chercheur(e) ou ingénieur(e) ayant apporté une contribution scientifique originale et/ou ayant des retombées pratiques importantes dans le domaine de la chimie et qui soit également reliée au domaine de l'énergie, au sens large. Les travaux pourront être de nature fondamentale ou d'orientation plus appliquée. Le lien entre les travaux de recherche et l'énergie devra être explicité dans le dossier de candidature.



Soutien aux scientifiques ukrainiens

Le 24 février 2022, la Russie annonçait qu'elle envahissait l'Ukraine. En réaction à cette invasion, la quasi-totalité des pays ont déclenché des sanctions économiques et diplomatiques envers la Russie. En France, le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) a demandé l'arrêt de toute coopération scientifique avec les laboratoires russes. Les sociétés savantes ont elles aussi exprimé leurs réprobations*.

Le progrès scientifique, que nos actions sous-tendent, vise à améliorer la qualité de vie de nos contemporains partout dans le monde. Le hasard fait que nous avons programmé de longue date un numéro spécial sur les explosifs et la gestion de crise, qui nous rappelle que les conflits ont existé et sont toujours d'actualité. Alors apportons notre soutien au peuple ukrainien, ses scientifiques**, enseignants, étudiants... avec notre abécédaire, le tableau de Mendeleïev.

Stanislas Pommeret
Président de la SCF

* <https://societes-savantes.fr/communique-relatif-a-linvasion-en-cours-de-lukraine-par-la-russie>

** Les chercheurs en exil peuvent se rapprocher de la cellule « PAUSE – Solidarité Ukraine » du Collège de France, afin de poursuivre leurs travaux en France (www.college-de-france.fr/site/programme-pause/PAUSE-Solidarite-Ukraine.htm).

- **Deux prix de thèse** (500 € chacun) : ce prix récompensera un(e) doctorant(e) pour l'excellence de ses travaux scientifiques lors de sa thèse dans le domaine de la chimie, et qui soit reliés au domaine de l'énergie au sens large. Les travaux pourront être de nature fondamentale ou d'orientation plus appliquée. Le lien entre les travaux de recherche et l'énergie devra être explicité dans le dossier de candidature. Les candidat(e)s doivent avoir soutenu leur thèse après le 31 août 2020.

Les lauréat(e)s s'engagent à présenter leurs travaux lors de la remise des prix et sont invité(e)s à rédiger un article qui paraîtra dans *L'Actualité Chimique*.

Date limite de réception des candidatures : 30 juin 2022.

• <https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/energie/prix-et-laureats-energie>

Subdivision Électrochimie

Prix Jeune chercheur/Jeune chercheuse

Appel à candidatures

La subdivision Électrochimie de la SCF et la section française de l'International Society of Electrochemistry (ISE) attribuent deux prix « Jeune chercheur en électrochimie » (1 500 € chacun). Cet appel à candidatures s'adresse aux jeunes francophones (30 à 41 ans), membres des deux sociétés (SCF et ISE), engagés dans une carrière académique (maîtres de conférences/chargés de recherches) ou industrielle en électrochimie.

Les prix seront remis à l'occasion des Journées d'électrochimie à Mons en juillet prochain.

Les lauréat(e)s s'engagent à présenter une conférence aux Journées d'électrochimie de 2024.

Date limite pour candidater : 23 mai 2022.

• <https://new.societechimiquedefrance.fr/divisions/electrochimie/prix-jeune-chercheur-e-en-electrochimie>

Section régionale Ile-de-France

Prix de thèse

Appel à candidatures

La 6^e édition du prix de thèse SCF-IdF est ouverte au concours. Ce prix vise à récompenser des jeunes chimistes, membres de la SCF, ayant soutenu leur thèse en Ile-de-France entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre 2021.

Six prix (650 € chacun) seront décernés et couvriront plusieurs domaines : Chimie organique ; Chimie inorganique, minérale et matériaux ; Chimie théorique, physique et analytique.

Les candidat(e)s sélectionné(e)s par le Bureau SCF-IdF seront invité(e)s à présenter leurs travaux à l'occasion de la Journée des jeunes talents de la chimie 2022 qui se déroulera en septembre prochain.

Date limite d'envoi des dossiers : 30 avril 2022 (minuit)*.

*contact-idf@societechimiquedefrance.fr

Manifestations

30-31 mai 2022

Colloque Analyse et environnement

Air, eaux, sols

Villeurbanne

Lors de ces deux journées organisées par la SCF, le Club de microcapteurs chimiques et l'Institut des sciences analytiques, seront abordées les dernières avancées en recherche, les nouvelles problématiques, notamment industrielles, et l'offre instrumentale dans le domaine de l'analyse pour l'environnement.

