



RAPPORT SCIENTIFIQUE / 2019



*maîtriser le risque |
pour un développement durable*



Créé en 1990, l'Ineris, Institut national de l'environnement industriel et des risques, est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique.

04 /

Un ancrage solide dans la recherche pour assurer la qualité et la crédibilité de l'expertise

06 /

Une année de recherche à l'Ineris

08 /

Maîtriser les risques liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire



18 /

Comprendre et maîtriser les risques à l'échelle d'un site industriel et d'un territoire

40 /

Caractériser les dangers des substances et leurs impacts sur l'Homme et la biodiversité

64 / annexes

L'excellence de la recherche pour nourrir l'expertise de l'Institut /



Raymond COINTE, directeur général

“ Conforter le rôle de l'Institut comme expert public national de référence sur la maîtrise des risques industriels et environnementaux, tant au service des pouvoirs publics que des entreprises, en s'appuyant sur une recherche du meilleur niveau.



Mehdi GHOREYCHI, directeur scientifique

L'Institut mène une recherche essentiellement appliquée, menée en partenariat étroit avec les meilleures équipes académiques et d'organismes de recherche, en France, en Europe et à l'international. Nos travaux, en prise avec le terrain, s'appuient sur des expérimentations et de la modélisation. Ils s'inscrivent dans une continuité avec les activités d'appui aux politiques publiques, d'expertise-conseil et certification au profit des entreprises et rendent ainsi le positionnement de l'Ineris unique dans le paysage scientifique.

Les résultats présentés dans ce rapport scientifique sont articulés autour des thèmes structurants de notre activité : maîtriser les risques liés à la transition énergétique et l'économie circulaire, comprendre et maîtriser les risques à l'échelle d'un site industriel et d'un territoire, caractériser les dangers des substances et produits et leurs impacts sur l'homme et la biodiversité, via l'air, l'eau et le sol. Les articles présentés, extraits des publications, montrent que les travaux menés par les équipes de l'Institut sont au cœur des défis actuels et à venir, en matière de maîtrise des risques : sécurisation des stockages d'énergie,

maîtrise des risques liés à l'hydrogène, qualité de l'air, sécurité des sites industriels, exposome, compréhension des comportements et des phénomènes d'instabilité des sols et des cavités souterraines...

L'Institut s'appuie sur ses instances de gouvernance scientifique pour l'évaluation de ses équipes et ses travaux de recherche. En 2019, l'Ineris a continué d'atteindre ses objectifs de recherche. Nous y avons consacré 20,2 % de notre activité, notamment en participant à 41 projets européens et en publiant 97 articles dans des revues à comité de lecture, référencées dans la base ISI Web of Science. Dans le cadre de la préparation du futur contrat d'objectifs et de performance 2021/2025, l'Ineris a produit en 2019 un rapport d'auto-évaluation, en vue de son évaluation par le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres), en 2020.

Merci aux équipes de l'Institut pour leur mobilisation et le travail remarquable accompli au quotidien, qui contribue activement au rayonnement de l'Ineris en France et à l'international.

Les chiffres clés de la recherche en 2019



20,2%
de l'activité
de l'Institut
est consacrée
à la recherche



Projets nationaux et internationaux

2 projets
européens
coordonnés par l'Ineris

70 projets
soumis aux appels à projets de recherche
(49 nationaux, 21 européens)

42% de taux de succès à l'Europe



Production scientifique

398 publications
et communications
avec la participation d'auteurs Ineris

97 publications dans des revues
à comité de lecture référencées dans la base ISI Web of
Science dont
• **41%** avec 1^{er} auteur Ineris
• **24 articles de revues ISI** dont le doctorant
est premier auteur

249 communications
présentées dans **120** manifestations
scientifiques et techniques, en France
et dans le monde (**65%** de congrès
internationaux)



6 contributions
dans des ouvrages



Doctorats et HDR

38 doctorants
dont 13 thèses soutenues en 2019

18 titulaires
d'une habilitation à diriger des recherches
(HDR), dont 2 HDR ont été soutenues en 2019



Collaborations

2 unités mixtes de recherche
Peritox avec l'UPJV d'Amiens (toxicologie prénatale) et
Sebio avec les universités de Champagne-Ardenne et
du Havre-Normandie (écotoxicologie.)

Participation (ou membre de) **3** alliances
nationales de recherche (AllEnvi, Ancre et Aviesan)

Une année de recherche

22 janvier



Le prix Jean Bricard pour Somik Chakravarty

Remise du prix Jean Bricard à Somik Chakravarty, titulaire d'une thèse UTC-Ineris sur la pulvérulence des poudres, lors du congrès français sur les aérosols à Paris. Ses travaux ont porté sur les propriétés mécaniques de poudres non-cohésives et cohésives et l'impact sur la pulvérulence.

6 mars



Colloque international sur la priorisation des contaminants émergents dans les eaux résiduaires urbaines

Organisation du colloque « *Prioritisation of Emerging Contaminants in Urban Wastewater* » dans le cadre du projet Aquality European Training Network et en collaboration avec le réseau Norman. Il se tenait à l'École polytechnique (Palaiseau), comptant plus de 70 participants.

Juin



Stabilité des réservoirs miniers ennoyés : lancement du projet RAFF

Lancement du projet de recherche européen RAFF (*Risk Assessment of Final pits during Flooding*) en Pologne, dont l'objectif est de traiter des risques géotechniques liés à l'inondation des mines de charbon à ciel ouvert en Europe. L'Ineris contribue à la méthodologie d'analyse de risques.

6 et 7 juin



Réduire les propriétés dangereuses des phtalates des sols en PVC - Lancement du projet H2020 Circular Flooring

Lancement du projet européen Circular Flooring à Bruxelles. Le projet a pour objectif d'étudier une innovation technologique permettant de transformer les phtalates contenus dans le PVC usagé, employé dans les dalles de sol, en produits non dangereux. L'Ineris est en charge du développement et de l'application des outils de modélisation et d'aide à la décision.

1^{er} - 6 septembre



Congrès européen de mécanique des sols et de la géotechnique, Reykjavik

Participation de l'Institut au 17^e congrès européen de mécanique des sols et de la géotechnique (ECSMGE-2019), organisé à Reykjavik (Islande). L'Ineris a présenté ses travaux de recherche relatifs à la mitigation de l'aléa « fontis » par l'utilisation d'un géosynthétique intelligent (équipé de capteurs). Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet Ademe REGIC et ont été réalisés, notamment, à partir d'expérimentations physiques menées sur le simulateur de mouvement de terrain de l'Institut.

12 septembre

Innovations dans la surveillance de l'environnement et le profilage de contaminants

Succès d'un projet Ineris, lauréat d'un appel à manifestation d'intérêt lancé par l'administration pour expérimenter des solutions d'intelligence artificielle. D'une durée d'un an, il a pour objectif d'automatiser le traitement des données produites par des spectromètres de masse pour identifier les molécules contaminant l'environnement et profiler les sources de pollution.

à l'Ineris : faits marquants /

16 mai

Congrès international sur la chimie verte

Participation au congrès international sur la chimie verte (*International Symposium on Green Chemistry - ISGC*) organisé à La Rochelle. L'Ineris a présenté les travaux relatifs au design *in silico* de nouveaux surfactants dérivés de sucre, dans une perspective de substitution de tensioactifs commerciaux issus du pétrole à partir de modèles prédictifs par modélisation moléculaire. Ces travaux sont menés en collaboration avec l'UTC de Compiègne et l'UPJV d'Amiens dans le cadre du projet Amphifoam, via un financement de la SAS PIVERT.

5 et 6 juin



Terres rares - Réunion du projet H2020 SecREETs

Accueil d'une réunion d'avancement du projet de recherche européen SecREETs (*Secure European Critical Rare Earth Elements*). Ce projet s'inscrit dans le contexte de la récupération de terres rares (éléments métalliques de la famille des lanthanides) à partir de flux de résidus de production d'engrais. L'Ineris, partenaire, contribue à la caractérisation des substances critiques et la conception sûre des futures unités de productions sur les pilotes industriels.

18 juin



Emissions de polluants dans l'air : journée de restitution du programme Cortea

Participation à la 4^e journée de restitution du programme de recherche Cortea (connaissance, réduction à la source et traitement des émissions dans l'air), organisée par l'Ademe, à Paris. L'Ineris y présente les résultats du projet de recherche Carablack (Caractérisation au rejet d'installations, des émissions atmosphériques de black carbon : facteurs d'émission de quelques sources de combustion).

27 juin



Champs et ondes électromagnétiques : l'expertise de l'Ineris reconnue à l'international

Participation au congrès annuel BioEM à Montpellier, co-organisé par la société de bioélectromagnétisme (BEMS) et l'association européenne de bioélectromagnétisme (EBEA). L'expert de l'Ineris René De Seze a été élu à la présidence de BEMS pour la période 2019-2020 et la doctorante Jasmina Wallace a remporté le second prix Poster.

2 & 3 octobre



Valorisation durable des terrils miniers : lancement du projet européen SUMAD

Lancement du projet de recherche européen SUMAD (*Sustainable Use of Mining wAste Dumps*) à Nottingham (Royaume-Uni), dont le but est de déterminer et évaluer des méthodes de revalorisation des terrils en vue de contribuer à la transition énergétique des régions minières. L'Ineris, partenaire, contribue en particulier à l'étude de la stabilité des terrils à l'aide de la modélisation physique et numérique.

2 décembre

Naissance de la plateforme PEPPER

La plateforme public-privé PEPPER est destinée à organiser la pré-validation de méthodes de caractérisation des perturbateurs endocriniens. Elle regroupe des associations professionnelles, des entreprises individuelles, la Fondation Maison de la chimie et des ministères impliqués dans la Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens au premier rang desquels le ministère de la Transition écologique. Issue d'un projet piloté par l'Ineris et notifié en juin 2019 par le Programme d'investissement d'avenir, la plateforme est dorénavant portée par une association de loi 1901 dont l'assemblée générale constitutive s'est tenue le 2 décembre 2019.





Maîtriser les risques liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire

- 10 / **Filière hydrogène-énergie** : développement et mise au point de modèles phénoménologiques et de maîtrise des risques d'explosion
- 12 / **Changement climatique et qualité de l'air** : focus sur les particules fines
- 14 / **Tendances de la qualité de l'air en Europe entre 1990 et 2015** : quels impacts sanitaires ?
- 16 / **Évaluation de l'intégrité de puits en vue de la fermeture définitive en sécurité de cavités salines** - Exemple de l'exploitation de sel de Matacães au Portugal

Filière hydrogène-énergie : développement et mise au point de modèles phénoménologiques et de maîtrise des risques d'explosion

Auteur :
Christophe PROUST

Depuis quelques décennies, l'hydrogène n'est plus seulement considéré comme un produit industriel nécessaire en métallurgie, chimie, électronique... mais suscite l'intérêt du secteur de l'énergie et des transports en tant que « vecteur d'énergie » au même titre, ou presque, que l'électricité. Le déploiement de filières industrielles de l'hydrogène-énergie est un réel enjeu pour les acteurs économiques et les pouvoirs publics. Il est vrai que l'hydrogène-énergie pourrait être une solution pour la réduction de l'empreinte carbone des transports et le stockage de l'énergie par exemple mais le risque d'explosion associé à ce produit ne peut pas être mésestimé. Ainsi pour qu'une technologie relevant de la filière hydrogène-énergie soit acceptée, il faut absolument pouvoir démontrer que ce risque est maîtrisé. L'objectif des travaux présentés dans cet article est de mettre au point une boîte à outils permettant de concevoir et dimensionner la

sécurité des applications hydrogène comme on peut le faire pour un circuit hydraulique au moyen d'utilitaires de mécanique des fluides.

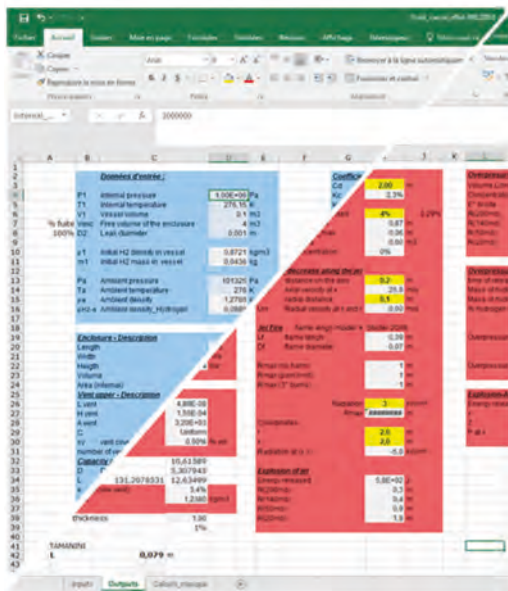
STRUCTURE DE L'OUTIL

L'étude des filières hydrogène-énergie [1] montre que beaucoup d'applications seront abritées dans des conteneurs. Un examen rapide révèle que même des fuites modérées (sur raccords) sont susceptibles de produire des situations dangereuses et le retour d'expérience montre que les explosions de gaz (pas forcément d'hydrogène) dans des conteneurs peut produire des effets significatifs. Il faut impérativement pouvoir dimensionner des barrières de sécurité et pour cela il faut savoir calculer précisément les scénarios d'accident. Une technique des « nœuds papillons » a été retenue [2] associée à une « matrice de criticité » spécifique intégrant les effets domino sur les installations externes, l'un des enjeux étant que l'application hydrogène n'aggrave

pas le risque global du lieu (entreprise par exemple) où elle est installée (figure 1). L'analyse des connaissances nécessaires pour atteindre l'objectif a montré [3] que les écueils principaux sont la faible représentativité des bases de données relatives aux taux de défaillance des composants et la précision des modèles de prédiction des caractéristiques des atmosphères explosives (ATEX) et des explosions.

VERS LA MISE AU POINT D'UNE BASE DE DONNÉES « DÉFAILLANCES » REPRÉSENTATIVE

Plusieurs auteurs ont montré que les bases de données (actuelles) de taux de défaillances des composants ne sont pas et ne peuvent pas être représentatives des technologies considérées. Même si on commence à disposer de données plus pertinentes, la défaillance est le résultat d'un composant et d'un usage. À partir d'une mise en équation des lois de comportement



Ranks	Definitions	Insides	Outsides
C1	<ul style="list-style-type: none"> No-(significant)-damage-inside-the-container.-A-pressure-wave-and-a-flame-can-come-out-but-no-projectile. No-(significant)-damage-and-no-injury-outside The-process-is-still-functional. 	<ul style="list-style-type: none"> <50-mbar <2-kW/m² 	<ul style="list-style-type: none"> <20-mbar <1.5-kW/m²
C2	<ul style="list-style-type: none"> Minor-damage-inside-the-container.-A-pressure-wave-and-a-flame-can-come-out-but-no-projectile. Outside,-minor-damages-and-injuries. The-system-may-be-impaired-and-needs-at-least-to-be-checked. 	<ul style="list-style-type: none"> <140-mbar <5-kW/m² 	<ul style="list-style-type: none"> <50-mbar <3-kW/m²
C3	<ul style="list-style-type: none"> Significant-damages-inside-in-the-container.-A-pressure-wave-and-a-flame-can-come-out-but-no-projectile. Outside,-significant-damages-and-injuries. The-system-needs-significant-repairs-and-maybe-definitely-out-of-service. 	<ul style="list-style-type: none"> <200-mbar <8-kW/m² 	<ul style="list-style-type: none"> <140-mbar <5-kW/m²
4	<ul style="list-style-type: none"> Catastrophic-damages-to-the-device.-Potential-rupture-of-the-container-that-could-lead-to-dominos-effects. Catastrophic-damages-outside-and-potential-loss-of-lives. The-system-is-totally-destroyed 	<ul style="list-style-type: none"> >200-mbar >8-kW/m² 	<ul style="list-style-type: none"> >140-mbar >5-kW/m²

Figure 1 Structure de l'outil et critères de sévérité des accidents.

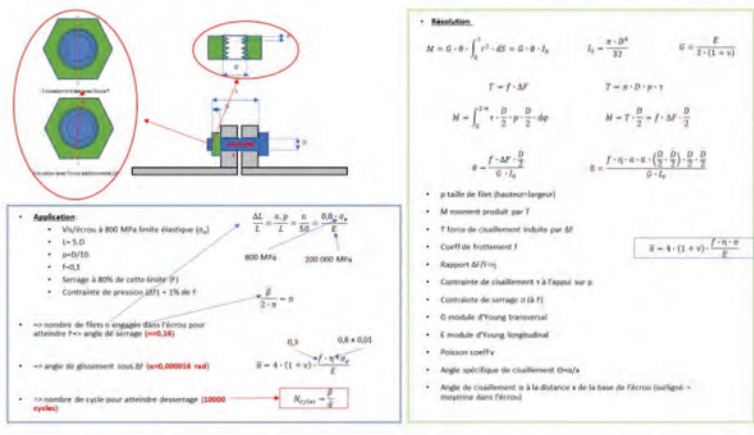


Figure 2 Exemple de prédiction du desserrage d'une bride plate sous l'effet de cycles de compression-dépressurisation.

mécanique des composants et d'une description précise des usages (procédure de montage par exemple), nous avons mis au point une sorte de « générateur » de taux de défaillance (figure 2). Malgré le caractère exploratoire de cette méthode, elle est assez opérationnelle et la confrontation au retour d'expérience est tout à fait encourageante. Il semble ainsi possible de prédire des taux de défaillance même si des données expérimentales ne sont pas disponibles.

FORMATION DES ATEX ET EXPLOSIONS

De nombreux modèles ont été proposés pour décrire les caractéristiques des atmosphères explosives (ATEX) et des explosions consécutives à une fuite d'hydrogène sous pression. L'analyse révèle que ces modèles sont souvent contradictoires car basés sur des données expérimentales

fragmentaires. Sur la base d'essais réalisés dans un conteneur de 4 m³, des modifications ont été apportées à certains de ces modèles. Les plus significatives concernent l'effet de la distance entre le point de fuite et les parois et l'introduction explicite des instabilités de combustion dans le processus de propagation de flamme via le modèle de Taylor généralisé mis au point par l'Ineris voici une dizaine d'années. Les résultats obtenus sont en accord avec pratiquement toutes les données disponibles (figure 3).

Un dimensionnement de la sécurité a finalement été constitué pour des applications hydrogène-énergie. Bien évidemment des incertitudes demeurent en particulier sur les effets d'échelle et les explosions externes (explosions secondaires) que les développements industriels en cours devraient permettre d'étudier.

ABSTRACT /

Since some decades hydrogen is considered as a potential energy carrier offering good opportunities to mitigate carbon emissions in transportation and solve some storage issues of energy. But safety should be ensured and demonstrated. In this paper, an attempt is presented in order to develop a tool box enabling the dimensioning of safety measures for hydrogen energy applications. The bow tie technique is used with a specific risk matrix (figure 1). The failure rate of the components can be estimated even if experimental data are lacking using mechanical models (figure 2). Detailed experiments were performed to modify phenomenological models to predict the characteristics and the flammable clouds and of the explosions. A good agreement with the available data is claimed (figure 3).

Références

[1] Duclos, A., Proust C., Daubech J., Verbecke F., Engineering safety in hydrogen-energy applications, Proceedings of the International conference on hydrogen safety (ICH5 2015), 2015
 [2] Duclos A., Développement de modèles phénoménologiques et de maîtrise des risques d'explosion pour la filière émergente hydrogène-énergie, thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, soutenue le 29 octobre 2019.
 [3] Proust C., Fire and explosion safety in hydrogen containing processes: state of the art and outstanding questions, Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9), 2019.

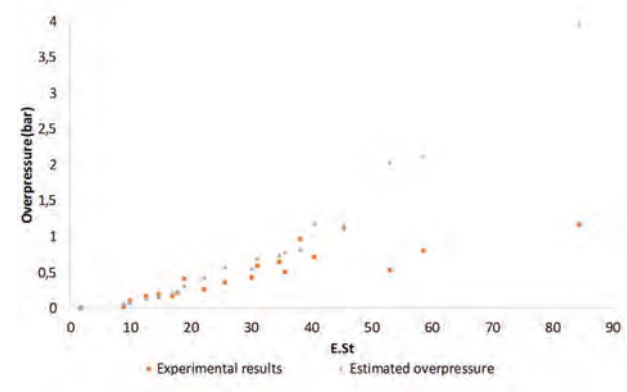
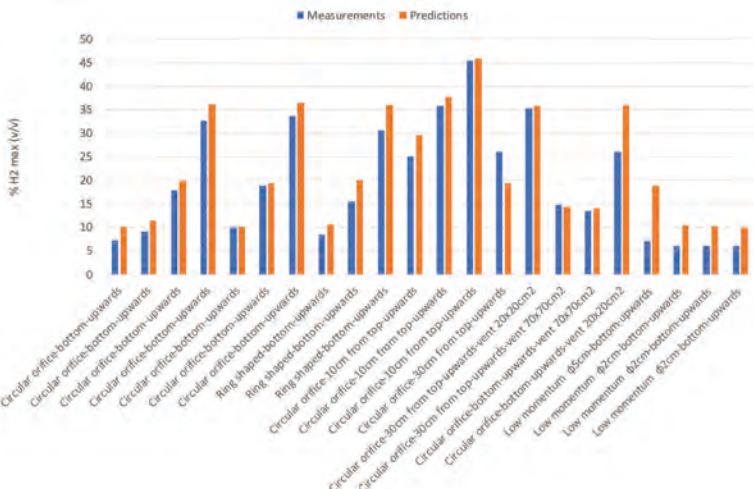


Figure 3 Comparaison des modèles modifiés de formation d'ATEX et d'explosion dans un conteneur (en bleu : mesures, en rouge : prédictions du modèle).

Changement climatique et qualité de l'air : focus sur les particules fines

Auteur :
Augustin COLETTE

Les liens entre changement climatique et qualité de l'air sont multiples, et influencent aussi bien les stratégies d'atténuation (politiques de gestion) que d'adaptation (impacts futurs du changement climatique). Notamment, ils interrogent sur l'impact du climat futur qui pourrait être tel que les stratégies actuelles d'amélioration de la qualité de l'air deviennent insuffisantes.

Sur le plan de l'atténuation, les sources anthropiques de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques sont souvent les mêmes. Les mesures de gestion visant à améliorer la qualité de l'air ou à atténuer le changement climatique auront donc en général des effets partagés, qui peuvent constituer des cobénéfices ou des effets contradictoires. Il y a des cobénéfices très importants

à rechercher, notamment en ce qui concerne les mesures d'efficacité énergétique. Mais il y a aussi des antagonismes : le diesel ou le recours au chauffage domestique au bois en sont deux exemples bien connus.

Certains polluants contribuent aussi à l'effet de serre (carbone suie, ozone). Cibler ces substances permet d'optimiser les cobénéfices. D'autant qu'ils ont souvent une durée de vie dans l'atmosphère inférieure à celle du CO₂, et pourraient donc avoir un effet à plus court terme. On parle d'ailleurs de polluants climatiques à courte durée de vie.

Le changement climatique conduit par ailleurs à la modification des phénomènes météorologiques régissant l'évolution des polluants dans l'atmosphère. L'été, l'augmentation de la fréquence et/ou de la sévérité des

vagues de chaleur renforce la pollution à l'ozone. On parle de pénalité climatique, son importance est à présent bien documentée. Elle est d'autant plus préoccupante qu'elle est du même ordre que l'évolution récente de la pollution à l'ozone malgré des efforts substantiels sur les réductions d'émissions [1].

Pour les particules, la situation est plus complexe notamment car le changement climatique peut avoir une influence différente pour les différents types d'aérosols (organique, inorganiques, d'origine biotique ou anthropique, poussières minérales, etc.). Les travaux de thèse d'Arineh Cholokian visaient à mieux cerner cet effet.

MÉTHODOLOGIE

L'analyse repose sur la chaîne de modélisation qualité de l'air & climat développée à l'Ineris dans le cadre du projet SALUT'AIR [2]. Cette chaîne est constituée de quatre modèles : le modèle de système terre de l'IPSL qui contribue aux analyses du GIEC, un modèle de chimie troposphérique globale (INCA), un modèle de climat régional (WRF) et le modèle de qualité de l'air CHIMERE codéveloppé par l'Institut et le CNRS [3]. Plusieurs centaines d'années ont été modélisées avec ces outils afin de couvrir l'évolution du climat au cours du XXI^e siècle, mais aussi pour explorer diverses études de sensibilité.