Au programme : les conférences plénières de Marc Bendahan (IM2NP Aix-Marseille Université), Nathalie Guigues (Laboratoire national de métrologie et d'essais) et Thomas Ricour (NIR Industry).

Le colloque se tiendra en mode hybride (distanciel et présentiel selon les mesures sanitaires en vigueur).

Participation gratuite mais inscription obligatoire.

• <https://analyse-enviro.sciencesconf.org>

2 juin 2022

Journée scientifique en mémoire de François Couty

Versailles

Ce symposium, ouvert à toutes et tous, se déroulera sur le site de l'UFR des sciences de l'Université de Versailles-St-Quentin et rassemblera des chimistes de renom que François Couty appréciait humainement et scientifiquement, pour certains d'anciens collègues ou étudiants.

Conférenciers invités : Janine Cossy (ESPCI Paris), Olivier David (Institut Lavoisier de Versailles), Pierre Deprez (Galapagos, Romainville), Gwilherm Evano (Université libre de Bruxelles), Sami Lakhdar (LHFA, Université de Toulouse), Jacques Maddaluno (COBRA, Université de Rouen), Ilan Marek (Technion Israel Institute of Technology), Pierre Mialane (Institut Lavoisier de Versailles), Anna Proust

Prix de sensibilisation/médiation scientifique

Le Bureau de la SCF-IdF ouvre un prix (250 €) destiné à récompenser les actions de sensibilisation/médiation scientifique destinées à un public de non-spécialistes, menées en 2021/2022.

Les projets retenus par le Bureau seront soumis aux votes et le lauréat aura la possibilité de présenter son action au cours de la Journée des jeunes talents de la chimie 2022 organisée par la SCF-IdF en septembre prochain.

Modalités : le/la candidat(e) devra être membre de la SCF à la date de candidature ; l'action doit pouvoir être accessible en ligne (fournir un lien web) ; joindre une justification en quelques lignes des objectifs recherchés par cette action et de ses retombées.

Envoi des candidatures avant le 30 mai 2022 (minuit)*.

*contact-idf@societechimiquedefrance.fr

(Institut parisien de chimie moléculaire, Paris), Nicolas Rabasso (Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay).

Inscription obligatoire (nombre de places limité).

• <https://francoiscouty.sciencesconf.org>

9-10 juin 2022

Club Emulsion 2022

Paris

Cet événement national, qui a lieu tous les ans depuis plus de trente-cinq ans, est l'occasion pour les communautés scientifiques académiques et industrielles travaillant dans le milieu de l'émulsion, de se retrouver et d'échanger sur l'avancement des recherches. L'Institut parisien de chimie moléculaire (IPCM) et le Laboratoire de sciences et ingénierie de la matière molle (SIMM) organisent cette année la 37^e édition au sein du campus Pierre et Marie Curie de Sorbonne Université.

Quatre thématiques sont au programme :

- Synthèse de colloïdes polymères ou hybrides ; polymérisations en milieu dispersés, PISA, auto-assemblage des macromolécules amphiphiles.

- Biopolymères et composés biosourcés : tensioactifs/monomères biosourcés et biopolymères dans le domaine des milieux dispersés.

- Physico-chimie des émulsions/milieux dispersés : caractérisation des émulsions, dispersions et interfaces, systèmes stimulables.

- Applications des systèmes colloïdaux.

Conférenciers invités : Nicolas Bremond (ESPCI-LCMD, Paris), Sylvain Caillol (ENSCM-ICGM, Montpellier), Ian Harrison (Givaudan, Argenteuil), Muriel Lansalot (CPE-C2P2, Lyon).

Participation gratuite mais inscription obligatoire.

• <https://club-emulsion.web.app/home>

27 juin-1^{er} juillet 2022

RCTF 2022

Rencontres des chimistes théoriciens francophones

Talence

Ces rencontres sont la manifestation biennale de référence du Réseau français de chimie théorique (RFCT). Les domaines de recherche représentés couvriront un large éventail de thématiques, allant des développements méthodologiques de pointe aux applications repoussant les limites des méthodes

Nouveaux témoignages de chimistes



Le stockage de l'énergie au CIRIMAT

Au CIRIMAT (Centre inter-universitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux, Université Paul Sabatier, Toulouse), l'équipe du professeur Patrice Simon (prix Pierre Süe 2019 de la SCF) étudie et développe des systèmes de stockage de l'énergie tels que les batteries et les supercondensateurs. Ils utilisent en particulier des systèmes à base d'un carbone très poreux, qui permet d'augmenter la densité d'énergie stockée. Les doctorants Hugo Chotard, Élodie Marcerou et Victor Maurel décrivent leurs sujets de thèse et leur intérêt sur cette thématique phare de la transition énergétique qu'est le stockage.

• <https://youtu.be/XczWoq-h2M8>

Retrouvez l'ensemble des vidéos sur la chaîne YouTube de la SCF : www.youtube.com/user/SocChimFrance

les plus modernes de chimie théorique et computationnelle. Ces XVII^e RCTF sont organisées par les membres du groupe de Chimie théorique et modélisation de l'Institut des sciences moléculaires (UMR 5255 CNRS/Université Bordeaux).

Conférences plénières au programme :

- Systèmes fortement corrélés, matériaux pour l'énergie, par Marie Liesse Doublet (Montpellier).
- Réactivité en phase condensée, solvation, milieux biologiques, par Damien Laage (Paris).
- Structure et transport en milieux poreux, diffusion des neutrons, par Virginie Marry.
- Molécules conjuguées, électronique organique, optique non-linéaire, par Yoann Olivier.
- Dynamique réactionnelle quantique, surfaces d'énergie potentielle, par Octavio Roncero (Madrid).
- Chimie quantique relativiste, champs de force, radioéléments, par Valérie Vallet (Lille).
- Spectroscopie, couplages non adiabatiques, dynamique quantique, par Alexandra Viel (Rennes).

• <https://rctf2022.sciencesconf.org>

4-7 juillet 2022

JE 2022

Journées d'électrochimie

Mons (Belgique)

Ce congrès scientifique bisannuel, organisé sous l'égide de la subdivision Electrochimie, réunit la communauté des électrochimistes francophones et des pays de la francophonie pour faire le point sur les avancées majeures du domaine. Après l'édition inaugurale en 1981 à Bruxelles, la Belgique aura le plaisir d'accueillir à nouveau ces journées, avec une édition bilingue (français ou anglais, au choix des participants).

Conférences plénières au programme :

- Matériaux et dispositifs pour supercondensateurs : où est la place de la science?, par Thierry Brousse.
- Wireless electrochemistry: from materials science to (bio) electroanalysis and beyond, par Alexander Kuhn.
- Métalloenzymes et électrocatalyse, par Elisabeth Lojou.

• <https://je2022.ulb.be>

5-7 juillet 2022

Journées scientifiques SCF-GFP Grand-Est

Besançon

Pour la première fois, la section régionale SCF Bourgogne Franche Comté et le Groupe Français des Polymères (GFP) section Est s'associent pour organiser cet événement avec pour objectif de créer des liens entre les différents laboratoires de l'est de la France, de rapprocher les membres de ces communautés et d'élargir les collaborations en direction d'autres domaines scientifiques voisins. Pour prendre en compte les spécificités de la recherche bisontine, certaines sessions seront banalisées autour du thème des capteurs environnementaux et de la contamination environnementale, de la bioingénierie des surfaces et biointerfaces et de la formulation.

Conférences plénières au programme :

- Layer-by-layer assembly in nanochannels: a highly versatile approach for the preparation of bioactive multifunctional nanotubes, par Sophie Demoustier (UCL, Belgique).
- Catalytic transformations of natural and synthetic waste into value-added chemicals, par Paul Dyson (EPFL, Suisse).
- Electrogénération de films minces par voie sol-gel, par Alain Walcarius (LCPME, Nancy).

• www.gfp-grand-est.cnrs.fr/SCFGFP2022



La « PIT-slope », une méthode simple et rapide pour classer les tensioactifs selon leur véritable « HLB »

Les tensioactifs sont des molécules amphiphiles qui se caractérisent par leur capacité à s'adsorber aux interfaces L/L, L/G et L/S et à s'auto-associer pour former des structures organisées telles que des micelles et des cristaux liquides. Ces propriétés physico-chimiques sont à l'origine de leurs propriétés applicatives en tant qu'émulsifiants, solubilisants, détergents, agents moussants, mouillants, dispersants ou encore extractants. Le descripteur le plus souvent employé pour caractériser leur amphiphilie est le HLB (« hydrophilic lipophilic balance ») qui exprime leur affinité relative pour les phases aqueuse et huileuse. Cette grandeur empirique est déterminée expérimentalement en repérant l'émulsion la plus stable avec une huile de référence. Alternativement, elle peut être estimée d'après une équation développée par Griffin en 1949 pour les tensioactifs non ioniques (échelle de 0 à 20) [1]. Elle est toutefois peu précise et difficile à estimer pour les composés ioniques et pour les biotensioactifs de structure complexe tels que les saponines, hétérosides naturels amphiphiles aux propriétés émulsifiantes, détergentes et moussantes.