RÉSULTATS

En regardant tout d'abord le seul effet du changement climatique (figure 1), c'est-à-dire l'impact du réchauffement mais aussi les modifications qui en découlent pour les autres paramètres météorologiques d'importance pour la qualité de l'air, on constate un effet notable pour les aérosols organiques secondaires formés à partir d'émissions biotiques (BSOA). Non seulement ces émissions augmentent sous l'effet du réchauffement (et conduisent aussi à la formation d'ozone), mais le mécanisme de formation des BSOA est aussi favorisé. La

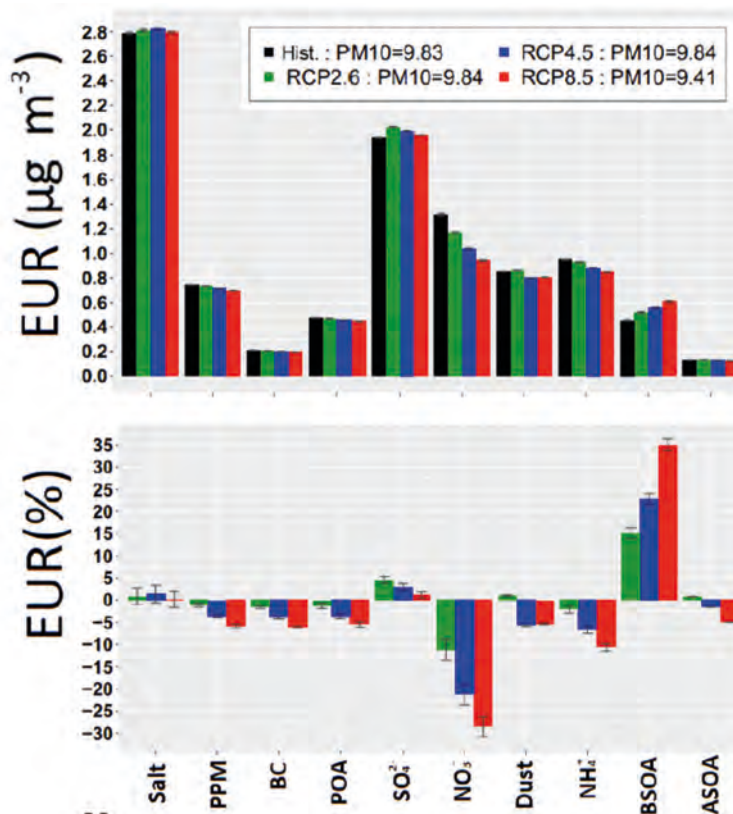


Figure 1 Concentration (haut) et évolution relative à l'historique (bas) des aérosols contribuant au total de particules fines pour les différents scénarios climatiques (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 par ordre croissant d'émissions de gaz à effet de serre). Droite : influence relative (%) du climat (Climate), de la pollution hémisphérique (Boundary), des émissions européennes (Emissions) et de l'ensemble des facteurs (All) sur les différents aérosols.

formation du sulfate (SO_4^{2-}) est, elle, favorisée par l'humidité plus importante, mais à l'inverse d'autres aérosols inorganiques tels que le nitrate (NO_3) ou l'ammonium (NH_4^+) seront moins abondants dans un climat plus chaud, à cause de leur volatilisation. Une légère baisse est identifiée pour les poussières désertiques, mais il n'a pas été possible de l'associer à un paramètre météorologique unique, d'autant que notre étude ne prenait pas en compte la question de l'évolution des sols qui jouera un rôle essentiel à l'avenir et mériterait un focus particulier. Trois facteurs principaux risquant d'influer l'évolution à long terme de la qualité de l'air ont été isolés

par une approche de sensibilité: le changement climatique, la pollution hémisphérique et les émissions européennes (figure 2). Le facteur dominant est clairement lié aux émissions de polluants en Europe. La contribution la plus importante de la pollution hémisphérique concerne les poussières désertiques.

L'importance de l'effet du changement climatique pour les aérosols organiques a motivé le travail conduit dans une autre partie de la thèse où une version plus complexe du modèle d'aérosols de CHIMERE a été développée [4] et testée dans un contexte de changement climatique [5].

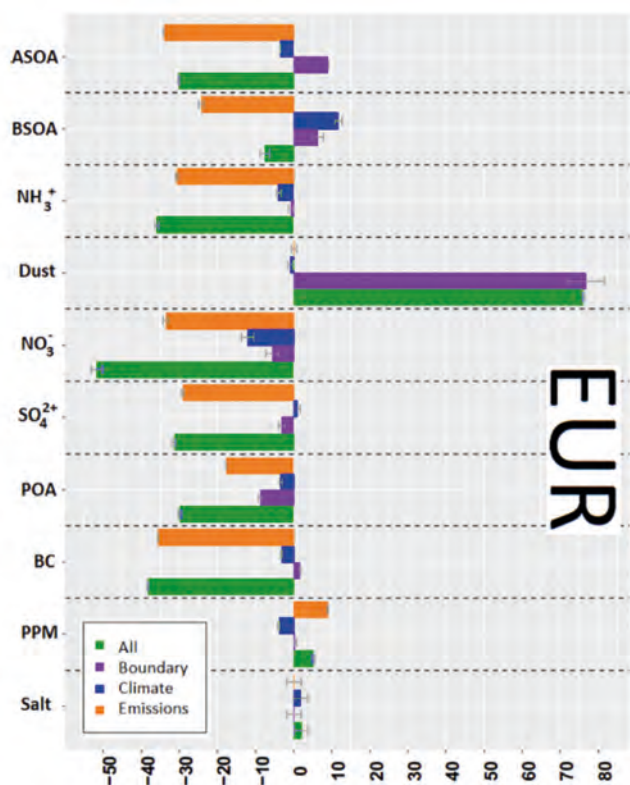


Figure 2
Influence relative (%) du climat (Climate), de la pollution hémisphérique (Boundary), des émissions européennes (Emissions) et de l'ensemble des facteurs (All) sur les différents aérosols.

Références

- [1] Colette, A., Andersson, C., Baklanov, A., Bessagnet, B., Brandt, J., Christensen, J.H., Doherty, R., Engardt, M., Geels, C., Giannakopoulos, C., Hedegaard, G.H., Katragkou, E., Langner, J., Lei, H., Manders, A., Melas, D., Meleux, F., Rouil, L., Sofiev, M., Soares, J., Stevenson, D.S., Tombrou-Tzella, M., Varotsos, K.V. and Young, P., Is the ozone climate penalty robust in Europe?, *Environmental Research Letters* 10(2015), p. 084015.
- [2] Colette, A., Bessagnet, B., Vautard, R., Szopa, S., Rao, S., Schucht, S., Klimont, Z., Menut, L., Clain, G., Meleux, F., Curci, G. and Rouil, L., European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios, *Atmos. Chem. Phys.* 13(2013), pp. 7451-7471.
- [3] Mailler, S., Menut, L., Khvorostyanov, D., Valari, M., Couvidat, F., Siour, G., Turquety, S., Briant, R., Tuccella, P., Bessagnet, B., Colette, A., Létinois, L., Markakis, K. and Meleux, F., CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling, *Geosci. Model Dev.* 10(2017), pp. 2397-2423.
- [4] Cholakian, A., Beekmann, M., Colette, A., Coll, I., Siour, G., Sciare, J., Marchand, N., Couvidat, F., Pey, J., Gros, V., Sauvage, S., Michoud, V., Sellegri, K., Colomb, A., Sartelet, K., Langley DeWitt, H., Elser, M., Prévot, A.S.H., Szidat, S. and Dulac, F., Simulation of fine organic aerosols in the western Mediterranean area during the ChArMEx 2013 summer campaign, *Atmos. Chem. Phys.* 18(2018), pp. 7287-7312.
- [5] Cholakian, A., Beekmann, M., Coll, I., Ciarelli, G. and Colette, A., Biogenic secondary organic aerosol sensitivity to organic aerosol simulation schemes in climate projections, *Atmos. Chem. Phys.* 19(2019), pp. 13209-13226.

ABSTRACT /

Multiple future scenarios simulations with the CHIMERE chemistry transport model (CTM) are compared to historic simulations in order to study the drivers governing air pollution, with a focus, here, on regional climate, anthropogenic emissions and long-range transport.

A detailed analysis of total PM_{10} (particulate matter with a diameter smaller than $10 \mu\text{m}$) concentrations is carried out, including changes to its composition. The individual effects of meteorological conditions on PM_{10} components are explored. The role of anthropogenic emissions is also taken into account as well as hemispheric transport of air pollution.

The results show that regional climate change causes a decrease in the PM_{10} concentrations in the scenarios we investigated, as a result of a decrease in nitrate, sulfate, ammonium and dust atmospheric concentrations. On the contrary, BSOA (biogenic secondary organic aerosol) displays an important increase in all scenarios.

A cumulative look at all drivers shows that anthropogenic emission changes dominate changes caused by climate and long-range transport, with the exception of dust particles for which long range transport changes are more influential. For certain species (such as sulfate and BSOA), the changes caused by anthropogenic emissions are substantially reduced by the hemispheric transport and regional climate change.

Tendances de la qualité de l'air en Europe entre 1990 et 2015 : quels impacts sanitaires ?

Auteurs :

Augustin COLETTE,
Simone SCHUCHT,
Florian COUVIDAT,
Frédéric MELEUX,
Bertrand
BESSAGNET

1 - L'Ineris est mandaté par le ministère de la Transition écologique pour représenter la France dans certaines instances de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière et Laurence Rouil a été ré-élue à la présidence du programme scientifique de cette convention.

La qualité de l'air a beaucoup évolué depuis les années 1990, notamment sous l'effet de mesures de gestion visant à réduire les émissions de polluants en Europe. Ces politiques ont aussi été accompagnées du développement d'outils de surveillance permettant d'évaluer l'efficacité des mesures mises en œuvre. Ces outils incluent bien sûr les réseaux de stations réglementaires mais aussi les modèles numériques. Après plusieurs décennies consacrées à la mise en œuvre de mesures de gestion, et au développement d'outils de suivi, il est légitime de mettre aujourd'hui l'ensemble en perspective pour comprendre quelle a été l'efficacité des politiques d'amélioration de la qualité de l'air. Le travail présenté ici a été initié dans des travaux de l'Ineris dans le cadre de la Convention des Nations unies sur la pollution transfrontière¹. C'est plus particulièrement la Task Force sur la mesure et la modélisation (TFMM) qui a lancé en 2015 un vaste programme d'étude des tendances de qualité de l'air en Europe. Une partie de ces travaux consistaient à évaluer les changements à long terme de la composition atmosphérique observés aux stations de mesure [1; 2]. Dans un deuxième temps, la TFMM a initié un exercice d'intercomparaison de modèles (Eurodelta-Trends) visant à reproduire par la modélisation l'évolution de la qualité de l'air en Europe entre 1990 et 2010 [3]. Ces résultats de modélisation ont été validés par comparaison

aux études de tendance constatées par la mesure [4; 5], ce qui encourage leur exploitation pour des études d'impact. Une première étude était consacrée à l'exploitation des résultats de modélisation pour comprendre l'effet relatif sur la qualité de l'air des réductions d'émissions, de la variabilité météorologique, et de la pollution hémisphérique [6]. Les résultats de l'exercice Eurodelta-Trends ont aussi permis de discuter l'évolution à long terme de l'effet de l'ozone sur les rendements agricoles [7; 8].

Le dernier volet, qui fait l'objet du présent article, concerne l'évolution de la mortalité attribuable à l'exposition aux particules fines. L'étude consiste à regrouper diverses évaluations de l'exposition aux $PM_{2.5}$ en Europe entre 1990 et 2015 et à les traduire en impacts sanitaires à l'aide d'une approche unique appliquée pour les différentes sources d'exposition.

MÉTHODOLOGIE

Des cartographies de concentration de surface de $PM_{2.5}$ ont été collectées à partir des sources suivantes :

- Agence européenne de l'environnement/Topic Centre on Air Pollution Transport Noise and Industry [9];
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service [10];
- Eurodelta-Trends;
- Global Burden of Disease [11].

Ces différentes sources d'information sur les concentrations de $PM_{2.5}$ ont été

traduites en termes d'exposition avec une pondération par la population, puis agrégation par pays. La répartition spatiale de la population a été supposée constante (année 2011) mais pour chaque pays la population totale et la répartition par classe d'âge sont variables sur la période.

L'outil d'évaluation d'impact sanitaire Alpha-Risk-Poll [12; 13] a ensuite été utilisé pour évaluer la mortalité due à l'exposition à long terme aux $PM_{2.5}$ parmi la population âgée d'au moins 30 ans, exprimée en décès prématurés par an. La relation concentration-risque utilisée est celle de l'Agence européenne de l'environnement [14; 15], soit 1,062 par augmentation d'exposition de $10 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$, et il faut noter que celle-ci est supposée constante sur toute la période.

RÉSULTATS

Une nette tendance à la baisse a été identifiée avec une baisse de la mortalité attribuable aux particules fines de l'ordre de 60 % en Europe sur la période 1990-2015. En 1990, en prenant la médiane de l'ensemble des sources d'exposition disponibles, la mortalité prématurée était de l'ordre de 960 000 décès par an. En 2015, elle est de 445 000 décès par an, ce qui reste très élevé malgré l'amélioration notable. Par ailleurs, on peut souligner que la plus grande part de l'amélioration a été constatée entre 1990 et 2005 et que depuis cette date, les tendances sont beaucoup moins prononcées.

La tendance en France est assez cohérente par rapport à l'évolution européenne, avec une mortalité évaluée à 89 000 décès anticipés en 1990, 48 000 en 2010 et 36 000 en 2015. À noter la cohérence des chiffres de mortalité calculée avec notre méthodologie pour 2010 et les estimations de Santé publique France qui correspondent aux années 2007-2008 [16].

Les incertitudes demeurent élevées, notamment pour la période avant 2000 où les estimations d'exposition peuvent varier d'un facteur deux. Et ces incertitudes ont aussi un effet sur l'évaluation des tendances. Entre 1990 et 2010, avec les cartographies Eurodelta-Trends on trouve une réduction de la mortalité de 52 % alors que la baisse n'est que de 30 % avec les chiffres du Global Burden of Disease.

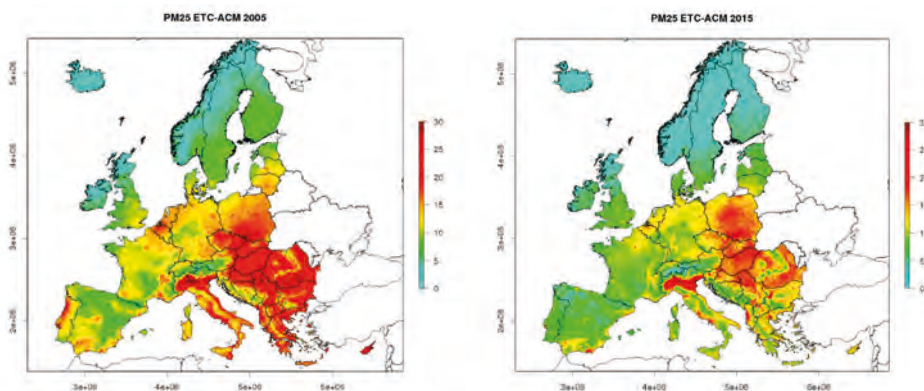


Figure 1
Concentration de $PM_{2.5}$ à la surface en 2005 (gauche) et 2015 (droite) d'après les cartographies de l'Agence européenne de l'environnement [17]

Références

- [1] Colette, A.; Beauchamp, M.; Malherbe, L. and Solberg, S.; Air Quality Trends in AIRBASE in the context of the LRTAP Convention ETC/ACM Technical Paper 2015/4(2015).
- [2] Colette, A.; Aas, W.; Banin, L.; Braban, C.F.; Ferm, M.; González Ortiz, A.; Ilyin, I.; Mar, K.; Pandolfi, M.; Putaud, J.-P.; Shatalov, V.; Solberg, S.; Spindler, G.; Tarasova, O.; Vana, M.; Adani, M.; Almodovar, P.; Berton, E.; Bessagnet, B.; Bohlin-Nizzetto, P.; Boruvkova, J.; Breivik, K.; Briganti, G.; Cappelletti, A.; Cuvelier, K.; Derwent, R.; D'Isidoro, M.; Fagerli, H.; Funk, C.; Garcia Vivanco, M.; Haeuber, R.; Hueglin, C.; Jenkins, S.; Kerr, J.; de Leeuw, F.; Lynch, J.; Manders, A.; Mircea, M.; Pay, M.T.; Pritula, D.; Querol, X.; Raffort, V.; Reiss, I.; Roustan, Y.; Sauvage, S.; Scavo, K.; Simpson, D.; Smith, R.I.; Tang, Y.S.; Theobald, M.; Tørseth, K.; Tsyro, S.; van Pul, A.; Vidic, S.; Wallasch, M. and Wind, P.; Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012. In: C.C.-o.C.C. Joint Report of the EMEP Task Force on Measurements and Modelling (TFMM), Meteorological Synthesizing Centre-East (MSC-E), Meteorological Synthesizing Centre-West (MSC-W) Editor, CCC, NILU, Oslo <http://www.nilu.no/projects/ccc/reports/ccc1-2016.pdf>. (2016).
- [3] Colette, A.; Andersson, C.; Manders, A.; Mar, K.; Mircea, M.; Pay, M.T.; Raffort, V.; Tsyro, S.; Cuvelier, C.; Adani, M.; Bessagnet, B.; Bergström, R.; Briganti, G.; Butler, T.; Cappelletti, A.; Couvidat, F.; D'Isidoro, M.; Doumbia, T.; Fagerli, H.; Granier, C.; Heyes, C.; Klimont, Z.; Ojha, N.; Otero, N.; Schaap, M.; Sindelarova, K.; Stegehuis, A.I.; Roustan, Y.; Vautard, R.; van Meijgaard, E.; Vivanco, M.G. and Wind, P.; EURODELTA-Trends, a multi-model experiment of air quality hindcast in Europe over 1990–2010, *Geosci. Model Dev.* 10(2017a), pp. 3255–3276.
- [4] Ciarelli, G.; Theobald, M.R.; Vivanco, M.G.; Beekmann, M.; Aas, W.; Andersson, C.; Bergström, R.; Manders-Groot, A.; Couvidat, F.; Mircea, M.; Tsyro, S.; Fagerli, H.; Mar, K.; Raffort, V.; Roustan, Y.; Pay, M.T.; Schaap, M.; Kranenburg, R.; Adani, M.; Briganti, G.; Cappelletti, A.; D'Isidoro, M.; Cuvelier, C.; Cholokian, A.; Bessagnet, B.; Wind, P. and Colette, A.; Trends of inorganic and organic aerosols and precursor gases in Europe: insights from the EURODELTA multi-model experiment over the 1990–2010 period, *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2019(2019), pp. 1–49.
- [5] Theobald, M.R.; Vivanco, M.G.; Aas, W.; Andersson, C.; Ciarelli, G.; Couvidat, F.; Cuvelier, K.; Manders, A.; Mircea, M.; Pay, M.T.; Tsyro, S.; Adani, M.; Bergström, R.; Bessagnet, B.; Briganti, G.; Cappelletti, A.; D'Isidoro, M.; Fagerli, H.; Mar, K.; Otero, N.; Raffort, V.; Roustan, Y.; Schaap, M.; Wind, P. and Colette, A.; An evaluation of European nitrogen and sulfur wet deposition and their trends estimated by six chemistry transport models for the period 1990–2010, *Atmos. Chem. Phys.* 19(2019), pp. 379–405.
- [6] Colette, A.; Solberg, S.; Beauchamp, M.; Bessagnet, B.; Malherbe, L. and Guerreiro, C.; Long term air quality trends in Europe: Contribution of meteorological variability, natural factors and emissions. ETC/ACM, Bilthoven http://acm.eionet.europa.eu/reports/ETCACM_TP_2016_7_AQTrendsEurope. (2017c).
- [7] Colette, A.; Tognet, F.; Létinois, L.; Lemaire, V.; Couvidat, F.; Alonso Del Amo, R.M.; Gonzalez Fernandez, A.; Rábago Juan-Aracil, I.; Harmens, H.; Andersson, C.; Tsyro, S.; Manders, A. and Mircea, M.; Long-term evolution of the impacts of ozone air pollution on agricultural yields in Europe. In: ETC/ACM, Editor, Bilthoven https://acm.eionet.europa.eu/reports/EIONET_Rep_ETCACM_2018_15_03impactTrends. (2018).
- [8] Schucht, S.; Tognet, F.; Colette, A.; Létinois, L.; Lenoble, C.; Agasse, S. and Mathieu, Q.; Analyse économique des impacts de la pollution atmosphérique de l'ozone sur la productivité agricole et sylvicole (APOLLO). *Rapport Final*, ADEME (2019), p. 185.
- [9] EEA, Air Quality in Europe - 2018 Report. In: E.E. Agency, Editor, Copenhagen (2018).
- [10] Maréchal, V.; Peuch, V.H.; Andersson, C.; Andersson, S.; Arteta, J.; Beekmann, M.; Benedictow, A.; Bergstrom, R.; Bessagnet, B.; Cansado, A.; Chêroux, F.; Colette, A.; Coman, A.; Curier, R.L.; Denier van der Gon, H.A.C.; Drouin, A.; Elbern, H.; Emili, E.; Engelen, R.J.; Eskes, H.J.; Foret, G.; Friese, E.; Gauss, M.; Giannaros, C.; Guth, J.; Joly, M.; Jaumouilla, E.; Josse, B.; Kadygrov, N.; Kaiser, J.W.; Krajsek, K.; Kuenen, J.; Kumar, U.; Liora, N.; Lopez, E.; Malherbe, L.; Martinez, I.; Melas, D.; Meleux, F.; Menut, L.; Moinat, P.; Morales, T.; Parmentier, J.; Piacentini, A.; Plu, M.; Poupkou, A.; Queguiner, S.; Robertson, L.; Rouil, L.; Schaap, M.; Segers, A.; Sofiev, M.; Tarasson, L.; Thomas, M.; Timmermans, R.; Valdebenito, A.; van Velthoven, P.; van Versendaal, R.; Vira, J. and Ung, A.; A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II daily ensemble production, *Geosci. Model Dev.* 8(2015), pp. 2777–2813.
- [11] Brauer, M.; Freedman, G.; Frostad, J.; van Donkelaar, A.; Martin, R.V.; Dentener, F.; Dingenen, R.V.; Estep, K.; Amini, H.; Apte, J.S.; Balakrishnan, K.; Barregard, L.; Broday, D.; Feigin, V.; Ghosh, S.; Hopke, P.K.; Knibbs, L.D.; Kokubo, Y.; Liu, Y.; Ma, S.; Morawska, L.; Sangrador, J.L.T.; Shaddick, G.; Anderson, H.R.; Vos, T.; Forouzanfar, M.H.; Burnett, R.T. and Cohen, A.; Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013, *Environmental Science & Technology* 50(2016), pp. 79–88.
- [12] Holland, M.; Hunt, A.; Hurley, F.; Navrud, S. and Watkiss, P.; Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE: Volume 1: Overview of Methodology, Service Contract for Carrying out Cost-Benefit Analysis of Air Quality Related Issues, in particular in the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. In: A.T. Environment, Editor (2005).
- [13] Schucht, S.; Colette, A.; Rao, S.; Holland, M.; Schoepp, W.; Kolp, P.; Klimont, Z.; Bessagnet, B.; Szopa, S.; Vautard, R.; Brignon, J.-M. and Rouil, L.; Moving towards ambitious climate policies: Monetised health benefits from improved air quality could offset mitigation costs in Europe, *Environmental Science & Policy* 50(2015), pp. 252–269.
- [14] WHO, Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE – Summary of recommendations for question D5 on “Identification of concentration-response functions” for cost-effectiveness analysis. In: W.E.C.f.e.a. health.; Editor (2013a).
- [15] WHO, Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. WHO, Bonn, Germany http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf. (2013b).
- [16] Pascal, M.; de Crouy Chanel, P.; Wagner, V.; Corso, M.; Tillier, C.; Bentayeb, M.; Blanchard, M.; Cochet, A.; Pascal, L.; Host, S.; Goria, S.; Le Tertre, A.; Chatignoux, E.; Ung, A.; Beaudou, P. and Medina, S.; The mortality impacts of fine particles in France, *Science of The Total Environment* 571(2016), pp. 416–425.
- [17] Colette, A.; Schucht, S.; Ciarelli, G.; Létinois, L. and Meleux, F.; Long-term air quality trends in Europe, Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Health Impacts. In: ETC/ACM, Editor, Bilthoven https://acm.eionet.europa.eu/reports/ETCACM_TP_2017_4_AQTrendsHIA. (2017b).

ABSTRACT /

Several estimates of PM_{2.5} concentrations over Europe during the 1990–2015 period were used to assess health impacts from chronic exposure to fine particle matter. The analysis is based on datasets provided by the European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM), the Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS), the Global Burden of Disease (GBD), the World Health Organization (WHO) as well as the EURODELTA-Trends (EDT) multi-model reanalysis.

The exposure to ambient PM_{2.5} concentrations was calculated as population weighted annual average PM_{2.5} concentrations by country. The calculated exposure to PM_{2.5} was later used as input in the health impact assessment (HIA) Alpha-RiskPoll (ARP) tool to retrieve the total number of premature deaths.

Our results indicate a substantial reduction in the number of premature deaths from PM_{2.5} exposure in Europe. Putting all the datasets together, a decrease of about 60 % is observed between 1990 and 2015. Over Europe, the estimated number of premature deaths from PM_{2.5} in 1990 was found to be around 960 000, whereas in 2015 it was found to be around 445 000.

Even though our results indicate a reduction in the number of premature deaths from chronic exposure to PM_{2.5}, the numbers remain considerable in 2015.

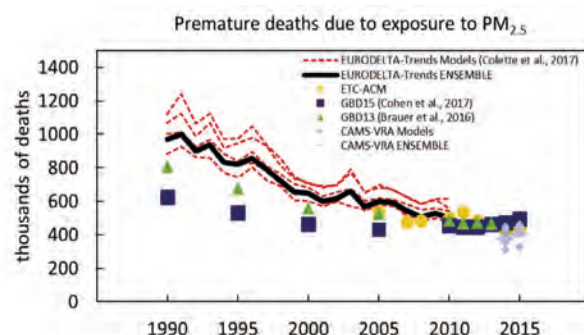


Figure 2
Décès prématurés attribués à l'exposition à long terme à la pollution aux particules PM_{2.5} entre 1990 et 2015 pour diverses sources d'évaluation de l'exposition (Agence européenne de l'environnement: ETC/ACM, Copernicus Atmospheric Monitoring Service: CAMS, Global Burden of Disease / World Health Organization: GBD, EURODELTA-Trends) mais une seule méthodologie d'évaluation des impacts sanitaires.