Choix d'un système ternaire tensioactif/huile/eau de référence

En 1964, Shinoda introduisait le concept de la PIT (« phase inversion temperature ») pour des systèmes tensioactifs/huile/eau [2]. La PIT correspond à la température à laquelle l'affinité d'un tensioactif non ionique éthoxylé pour l'eau et l'huile s'inverse pendant le chauffage, conduisant à l'inversion d'une émulsion H/E vers une émulsion E/H. Le système tétraéthylène glycol monodécyl éther ($C_{10}E_4$)/eau/*n*-octane ($m_{\text{eau}}/m_{\text{n-octane}} = 1$) présente une PIT de 23,9 °C [3]. L'utilisation du tensioactif $C_{10}E_4$ pur permet de s'affranchir des phénomènes de partage des oligomères présents dans les alcools gras polyéthoxylés commerciaux qui perturbent la mesure. Comme le montre la figure 1, la valeur de la PIT peut être déterminée par suivi conductimétrique en fonction de la température. Le profil présente une augmentation de la conductivité pour l'émulsion H/E suivie d'une chute brutale indiquant le changement de morphologie de l'émulsion vers un système E/H de conductivité nulle [3].

Principe de la méthode « PIT-slope »

La méthode « PIT-slope » consiste à introduire des quantités croissantes d'un second tensioactif S_2 dans le système de référence précédent et à suivre l'évolution de la PIT après chaque ajout. De façon générale, un tensioactif plus hydrophile que le $C_{10}E_4$ entraîne une augmentation de la PIT, tandis qu'un tensioactif plus lipophile l'abaisse. Ce changement de PIT varie linéairement en fonction de la quantité de S_2 ajoutée. La figure 2 montre les profils de conductivité pour le triéthylène glycol dodécyl éther $C_{12}E_3$ et le dodécyl sulfate de sodium $C_{12}SO_4Na$ en fonction de la fraction molaire x_2 ajoutée au système 3 % $C_{10}E_4$ /*n*-octane/ 10^{-2} M $NaCl_{\text{aq}}$. L'ajout de $C_{12}E_3$ entraîne une diminution progressive de la PIT (figure 2A). $C_{12}E_3$ est moins hydrophile que $C_{10}E_4$. À l'inverse, $C_{12}SO_4Na$ est plus hydrophile que $C_{10}E_4$ en raison du caractère ionique de sa tête

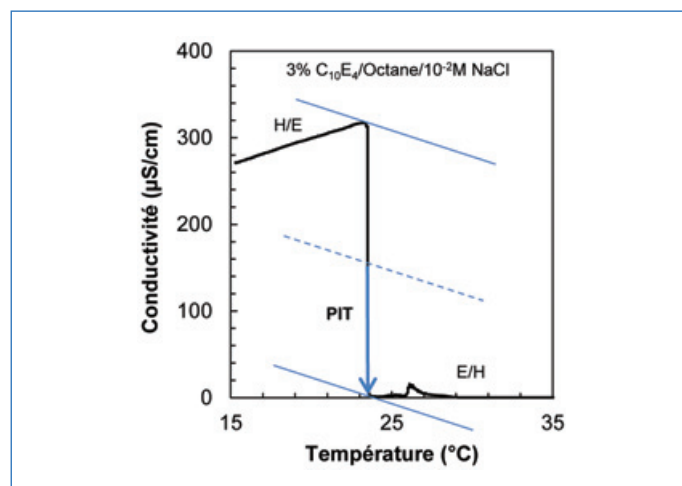


Figure 1 - Profil de conductivité en fonction de la température pour le système de référence 3 % $C_{10}E_4$ /*n*-octane/ 10^{-2} M $NaCl_{\text{aq}}$ sous agitation.

polaire. Comme attendu, il augmente la PIT du système de référence (figure 2B). La figure 3 représente l'évolution de la PIT en fonction de la fraction molaire x_2 pour différents $C_{12}E_j$.

L'évolution de la PIT avec la fraction molaire x_2 est parfaitement linéaire jusqu'à des fractions molaires assez élevées (0,2 à 0,4). La pente des différentes droites, $dPIT/dx_2$, baptisée « PIT-slope », caractérise le rapport hydrophile/lipophile du tensioactif S_2 [4]. Une PIT-slope positive indique une hydrophilie supérieure à celle du $C_{10}E_4$, tandis qu'une valeur négative correspond à un tensioactif plus lipophile. À noter que pour des tensioactifs de grade technique ou des mélanges complexes dont la masse molaire n'est pas connue, la concentration du tensioactif est exprimée en pourcentage massique ; la pente dans ce cas est notée $dPIT/dC$ [3].

Échelle de classification des tensioactifs selon la PIT-slope

La figure 4 illustre la classification de tensioactifs ioniques et non ioniques selon leur « véritable » HLB mesurée par la méthode PIT-slope.

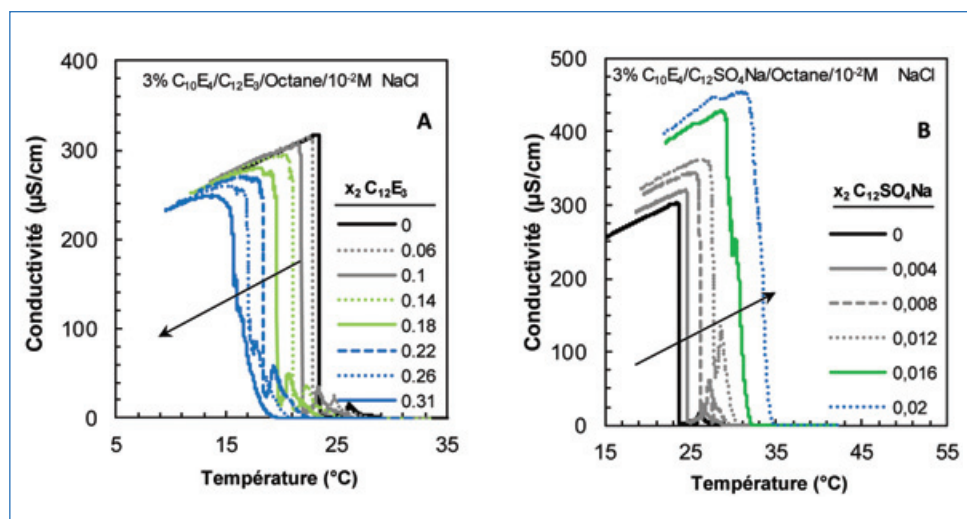


Figure 2 - Évolution de la conductivité avec la température pour deux systèmes agités 3 % $C_{10}E_4$ / S_2 /*n*-octane/ 10^{-2} M $NaCl$. x_2 = fraction molaire du tensioactif S_2 ajouté dans le mélange $C_{10}E_4 + S_2$ = $C_{12}E_3$ (A) et $C_{12}SO_4Na$ (B).

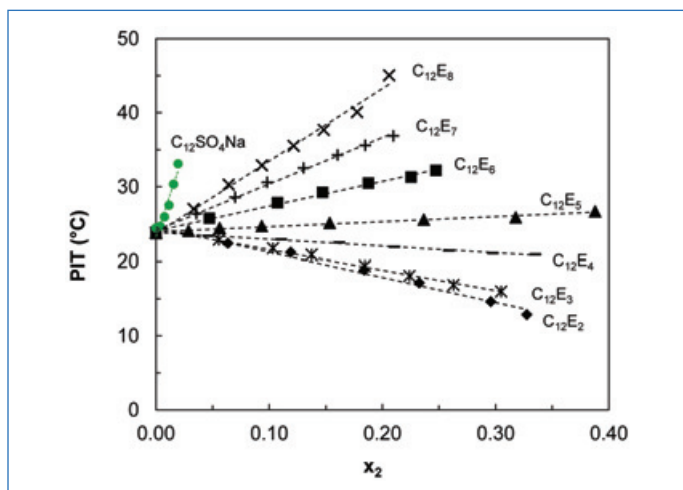


Figure 3 - Évolution de la température d'inversion de phase (PIT) en fonction de la fraction molaire du tensioactif ajouté S_2 (x_2) au système de référence 3 % $C_{10}E_4/C_{12}E_7$ /octane/ 10^{-2} M NaCl_{aq}. $S_2 = C_{12}SO_4Na$ (●); $C_{12}E_8$ (×); $C_{12}E_7$ (+); $C_{12}E_6$ (■); $C_{12}E_5$ (▲); $C_{12}E_4$ (-); $C_{12}E_3$ (*); $C_{12}E_2$ (◆).