Évaluation de l'intégrité de puits en vue de la fermeture définitive en sécurité de cavités salines - Exemple de l'exploitation de sel de Matacães au Portugal

Auteurs :

Franz LAHAIE,
Xavier DAUPLEY,
Paulo QUENTAL

La mine de Matacães au Portugal est une ancienne exploitation de sel par dissolution, opérée par Solvay depuis 1954 et désormais en phase de fermeture définitive. Cette mine comprend 22 cavités créées par dissolution dans un dôme de sel. Les profondeurs des cavités varient de 300 à 1200 m et leur volume de 80 000 à plus de 1,2 million de m³.

Afin d'assister l'exploitant dans la mise en sécurité de ces cavités avant leur fermeture, l'Ineris a conduit un vaste programme d'études comprenant le recueil et l'analyse de données géologiques, l'étude hydrogéologique du site, la modélisation géomécanique des cavités [1], la surveillance micro-sismique ainsi que des essais *in situ* (essais de fluage, essais d'abandon). Parmi ceux-ci, un programme d'essais d'étanchéité a été défini afin de vérifier l'intégrité des puits avant leur bouchage définitif.

En effet, l'intégrité des puits d'accès aux ouvrages souterrains est un maillon essentiel de la sécurité des exploitations souterraines. S'assurer de leur intégrité à toutes les phases de la vie de l'exploitation, y compris lors de la fermeture définitive du site, permet de réduire le risque que ces ouvrages deviennent à long terme des chemins de fuites ou mettent en communication des aquifères de qualité différente.

MÉTHODE ET DÉPLOIEMENT SUR SITE

La méthode utilisée est celle dite MIT ou *Mechanical Integrity Test* [2; 3; 4]. Son principe est illustré dans la figure 1. Une colonne en acier (*tubing*) est descendue dans le puits, séparant ainsi deux espaces, un espace central rempli de saumure et un espace annulaire rempli d'un fluide plus léger (en l'occurrence du fioul). Des capteurs de pression de haute précision sont installés en tête de chacune des colonnes. La cavité est ensuite mise en pression par injection de saumure via la colonne centrale, jusqu'à amener le système puits-cavité à la pression d'essai préalablement définie. Lorsque le système a

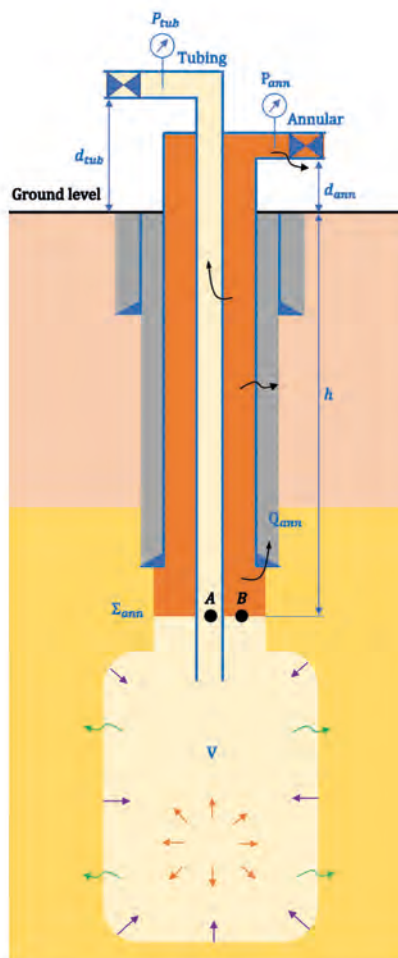


Figure 1

Principe de l'essai *in situ*. La cavité et la colonne centrale du puits sont remplies de saumure (jaune clair), l'annulaire est rempli de fioul. L'égalité des pressions côté tubing (point A) et côté annulaire (point B) à l'interface huile-saumure permet de déduire l'évolution des pressions en tête de puits.

atteint un nouvel état d'équilibre, le puits est observé en suivant sa pression pendant une durée de plusieurs jours à plusieurs semaines. Du fait de la différence de densité entre le fioul et la saumure qui sont non miscibles, une éventuelle fuite du puits conduit à une évolution différente de la pression en tête de chacune des colonnes (centrale et annulaire). Le

suiti du différentiel de pression entre le *tubing* et l'annulaire est donc un moyen de caractériser d'éventuelles fuites le long du puits.

Le programme d'essais a débuté en novembre 2016 et doit se poursuivre jusqu'en 2021. À la fin de l'année 2019, dix puits ont été testés (figure 2). Les données de mesure (pression, température, débits) sont transmises en temps réel vers la plateforme web e-cenaris (cenaris.ineris.fr), permettant au personnel de l'Ineris et de Solvay de suivre et piloter les essais à distance.

RÉSULTATS

Les dix essais ont pu être menés et interprétés. La figure 3 présente, pour l'un d'entre eux, les variations de la pression différentielle observée entre le *tubing* et l'annulaire (en vert), qui est directement reliée à la variation de la profondeur de l'interface huile-saumure (en rouge). Après une période transitoire de mise à l'équilibre, l'interface huile-saumure s'établit à une profondeur constante (ici 540 m), démontrant l'absence de fuite du puits. Les oscillations observées sur les courbes sont la traduction des variations journalières de température extérieure. Ces variations sont du second ordre et peuvent si nécessaire être corrigées [5].

Sur l'ensemble des essais réalisés, les débits de fuite maximum observés sont de l'ordre de quelques litres par jour, soit très en dessous de la valeur maximum définie comme admissible pour ce site (de l'ordre de la cinquantaine de litres par jour). Ces résultats montrent que l'intégrité de puits d'exploitation de sel, en dépit d'un environnement fortement corrosif et sans avoir fait l'objet de mesures de maintenance particulières, peut être préservée même 60 ans après leur construction. Ces résultats restent toutefois à confirmer sur les derniers essais.

Au-delà des résultats sur l'intégrité des puits, la courbe d'épaulement obtenue lors de la descente de l'interface

fuel-saumure (figure 4) permet d'obtenir des informations précieuses sur la géométrie des puits, tant sur leur partie revêtue que découverte, complémentaires des données obtenues par diagraphie (diamètres, sonar). Ainsi, à Matacães, cette méthode a permis de caractériser sur certains puits des dissolutions parasites, des positions différentes du toit des cavités ou encore de caractériser précisément les diamètres internes des cuvelages ou des sections découvertes. Enfin, les opérations de mise en

pression et de dépressurisation de la cavité effectuées sont l'occasion d'estimer la compressibilité de la cavité sur une large gamme de pressions, notamment pour des pressions représentatives de l'état de la cavité à long terme (après fermeture).

La méthode MIT s'avère donc intéressante pour le diagnostic de l'intégrité de puits de cavités salines, que ce soit avant la mise en service de la cavité, pendant son exploitation ou avant sa fermeture définitive.

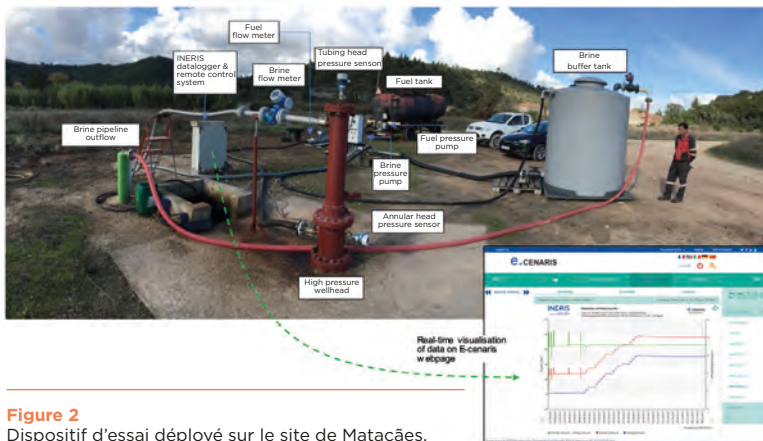


Figure 2 Dispositif d'essai déployé sur le site de Matacães.

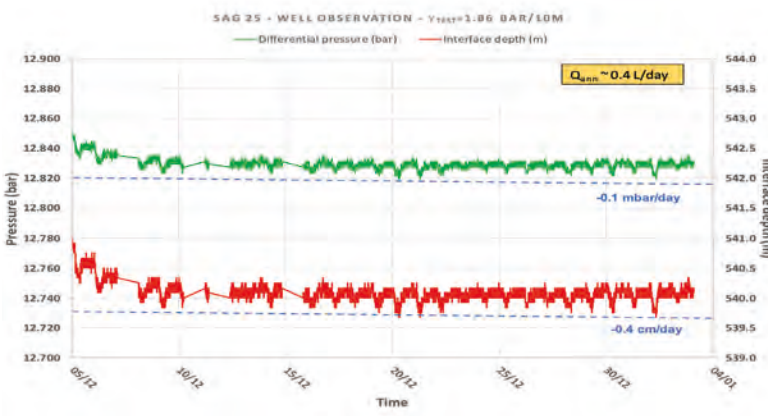


Figure 3 Evolution de la pression différentielle et de l'interface huile-saumure au cours d'un essai.

Références

[1] Thoraval, A., Daupley, X. Lahaie, F., Richard T., Quental, P. (2018) Long-term behavior of salt caverns in the Matacães solution mining concession in Portugal - In situ measurements and nu-merical modeling, SMRI Fall 2018 meeting, Belfast, Northern Ireland, UK, 24-25 sept 2018.

[2] Diamond H.W. (1989) The water-brine interface method, an alternative mechanical integrity test for salt solution mining wells, SMRI Fall meeting, San Antonio.

[3] Crotagino, F.R. (1996) Reference value developed for mechanical integrity of storage caverns, Oil and gas journal, vol. 94, issue 44.

[4] Bérest, P., Brouard, B. & Durup G. (2002) Tightness tests in salt-cavern wells, SMRI Spring 2002 meeting, Banff, Canada, 28 april-1 may 2002.

[5] Brouard, B., Bérest, P., Karimi-Jafari, Rokahr, R.B., Staudtmeister, K., Zander-Schiebenhöfer, D., Fourmaintraux, D., De Laguérie, P. & You, T. (2006) Salt cavern abandonment field test in Carresse, SMRI research report n°2006-1.

Lahaie, F., Daupley, X. & Quental, P. Mechanical integrity testing of cavern wells in a salt solution mining in Portugal - First tests analysis and lessons learned, SMRI Fall 2019 conference, Berlin, Germany, 23-24 sept 2019.

ABSTRACT /

The Matacães site in Portugal is a salt solution mine operated by Solvay since 1954 and now in a phase of abandonment. With the aim of assisting the operator in securing the caverns before final closure, Ineris conducted a comprehensive program of investigations including collection of geological data, hydrogeological studies, geomechanical modelling of caverns, microseismic monitoring and *in situ* tests. Among these, a well test program was defined with the objective of assessing the tightness of cavern wells before their plugging and abandonment. The method used is the fuel-oil interface Mechanical Integrity Test (MIT).

The test program started in November 2016 and should end up in 2021. By the end of 2019, 10 wells have been tested. So far, all tests have concluded to the integrity of the wells. Beside characterizing the well tightness, the MIT method provides a wealth of additional information on the well geometry, the cavern compressibility and the long-term equilibrium pressure of the cavern. Thus it appears as an interesting method for the diagnosis of wells integrity in the context of salt caverns, either before cavern commissioning or before cavern closure during site decommissioning.

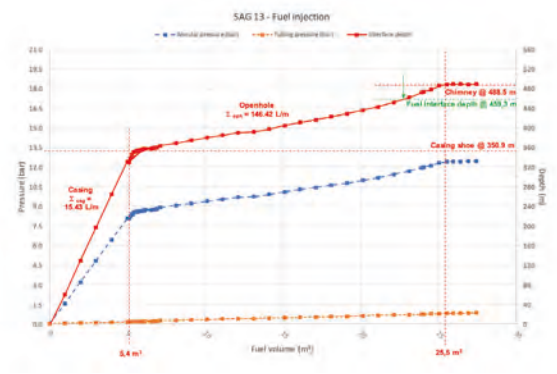


Figure 4 Exemple de courbe d'épaulement obtenue lors de la descente de l'interface fioul dans l'annulaire. En bleu la pression en tête d'annulaire, en orange la pression en tête de tubing, en rouge la profondeur calculée de l'interface.





Comprendre et maîtriser les risques à l'échelle d'un site industriel et d'un territoire /

- 20 / **Caractérisation de l'exposition environnementale spatialisée** à un pyréthriinoïde en Picardie
- 22 / **Gestion de sols pollués en milieu urbain par la mise en œuvre de la phytoextraction du zinc et du cadmium**, couplée à la production de biomasse enrichie en zinc pour la chimie verte et le verdissement
- 24 / **Réduction des rejets de micropolluants**: un essai de comparaison économique entre le traitement et la substitution à la source
- 26 / **Cyberattaques**: peut-on craindre des conséquences sur l'intégrité physique des personnes ?
- 28 / **Sécurité industrielle et recherches en SHS**: une vision internationale des enjeux contemporains
- 30 / **Activités économiques autour des sites Seveso seuil haut** : comment se protéger du risque technologique ?
- 32 / **Accroître les interfaces entre science et société** pour assurer la sécurité globale des sols
- 34 / **Compréhension et maîtrise** de l'instabilité des carrières de craie en zone inondable
- 36 / **Impact géomécanique de la dissolution**: approche innovante par modélisation couplée multiphysique
- 38 / **Compréhension du comportement complexe des massifs rocheux profonds** en réponse à l'exploitation industrielle

Caractérisation de l'exposition environnementale spatialisée à un pyréthrianoïde en Picardie

Auteur :
Julien CAUDEVILLE

Les expositions aux pesticides se caractérisent par la multiplicité des voies d'exposition (alimentation, eau, sol, air) liée à leur présence dans l'ensemble des milieux environnementaux. Pour une caractérisation fine des expositions environnementales, un premier verrou réside dans la capacité à rassembler au sein d'un même système d'analyse un ensemble de données combinant le mode de vie des populations et la contamination locale des milieux environnementaux sur des résolutions spatiales appropriées et des territoires étendus.

Dans le cadre de cette étude pilote [1], l'objectif du projet CartoExpo était de tester la faisabilité d'une méthodologie intégrée pour la cartographie d'indicateurs d'exposition sur des résolutions spatiales et temporelles fines. Pour illustrer la démarche, la contamination de la population générale est étudiée pour un pesticide (la cyperméthrine)

sur la Picardie en considérant les voies d'ingestion (eau, sol, aliments) et d'inhalation (gaz et particules). L'exposition par ingestion et inhalation a été calculée sur la région Picardie pour l'année 2013 pour la population générale. La région a été subdivisée en mailles de 2 km de côté (soit 5 183 mailles sur l'ensemble du territoire d'étude). Seules les voies d'ingestion et d'inhalation sont considérées ici, la voie cutanée étant une voie négligeable pour la population générale. De même, dans cette étude pilote, ne sont intégrées et caractérisées que les expositions dont les sources locales proviennent d'usages phytosanitaires, de provenance commerciale et non domestiques.

MÉTHODOLOGIE

L'approche développée intègre un modèle d'émission, de dispersion atmosphérique, un modèle d'exposition multimédia [2] et un modèle PBPK (Physiologically Based Pharmacokinetic) [3]. Une étape importante

du travail de modélisation a consisté à estimer les flux de phytosanitaires émis dans l'air à partir des surfaces agricoles traitées après application des phytosanitaires, afin de fournir un terme d'entrée pour modéliser le transport atmosphérique des substances des zones d'épandage.

Pour la dispersion atmosphérique, une méthode innovante de méta-modèle statistique a été développée. Elle repose sur une technique d'apprentissage automatique à partir d'une vaste base de données de simulations sur une parcelle élémentaire. Le méta-modèle étant dans un deuxième temps appliqué aux épandages à une fréquence tri-horaire sur l'ensemble des parcelles agricoles en région Picardie.

Des modèles d'exposition multimédia sont nécessaires pour :

- estimer les flux d'émission liés aux phénomènes de volatilisation du sol et des plantes au niveau des parcelles agricoles ;
- quantifier la contamination des produits alimentaires locaux (hors champ : jardin potager) liée à la proximité des parcelles agricoles ;
- combiner l'exposition externe.

La modélisation a été réalisée jusqu'à l'estimation des concentrations internes dans l'ensemble des tissus, organes et fluides intégrés dans les modèles physiologiques PBPK.

Les contributions locales spatialisées (inhalation et ingestion de produits alimentaires autoproduits) ont alors été estimées hors champ pour caractériser l'exposition des populations riveraines. Le diagramme conceptuel présentant la chaîne de modélisation de transport et de transfert des contaminants dans les voies d'exposition locales est présenté ci-contre (figure 1).

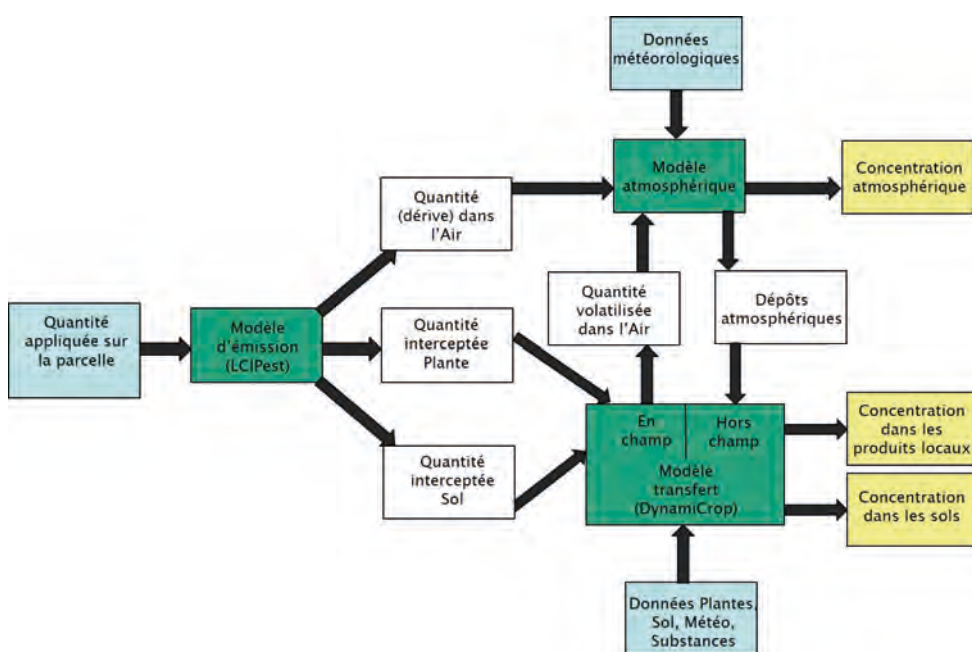


Figure 1 Diagramme conceptuel présentant la chaîne de modélisation du transfert des contaminants dans les voies d'expositions environnementales locales.

RÉSULTATS

Le couplage de modèles numériques et statistiques a permis d'asseoir une base scientifique et technique pour

l'intégration, le traitement de données et l'évaluation du transfert des contaminants de l'environnement vers les populations. L'exercice de caractérisation de l'exposition comporte de nombreux manques et incertitudes. Ceux-ci dépendent principalement des hypothèses qui sous-tendent les différentes approches de modélisation, de la représentativité et de l'exactitude des données intégrées. On retrouve un nombre élevé de concentrations inférieures aux limites de quantification/détection dans les bases de données de mesures des compartiments environnementaux (alimentation, eau). Les concentrations mesurées disponibles à ce stade ne permettent pas de comparer les parts locales et commerciales. Au vu de ce constat, le besoin de mobiliser des données (mesurées ou modélisées) supplémentaires devient nécessaire.

L'hypothèse basse (HB), ou lower-bound, correspond à un scénario pour lequel les valeurs non détectées sont estimées égales à 0 et les valeurs détectées mais non quantifiées sont estimées égales à la limite de détection.

Selon cette hypothèse, pour la cyperméthrine, les valeurs de concentration pour les différents aliments sont nulles. La carte ci-dessous (figure 2) présente la DJE (dose journalière d'exposition) totale correspondant au scénario HB pour les produits alimentaires de provenance commerciale. Sur cette carte, seules les contributions alimentaires locales sont apparentes (les concentrations des HB étant nulles). Les zones où les doses d'exposition sont les plus élevées correspondent à des zones à proximité des parcelles sur lesquelles les épandages sont les plus importants.

L'utilisation du système d'information géographique (SIG) permet de cartographier les inégalités d'exposition environnementales, à une résolution fine, par la spatialisation des doses journalières d'exposition issues du modèle d'exposition multimédia. Ce type d'approche permet d'estimer une dose totale et la contribution relative des différentes voies d'exposition à partir des données populationnelles et des concentrations estimées dans les médias d'exposition.

ABSTRACT /

Exposures to pesticides are characterized by the multiplicity of exposure routes related to their presence in all environmental media. For a fine characterization of the environmental exposures, a first prerequisite resides in the capacity to gather within the same analysis system a dataset combining the population behavior and the local contamination of the environmental media on fine resolutions and large territories.

Contamination of the general population is studied for a pesticide (cypermethrin) in the Picardie region. For atmospheric dispersion, an innovative statistical meta-model method has been developed. Multimedia exposure models are needed to [1] estimate emission fluxes linked to soil and plant volatilization phenomena at the level of crop fields, [2] quantify contamination of local food products (out of the field: vegetable garden) close to crop fields and [3] combine external and internal exposure.

The exposure characterization exercise has many gaps and uncertainties. These depend primarily on the assumptions underlying the different modeling approaches, representativeness and accuracy of the integrated data. The need to mobilize additional (measured or modeled) data becomes necessary.

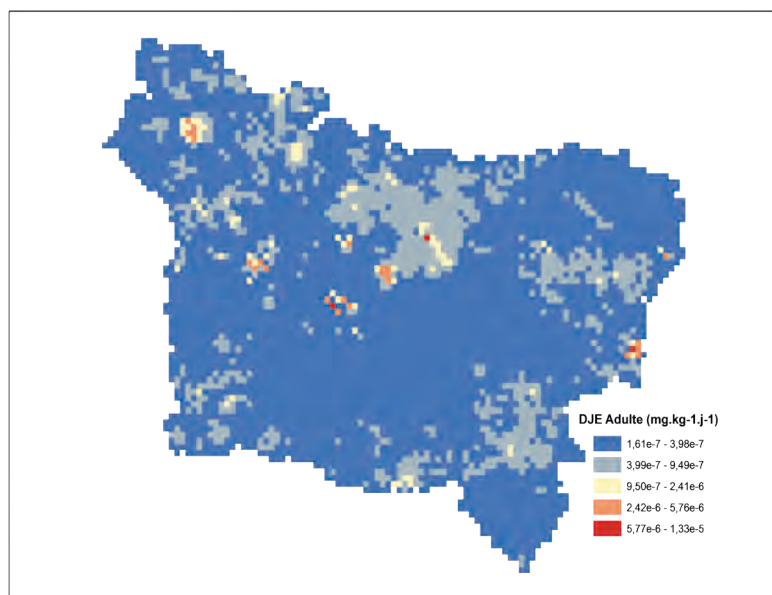


Figure 2
Dose journalière d'exposition totale en $\text{ng.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ intégrant les contributions des ingestions de sol, d'eau, d'aliments de provenance locale et utilisant l'hypothèse basse pour le calcul des concentrations dans les aliments de provenance commerciale.

Références

- [1] Caudeville J.; Regrain C.; Bonnard R.; Lemaire V.; Letinois L.; Tognet F.; Brochot C.; Bac V.; Chardon K.; Zeman F. Caractérisation de l'exposition environnementale spatialisée à un pyrèthriné en Picardie. *Environ Risque Sante* 2019; 18 : 1-9. doi: 10.1684/ers.2019.1340
- [2] Ineris, 2010. Sets of equations for modelling exposure associated with soil contamination or emissions from an industrial facility, DRC-14-141968-04378A.
- [3] Quindroit Paul, Beaudouin Rémy, Brochot Céline. Estimating the cumulative human exposures to pyrethroids by combined multi-route PBPK models: Application to the French population. *Toxicology Letters*. Volume 312, 15 September 2019, Pages 125-138

Gestion de sols pollués en milieu urbain par la mise en œuvre de la phytoextraction du zinc et du cadmium, couplée à la production de biomasse enrichie en zinc pour la chimie verte et le verdissement

Auteurs :
Arnaud GRIGNET,
Arnaud PAPIN,
Valérie BERT

Contributeur externe:
Annette DE VAUFLEURY
UMR UFC/CNRS
6249 USC / INRA,
Université de Bourgogne
Franche Comté

Dans le cadre du projet « Intégration des phytotechnologies en milieu urbain comme moyen de gestion de sols pollués par les métaux » (PHYTOAGGLO, ADEME), le potentiel de phytoextraction du cadmium (Cd) et du zinc (Zn) des espèces végétales (hyper)accumulatrices *Arabidopsis halleri* et *Salix viminalis* a été mesuré pendant trois ans. En plus de l'objectif de dépollution partielle du Zn et du Cd du sol par les espèces pré-citées, la pertinence d'utiliser ces espèces en aménagement paysager et

pour produire une biomasse riche en Zn pour la chimie verte a été considérée. Ce projet s'inscrit dans plusieurs projets de long terme sur ce site, couplant différents modes de phytomanagement et en collaboration avec la collectivité et ses propres projets d'aménagement urbains.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le site situé à Montataire (Oise, France) d'une surface de 800 m² a accueilli une culture en taillis à courte rotation de *S. viminalis* et des

parcelles de 1 m² d'*A. halleri*, réalisées pour partie dans la saulaie et soumises ou non à une fertilisation avec un engrais NPK et fauchées (figure 1). Pendant les trois ans du suivi (2015 à 2017), les feuilles de 90 saules ont été prélevées en juin et leur diamètre, hauteur et taux de survie ont été mesurés. Les feuilles tombées ont été collectées en octobre 2016. Les parties aériennes d'*A. halleri* ont été collectées à divers stades de développement (rosette, floraison, fructification et sénescence) en 2015 et 2016. Sur ces échantillons, la mesure du Zn et du Cd a été réalisée. Le transfert du Zn et du Cd chez les escargots (*Cantarus aspersus*) a été évalué via des tests réalisés au laboratoire et sur site en microcosmes dans lesquels des feuilles de saules et d'*A. halleri* plus ou moins enrichies en ces éléments ont été proposées aux escargots pour leur consommation.