Exemples d'applications

Formulation de microémulsions triphasiques « optimales »

La figure 4 montre que le $C_{12}Gly_2$ a pratiquement la même valeur de PIT-slope que le $C_{10}E_4$. On peut donc s'attendre à ce que ces deux tensioactifs aient un comportement similaire dans un mélange eau/huile à l'équilibre. C'est effectivement ce qui est observé en présence d'eau et d'octane puisque les deux tensioactifs $C_{10}E_4$ et $C_{12}Gly_2$ conduisent, à l'équilibre, à un système triphasique appelé Winsor III correspondant à une phase microémulsion en équilibre avec une phase aqueuse et une phase huileuse. Ce raisonnement s'applique également aux tensioactifs ioniques puisque le dihexylméthane sulfonate de magnésium $[DiC_6CHSO_3]_2Mg$ ($dPIT/dx = 240$ °C) et le molybdate de dioctyldiméthyl ammonium $[DiC_8NMe_2]_2MoO_4$ ($dPIT/dx = 246$ °C) forment un système VIII à 25 °C avec le benzène [5]. Le $[DiC_8NMe_2]_2MoO_4$ est un « tensioactif catalytique équilibré » qui catalyse la dismutation de l'eau oxygénée en oxygène singulet (1O_2), une espèce excitée oxydante puissante et sélective des composés organiques insaturés. Le système de microémulsion triphasique, de par sa nanostructuration et ses phases en excès, constitue un milieu réactionnel original parfaitement adapté aux réactions impliquant des espèces à faible durée de vie [6].

Substitution de tensioactifs pour l'émulsification de résines de peinture végétalisées

Ce deuxième exemple concerne une application industrielle de mise en émulsion aqueuse d'un polymère hydrophobe formant le feuil de peinture après séchage. L'émulsion est préparée en ajoutant progressivement de l'eau à un mélange initial de polymère et de tensioactifs jusqu'à obtenir une émulsion H/E. Le choix du tensioactif est crucial car s'il est mal choisi, l'inversion de phase eau/polymère → polymère/eau ne se produit pas. Les tensioactifs utilisés pour ce procédé sont des non-ioniques polyéthoxylés avec une valeur de PIT-slope dans un intervalle précis. La PIT-slope a permis de trouver des mélanges alternatifs de tensioactifs plus « verts », alors qu'individuellement ils ne permettaient pas d'inverser l'émulsion. Ainsi, un mélange d'alkylpolyglucoside et d'alkyl éthoxy sulfate de sodium dans une proportion telle que la PIT-slope du mélange se situe dans l'intervalle 20-24 °C/%m s'est révélé satisfaisant pour formuler une émulsion H/E fluide en partant d'une résine polymérique extrêmement visqueuse [7].

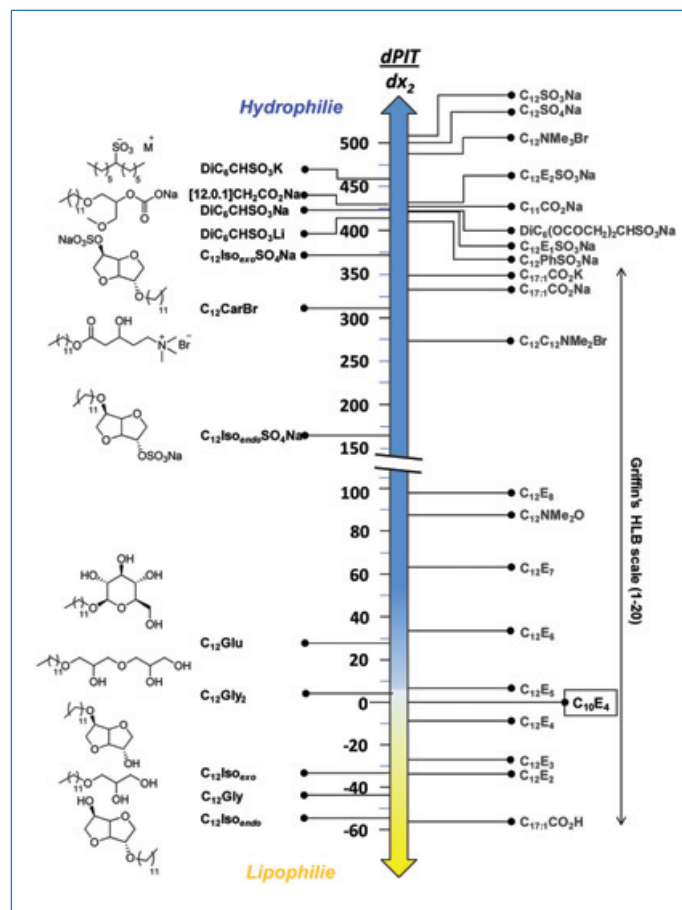


Figure 4 - Classification des tensioactifs selon leur « véritable » HLB mesurée par la méthode « PIT-slope » en comparaison à l'échelle de Griffin.