RÉSULTATS

Le taux de survie de *S. viminalis* sur sol pollué (1,7 Cd mg Kg⁻¹ et 616 Zn mg Kg⁻¹) était de 86 % en 2017 et nous avons observé une augmentation significative du diamètre et de la hauteur des arbres, signe de leur bon développement. Les concentrations en Zn (856 mg Kg⁻¹ en juin et 1510 en octobre) et en Cd (3,06 mg Kg⁻¹ en juin et 3,43 en octobre), toutes supérieures aux valeurs habituellement mesurées chez cette espèce sur sol non pollué, ont confirmé leur comportement accumulateur de Zn et de Cd. Ces concentrations ont diminué au cours du temps ce qui pouvait être expliqué par un effet dilution dû à leur augmentation en biomasse. Les conditions de site ne sont pas optimales. Le pH alcalin du sol limite la mobilité du Zn et du Cd dans le sol et en conséquence le transfert foliaire de ces éléments. Dans ces conditions de sol, il paraît difficile d'améliorer le temps de dépollution par cette espèce (estimé à 550 ans ici). L'accumulation du Cd différerait en fonction du stade de développement d'*A.*

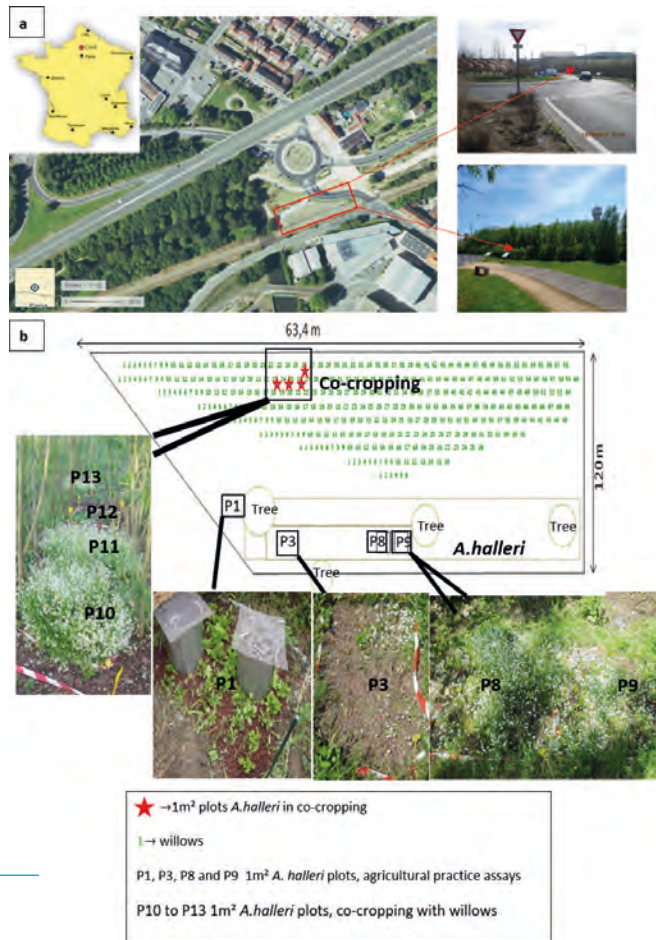


Figure 1
a : Localisation et vue aérienne du site expérimental.
b : Dispositif expérimental du site et vues des parcelles d'*Arabidopsis halleri*.

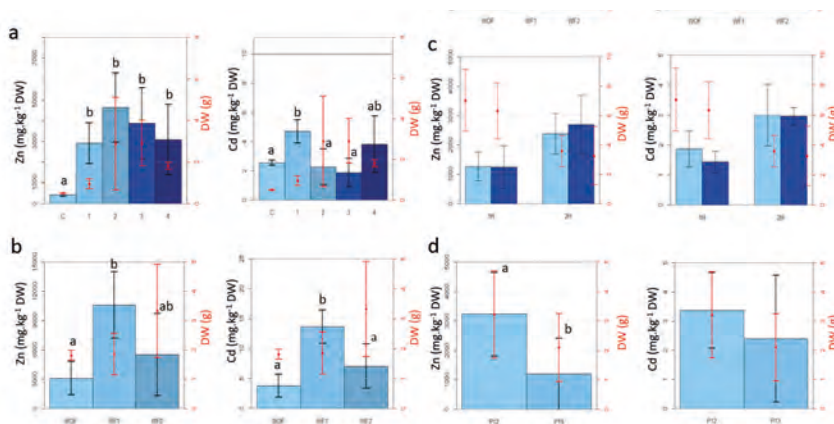


Figure 2

Concentrations en Zn et Cd dans les parties aériennes d'*Arabidopsis halleri* et biomasse sèche correspondante (moyenne \pm déviation standard). **a** Résultats des différents stades de développement sur un cycle de vie (1 à 4; rosette, floraison, fructification et sénescence; C: contrôle). **b** Effet du fertilisant, WF1 après 1 mois avec fertilisant, WF2 après 2 mois avec fertilisant). **c** Effet de la fauche (P1 bleu clair; P9 bleu foncé). **d** Effet de la coculture avec le saule (P12 = entre les rangées; P13 = autour d'un saule). Les différences significatives entre conditions sont indiquées par des lettres au seuil = 0,05.

halleri (figure 2). La plus forte concentration de Cd a été mesurée au stade rosette. Des valeurs plus faibles ont été mesurées aux stades floraison et fructification en raison d'une augmentation de la biomasse de l'espèce à ces stades (effet dilution). Les concentrations en Zn et en Cd étaient doublées en présence de fertilisant NPK alors que seule une tendance était mise en évidence pour l'augmentation de la biomasse de l'espèce.

D'autre part, en présence de NPK, le seuil de l'hyperaccumulation du Zn a été atteint ($> 10,000 \text{ mg Kg}^{-1}$ poids sec), alors que l'espèce n'était pas en conditions de site optimales (pH alcalin). Les essais de fauche ont démontré la pertinence de cette pratique sur l'espèce au stade rosette pour augmenter sa biomasse mais, si la fauche a permis la repousse de l'espèce, elle n'a en revanche pas permis de mettre en évidence une augmentation des concentrations en Zn et en Cd. Les concentrations en Zn les plus importantes ont été mesurées lorsque *A. halleri* se développait entre les rangées de saules et non à leur pied, suggérant une compétition pour cet élément. Le temps de dépollution extrapolé est de 39 ans pour le Cd et de 25,5 ans pour le Zn. La synergie entre le saule et *A. halleri* permet de

réduire ce temps à 36 ans pour le Cd et à 24 ans pour le Zn. En comparaison de la littérature existante, le rendement en biomasse d'*A. halleri* est très supérieur à celui rapporté dans le seul essai en champ réalisé et comparable à celui de l'autre hyperaccumulateur de Zn et de Cd connu, *Nocca caerulea*.

Ces résultats très encourageants permettent d'anticiper une optimisation du temps de dépollution via une meilleure connaissance du cycle de développement de l'espèce et des pratiques agronomiques, notamment la fauche et l'utilisation de fertilisant. Un transfert de Cd et de Zn dans les escargots a été mis en évidence pour les feuilles les plus enrichies. Ce résultat devra être pris en compte lors de la gestion de site par cette méthode afin d'éviter la dispersion de polluant dans l'environnement.

Les concentrations en Zn et en Cd du saule et de l'arabette permettent d'envisager une utilisation en production d'écocatalyseurs de Zn pour la chimie verte. L'utilisation de ces espèces pour cet usage et celui du verdissement sont des avantages qui permettraient de compenser la durée de dépollution (services écosystémiques).

ABSTRACT /

The Zn and Cd phytoextraction potential of *Arabidopsis halleri* and *Salix viminalis* was investigated in an urban field site. *A. halleri* was cultivated with or without fertilizer to improve biomass yield and/or Zn and Cd aerial part concentrations.

To determine if willows and *A. halleri* leaves were risky in case of consumption by snail, metal concentrations of snails fed with Zn and Cd enriched and low enriched leaves were compared. Both plants grew well on the metal-contaminated soil.

The *A. halleri* Zn foliar concentration reached the Zn hyperaccumulation threshold in the presence of NPK fertilizer and although the soil was alkaline. Cd and Zn willow foliar concentrations were far above baseline values.

Laboratory snail exposure revealed that willow leaves ingestion caused a moderate increase of Cd, Pb and Zn bioaccumulation in snails compared to the one caused by *A. halleri* ingestion. This study confirmed the interest of selecting *A. halleri* and willows to partially remove Zn and Cd in the soil and emphasized their potential usefulness in greening urban contaminated area and producing raw materials for green chemistry while paying attention to the environmental pollutant transfer.

Référence

Grignet A.; De Vaufléury A.; Papin A.; Bert V.; Urban soil phytomanagement for Zn and Cd in situ removal, greening and Zn-rich biomass production taking care of snail exposure. Environmental Science and Pollution Research 2019; 27: 3187–3201.

Réduction des rejets de micropolluants : un essai de comparaison économique entre le traitement et la substitution à la source

Auteurs :

Jean-Marc BRIGNON,
Carmen CANTUARIAS
-VILLESUZANNE,
Valentin CHAPON,
Enrico MOMBELLI

Les nombreux micropolluants générés par l'activité humaine sont susceptibles d'altérer significativement la qualité des cours d'eau, notamment à la traversée des grandes agglomérations. L'Ineris s'est intéressé à l'efficacité économique de différentes approches de gestion des micropolluants urbains. Ce travail compare le coût associé à la réduction dans le milieu aquatique des flux de micropolluants générés par les activités d'une agglomération, soit en substituant les produits chimiques en cause à la source, soit en les éliminant des rejets d'eaux usées par traitement complémentaire en station de traitement des eaux usées urbaines.

Afin d'étudier l'influence de l'étendue de la contamination chimique, un premier scénario se focalise sur des substances prioritaires dangereuses actuelles de la directive cadre eau DCE (donc des substances réglementées) et un second scénario intègre une liste de 23 substances émergentes supplémentaires : produits domestiques (par exemple conservateurs), substances provenant de matériaux universels (monomères comme le bisphénol A - BPA - ou le chlorure de vinyle monomère - CVM -, plastifiants, retardateurs de flamme, autres additifs), résidus de médicaments et hormones. Le traitement et la substitution sont comparés pour

le cas-type de la station d'épuration d'une ville de 200 000 eq.hab. Deux alternatives de traitement ont été étudiées : filtration sur charbon actif, et nanofiltration. Pour le cas de la nanofiltration, on a modélisé par QSAR¹ un rendement d'élimination pour les nombreuses molécules n'ayant pas été étudiées expérimentalement dans les études consultées. Le principe de la méthode (figure 1) est d'abord de calculer les quantités de micropolluants non émises dans l'environnement aquatique grâce à des traitements complémentaires (points 1 et 2). Le coût total de ces traitements (investissement et exploitation) est ensuite estimé (point 3).

1 - Le principe des méthodes QSAR (Quantitative Structure Activity Relationship) consiste à mettre en place une relation mathématique à l'aide de méthodes d'analyse de données, reliant des propriétés moléculaires appelées descripteurs, à un effet expérimental (activité biologique, toxicité, affinité pour un récepteur), pour une série de composés chimiques similaires; ils prennent en compte des informations sur la structure et les caractéristiques physico-chimiques des molécules.

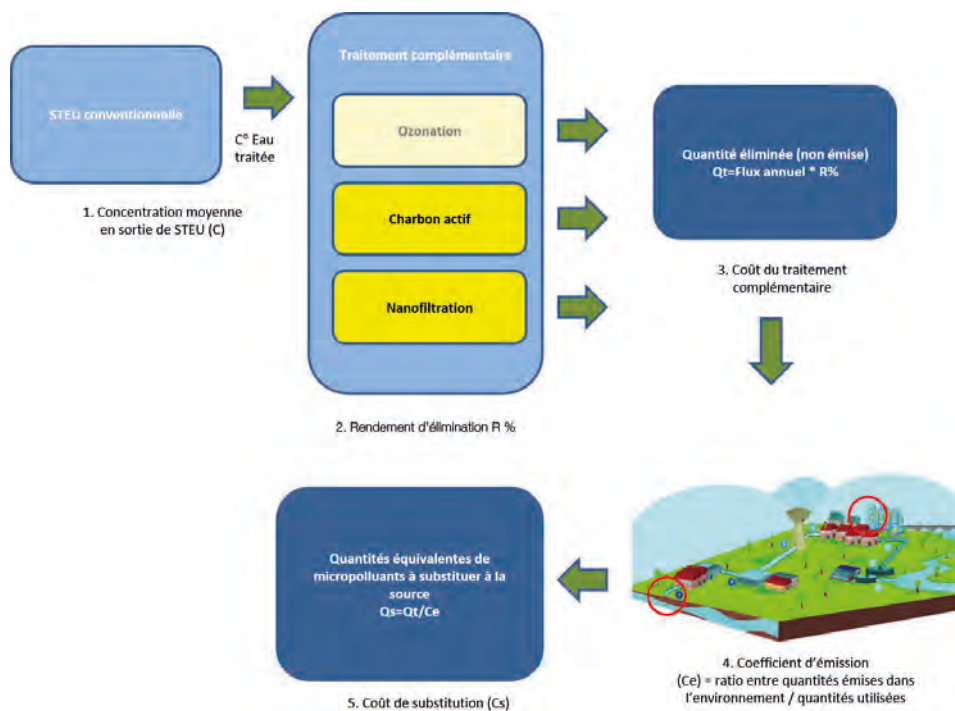


Figure 1
Principes de comparaison des coûts de substitution et de traitement.

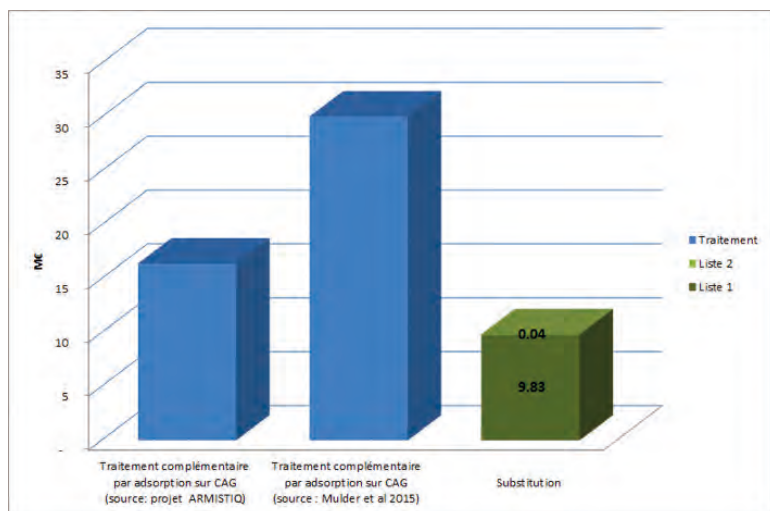


Figure 2
 Comparaison des coûts actualisés sur 20 ans du traitement complémentaire à la station (adsorption sur charbon actif à grain) et de substitution des micropolluants (à quantités non émises dans l'eau égales pour le cas d'une ville de 200 000 eq.hab).

On évalue enfin les coûts qui seraient associés à la substitution à la source des mêmes quantités éliminées par les traitements additionnels. On compare finalement (figure 2), à efficacité identique (mêmes émissions évitées dans l'environnement), les coûts de traitement et de substitution.

Les écarts de coûts entre substitution et traitement sont plus faibles pour le traitement sur charbon actif (CAG) que pour la nanofiltration, mais on montre de façon constante que la stratégie de substitution est plus « coût-efficace ». On note que le coût de substitution supplémentaire engendré par la « Liste 2 » des 23 substances additionnelles est très marginal du fait que la « Liste 1 » comprend les métaux, dont les quantités à substituer sont importantes, et dont le coût de substitution est également élevé du fait de leurs fonctions essentielles

généralement difficilement remplaçables dans l'industrie (traitement de surface, équipements électriques et électroniques).

En outre, la substitution présente des co-bénéfices importants, en termes de santé publique, qui sont susceptibles d'être supérieurs aux coûts de substitution, ce qui a été démontré dans le cadre du règlement chimique européen REACH pour plusieurs des micropolluants. Par contre, les traitements complémentaires ont un effet immédiat sur les milieux aquatiques contrairement à la substitution dont un handicap majeur est d'être un processus long et progressif. Ces travaux attirent au final l'attention sur l'intérêt de stratégies préventives intégrées en termes de santé humaine et d'environnement, de réduction des risques liés aux substances chimiques.

ABSTRACT /

The numerous micropollutants generated by human activity are likely to significantly alter the quality of watercourses, especially when crossing large agglomerations. The study deals with the economic efficiency of different approaches to the management of urban micropollutants: we compare the cost of not emitting micropollutant streams from an agglomeration, either by substituting chemicals them at source, or by tertiary treatment in urban wastewater treatment plants.

This comparison is carried out in two contrasting contexts of pollution: in the first case, we focused on current hazardous substances of the Water Framework Directive (i.e. regulated substances) and in a second one we selected a list of 23 additional emerging substances.

The comparison between treatment and substitution is carried out for the case of the wastewater treatment plant of a city of 200,000 eq.hab and the results tend to show that the substitution costs are lower than the costs of tertiary treatment by nanofiltration and activated carbon.

Despite numerous uncertainties and assumptions, this exploratory study tends to provide overall evidence that substitution is a more cost-effective strategy in general. The study also appears to signal the interest of preventive and strategies integrated over human health and environmental considerations to control chemical risks.

Référence

J.-M. Brignon, C. Cantuarias-Villesuzanne, V. Chapon, E. Mombelli, 2019, Rejets de micropolluants : un essai de comparaison économique entre traitement et substitution à la source ; TSM - Techniques sciences méthodes, 2019 (3): p. 27-40

Cyberattaques : peut-on craindre des conséquences sur l'intégrité physique des personnes ?

Auteurs :
François MASSÉ,
Sylvain
CHAUMETTE

Les systèmes de contrôle industriels sont des systèmes informatiques en interaction avec un procédé physique qu'ils manipulent par le biais d'actionneurs (pompes, vannes, compresseurs, dispositifs de chauffage ou de refroidissement) en fonction d'entrées de capteurs ou de commande envoyées par des opérateurs.

Le cœur du système de contrôle industriel est l'automate programmable qui peut être dédié soit à des fonctions de contrôle commande et de régulation, soit à des fonctions de sécurité, soit à ces deux types de fonction. Ces automates communiquent le plus souvent avec les systèmes de supervision et de gestion de l'entreprise et sont donc accessibles, de manière indirecte, par le réseau internet.

Les défaillances du système de contrôle industriel sont susceptibles de provoquer des actions indésirables sur le procédé qui peuvent être la cause de phénomènes dangereux. Ces événements sont avant tout étudiés sous l'angle de la sûreté de fonctionnement ou de l'analyse des risques accidentels.

Depuis maintenant une dizaine d'années, le sujet de la cybersécurité de ces systèmes est une préoccupation croissante pour les industriels et les pouvoirs publics. Cela a notamment conduit à adopter des réglementations au niveau français (LP et arrêtés sectoriels) et européen (directive NIST). Cependant, ces réglementations visent les infrastructures critiques, principalement pour s'assurer de leur capacité à réaliser leur mission.

La première attaque médiatisée (Stuxnet - 2010) visait à ralentir le programme iranien d'enrichissement d'uranium. Il s'agissait d'une attaque très sophistiquée menée par des organisations étatiques. Depuis, des attaques aux modes opératoires plus ou moins complexes ont provoqué l'arrêt de raffineries, des coupures de distribution électrique, l'endommagement de hauts fourneaux et de multiples arrêts de production d'entreprises industrielles. La plupart étaient



des attaques médiatisées étatiques (Stuxnet, distribution électrique en Ukraine) ou criminelles (rançongiciels) provoquant des arrêts de production ou des destructions de données. Cependant, certaines attaques ont provoqué des dommages aux systèmes de production (aciérie allemande).

La possibilité de causer des dommages aux personnes en attaquant des systèmes industriels a d'abord été envisagée dans le domaine des transports collectifs, des barrages ou de la distribution d'eau. Ces domaines ont tous subi des attaques avec toutefois des conséquences limitées. La possibilité de provoquer des dommages humains en attaquant des procédés chimiques ou pétrochimiques était déjà étudiée, mais c'est l'attaque Triton, en 2017, qui en est le premier exemple connu. Cette attaque, relativement sophistiquée, visait spécifiquement des automates industriels de sécurité, c'est-à-dire des automates destinés à prévenir les accidents majeurs dans l'industrie chimique. Cette attaque met donc en évidence que ce risque doit être pris en compte : une installation de l'industrie chimique présente un potentiel de danger important et la modification de paramètres de procédé est susceptible de provoquer

des incendies, explosions ou dispersions de substances toxiques et donc des dommages aux personnes ou à l'environnement.

Une première approche pour identifier ces scénarios est de partir de l'analyse des risques accidentels, d'identifier dans les scénarios d'accidents ceux qui sont dus à des défaillances du contrôle commande et de considérer que ces défaillances pourraient être provoquées de manière équivalente par des cyberattaques. Cependant, les scénarios dus à des cyberattaques sont par nature très différents des scénarios accidentels :

- les attaquants cherchent à atteindre un objectif qui leur est propre, en exploitant des vulnérabilités existantes et en fonction des moyens et du temps dont ils disposent. L'attaquant va donc viser les points les plus vulnérables, tenter de contourner ou désactiver les mesures de sécurité en place et chercher à maximiser les dommages éventuellement en multipliant les attaques simultanées. On peut donc envisager des phénomènes dangereux d'intensité plus importante mais également des difficultés d'intervention des secours si les attaques touchent plusieurs installations simultanément

- ou si par exemple, les moyens de communication sont aussi visés.
- Par ailleurs, la dimension temporelle est également importante: l'attaque sera déclenchée au moment le plus opportun (pour l'attaquant). Par exemple, des rançongiciels visant les hôpitaux ont été déclenchés au moment de la crise du coronavirus.
 - Enfin, le niveau d'exposition d'une installation évolue dans le temps: des vulnérabilités sur les équipements et logiciels sont régulièrement publiées, les attaquants sont sans cesse plus nombreux et plus compétents sur les technologies utilisées dans l'industrie, et la menace évolue en fonction du contexte politique social, économique. Les attaquants potentiels sont variables entre les sites et les infrastructures, on peut considérer par exemple des organisations étatiques, des organisations criminelles, des activistes, des employés ou sous-traitants mécontents, des concurrents, des organisations terroristes.

Les démarches d'analyse des risques pour la sécurité informatique prennent en compte les caractères

délibérés, systémiques et évolutifs des cyberattaques. L'Ineris travaille au développement de méthodes adaptées aux technologies et fonctionnement de l'industrie des procédés et faisant le lien entre des scénarios d'attaques et des phénomènes dangereux. L'objectif est d'identifier des scénarios et évaluer leur vraisemblance, proposer des mesures de prévention et préparer des plans d'intervention.

La mise en œuvre de telles démarches est critique car les installations sont de plus en plus vulnérables aux cyberattaques. En effet, les systèmes de contrôle industriels sont de plus en plus communicants et basés sur des technologies issues de l'informatique grand public. De plus les mutations de l'industrie et la transition énergétique impliquent des systèmes beaucoup plus évolutifs, ce qui rend la maîtrise du risque dans le temps plus difficile, et des systèmes de production, notamment pour l'énergie, plus décentralisés, plus proches des populations et plus facilement accessibles aux attaquants.

ABSTRACT /

Most industrial plants in the chemical industry have automated control systems that can be connected to various control or supervision devices that are often connected directly or indirectly to the company's external network. Remote control of these installations by cyber-attackers could enable them to cause dangerous phenomena for people and the environment, such as explosions, fires or toxic releases.

The transformations underway in industry (digitalization, standardisation of control technologies, energy transition, Industry 4.0) are making industrial control systems more vulnerable to cyberattacks: vulnerabilities that in the past were known and exploitable by state organisations with significant resources are now within the reach of criminal networks, terrorist organisations or activists with more limited resources. The likelihood of cyber-attacks aimed at provoking human consequences therefore tends to increase and appropriate risk analysis and management methods must be deployed.



Références

- Cyberattaques: peut-on craindre des conséquences sur l'intégrité physique des personnes ? *Revue de la Gendarmerie nationale*, 2019 (264): p. 21-27
- T. Oueidat, J.-M. Flaus, F. Massé « A review of combined safety and security risk analysis approaches: Application and Classification » Congrès ICCAD'20, Paris, 2020
- F. Massé, H. Abdo, J.-M. Flaus, « Comment intégrer les cyber-attaques dans l'évaluation globale des risques pour les installations classées ? Proposition d'un cadre général d'analyse des risques », Congrès Ap 22, Reims, 2020
- H. Abdo, M. Kaouk, J.-M. Flaus, F. Massé, "A new approach that consider cybersecurity within industrial risk analysis using a cyber bow-tie analysis," *Computer and Security*, 2017

Sécurité industrielle et recherches en SHS : une vision internationale des enjeux contemporains

Auteur :
Jean-Christophe
LE COZE

Safety science research. *Evolution, Challenges and New Directions* est un ouvrage combinant les réflexions de deux générations d'auteurs dans le domaine de la sécurité industrielle par le prisme des sciences humaines et sociales (SHS), et réunies pour la première fois. Cet ouvrage est issu pour partie d'un atelier de travail international réunissant une quinzaine de chercheurs de premier plan, organisé à Paris en juin 2017.

Du point de vue de la recherche, notre vision de la sécurité dans les

systèmes à risques (aviation, chimie, nucléaire, ferroviaire, maritime) dépend de la façon dont les traditions se sont développées dans les années 1980 et 1990. Ces traditions de recherche, en Europe et aux États-Unis (et plus globalement, le monde anglo-saxon), sont ancrées dans des réseaux de chercheurs et de leurs disciplines, parmi lesquels figurent en bonne place la psychologie cognitive, l'ergonomie, la psychologie sociale, la gestion, la sociologie et les sciences politiques. Des concepts tels que la culture de la sécurité, les organisations à haute fiabilité, l'ingénierie de

la résilience ou encore la régulation de la sécurité sont parmi les concepts les plus visibles des développements de ces traditions de recherche depuis plus de 40 ans.

Ce livre explore la pertinence de ces traditions de recherche dans le contexte des mutations industrielles contemporaines et l'évolution de nos connaissances en SHS. Il offre ainsi un panorama privilégié des problématiques et des développements empiriques, conceptuels, pratiques et critiques actuels dans le domaine de la sécurité. Il permet aussi d'en

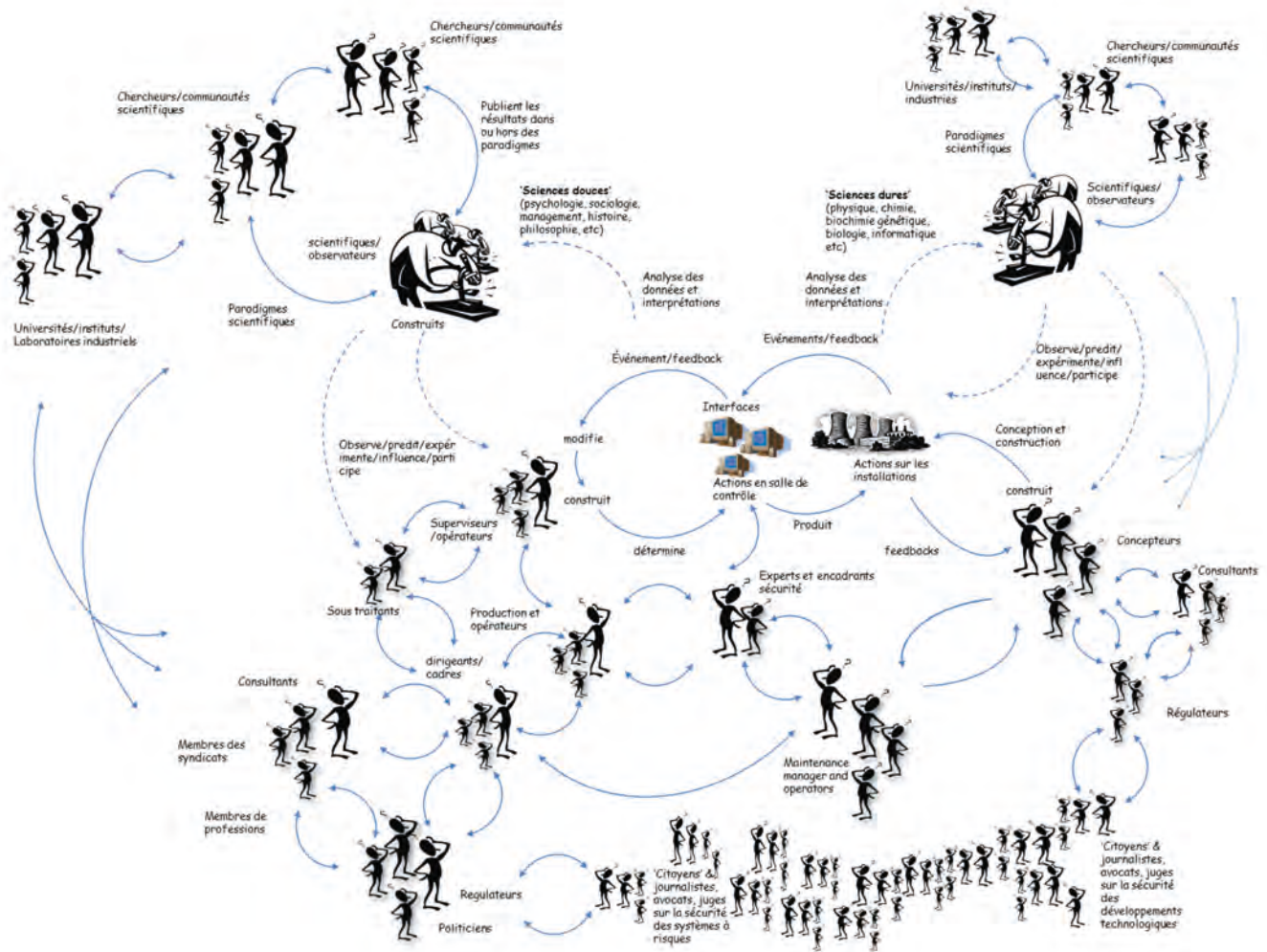


Figure 1
Systèmes sociotechniques complexes multi-acteurs.

dégager les lignes de force, leur complémentarité et les enjeux associés. Ainsi, une diversité de sujets est abordée par les auteurs des différents chapitres dont l'articulation est proposée. Les thèmes clés de l'ouvrage figurent en gras avec les auteurs qui les développent dans les chapitres du livre.

Au cours des deux premières décennies du XXI^e siècle, il est devenu important dans les recherches sur la sécurité de considérer davantage la question du pouvoir (chapitre d'Antonsen, et Almklov), pouvoir désormais transformé par la nouvelle configuration d'acteurs et d'institutions mondiales qui façonnent le paysage des systèmes à risque, créant de nouveaux défis, notamment, pour les régimes de régulation (chapitre de Tor Olav Engen, et Preben Lindøe).

Ces activités de plus en plus globalisées et en réseau à travers les continents exigent aussi que les concepts utilisés, comme la culture de sécurité, soient adaptés aux différents contextes nationaux (chapitre de Tom Reader). De plus, propulsés par la digitalisation et la standardisation parmi d'autres facteurs (par exemple, la financiarisation), ces processus globalisés créent de nouvelles ressources, contraintes et problèmes pour les entreprises, y compris une nouvelle phase de développement de la standardisation (chapitre de Petter Almklov et de Stian Antonsen) et de nouveaux environnements de travail de plus en plus automatisés et délégués aux machines façonnant les pratiques cognitives d'acteurs au plus proches des situations dangereuses (chapitre de Torgeir Haavik).

Compte tenu de l'ampleur et de la vitesse des reconfigurations des systèmes à risque, les accidents dits « épistémiques » (chapitre de John Downer) pourraient survenir là où on ne les attend pas, mais pourraient également créer de multiples causes de dérives ouvrant des possibilités pour de nouvelles catastrophes (chapitre de Kenneth Pettersen-Gould, et Lisbet Fjaeran). Renforcer les capacités d'apprentissage à partir des accidents majeurs (chapitre de Jan Hayes) est et restera donc d'une grande importance, une approche également précieuse pour améliorer notre compréhension des propriétés et comportements en réseaux des organisations actuelles en matière de sécurité, mais aussi des projets complexes pour lesquels

des pratiques et des modèles de sécurité ont besoin de développements supplémentaires (chapitre de Nadja Gotcheva).

Il s'agit, plus généralement, de la capacité de la recherche sur la sécurité à relier ses résultats (par exemple, connaissances, outils) aux besoins des praticiens (chapitre de Steven Shorrock). Cependant, l'idéal d'une recherche répondant aux problématiques pratiques (et inversement) n'est pas un processus simple, nécessitant un travail permanent de traduction (chapitre de Teemu Reiman et Kaupo Viitanen) avec des cas d'effets non intentionnels à la suite de l'introduction de modèles de sécurité qui doivent être pensés et peut-être mieux anticipés lorsqu'il s'agit de régulations (chapitre de Bergström) ou de professions (chapitre de Justin Waring et Simon Bishop). Garder une vue d'ensemble à l'esprit, c'est-à-dire des thématiques du pouvoir, en passant par la standardisation aux effets non-intentionnels de la recherche sur la sécurité (entre autres) pourrait être soutenu à l'avenir par des visualisations assez puissantes pour remplacer les plus emblématiques du domaine (chapitre de Jean-Christophe Le Coze), comme celle proposée ci-dessous qui indique les problèmes d'interactions multi-acteurs dans les systèmes sociotechniques complexes (figure 1).

Cette articulation n'est certainement pas l'unique possibilité de récit. C'est une manière parmi d'autres de mettre en perspective la diversité des champs de recherche en chantier, et de leur rapport aux traditions de recherche structurantes du domaine. De ce point de vue, ces chapitres sont commentés (dans l'ouvrage) par les réflexions de pionniers des recherches SHS en sécurité, et qui ont été les investigateurs, avec d'autres, de ces traditions qui ont façonné le domaine depuis les années 1980 : Rhona Flin, Erik Hollnagel, Nick Pidgeon, Karlene Roberts, Paul Schulman, Karl Weick et Ron Westrum.

ABSTRACT /

The book *Safety Science Research: Evolution, Challenges and New Directions* explores within, across and beyond established safety research traditions (high reliability organisations, safety regulation, normal accident, cognitive engineering, etc.) some contemporary topics associated with the profound transformations of the past two decades. For the first time, two generations of safety researchers are put together to reflect on some of the core issues regarding the performance of safety-critical systems (e.g. nuclear industry, aviation, railways, chemical industry, hospitals) and the prospect of an established, relevant and sound safety research. The result is a unique overview of the dynamic of a field whose importance can only grow in the context of increased pressure exerted on a variety of large technical systems operating in globalised processes, digital mutations and ecological changes.



Référence

Le Coze, J.C. 2019. *Safety Science Research. Evolution, Challenges and New Directions*. CRC Press. Taylor and Francis. Boca Raton, FL.

Activités économiques autour des sites Seveso seuil haut : comment se protéger du risque technologique ?

Auteurs :

Agnès VALLEE,
Benjamin LE-ROUX,
Sylvain CHAUMETTE,
Stéphane DUPLANTIER

En France, deux ans après l'accident d'AZF à Toulouse, la loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages a notamment introduit les plans de prévention des risques technologiques (PPRT) pour la maîtrise de l'urbanisation autour des sites industriels à haut risque.

Les PPRT sont aujourd'hui approuvés à 99 %. La mise en œuvre concernant les habitations est lancée. Par contre, pour les activités économiques en zones PPRT, la mise en application des nouvelles conditions de mise en œuvre instaurées par l'ordonnance n° 2015-1324 du 22 octobre 2015 (solutions de protection alternatives aux mesures foncières et aux prescriptions de travaux de renforcement) présente plus de difficultés.

Dans ce contexte, en appui au ministère de la Transition écologique et en collaboration avec l'agence Edel et le Cerema, Amaris et l'Ineris ont travaillé en 2016-2017 à la rédaction d'un résiguide proposant des solutions techniques et/ou organisationnelles pour la prise en compte du risque technologique par les activités économiques en zones bleues des PPRT.

La démarche proposée se décompose en cinq étapes principales :

- identification des phénomènes dangereux impactant l'entreprise;
- analyse de la vulnérabilité des bâtiments (effets thermiques, toxiques et de surpression) et du personnel/visiteurs en intérieur, comme en extérieur;
- identification des phénomènes dangereux dont il faut se protéger et étude de leur dynamique (temps disponible pour que les personnes puissent se mettre en sécurité);
- étude et choix des mesures possibles: les mesures envisageables sont notamment l'information et la formation du personnel et des personnes extérieures, la réorganisation des espaces de travail intérieurs et extérieurs, la mise en place d'une

alerte, la mise à l'abri dans un local de protection, une zone refuge, la mise à l'abri en évacuant de la zone exposée, le renforcement du bâti;

- mise en place des mesures choisies et intégration dans la politique de sécurité de l'entreprise.

Depuis la parution du résiguide en 2017, il est difficile d'avoir une vision précise de l'utilisation du document par les activités économiques et de la mise en place réelle de mesures de protection sur le terrain. Mais des premiers enseignements peuvent être tirés sur quelques cas d'application réalisés en 2019 par l'Ineris.

Les utilisateurs reconnaissent que la méthodologie proposée est très utile pour initier une démarche de prise en compte des risques technologiques générés par les établissements Seveso seuil haut voisins. Cette méthodologie donne des outils pratiques pour la mise en œuvre de cette démarche. Elle répond à une grande majorité des questions que

les chefs d'entreprises riveraines peuvent se poser.

Il semble néanmoins que les entreprises en zones bleues des PPRT peinent à s'engager massivement dans cette démarche, par méconnaissance des risques, de leurs obligations, des acteurs vers qui se tourner, et également par manque de moyens humains et financiers.

À part celles qui possèdent déjà des personnes compétentes en interne, par exemple dans les services Hygiène, Sécurité et Environnement, ou qui ont déjà une culture du risque, la plupart des entreprises riveraines ont des difficultés à s'engager seules, sans aide extérieure. Elles vont s'appuyer sur des bureaux d'études pour les accompagner, notamment pour faire le diagnostic de vulnérabilité des bâtiments aux aléas thermiques, toxiques et/ou de surpression et définir les mesures de renforcement nécessaires.

On observe que cet engagement est facilité lorsqu'il y a une « animation » en local pour la mise en place des mesures, qui peut être assurée par la

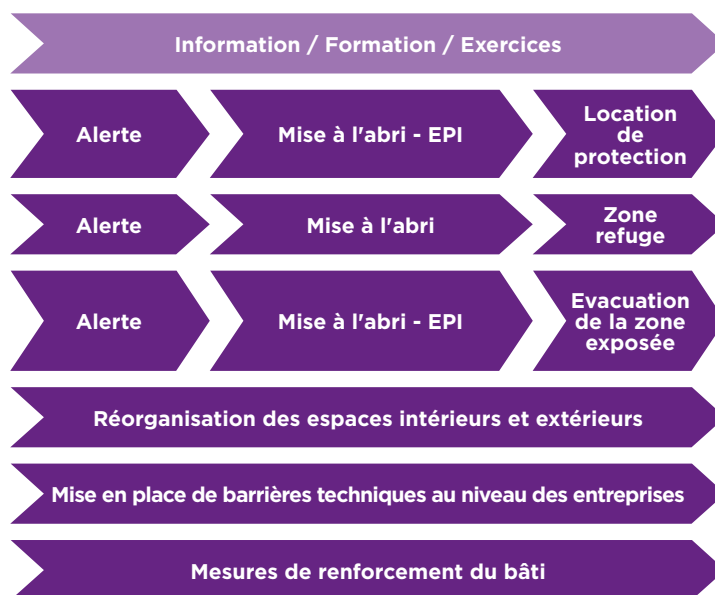


Figure 1
Solutions possibles pour la protection des personnes.

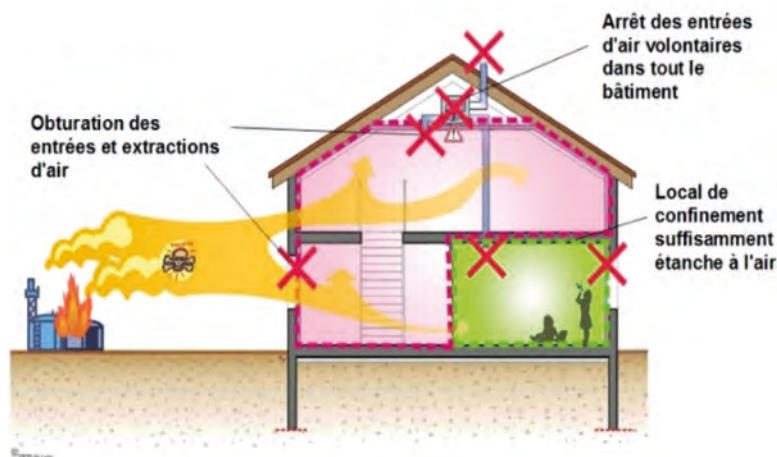


Figure 2
Schéma de principe d'un local de confinement.

collectivité, une association d'entreprises qui s'est créée dans une zone d'activités, etc.

Le rôle des sites Seveso seuil haut peut aussi être très important. Ils sont les mieux placés pour sensibiliser les entreprises riveraines aux risques encourus, pour leur communiquer des informations précises sur les phénomènes dangereux, leur dynamique, le temps disponible pour se mettre à l'abri en cas d'alerte...

En plus de ces enseignements assez généraux sur la mise en application de la méthodologie du Résiguide, des questions, jusqu'alors non traitées, ont été soulevées avec les premiers cas concrets et continueront à émerger au fur et à mesure, compte tenu de la diversité et de la spécificité des activités économiques concernées. On peut notamment citer les questions suivantes :

- Dans le cas de plusieurs entreprises dans un même bâtiment, comment définir une stratégie commune de protection plutôt que de raisonner individuellement ?

- Comment peut-on créer un local de confinement performant dans un petit commerce où il n'y a pas beaucoup d'espace, sans arrière-boutique ?
- Quelle est la vulnérabilité des surfaces vitrées de grandes dimensions (vitrines de magasins par exemple) soumise à une onde de surpression ? Quelles seraient les mesures de renforcement ?

Le travail actuel de l'Ineris vise à pouvoir y apporter des réponses concrètes et de chercher à améliorer la démarche proposée.

ABSTRACT /

In France, a new law was introduced on July 30, 2003 which created the Technological Risk Prevention Plan (PPRT). The aim of the PPRT is to protect people by action on the existing urbanization and by controlling the future land-use planning in the vicinity of upper-tier SEVESO sites. In this context, in support of the Ministry in charge of Ecology and in collaboration Agence EDEL and Cerema, AMARIS and Ineris worked on developing a methodology to help the activities concerned by a PPRT to implement and to optimize their protection with technical/organizational measures. Since the publication of the so-called Résiguide in 2017, first lessons can be drawn from a few application cases carried out in 2019 by Ineris.

The users recognize that the methodology is useful for initiating an approach, gives practical tools for implementing it and answer to the questions that may be asked. However, it is noted that activities are struggling to massive engage in the process, by ignoring the risks, their obligations, the actors to whom to turn, lack of human and financial resources.

In addition to these general lessons, untreated questions have already been raised and will continue to emerge progressively, considering the diversity of the activities concerned. The current work of Ineris is to be able to provide concrete answers and improve the proposed approach.

Référence

VALLÉE, Agnès ; LE-ROUX, Benjamin ; FABRE, Damien ; CHAUMETTE, Sylvain ; DUPLANTIER, Stéphane
Activities around upper-tier SEVESO sites : How to protect against technological risk ? RENIERS, Genserik ; FABIANO, Bruno - Proceedings of the 16th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano : AIDIC, 2019 (Chemical engineering transactions, 75)

Accroître les interfaces entre science et société pour assurer la sécurité globale des sols

Auteurs :
 Florence CARRÉ
 Valérie BERT
 Rodolphe GAUCHER

Contributeurs externes :
 Anne Richer de Forges (Inra Orléans),
 Dominique Arrouays (Inra Orléans),
 Alex McBratney (université de Sydney, Australie),
 Johan Bouma (université de Wageningen, Pays Bas)

Situés à l'interface entre biosphère, hydrosphère, atmosphère et lithosphère, les sols sont capables de répondre à de multiples enjeux de société. Les gestionnaires, usagers et protecteurs des sols font donc souvent pression pour l'utilisation d'un même sol, participant à le fragiliser. Face à ce constat, une première conférence internationale réunissant des chercheurs en sciences du sol a été organisée en 2015 pour réfléchir à un concept pouvant être partagé avec les différentes parties prenantes : la sécurité des sols [1].

La sécurité des sols est définie comme le maintien et l'amélioration des ressources en sols de la planète pour renforcer les services contribuant au bien-être humain et à la protection globale des écosystèmes [2]. Ces services, relatifs aux écosystèmes,

concernent l'approvisionnement en ressources (nourriture, matières premières, infrastructures), la régulation de processus biophysiques (stockage de carbone, détoxification en polluants...) et l'apport de culture (loisirs, esthétique, valeurs patrimoniales...) (figure 1).

Cet article se réfère notamment à la seconde conférence internationale organisée en 2016 par l'Ineris, l'Inra et l'Association française d'étude des sols dont les actes ont fait l'objet d'une édition en 2019. L'objectif de cette conférence était de partager entre chercheurs en sciences du sol et de l'environnement, chercheurs en sociologie et économie, et gestionnaires, usagers des terres et protecteurs de la nature, les critères d'évaluation de la sécurité des sols et des stratégies d'implémentation. Les présentations ont pour la plupart

fait l'objet d'une restitution dans l'ouvrage *Global Soil Security: Towards More Science- Society Interfaces* [3].

CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ DES SOLS

L'évaluation de la sécurité des sols est établie à partir de cinq critères : capacité, condition, capital, connectivité et codification.

La capacité est l'aptitude intrinsèque d'un sol à remplir une fonction telle que contribuer aux services écosystémiques, parmi lesquels stocker du carbone ou détoxifier. La condition est la caractérisation actuelle des attributs du sol permettant d'évaluer si la capacité du sol à fournir un service peut perdurer. Le capital est l'évaluation économique des sols, souvent estimée au regard de sa capacité à fournir un ou plusieurs services écosystémiques. La connectivité est le lien social entre gestionnaires, protecteurs et usagers des terres. La



Figure 1
 Services écosystémiques fournis par les sols.

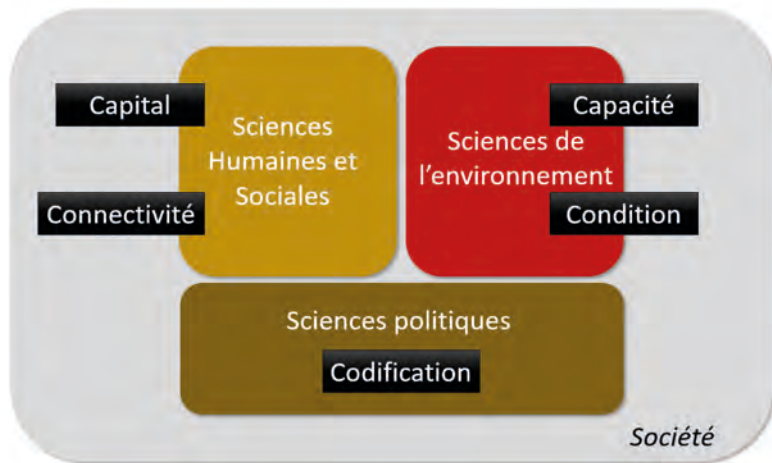


Figure 2
Liens entre critères d'évaluation de la sécurité des sols, disciplines scientifiques et société

codification fait référence aux outils en appui à la réglementation permettant de sécuriser les sols [4]. La figure 2 illustre les liens entre les sciences sous-jacentes aux cinq critères de la sécurité des sols et l'implication de la société qui intervient à tous niveaux.

EXEMPLES D'ÉVALUATION DES CRITÈRES ET DE STRATÉGIES D'IMPLÉMENTATION DE LA SÉCURITÉ DES SOLS

Durant cette conférence, l'Ineris a présenté ses travaux sur la capacité et la condition. La première étude portait sur l'évaluation de sols contaminés par métaux lourds (condition) et l'amélioration de leurs capacités à produire des services écosystémiques à partir de phyto-extraction permettant à terme d'évaluer le capital du sol en fonction des sous-produits de métaux lourds extraits, de la création d'espace de loisir et du bien-être

des citoyens [5]. La deuxième étude portait sur l'évaluation des liens bidirectionnels entre conditions du sol et polluants atmosphériques. Ces liens reflètent la capacité du sol à émettre des polluants/particules atmosphériques et à impacter le bien-être des citoyens en fonction des conditions climatiques [6].