En conclusion, la PIT-slope est une méthode simple, rapide et robuste qui permet de classer les tensioactifs selon leur HLB, quels qu'ils soient. Elle présente un grand intérêt dans la comparaison des tensioactifs entre eux pour le remplacement des composés pétro-sourcés et pour la prédiction de leurs propriétés fonctionnelles.

- [1] W.C. Griffin, Classification of surface-active agents by HLB, *J. Soc. Cosmet. Chem.*, **1949**, *1*, p. 311-326.
- [2] K. Shinoda, H. Arai, The correlation between phase inversion temperature in emulsion and cloud point in solution of nonionic emulsifier, *J. Phys. Chem.*, **1964**, p. 683485-3490.
- [3] J.F. Ontiveros, C. Pierlot, M. Catté, V. Molinier, J.-L. Salager, J.-M. Aubry, A simple method to assess the hydrophilic lipophilic balance of food and cosmetic surfactants using the phase inversion temperature of $C_{10}E_4/n$ -octane/water emulsions, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, **2014**, *458*, p. 32-39.
- [4] J.F. Ontiveros, C. Pierlot, M. Catté, V. Molinier, J.-L. Salager, J.-M. Aubry, Structure-interfacial properties relationship and quantification of the amphiphilicity of well-defined ionic and non-ionic surfactants using the PIT-slope method, *J. Colloid Interface Sci.*, **2015**, *448*, p. 222-230.
- [5] J.F. Ontiveros, B. Hong, K. Aramaki, C. Pierlot, J. Aubry, V. Nardello-Rataj, Cation effect on the binary and ternary phase behaviors of double-tailed methanesulfonate amphiphiles, *J. Surfactants Deterg.*, **2021**, *24*, p. 401-410.
- [6] V. Nardello-Rataj, L. Caron, C. Borde, J.-M. Aubry, Oxidation in three-liquid-phase microemulsion systems using "balanced catalytic surfactants", *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, *130*, p. 14914-915.
- [7] M. Royer, Émulsifiants biosourcés et émulsification de résines de peinture végétalisées, Thèse de doctorat, Université de Lille, **2016**.

Cette fiche a été préparée par **Jesús F. ONTIVEROS**, maître de conférences (jesus-fermin.ontiveros@centralelille.fr), **Christel PIERLOT**, maître de conférences (christel.pierlot@centralelille.fr), **Mike ORTEGA**, assistant ingénieur (mike.ortega-vaz@univ-lille.fr), **Jean-Marie AUBRY**, professeur émérite (jean-marie.aubry@univ-lille.fr) et **Véronique NARDELLO-RATAJ**, professeure des universités (veronique.rataj-nardello@univ-lille.fr), équipe CÍSCO (Colloïdes Catalyse Oxydation), UCCS, Centrale Lille Institut. Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON (jpfoulon@wanadoo.fr). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur www.lactualitechimique.org.

Abonnez-vous pour un an (numéros spéciaux inclus)

Cochez la case qui correspond à l'abonnement auquel vous voulez souscrire :

	Abonnement papier + électronique*			Abonnement électronique seul*	
	France métropolitaine	DROM-COM / Zone 1**	Zone 2**	France / Étranger	
Particuliers	<input type="checkbox"/> 105 €	<input type="checkbox"/> 145 €	<input type="checkbox"/> 160 €	Particuliers	<input type="checkbox"/> 55 €
Lycées	<input type="checkbox"/> 120 €	<input type="checkbox"/> 160 €	<input type="checkbox"/> 175 €	Lycées	<input type="checkbox"/> 70 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 205 €	<input type="checkbox"/> 245 €	<input type="checkbox"/> 260 €	Institutions	<input type="checkbox"/> 155 €

* Courriel obligatoire ** Zone 1 : Union européenne, Royaume-Uni et Suisse; Zone 2 : reste du monde.