LES BESOINS DE RECHERCHE SUR LA SÉCURITÉ DES SOLS

Aujourd'hui les critères « capital », « connectivité » et « codification », impliquant les sciences humaines et sociales (psychologie incluse) et les sciences politiques, sont peu couverts par la recherche sur l'évaluation et l'implémentation de la sécurité globale des sols. L'objectif commun avec les sciences de l'environnement pourrait être de quantifier, à différentes échelles, les bénéfices environnementaux et économiques des sols en fonction d'enjeux de société comme la santé humaine.

ABSTRACT /

Because soils are at the interface of lithosphere, atmosphere, hydrosphere and biosphere, they can tackle a large variety of societal challenges but are also a vulnerable resource. It is then necessary to find trade-off between protection and usage of soils. To this aim, a first conference was organized in 2015 to develop a new concept to share between soil scientists and stakeholders related to soils: the soil security. This is defined as the ability for soil to sustain functions to provide planetary services and human wellbeing. A second conference was organized in 2016, partly by Ineris, from which the book *Global Soil Security: Towards More Science-Society Interfaces* was published in 2019.

The purpose was to share best practices about soil security evaluation between scientists and society. Five evaluation criteria were discussed: capacity (potential to contribute to ecosystem services), condition (current status of soil), capital (economic value), connectivity (links with stakeholders) and codification (regulation). Current research on capacity and condition are quite advanced but there is a need to further explore capital, connectivity and codification of soil.

Références

- [1] Morgan, C. L. S., McBratney, A. B., Field, D. J., Koch, A., Bouma, J., & Carré, F. (2017). Synthesis: Goals to Achieve Soil Security. In D. J. Field, C. L. S. Morgan, & A. B. McBratney (Éds.), *Global Soil Security* (p. 457-462). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43394-3_43
- [2] Koch, A., McBratney, A., Adams, M., Field, D., Hill, R., Crawford, J., Minasy, B., Lal, R., Abbott, L., O'Donnell, A., Angers, D., Baldock, J., Barbier, E., Binkley, D., Parton, W., Wall, D. H., Bird, M., Bouma, J., Chenu, C., ... Zimmermann, M. (2013). Soil Security: Solving the Global Soil Crisis. *Global Policy*, 4(4), 434-441. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12096>
- [3] Richer de Forges, A. R. de, Carré, F., Arrouays, D., McBratney, A. B., & Bouma, J. (2018). *Global Soil Security: Towards More Science-Society Interfaces: Proceedings of the Global Soil Security 2016 Conference, December 5-6, 2016, Paris, France*. CRC Press LLC
- [4] McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>
- [5] Bert, V., Carre, F., Coudiere, H., Grison, C., & Gaucher, R. (2016). Enhancing ecosystem services of contaminated soil. 2. Global Soil Security Conference. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01854333>
- [6] Bessagnet, B. (2016). The soil-air nexus: An important aspect of global soil security. 2. Global Soil Security Conference. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01853064>

Compréhension et maîtrise de l'instabilité des carrières de craie en zone inondable

Auteur :
Vincent RENAUD

En janvier 1910, la crue centennale du Loing à Château-Landon a provoqué l'effondrement d'un coteau sous-cavé par la carrière de craie de Beaulieu, générant un glissement de terrain de 100 000 m³ qui a causé la mort de 7 personnes. La surface de glissement était située 40 mètres à l'intérieur du coteau. Trois autres carrières s'étaient déjà effondrées dans ce secteur, n'en laissant qu'une seule intacte, la carrière Royer (figure 1).

L'origine de ce mouvement de terrain massif est supposée être liée à la ruine d'une zone de petits piliers dont la rupture en chaîne a été causée par l'inondation. En effet, les résultats des essais de compression uniaxiale en laboratoire ont montré clairement que cette craie perdait presque toute résistance après saturation (perte de résistance de la roche saturée $R_c/R_{csat} = 2,5$ [1]).

La carrière Beaulieu présente plusieurs similitudes avec la carrière Royer qui lui est proche et reste toujours accessible. Cette dernière constitue donc un analogue pour étudier les mécanismes possibles de ruine et la possibilité d'un effondrement brutal et massif de ce type d'ouvrages abandonnés en bord fluvial sous le forçage naturel d'une crue.

ÉTUDE DE LA CARRIÈRE ROYER

Des inspections visuelles et des relevés de dommages ont été effectués depuis 2015 pour caractériser l'état des galeries et piliers de cette carrière souterraine. L'inspection approfondie *in situ* et par analyse d'images numériques de scanner 3D a permis de mettre en évidence la présence de failles normales avec un pendage parallèle au versant et situées à environ 40 mètres à l'intérieur du coteau attestant des fortes contraintes tectoniques auxquelles le massif de craie a été soumis.

Jusqu'en 2015, aucun désordre significatif n'a été constaté. En 2016, un écaillage important le long de la faille F3 a été observé (figure 2), en relation temporelle avec une nouvelle crue centennale du Loing.

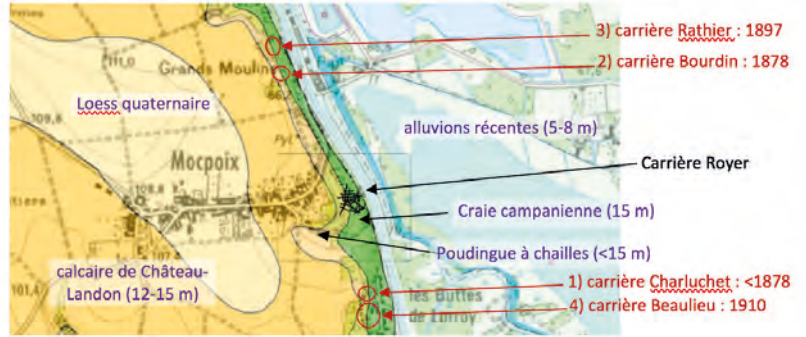


Figure 1
Emplacement des carrières effondrées de Château-Landon et position (en noir) de la carrière étudiée (Royer). Les dates sont celles de l'effondrement des différentes carrières.

Modélisation géomécanique

Les objectifs de la modélisation numérique sont :

- d'étudier de manière quantitative les scénarios de rupture basés sur les mécanismes supposés de l'effondrement de la carrière Beaulieu;
- de définir une stratégie d'observation instrumentale continue. La montée de la nappe d'eaux souterraines et la lubrification des failles découpant le coteau sont les deux principaux mécanismes envisagés à partir desquels trois scénarios différents ont été élaborés. Les deux premiers scénarios visent à déterminer quel mécanisme est prédominant dans l'origine de l'effondrement. L'objectif du troisième scénario est d'estimer l'impact d'une forte pluviométrie.

La distance normalisée par rapport au critère de rupture de Mohr-Coulomb (F) permet d'estimer la stabilité des piliers de craie :

$$F = \frac{\sigma_1^f - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \text{ avec } \sigma_1^f = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \sigma_3 - 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

(c : cohésion, f : angle de frottement, σ_1 et σ_3 : contraintes principales respectivement majeure et mineure)
La complexité géométrique de la carrière Royer influence fortement le calcul de réserve de stabilité F. Pour ces raisons, la géométrie des vides a

été acquise via un scanner laser 3D avec une haute résolution (figure 3).

Si le premier scénario a permis de montrer que la lubrification de la faille (sans remontée de nappe) affecte peu la moyenne des facteurs F, avec une diminution de 1,2 %, le second scénario, correspondant à la remontée de nappe dans la craie, révèle une influence plus importante : F diminue alors de 29 %. Cela est dû au fait que ce mécanisme s'applique à toutes les zones situées sous la nappe, alors que la faille a une distance d'influence limitée. Enfin, l'écart de 2 % entre le scénario 3 et le scénario 1 a montré qu'une forte pluviométrie a un faible impact sur la stabilité de la carrière tant que la base des piliers n'est pas saturée.

Le facteur prédominant pour la stabilité est donc la remontée de nappe dans la craie, la présence de la faille jouant un rôle aggravant localement.

Projet d'instrumentation

La modélisation d'un scénario de crue dans la carrière Royer a permis d'identifier deux zones potentiellement instables, choisies pour y installer une instrumentation géotechnique (zone de petits piliers : zone A, plan de faille F3 : zone B) et une zone de contrôle (zone C, figure 3). Le rôle important de l'eau est aussi surveillé. L'objectif est de comprendre l'évolution de la teneur en eau de la craie, le taux d'humidité de l'air et le niveau de la nappe dans la carrière. La figure 3 résume les dispositifs de surveillance installés en 2019.

CONCLUSION

Une rétroanalyse par modélisation numérique a été conduite pour comprendre les mécanismes qui ont contribué à l'effondrement de la carrière Beaulieu en 1910. Le modèle prend en compte la géométrie complexe de la carrière Royer acquise par scanner 3D. Il a permis d'identifier les zones de variations maximales de déplacements, de déformations et de contraintes. Ces informations ont été utilisées pour concevoir un « monitoring » adéquat des grandeurs mécaniques et hydrauliques à observer. L'objectif est de mettre en évidence

les relations de causes à effets susceptibles de déclencher des mouvements d'ampleur à partir de ces mesures multiparamètres et d'affiner en même temps les modèles géomécaniques. Cette approche intégratrice (rétro-analyse de l'effondrement de 1910, numérisation et modélisation 3D des cavités, instrumentation de suivi *in situ* et contrôle des modèles) pour la compréhension et la prévention des risques de mouvements de terrains en grand concernent *in fine* bien d'autres sites avec des carrières de craie situées en zone inondable.

ABSTRACT /

In January 1910, the 100-year flood of the Loing River caused the tragic collapse of an underground chalk mine at Château-Landon (France), which resulted in the death of 7 people. In this valley, three other underground chalk mines had already collapsed.

The hydrogeological analysis of the site and the geomechanical studies carried out on the chalk enabled to elaborate a 3-stage collapse scenario: [1] exceptional rainfall generating intense flooding of the Loing, which plays the role of a hydraulic dam and causes [2] a rise of the chalk aquifer, which invades the underground structure [3] the lower parts of the mine and weakens the pillars until they collapse.

To investigate this probable scenario, the Royer mine, the last underground mine still present in this sector, was thoroughly characterized. This study included a complete 3D scan of the mine, the 3D numerical modelling of its geomechanical behavior and the installation of a multiparameter monitoring system in order to study the site on a long term basis.

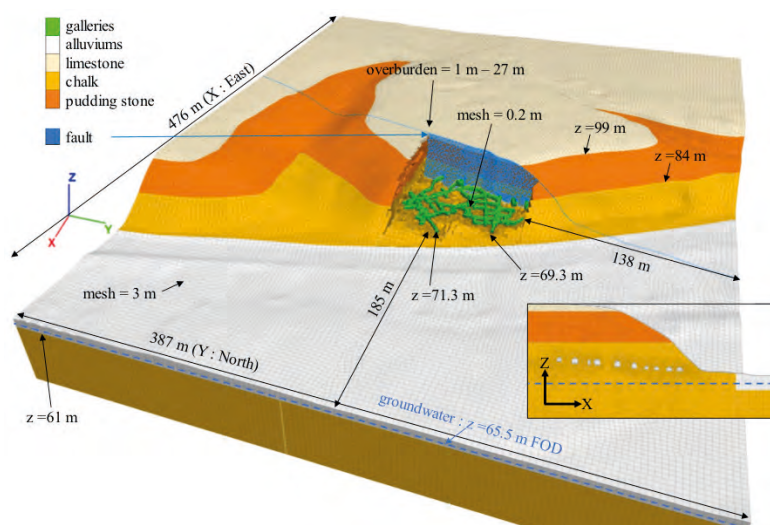


Figure 2
Maillage du modèle numérique centré sur la carrière Royer.

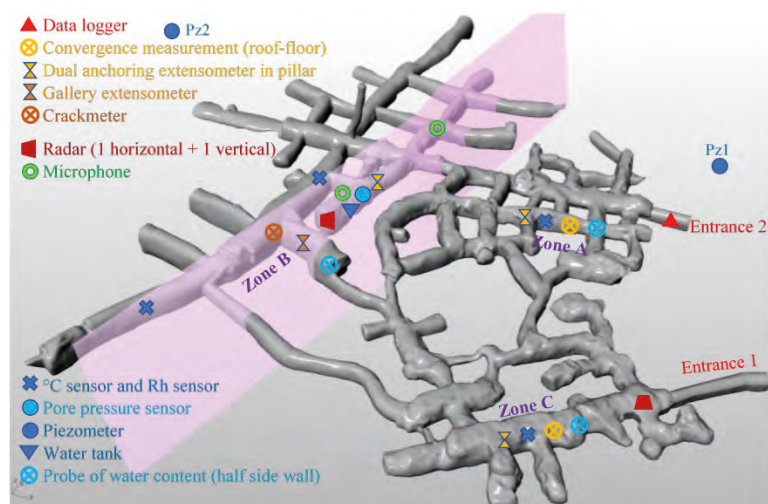


Figure 3
Diagramme de l'instrumentation hydrogéologique et géotechnique de la carrière Royer.

Référence

[1] Lafrance, N. 2016. Étude des effets de l'eau sur les phénomènes de rupture et de déformation affectant les carrières souterraines de craie. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

Impact géomécanique de la dissolution : approche innovante par modélisation couplée multiphysique

Auteur :
Farid LAOUAFA

Le gypse est une ressource minière importante en France et en particulier en Île-de-France où les masses de gypse renferment son sous-sol, exploité en carrières souterraines ou à ciel ouvert. Matière première du plâtre, le gypse est une roche évaporitique soluble. Ainsi, dans un contexte naturel ou dans celui d'exploitations anthropiques, cette spécificité occasionne, au contact de l'eau, la dissolution de la roche et peut créer en fonction des configurations, des vides souterrains de dimensions plus ou moins importantes. Les premières recherches et développements menés par l'Ineris dans ce domaine avaient pour objectif d'améliorer la connaissance des mécanismes de dissolution et de développer des outils de modélisation permettant de quantifier l'évolution spatio-temporelle de systèmes de dissolution. Ces travaux ont été enrichis en prenant en compte la composante géomécanique. En d'autres termes, le processus

de dissolution est intégré dans les problèmes géomécaniques en couplant les deux aspects. Cette approche couplée permet d'aborder les enjeux qui sous-tendent ces recherches notamment une meilleure prédiction des mouvements de terrain (et leurs impacts), ainsi que les conditions et l'instant de l'apparition de fontis ou d'éventuelles ruptures de piliers d'exploitations souterraines. Notons que dans le cadre de l'analyse des risques liés à la présence de cavités souterraines, il est nécessaire de connaître ou, *a minima*, d'estimer la présence de cavités, leur localisation et leurs formes géométriques.

COUPLAGE DISSOLUTION - GÉOMÉCANIQUE

Le modèle de dissolution est basé sur la transposition à l'échelle macro (ou échelle d'écoulement de Darcy), les équations régissant les phénomènes physiques au niveau des pores. Le changement d'échelle est basé sur une

théorie de moyenne en volume qui permet de relier explicitement la forme des équations à l'échelle macro aux propriétés effectives à l'échelle des pores. L'application à plusieurs problèmes typiquement rencontrés en ingénierie montre l'importance de la solubilité de la roche sur la formation des cavités, mettant en jeu un fort couplage avec la convection naturelle pour les grandes solubilités, et l'importance du couplage entre le processus de transport de la matière et le comportement géomécanique. Conceptuellement, l'effet de ce couplage peut être divisé en deux parties. Dans la première partie, la dissolution conduit à la création de la cavité en dissolvant par exemple une partie d'un pilier. Cette évolution morphologique se traduit par une déformation du milieu et une redistribution des contraintes qui peuvent localement atteindre le critère de rupture de la roche et induire des effondrements locaux ou à l'échelle de l'ouvrage. Ce couplage renseigne également sur le suivi temporel continu en chaque instant et en chaque point de grandeurs physiques telles que les déplacements, les contraintes, les déformations, les concentrations de l'espèce chimique, etc. Plus précisément, les problèmes de couplage non linéaire multiphysiques dépendant du temps sont résolus dans le cadre de la théorie des milieux poreux. Dans ces travaux, les conséquences de la dissolution sur le

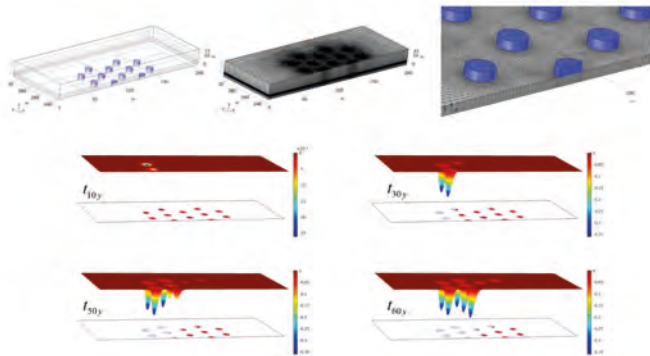


Figure 1
(haut) Modèle géométrique, localisation des lentilles de gypses et maillage. (bas) Représentation spatiale 3D du déplacement vertical en surface du sol en cm et état des lentilles de gypses (cercle rouge) à différents temps $t= 10, 30, 50, 60$ ans ($y=year$).

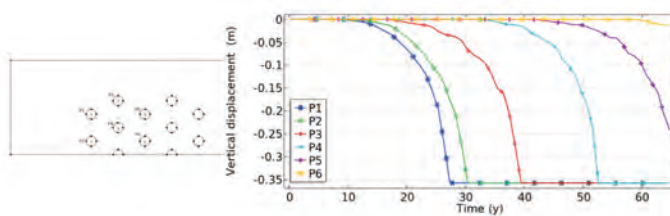


Figure 2
Localisation de six points P1-P6 en surface du sol (gauche) et évolution temporelle du déplacement vertical de la surface du sol pendant la dissolution (droite).

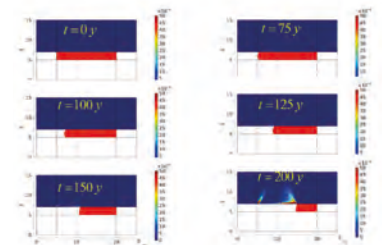


Figure 3
Évolution de la dissolution de la couche de gypse (en rouge) et de la déformation plastique effective induite dans les terrains de recouvrement.

comportement mécanique du milieu sont abordées par une analyse simplifiée. Pour ce dernier, nous considérons uniquement l'effet du changement de domaine induit par la dissolution. Le processus de dissolution va générer des cavités croissantes (cas des lentilles) ou des sections transversales décroissantes des piliers. Le milieu rocheux est supposé saturé et drainé. Les problèmes sont supposés être isothermes, même s'il n'y a pas de difficulté particulière à introduire la température ni dans le formalisme de la dissolution ni dans les problèmes mécaniques.

EXEMPLES: AFFAISSEMENT, FONTIS, RUPTURE DE PILIERS, INDUITS PAR LA DISSOLUTION

Dans les exemples présentés (calcul en 2D et 3D), nous considérons plusieurs problèmes couplés. La dissolution 3D de plusieurs lentilles de gypse contenues dans un milieu poreux. La problématique est décrite dans la **figure 1** qui montre également l'évolution de l'affaissement de la surface du sol pendant que la dissolution s'opère. On montre sur la **figure 2**, l'évolution temporelle de l'affaissement en six points situés en surface du sol au droit des lentilles. La **figure 3** montre l'évolution de la zone plastique dans les terrains de recouvrement ayant un comportement élastoplastique avec la progression de la dissolution. Le modèle donne accès aux affaissements en fonction du temps

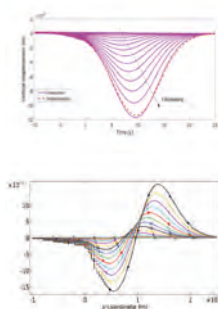


Figure 4
Déplacement vertical de la surface du sol, comparaison : entre le cas de dissolution et le comportement instantané (gauche). Évolution en % de la pente de la déformée de la surface du sol lors de la dissolution (droite).

mais également à la mise en pente de la surface du sol (**figure 4**). Dans le cadre de l'évaluation des risques liés à l'ennoyage d'une ancienne carrière souterraine de gypse, la dissolution d'un piliers entretenue par l'écoulement d'une eau pure a été modélisée (**figure 5**). Celle-ci permet de déterminer l'échelle de temps à laquelle la déformation plastique du piliers conduit à la rupture de celui-ci (**figure 6**). Ces exemples simples montrent la nature prédictive de l'approche proposée.

CONCLUSION

La problématique de dissolution des évaporites a été étudiée pour le gypse. Une approche de modélisation a été développée en utilisant un couplage faible (impact de la dissolution sur le comportement mécanique du milieu rocheux) entre la dissolution et le comportement géomécanique. L'approche séquentielle faiblement couplée pour modéliser la dissolution et le comportement géomécanique a permis d'obtenir des résultats intéressants en termes d'analyse de risque. Une meilleure précision, ou de nouvelles applications, nécessiteraient l'introduction d'un couplage plus fort entre le comportement géomécanique et la dissolution. Un autre point qui semble intéressant à étudier est la dissolution dans des milieux présentant plusieurs échelles de porosité. Cela pourrait concerner par exemple, la dissolution des milieux fracturés ainsi que les milieux à porosités doubles ou multiples porosités.

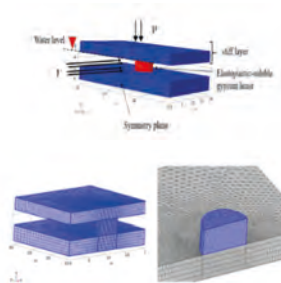


Figure 5
Modèle de piliers de gypse et conditions.

ABSTRACT /

Many soluble rocks dissolve in contact with non-saturated fluid such as water. This transformation of solid rock into a flowing fluid leads most of the time to the development of cavities. If dissolution phenomenon can be of natural or human origin, it is most of the time non-observable. The dissolution of underground rocks has unavoidable effects on the mechanical behavior of the surrounding medium.

The consequences may be for example, a soft deformation of the ground surface, subsidence, brutal rupture of the overburden, sinkholes, failure of pillars in old underground quarries. The innovative approach we propose is to couple the phenomenon of dissolution with the geomechanical issues.

Therefore, the coupled approach has an undeniable predictive capability due the time dependent problem. In well-informed hydrogeological and geomechanical configurations one can quantitatively describe the space-time impact of dissolution. Dissolution is described using a Diffuse Interface Model (DIM). Here we describe briefly the mathematical and physical framework for the dissolution model. Rock material considered is gypsum, although the developed method is usable for other soluble rocks (limestone, halite).

Three case studies are presented such as the subsidence induced by the dissolution of one or more subsurface gypsum lenses, the stability of an elastoplastic overburden and the failure of a gypsum pillar in an abandoned flooded underground quarry.

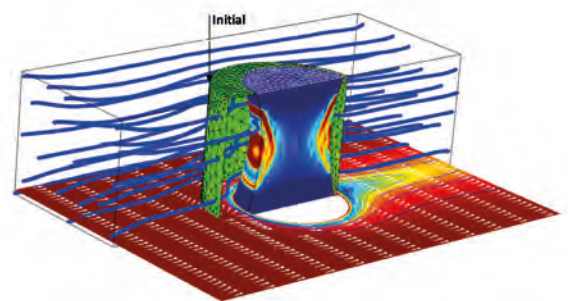


Figure 6
Zone plastique au sein du piliers, ligne d'écoulement, isolvaleur de la concentration et exemple de champ vectoriel de vitesse du fluide à la base du piliers.

Références

- [1] Laouafa, F.; Guo, J. et Quintard, M. (2019): Modeling of salt and gypsum dissolution: applications, evaluation of geomechanical hazards. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. DOI: 10.1080/19648189.2019.1579758.
- [2] Guo J.; Laouafa, F.; Quintard (2016). A theoretical and numerical framework for modeling gypsum cavity dissolution. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* Vol. 40, 1662-1689.
- [3] Laouafa, F.; Guo, J. et Quintard, M. (2020) Underground rock dissolution and geomechanical issues". *Rock Mechanics and Rock Engineering* (soumis, 2020).

Compréhension du comportement complexe des massifs rocheux profonds en réponse à l'exploitation industrielle

Auteur :
Francesca
DE SANTIS

Les activités anthropiques impliquant le sous-sol profond se développent constamment et sont confrontées à des conditions géomécaniques incertaines qui rendent difficile la prévention des risques géotechniques et géologiques, tels que le maintien de la stabilité des ouvrages ou la réactivation de faille. En particulier, l'exploitation minière profonde génère des gradients de contraintes très élevés et de manière quasi instantanée lors du creusement des vides souterrains (forages, galeries, tunnels, etc.) et, concomitamment, une sismicité induite. Cette dernière représente un problème majeur, d'origine encore mal comprise, qui peut se développer à des échelles et des magnitudes très différentes, depuis le micro-séisme déstabilisant brutalement un pilier, jusqu'au séisme perçu en surface et pouvant induire des dommages matériels. Dans ce contexte, la compréhension des mécanismes de rupture sismique est un objectif important pour mieux évaluer les risques associés. L'exploitation minière profonde offre un champ d'investigation unique à la recherche scientifique en termes

d'accès observationnel à ces phénomènes. Elle permet de les étudier au plus proche et d'améliorer la stratégie de prévention des risques pour mieux garantir la sécurité des mineurs et la stabilité des infrastructures minières.