Complétez votre collection

Les sommaires de tous les numéros peuvent être consultés sur notre site www.lactualitechimique.org

Tous les articles et numéros de plus de cinq ans sont téléchargeables gratuitement

Numéros spéciaux également disponibles en **version électronique** sur le site à un tarif préférentiel

Dernières parutions :

- Répondre aux menaces : explosifs, déminage et management de crises (avril 2022) : 20 €
- La chémobiologie explore le vivant (décembre 2021) : 20 €
- Hydrogène décarboné (octobre 2021) : 20 €
- De la chimie du solide aux batteries de demain (juillet-août 2021) : 20 €
- Substances naturelles et chimie durable (mai 2021) : 20 €
- Radiochimie et chimie sous rayonnement (mars-avril 2021) : 32 €
- Le jubilé du Groupe Français d'Études & d'Applications des Polymères (nov.-déc.-janv. 2020-2021) : 32 €
- Pigments et colorants (oct.-nov. 2019) : 32 €
- La montée en puissance de la RPE (sept. 2019) : 20 €
- Les applications actuelles de la calorimétrie (juin 2019) : 20 €
- Quelles réponses aux menaces chimiques, biologiques et radiobiologiques ? (mai 2019) : 20 €
- Les startups de la chimie (mars-avril 2019) : 32 €
- La chimie supramoléculaire (juin-juil.-août 2018) : 32 €
- Chimie et développement durable (mars-avril 2018) : 32 €
- Polymères de demain, boosters d'innovations (oct.-nov. 2017) : 32 €
- Chimie et miniaturisation (mai-juin 2017) : 32 €
- La sonochimie, ou comment les ultrasons font vibrer la chimie ! (sept. 2016) : 20 €
- Chimie et transition énergétique (juin-juil.-août 2016) : 32 €



Collection "Chimie et...", co-éditée et diffusée par EDP Sciences

Dernières parutions :

- Chimie et énergies nouvelles (mars 2022) : 25 €
- Chimie et lumière (janv. 2021) : 25 €
- Chimie et nouvelles thérapies (sept. 2020) : 25 €
- Chimie et Alexandrie dans l'Antiquité (janv. 2020) : 25 €
- Chimie, nanomatériaux, nanotechnologies (sept. 2019) : 25 €
- Chimie et biologie de synthèse - Les applications (janv. 2019) : 25 €
- Chimie, aéronautique et espace (sept. 2018) : 25 €
- La chimie et les sens (janv. 2018) : 25 €
- La chimie et les grandes villes (sept. 2017) : 25 €
- Chimie, dermo-cosmétique et beauté (janv. 2017) : 25 €
- Chimie et changement climatique (sept. 2016) : 25 €
- Chimie et expertise : santé et environnement (janv. 2016) : 25 €



À commander
chez votre libraire
ou directement sur
laboutique.edpsciences.fr

Bon de commande

Nom Prénom

Adresse (pour les particuliers, préciser l'adresse personnelle)

Code postal Ville Pays

Tél Courriel

Adresse IP (pour l'abonnement multiple).....

Montant total de la commande (frais de port inclus) :

Mode de règlement

- sur facturation (joindre obligatoirement le bon de commande)
- par chèque bancaire ou postal libellé à l'ordre de la SCF souhaite recevoir une facture acquittée
- par virement bancaire ou postal
France Société Générale Paris Seine Amont, 03081/00037265820/87 CCP Paris 30041 Compte 070786U020/90
Étranger IBAN FR7630003030810003726582087 Swift.Sogefrpp
- par carte bancaire (Visa, Eurocard Mastercard) Validité
Cryptogramme visuel (les trois derniers chiffres du numéro imprimé au dos)

L'Actualité Chimique

SCF, Service Abonnement, 250 rue Saint-Jacques, 75005 Paris - Tél. : 01 40 46 71 66/60.

abonnement@lactualitechimique.org - www.lactualitechimique.org

35e

ÉDITION

35e

31 mai - 1 juin 2022

Messe Frankfurt, Allemagne

Le rendez-vous incontournable de la chimie fine et spécialisée

Découvrez des solutions sur mesure & substances innovantes pour
votre entreprise tout en développant votre réseau de contacts :

- Synthèse à façon
- Produits pharmaceutiques
- Produits chimiques fins
- Produits intermédiaires
- Produits agrochimiques
- Peintures et revêtements
- Produits issus de la chimie verte
- Nettoyage domestique et industriel
- Biocatalyseurs
- Produits chimiques d'origine biologique
- Produits cosmétiques
- Produits chimiques pour l'électronique
- Et bien plus encore

**Conférences et tables rondes
offrant des informations
précieuses sur l'industrie !**

- Agrochemical Lecture Theatre
- Chemspec Careers Clinic
- Pharma Lecture Theatre
- Regulatory Services Lecture Theatre
- RSC Lecture Theatre
- Innovative Start-ups



Plus d'informations :

www.chemspeceurope.com

Organisateur :

MACKBROOKS Part of
exhibitions **RX**