Pour bien comprendre la réponse du massif rocheux à l'exploitation minière, il est nécessaire d'adopter une approche intégratrice, capable d'appréhender les phénomènes en jeu, en relation avec les caractéristiques géologiques locales ainsi qu'avec le processus technologique d'exploitation. Pour ce faire, l'Ineris développe des travaux de recherche fondés sur une approche combinant monitoring multiparamètres et modélisation géomécanique 3D complexe. Cette approche méthodologique a été testée dans la mine de Garpenberg en Suède (société minière Boliden) où un quartier en exploitation, situé à plus de 1 200 mètres de profondeur, a été instrumenté via une série de capteurs géophysiques et géotechniques reliés en réseau, pour suivre la sismicité induite ainsi que la variation du champ de contrainte local. En complément, un modèle numérique du type élastoplastique 3D (figure 1)

a été élaboré pour évaluer les interactions entre les modifications des contraintes induites et la génération d'activité sismique à grande échelle. Les données issues de la surveillance *in situ*, ainsi que les données d'observation géologique et de production minière fournies par le partenaire industriel, sont centralisées quasi automatiquement et mises à jour sur la plateforme de web monitoring e.cenaris de l'Ineris.

Le réseau de surveillance a permis de détecter et localiser plus de 700 événements microsismiques sur une période de deux ans. Leur analyse a mis en évidence un comportement complexe du massif rocheux, caractérisé par différents types de réponses mécaniques. En particulier, il a été démontré que la sismicité induite est d'une part strictement liée au passage d'excavation et, d'autre part, qu'elle est aussi influencée par la géologie locale. La réponse sismique peut ainsi avoir un caractère local et de courte durée et se manifester à distance des zones excavées et perdurer dans le temps. C'est ce que traduisent les deux clusters de sismicité observés (figure 2) : l'un situé dans

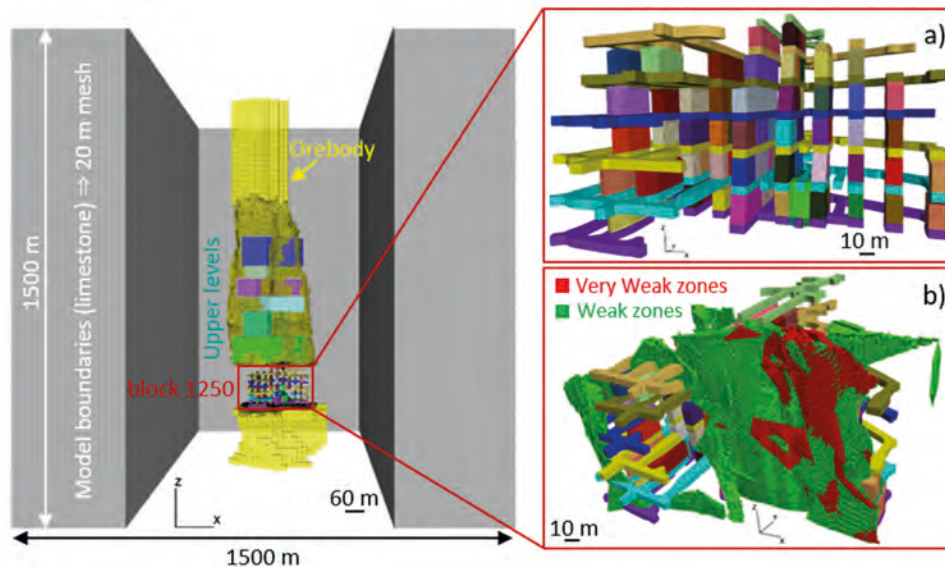


Figure 1
Géométrie du modèle élastoplastique.

ABSTRACT /

Mining induced seismicity generally appears in form of spatio-temporal clusters in the vicinity of the newly excavated volumes. It results from fracturing of the rock-mass and/or shearing on pre-existing fractures. In this work we investigated these processes in one of the orebodies of Garpenberg polymetallic mine (Sweden), using a multidisciplinary approach. It integrates visual observation of the deep underground environment, predictive and comparative 3D geomechanical digital modeling, high-resolution microseismic and geotechnical monitoring, as well as production data follow-up. Results show a complex rock mass response, with two main seismic behaviors: one local, short-term response directly induced by production, the other long-lasting over time and remote from excavations being mainly controlled by geological heterogeneities. Results also show a long-term post-blast aseismic rock behavior, which constitutes a third mechanism driving seismicity. All these findings open new perspectives for rethinking and improving standard procedures in rock-burst hazard assessment, geomechanical modelling and seismic monitoring in deep hard-rock mines.

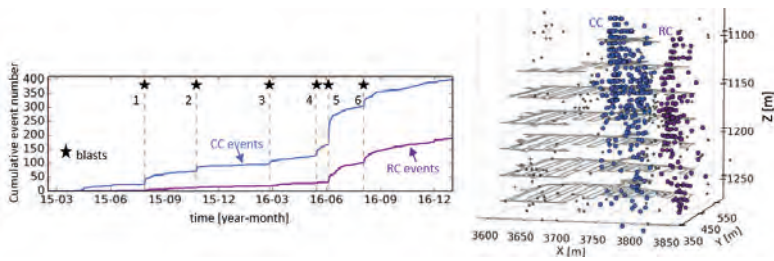


Figure 2
Distributions spatio-temporelles de la sismicité induite. En bleu le cluster central (CC) et en violet le cluster de droite (RC).

la zone de production (cluster central) et l'autre (cluster droit) situé à environ 80 m de distance des excavations, dans une zone caractérisée par la présence de lentilles de talc-schiste. L'essai central est interprété comme la réponse directe et locale de la roche aux changements de contraintes quasi-statiques dus à l'excavation. En revanche, l'essai latéral à la zone en exploitation, lui aussi associé temporellement aux tirs de production, semble être d'abord influencé par les hétérogénéités géologiques locales, avant le mécanisme de transfert de contraintes plus faible à grande distance.

Les données géotechniques ont montré que l'intensité du champ de déformations semble être plus corrélée à la séquence minière et à la proximité de zones de talc-schiste qu'au volume de roche excavée. Elles montrent également l'existence de mécanismes de fluage en réponse à l'exploitation. Ces mécanismes de fluage aisé peuvent à leur tour déclencher de manière différée la sismicité et pourraient expliquer l'occurrence de la séquence sismique non directement liée aux tirs de production.

La modélisation géomécanique 3D a confirmé l'influence de la méthode d'exploitation sur la dynamique de redistribution des contraintes et a montré qu'une forte déformation plastique est induite dans les zones de talc-schiste. La comparaison entre les résultats du modèle et les observations *in situ* a par ailleurs mis en évidence une bonne corrélation lorsque l'on considère la sismicité à proximité des zones de production. En revanche, le modèle ne peut entièrement expliquer la sismicité déclenchée à distance des nouvelles excavations, puisqu'il ne prend en compte que les effets quasi-statiques dus à l'avancement de l'exploitation.

Des travaux de recherche complémentaires sont engagés pour caler des lois de fluage dans le modèle géomécanique et ainsi permettre d'identifier les zones à forte concentration de contraintes pour anticiper les situations mécaniquement instables générées par l'extraction minière et qui peuvent apparaître de manière différée. L'approche croisée par la géomécanique et la géophysique constitue une voie de progrès importante dans l'évaluation de l'aléa et du risque sismique.

Référence

De Santis, Francesca; Rock mass mechanical behavior in deep mines: in situ monitoring and numerical modelling for improving seismic hazard assessment ; thèse de doctorat. Université de Lorraine, 05/02/2019





Caractériser les dangers des substances et leurs impacts sur l'Homme et la biodiversité /

- 42 / **Observation en continu et sur le long terme** de la composition chimique des particules fines sur la plateforme expérimentale SIRTA
- 44 / **Application de modèles récepteurs** pour l'identification et la quantification des principales sources de particules atmosphériques
- 46 / **Modélisation *in silico* des chemins de l'effet néfaste (AOP)** en toxicologie
- 48 / **Développement d'une approche de modélisation pour élucider les mécanismes du bisphénol A** sur les populations d'épinoches en mésocosmes
- 50 / **Recherche des effets des radiofréquences de la téléphonie mobile sur la physiologie humaine :** étude de l'activité cérébrale et la variabilité du rythme cardiaque
- 52 / **La modélisation toxicocinétique** basée sur la physiologie (PBPK) pour l'exposome
- 54 / **Modélisation toxicocinétique chez les poissons** pour l'évaluation du risque environnemental
- 56 / **Dispositifs de mesure en continu pour la surveillance des eaux de surface :** évaluer les performances métrologiques en conditions maîtrisées et sur le terrain
- 58 / **Évaluer l'inflammabilité de mélanges liquides** par approches prédictives en complément des mesures expérimentales
- 60 / **Test d'éclatement d'un microréacteur** en carbure de silicium

Observation en continu et sur le long terme de la composition chimique des particules fines sur la plateforme expérimentale SIRTA

Auteurs:
Olivier FAVEZ,
Alexandre ALBINET

Les particules fines jouent un rôle majeur sur la qualité de l'air et sur le climat. Il est primordial de pouvoir quantifier leurs sources, ainsi que celles de leurs précurseurs gazeux, pour la mise en œuvre de plans d'action appropriés. Les études de tendance sur la composition chimique de l'atmosphère sont également nécessaires afin d'évaluer l'efficacité des mesures de gestion et d'améliorer les connaissances de l'impact des particules sur le réchauffement climatique, actuel et à venir.

Dans ce contexte, l'Ineris s'est associé dès 2011 au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) pour la création d'une plateforme de mesure *in situ* des polluants atmosphériques. Cette plateforme expérimentale est localisée sur le plateau de Saclay (Essonne), à 25 km au sud-ouest de Paris, et est représentative de la pollution de fond en région Ile-de-France. Elle constitue aujourd'hui une composante importante du SIRTA (Site instrumenté de recherche par télédétection atmosphérique,

sirta.ipsl.fr) et, à plus large échelle, de l'infrastructure de recherche Européenne ACTRIS (*Aerosol, Clouds and Trace gases Research InfraStructure, www.actris.eu*). Elle est également intégrée au programme CARA du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) pour la surveillance opérationnelle de la composition chimique et des sources des particules atmosphériques à l'échelle nationale (*www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara*) ainsi qu'à différents programmes de recherche régionaux (tel que le DIM QI², nouveau domaine d'intérêt majeur de la région Ile-de-France).

Parmi les particules atmosphériques, le comportement des aérosols carbonés, formés de matière organique (AO, pour aérosols organiques) et de carbone suie (BC, pour *Black Carbon*), reste encore mal connu. Une thèse de doctorat (2016-2019) a été préparée par Yunjiang Zhang à l'Ineris afin d'exploiter les mesures automatiques et *in situ* des aérosols carbonés réalisées au SIRTA entre fin

2011 et début 2018. Les principales sources d'AO ont pu être discriminées à l'aide de l'outil *Positive Matrix Factorization* (type de « modèle récepteur ») appliqué aux données de spéciation chimique mesurées par un *Aerosol Chemical Speciation Monitor* (ACSM). Les propriétés d'absorption de la lumière de BC et du *brown carbon* (BrC, fraction de l'AO absorbant le rayonnement ultraviolet) ont été mesurées à l'aide d'un aethalomètre multilongueurs d'onde, dont le principe de fonctionnement est basé sur le suivi en continuation de l'atténuation de la lumière par les particules fines s'accumulant sur une bande filtrante. Les résultats obtenus indiquent notamment des cycles saisonniers, hebdomadaires et journaliers spécifiques aux différentes fractions des aérosols primaires et secondaires [1]. En particulier l'AO primaire (AOP), provenant essentiellement de la combustion de biomasse et du transport routier, est prépondérant sur la période froide (de novembre à février), alors que le reste de l'année est dominé par

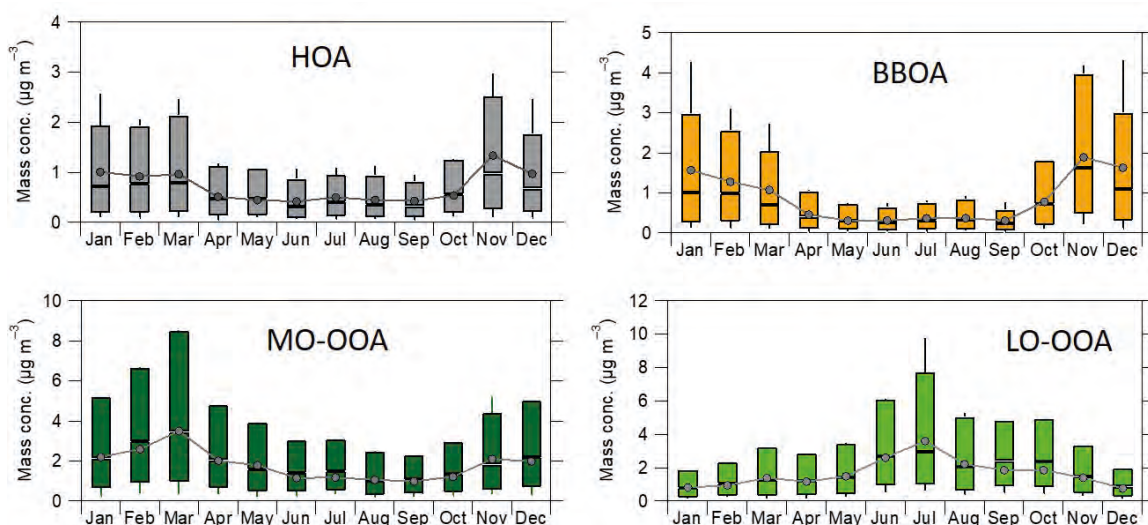


Figure 1
Variations saisonnières moyennes des principales familles d'AO identifiées par PMF: HOA principalement issu de la combustion d'hydrocarbures, BBOA issu de la combustion de biomasse, OOA: aérosols organiques secondaires plus ou moins oxydés (respectivement MO-OOA et LO-OOA).

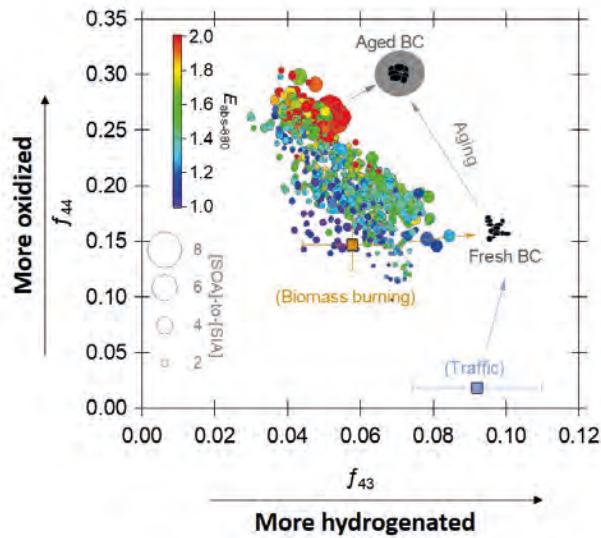


Figure 2
Augmentation des propriétés d'absorption du carbone suie ($E_{\text{abs-880}}$) avec le contenu en aérosols organiques secondaires (SOA), matérialisé par le diamètre des points - et leur degré d'oxydation (cf. axe des ordonnées) au SIRTA. Pour comparaison, les deux carrés représentent le degré d'oxydation de particules issues directement du trafic automobile et de combustion de biomasse, en tant que principales sources de BC en région Ile-de-France.

des aérosols organiques oxygénés (figure 1). Parmi ces derniers, une fraction moins oxydée, provenant probablement de façon majeure de précurseurs biogéniques, est prépondérante en été (60 % de l'AO en moyenne estivale). Par ailleurs, les études de tendance ont montré une légère diminution des concentrations (de l'ordre de 0,05-0,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ par an) de toutes les fractions d'AO identifiées au cours de la période étudiée, hormis pour cette fraction d'AO moins oxydée qui ne présente pas de tendance significative.

Concernant les propriétés optiques, une contribution moyenne globalement équivalente à celle de BC a été observée pour le BrC dans le proche ultraviolet en hiver. En outre, il a été mis en évidence une augmentation significative des propriétés d'absorption du BC liée à des interactions avec les aérosols secondaires en mélange interne, en particulier en été où les conditions photochimiques sont les plus favorables à une oxydation du BC. La fraction organique la plus oxydée a pu être identifiée comme principale responsable de ce phénomène (figure 2), faisant des aérosols organiques secondaires l'une des fractions des particules les plus importants à considérer par les modèles climatiques [2].

Ces observations sur le long terme ont également permis d'alimenter

une étude publiée en 2019 sur l'influence des émissions du volcan Bardarbunga (Islande) sur la qualité de l'air en Europe de l'ouest en 2014 et 2015 [3], ainsi qu'une autre étude portant sur l'origine des composés organiques volatils (COVs) en région Ile-de-France [4]. En lien avec cette dernière thématique, une nouvelle thèse de doctorat a débuté fin 2019 en partenariat avec le LSCE afin d'explorer l'apport de l'observation de ces COVs pour une meilleure compréhension des sources de l'AO.

ABSTRACT /

This work aimed at investigating on-line and in situ carbonaceous aerosol measurements performed for more than 6 years at the SIRTA facility, representative of background air quality in the Ile de France region. Results illustrated well-marked seasonal, weekly, and diel cycles of the various primary and secondary carbonaceous aerosol fractions. Primary OA (POA), mainly from wood burning and traffic emissions, were confirmed to dominate submicron OA concentrations at wintertime, while Oxygenated OA (OOA) were shown as the major contributors during the rest of the year. Trend analyses indicated slight decreasing features (in the range of 0.05-0.20 $\mu\text{g m}^{-3} \text{yr}^{-1}$) for every OA fraction, except for Less Oxidized OOA (LO-OOA). Regarding radiative impacts, a mean value of 1.6 was notably obtained for BC absorption enhancement (E_{abs}) in summer due to secondary aerosol lensing effect, supporting possible higher BC-related climatic impact than currently expected. Last but not least, More Oxidized OOA (MO-OOA) were shown as the main agent for this E_{abs} and then appeared as one of the most critical aerosol fractions to be considered within near-future climate models.

Références

- [1] Zhang, Y., O. Favez, J.-E. Petit, F. Canonaco, F. Truong, N. Bonnaire, V. Cretn, T. Amodeo, A.S.H. Prévôt, J. Sciare, V. Gros and A. Albinet (2019): Six-year source apportionment of submicron organic aerosols from near-continuous highly time-resolved measurements at SIRTA (Paris area, France). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 14755-14776, doi: 10.5194/acp-19-14755-2019
- [2] Zhang, Y., O. Favez, F. Canonaco, D. Liu, G. Mocnik, T. Amodeo, J. Sciare, A.S.H. Prévôt, V. Gros and A. Albinet (2018): Evidence of major secondary organic aerosol contribution to lensing effect black carbon absorption enhancement. *Nature Partner Journal - Climate and Atmospheric Science*, 1(47), doi: 10.1038/s41612-018-0056-2
- [3] Boichu, M., O. Favez, V. Riffault, J.-E. Petit, Y. Zhang, C. Brogniez, J. Sciare, I. Chiapello, C. Lieven, S. Zhang, N. Pujol-Söhne, E. Tison, H. Delbarre, P. Goloub (2019): Large-scale particulate air pollution and chemical fingerprint of volcanic sulfate aerosols from the 2014-15 Holuhraun flood lava eruption of Bardarbunga volcano (Iceland). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 14253-14287, doi: 10.5194/acp-19-14253-2019.
- [4] Languille B., V. Gros, J.-E. Petit, C. Honoré, A. Baudic, O. Perrussel, G. Foret, V. Michoud, F. Truong, N. Bonnaire, R. Sarda-Estève, M. Delmotte, A. Feron, F. Maisonneuve, C. Gaimoz, P. Formenti, S. Kotthaus, M. Haeffelin and O. Favez (2020): Wood burning: a major source of Volatile Organic Compounds during wintertime in the Paris region. *Science of the Total Environment*, 711, 135055, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135055

Application de modèles récepteurs pour l'identification et la quantification des principales sources de particules atmosphériques

Auteur :
Olivier FAVEZ

L'élaboration et l'évaluation des plans d'action visant à améliorer la qualité de l'air nécessitent l'identification et la quantification des principales sources d'émissions. Deux grands types de méthodologies sont alors principalement utilisées :

- celles se basant sur l'utilisation de modèles numériques permettant de simuler le devenir des polluants dans l'atmosphère à partir de cadastres d'émission, de la paramétrisation des conditions météorologiques et des processus physico-chimiques de (trans-)formation des PM (*particulate matter*);
- celles se basant sur la mesure des propriétés physico-chimiques des particules sur un site récepteur (« modèles récepteurs »). Ces derniers rendent compte des situations réelles et sont aujourd'hui couramment utilisés au sein de la communauté scientifique et par les acteurs de la surveillance de la qualité de l'air.

1 - <https://ec.europa.eu/irc/en/publication/european-guide-air-pollution-source-apportionment-receptor-models>

Un guide méthodologique pour la mise en œuvre des modèles récepteurs a été édité dans le cadre des travaux du forum européen pour la



Figure 1
Page de couverture de la version révisée du guide européen pour l'application de modèles récepteurs paru en 2019.



Figure 2
Localisation des sites étudiés dans le cadre du projet SOURCES.

modélisation de la qualité de l'air (FAIRMODE)¹. L'Ineris s'est fortement impliqué dans ces travaux, en collaboration avec le Joint Research Center (figure 1).

Les méthodologies appliquées incluent généralement la détermination d'une grande diversité de traceurs spécifiques, suivie de l'utilisation d'outils statistiques basés soit sur une bonne connaissance a priori des principales sources et de leur profil d'émission, soit sur une détermination a posteriori de ces sources à l'aide de profils d'émission déterminés par ailleurs. Quelle que soit l'approche utilisée, l'obtention de résultats pertinents nécessite une bonne connaissance de l'environnement immédiat du site d'étude et ainsi que l'élaboration d'une stratégie expérimentale adaptée.

Les informations fournies par les modèles récepteurs sont directement

exploitables (et communicables) pour les sources primaires de particules (e.g., combustion de biomasse, émissions directes à l'échappement automobile, sels de mer...). En revanche, pour les aérosols secondaires, les contributions obtenues ne peuvent permettre de statuer directement sur l'impact réel d'une modification des concentrations de leurs précurseurs gazeux (dont les sources restent, en outre, fréquemment à déterminer) sur leurs niveaux de concentrations particulières. En effet, comme les processus de transformations secondaires ne sont généralement pas linéaires, les polluants émis par les différentes sources (anthropiques ou naturelles) réagissent entre eux, selon des processus que les modèles récepteurs ne peuvent ni discriminer ni quantifier. Pour exemple, les modèles récepteurs permettent d'estimer la contribution des émissions directes de particules par le transport routier, mais n'apportent pas d'information

ABSTRACT /

The source apportionment of air pollutants currently constitutes an overarching challenge for policy makers. This can be accomplished using receptor models, which allows to attribute the mass of an atmospheric pollutant at a given site (called the receptor) to its emission sources by using multivariate analysis. These tools have the advantage of providing information derived from real-world measurements, including estimations of output uncertainty. However, there are limitations in their application to very reactive species. In this context, Ineris collaborated closely with the Joint Research Center (JRC) to edit a revised version of the European guidance document dedicated to the use of such data treatment tools, in collaboration with a group of international experts. This document notably includes tutorials, technical recommendations and check lists for different types of receptor models.

In parallel, the SOURCES project supported by Ademe allowed to investigate 15 datasets corresponding to various sampling sites distributed all over France. An innovative aspect of this study is that receptor model analyses have been achieved in a harmonized way, allowing for accurate output comparisons.

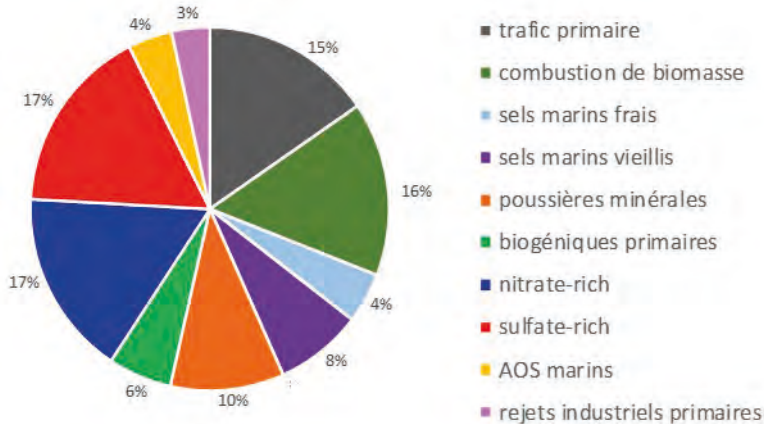


Figure 3
Contributions annuelles moyennes des principaux facteurs constitutifs des PM₁₀ en fond urbain à l'échelle nationale.

quantitative précise sur l'influence réelle de cette même source dans la formation d'aérosols secondaires (en particulier le nitrate d'ammonium et les aérosols organiques secondaires).

L'application de « modèles récepteurs » implique généralement l'utilisation de nombreuses hypothèses conceptuelles et empiriques. Leur mise en œuvre nécessite de documenter de la manière la plus exhaustive possible les choix réalisés au cours des différentes étapes de leur mise en œuvre.

En parallèle des travaux méthodologiques qu'il a menés sur ces approches, l'Ineris a également conduit une étude intégrative avec l'Institut des géosciences de l'environnement (CNRS/Université Grenoble Alpes) permettant une réanalyse homogène d'une

quinzaine de jeux de données français (figure 2) collectés entre 2012 et 2016 dans le cadre du programme CARA du LCSQA (Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air) et/ou de projets de recherche nationaux/européens.

Ce travail a été cofinancé par l'Ademe (projet SOURCES) et constitue la plus large étude de sources de PM₁₀ au niveau national par application d'un modèle récepteur. Il a fait l'objet d'une publication scientifique en 2019, synthétisant les principaux résultats issus de cette étude [1].

À titre d'illustration, la figure 3 présente les contributions moyennes des principales sources de PM obtenus pour les environnements de fond urbains à l'échelle nationale (moyennes réalisées pour les sites indiqués en jaune sur la figure 2).

Référence

[1] Weber, S., D. Salameh, A. Albinet, L. Alleman, A. Waked, J.-L. Besombes, V. Jacob, G. Guillaud, B. Mesbah, B. Rocq, A. Hulin, M. Dominik-Sègue, E. Chrétien, J.-L. Jaffrezo and O. Favez (2019): Comparison of PM₁₀ source profiles at 15 French sites using a harmonized constrained positive matrix factorization approach. *Atmosphere*, 10, 310, doi: 10.3390/atmos10060310

Modélisation *in silico* des chemins de l'effet néfaste (AOP) en toxicologie

Auteurs :
 Enrico MOMBELLI,
 Cléo TEBBY

LES CHEMINS DE L'EFFET NÉFASTE

La toxicologie s'oriente vers la caractérisation des voies de toxicité conduisant à des effets néfastes. Mieux connaître les mécanismes biologiques et leurs étapes vers la survenue d'une pathologie permettrait d'anticiper les perturbations liées à des expositions aux substances chimiques. La définition de ces voies de toxicité est connue sous le nom d'AOP pour « *Adverse Outcome Pathways* » [1]. Un AOP décrit la cascade d'évènements déclenchés par l'interaction d'une substance avec des cibles moléculaires et pouvant mener à un effet néfaste au niveau de l'organisme. En mesurant l'amplitude des effets intermédiaires en réponse à différentes doses et scénarios d'exposition et en quantifiant

la relation entre leurs évènements, les AOP pourraient fournir davantage d'informations pour l'évaluation des risques.

Dans le but de contribuer à l'application des AOP, L'Ineris participe au projet européen H2020 EU-ToxRisk. D'une part, nous avons caractérisé les évènements initiateurs de la stéatose hépatique et d'autre part, nous avons comparé plusieurs approches de quantification d'un AOP pour la maladie rénale chronique.

MODÉLISATION QSAR D'ÉVÈNEMENTS INITIATEURS DE LA STÉATOSE HÉPATIQUE

Le but de ce travail (figure 1), conduit en collaboration avec l'institut Mario Negri (Italie), était de développer des

modèles QSAR prédisant les activités biologiques d'une série de facteurs de transcription (FT) identifiés comme des évènements moléculaires initiateurs (EMI) d'AOPs aboutissant à une stéatose hépatique [2]. Les données de trans-activation pour ces EMI ont été extraites de la base de données ToxCast [3].

Une des difficultés majeures de modélisation concernait la proportion réduite de substances actives. Lorsque les algorithmes QSAR sont confrontés à ce problème, ils biaisent les prédictions en surestimant l'appartenance à la classe majoritaire. Ce problème a été résolu grâce à l'algorithme des forêts d'arbres décisionnels (FAD). La première solution consistait à calibrer les FAD sur un jeu de données équilibré obtenu en

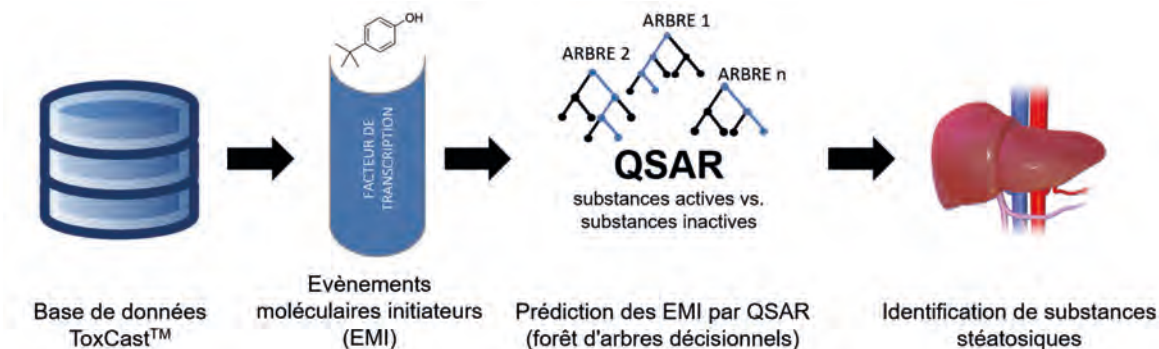


Figure 1 Schématisation de la modélisation QSAR des événements moléculaires initiateurs de la stéatose hépatique. Les données répertoriées par la base de données ToxCast ont été utilisées pour calibrer des modèles QSAR capables d'identifier les substances pouvant perturber les facteurs de transcription impliqués dans les phénomènes stéatosiques. Ces prédictions QSAR permettent des approches de criblage virtuel visées à hiérarchiser des listes de substances chimiques en fonction de leur potentiel stéatosique.

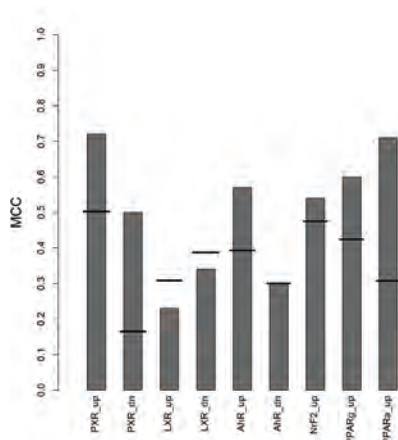


Figure 2 Performance prédictive évaluée sur un jeu de validation externe (non utilisé lors de la calibration des modèles) des modèles QSAR consensus des EMI de la stéatose hépatique. Les étiquettes « up » et « dn » désignent respectivement un effet de régulation positive et négative de la trans-activation des FT. Les lignes horizontales indiquent les seuils critiques de validité de l'indicateur statistique MCC (coefficient de corrélation de Matthews) garantissant une spécificité et une sensibilité égales ou supérieures à 0,75. La performance prédictive de la majorité des modèles dépasse ces seuils.

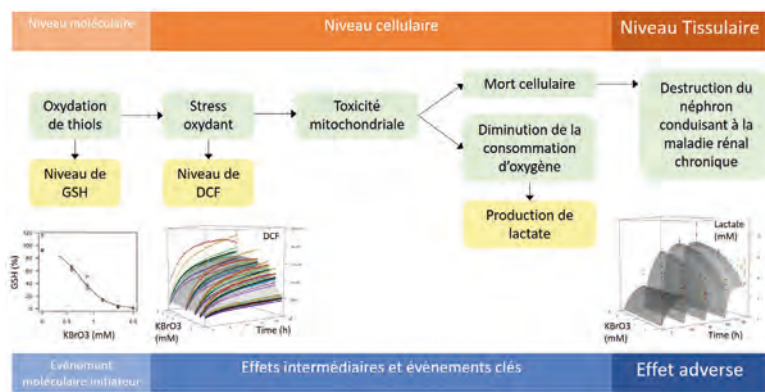


Figure 3
Schéma de l'AOP de maladie rénale chronique et données modélisées. En vert: les évènements. En jaune: des mesures de marqueurs (GSH: Glutathion; DCF: dichlorofluoresceine fluorescente) d'après (Zgheib et al. 2019). Les données représentent la dose-réponse de GSH à 1heure d'exposition, le niveau de stress oxydant au cours du temps à différentes doses, et des mesures de lactate à plusieurs doses et durées d'exposition.

excluant des substances inactives. La deuxième solution consistait à calibrer chaque arbre décisionnel sur des sous-échantillons équilibrés du jeu de données. La combinaison des deux stratégies au sein d'une approche par consensus a donné les meilleurs résultats en termes de performance prédictive (figure 2).

La majorité des modèles QSAR développés prédit avec un niveau de précision acceptable (sensibilité et spécificité ≥ 0.75) pour cinq EMI de la stéatose (PXR, AhR, Nrf2, PPAR γ , PPAR α). Ces modèles peuvent être utilisés lors d'une approche de criblage virtuel. En effet, la probabilité d'une substance d'induire la stéatose *in vitro* augmente avec le nombre d'EMI prédits comme actifs par les modèles. L'aire sous la courbe qui caractérise cette approche est égale à 0,76 indiquant un pouvoir de discrimination compatible avec un criblage de bases de données.

QUANTIFICATION DE L'AOP POUR LA MALADIE RÉNALE CHRONIQUE

À l'aide d'outils de modélisation mathématique, l'Ineris a étudié le lien entre les évènements successifs de l'AOP de la maladie rénale chronique (figure 3). L'amplitude de chaque évènement de cet AOP en réponse à différentes doses de bromate de potassium a été quantifiée *in vitro* à l'aide de cellules rénales par l'université médicale d'Innsbruck puis l'université Vrije d'Amsterdam. Pour établir la relation mathématique entre les évènements de l'AOP, trois approches ont été comparées. Premièrement, des relations

dose-réponse ont été établies entre chaque évènement et la dose d'exposition, permettant de modéliser les liens entre les évènements. La deuxième approche consistait à calibrer un réseau bayésien, qui repose sur des relations probabilistes entre chaque évènement. Ainsi les données obtenues pour chaque évènement clé renseignent l'ensemble des relations modélisées, ainsi que l'incertitude associée. La dimension temporelle de l'AOP a été en partie intégrée grâce au suivi temporel du stress oxydant (DCF). La troisième approche consistait à utiliser un modèle de biologie systémique modélisant le stress oxydant par la voie du facteur de transcription Nrf2 et du glutathion, qui intégrait un nombre important de processus intracellulaires à l'aide de 57 équations différentielles [4].

La méthode des réseaux bayésiens est celle qui, pour une qualité de prédiction équivalente, utilise le moins de paramètres. Mis à part le lien entre l'évènement initiateur et la dose, les relations modélisées sont linéaires. Le modèle de biologie systémique permet d'obtenir des prédictions satisfaisantes mais requiert plusieurs étapes de calibration en modulant les hypothèses sur le mécanisme d'action. La méthode des réseaux bayésiens a donc été retenue en raison de :

- sa simplicité par rapport aux outils de biologie systémique;
- sa capacité à représenter des liens mécanistiques entre les évènements.

ABSTRACT /

Toxicology is moving towards the characterization of mechanistic biological pathways leading to adverse outcomes. These toxicity pathways are defined as AOPs for "Adverse Outcome Pathway", which describe the cascade of events triggered by the interaction of chemicals with molecular targets that can lead to an adverse outcome at an organism or population level. By determining and modelling the nature of the relationship between each event based on *in vitro* measurements, AOPs can be quantified using mathematical tools. This unifying toxicological construct can be used in practice in risk assessment.

Within the European project EU-ToxRisk, Ineris has contributed to the development of AOPs by characterizing the molecular initiating events of hepatic steatosis by QSAR modeling (Quantitative Structure-Activity Relationship) and by comparing several approaches to calibrate a quantitative AOP for chronic kidney disease. The developed QSAR models proved to be successful in virtual screening approaches aimed at identifying steatotic chemicals. The case study of chronic kidney disease provided insight into various techniques for quantitative AOP calibration, with further applications expected in Bayesian networks.

Références

- [1] Leist, M., A. Ghallab, R. Graepel, R. Marchan, R. Hassan, S. H. Bennekou, A. Limonciel, M. Vinken, S. Schildknecht, T. Waldmann, E. Danen, B. van Ravenzwaay, H. Kamp, I. Gardner, P. Godoy, F. Y. Bois, A. Braeuning, R. Reif, F. Oesch, D. Drasdo, S. Hohme, M. Schwarz, T. Hartung, T. Braunbeck, J. Beltman, H. Vrieling, F. Sanz, A. Forsby, D. Gadaleta, C. Fisher, J. Kelm, D. Fluri, G. Ecker, B. Zdrzil, A. Terron, P. Jennings, B. van der Burg, S. Dooley, A. H. Meijer, E. Willighagen, M. Martens, C. Evelo, E. Mombelli, O. Tabourea, A. Mantovani, B. Hardy, B. Koch, S. Escher, C. van Thriel, C. Cadenas, D. Kroese, B. van de Water & J. G. Hengstler (2017) Adverse outcome pathways: opportunities, limitations and open questions. *Arch Toxicol*, 91, 3477-3505.
- [2] Gadaleta, D., S. Manganelli, A. Roncaglioni, C. Toma, E. Benfenati & E. Mombelli (2018) QSAR Modeling of ToxCast Assays Relevant to the Molecular Initiating Events of AOPs Leading to Hepatic Steatosis. *J Chem Inf Model*, 58, 1501-1517
- [3] Judson, R., A. Richard, D. J. Dix, K. Houck, M. Martin, R. Kavlock, V. Dellarco, T. Henry, T. Holderman, P. Sayre, S. Tan, T. Carpenter & E. Smith (2009) The toxicity data landscape for environmental chemicals. *Environ Health Perspect*, 117, 685-95
- [4] Zgheib, E., W. Gao, A. Limonciel, H. Aladjov, H. Yang, C. Tebby, G. Gayraud, P. Jennings, M. Sachana, J. B. Beltman & F. Y. Bois (2019) Application of three approaches for quantitative AOP development to renal toxicity. *Computational Toxicology*, 11, 1-13

Développement d'une approche de modélisation pour élucider les mécanismes du bisphénol A sur les populations d'épinoches en mésocosmes

Auteur :
Rémy BEAUDOUIN

Le bisphénol A (BPA) est une substance chimique qui était utilisée dans de nombreux produits d'usage courant puisqu'il s'agissait d'un des constituants des plastiques rigides tels que le polycarbonate. Reconnu comme perturbateur endocrinien, son utilisation est maintenant interdite dans un grand nombre de produits [1]. Afin d'évaluer les effets du BPA sur les organismes aquatiques, une expérience dans les rivières artificielles de l'Ineris a été réalisée en 2012 testant trois concentrations de BPA (1, 10 et 100 µg/L) [2]. Lors de cette expérience, des impacts au niveau individuel et populationnel sur les épinoches à trois épines ont été observés à la plus forte concentration testée mais les causes expliquant ces effets n'ont pas été précisément élucidées à cette époque.

Pour permettre d'extrapoler la toxicité observée au niveau moléculaire ou individuel au niveau de la population,

nous avons élaboré un modèle de dynamique de population. Ce modèle, couplant un modèle individu-centré (IBM) et un modèle basé sur la théorie « *Dynamic Energy Budget* » (DEB), a été testé rigoureusement à l'aide d'analyses de sensibilité locales et globales afin d'identifier les paramètres les plus influents sur ses prédictions. Ces paramètres ont ensuite été calibrés à l'aide de jeux de données provenant de deux expériences indépendantes en mésocosme. Enfin, pour évaluer la pertinence de ce modèle DEB-IBM pour décrire les dynamiques de population des épinoches en mésocosme, ses capacités prédictives ont été évaluées à l'aide de trois jeux de données présentant différents scénarios environnementaux [3].

Pour ces trois expériences, les prédictions du modèle sont similaires aux observations faites en fin d'expérience. Les bonnes capacités prédictives de notre modèle permettent

d'envisager son utilisation pour évaluer les impacts des substances toxiques au niveau de la population en améliorant les analyses des expériences en mésocosme. Ainsi nous avons utilisé les données issues de l'expérience sur le BPA pour :

- évaluer le potentiel de ce modèle pour prédire les impacts au niveau de la population à l'aide de données écotoxicologiques issues de la littérature ;
- mieux comprendre les mécanismes de toxicité du BPA dans ces mésocosmes [4].

Pour cela, nous avons testé plusieurs modes d'action possibles du BPA (effets directs) en prenant en compte les effets sur l'environnement dans lequel vivent et se reproduisent les épinoches. Les effets directs du BPA sur les poissons ont été identifiés à partir des données de la littérature (figure 1) tandis que les effets indirects sur les épinoches ont été pris en

1 - Lowest observed effect concentration

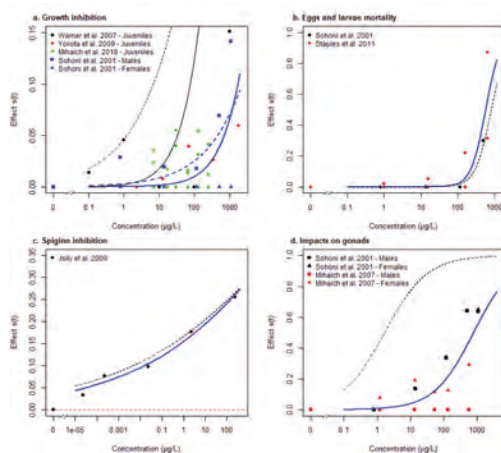


Figure 1
Dose-réponses des effets du BPA sur la croissance (a), la mortalité des œufs et des larves (b), la production de spiggin (c) et le niveau de développement des gonades (d) (David et al. 2019a). Les points représentent les données de la littérature, les lignes bleues représentent les doses-réponses ajustées sur les points de données. Les lignes noires représentent les courbes dose-réponse recalibrées sur les données de populations obtenues en mésocosme. Pour l'inhibition de la croissance, les lignes pleines représentent les doses-réponses pour les adultes (mâles et femelles) tandis que les lignes en pointillé représentent la dose-réponse pour les juvéniles.

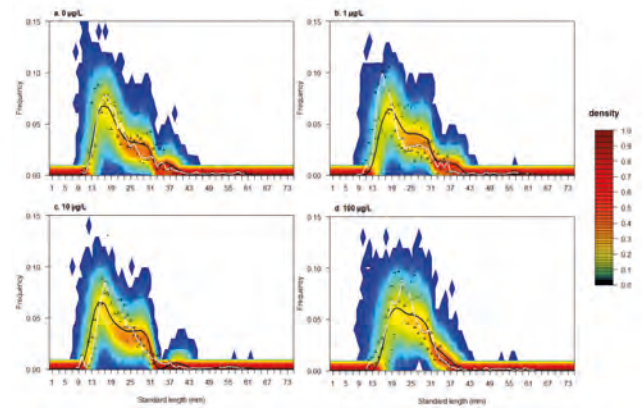


Figure 2
Distributions des fréquences des tailles des poissons prédites par le modèle par rapport aux fréquences des tailles des poissons observées (classe de 1 mm) pour chaque traitement au BPA : 0 µg/L (a), 1 µg/L (b), 10 µg/L (c) ou 100 µg/L (d) (David et al. 2019a). Différents types de points représentent les fréquences des différentes populations observées. Les lignes noires et blanches représentent les distributions médianes des populations simulées et observées. Le niveau de couleur représente la fréquence des populations simulées (1000 simulations) ayant un pourcentage donné d'individus pour une classe de taille donnée. Les fréquences inférieures à < 1e-04 sont représentées en blanc.

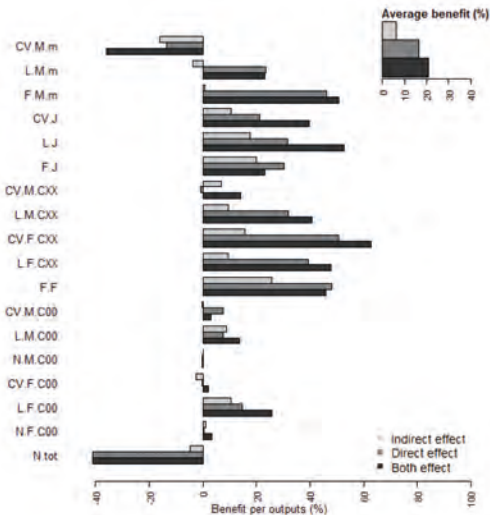


Figure 3
Amélioration des prédictions des modèles prenant en compte les effets indirects du BPA seuls (gris clair), les effets directs du BPA seuls (gris moyen) ou les effets directs et indirects (gris foncé) pour les différentes variables descriptives des populations d'épinoches (David et al. 2019a). Les résultats sont représentés en termes de ratios entre le RMSE de ces différents modèles et le RMSE du modèle sans tenir compte des effets BPA pour chaque sortie. L'avantage moyen sur toutes les sorties est donné en haut à droite. F: femelle. M: Mâle. M.m: mâle sexuellement mature. J: Juvénile. C00: poissons introduits dans les mésocosmes et CXX: poissons nés dans les mésocosmes. L: taille moyenne des poissons. CV: variation dans une population des tailles des poissons. F.M.m, F.F et F.J: fréquence de mâles sexuellement matures, de femelles, de juvéniles dans les populations. N: nombre de poissons.

compte à partir des données d'échantillonnage des proies provenant de nos rivières artificielles.

Les résultats de modélisation ont montré que l'utilisation du modèle pour extrapoler les données de toxicité mesurées en laboratoire de l'échelle individuelle à l'échelle populationnelle semblait prometteuse puisque celui-ci prédisait correctement les variables descriptives des populations d'épinoches à trois épines en fin d'expérience (figure 2). Néanmoins, comme les études en laboratoire s'intéressant aux effets du BPA sur les épinoches à trois épines sont relativement rares, nous avons dû intégrer des données obtenues chez différentes espèces. La variabilité interspèce de la sensibilité au BPA est donc une source d'incertitude dans notre approche et représente un frein à l'utilisation du DEB-IBM pour extrapoler les effets de substances chimiques moins étudiées en laboratoire.

Par ailleurs, nous avons identifié les principaux modes d'action du BPA sur les épinoches en mésocosme et nous avons évalué la contribution des effets directs sur les traits d'histoire de vie des

épinoches et indirects sur leurs proies pour chacune des variables descriptives des populations d'épinoches. En effet, les effets directs du BPA sur les poissons (impact sur la formation des gonades, la croissance, le comportement reproducteur des mâles, la survie des œufs et des larves) expliquaient principalement les modifications de la structure de la population d'épinoches à trois épines en fin d'expérience en mésocosme (figure 3). De plus, nous avons également proposé une démarche pour extrapoler des courbes dose-réponses à l'échelle de la population dans le but d'estimer des valeurs seuils de toxicité. Enfin, la LOEC¹ la plus basse pour les variables descriptives des populations d'épinoches à trois épines a été estimée par modélisation à 10 µg/L de BPA.

Ainsi, lors de cette étude de cas, notre approche basée sur la modélisation s'est montrée performante pour reproduire les dynamiques normales de populations et pour simuler les effets d'une substance toxique perturbatrice endocrinienne. Ainsi, l'utilisation de ce modèle permettra de donner un sens écologique aux observations faites en laboratoire, et donc de fournir des critères d'évaluation et de gestion du risque pertinents.

ABSTRACT /

Bisphenol A (BPA), a well-known endocrine-disrupting chemical, is ubiquitously present in the aquatic environment. Its impacts on populations of three-spined sticklebacks have been studied in artificial streams at low BPA doses. These experimental data showed clear impacts on the population, but the causes explaining the observed effects remained unclear. Here, we used an individual-based model coupled with a Dynamic Energy Budget model to (i) predict BPA impacts on populations from individual level laboratory ecotoxicological endpoints and (ii) provide insight on the mechanisms of BPA toxicity in these mesocosms.

To do that, both direct and indirect effects of BPA on sticklebacks were incorporated in the model. Direct BPA effects on fish have been identified based on literature data whereas indirect effects have been taken into account using sampling data from the exposed artificial streams.

Results showed that direct BPA effects on fish mainly explained population structure in the mesocosms, but indirect effects were not negligible. Hence, this study showed the potential of modelling in risk assessment to predict the impacts on fish population viability from effects measured on organisms.

Références

- [1] Beausoleil, C., Emond, C., Cravedi, J.P., Antignac, J.P., Applanat, M., Appenzeller, B.M.R. et al. (2018). Regulatory identification of BPA as an endocrine disruptor: Context and methodology. *Molecular and cellular endocrinology*, 475, 4-9.
- [2] de Kermoyan, G., Joachim, S., Baudoin, P., Lonjaret, M., Tebby, C., Lesaulnier, F. et al. (2013). Effects of bisphenol A on different trophic levels in a lotic experimental ecosystem. *Aquat Toxicol*, 144, 186-198.
- [3] David, V., Joachim, S., Tebby, C., Porcher, J.-M. & Beaudouin, R. (2019b). Modelling population dynamics in mesocosms using an individual-based model coupled to a bioenergetics model. *Ecological Modelling*, 398, 55-66.
- [4] David, V., Joachim, S., Porcher, J.M. & Beaudouin, R. (2019a). Modelling BPA effects on three-spined stickleback population dynamics in mesocosms to improve the understanding of population effects. *Science of the Total Environment*, 692, 854-867.

Recherche des effets des radiofréquences de la téléphonie mobile sur la physiologie humaine : étude de l'activité cérébrale et la variabilité du rythme cardiaque

Auteur :
Brahim SELMAOUI

L'utilisation croissante du téléphone portable a considérablement augmenté l'exposition de la population aux champs électromagnétiques de radiofréquences (CEM-RF). Les effets biologiques de ces champs et leurs conséquences sur la santé humaine ont retenu l'attention des scientifiques, plus particulièrement les effets sur le cerveau. Certaines études ont examiné l'effet sur le flux sanguin cérébral [1] ou sur la réponse hémodynamique cérébrale via l'IRM fonctionnelle [2 ; 3 ; 4], alors que d'autres ont examiné l'activité électrique du cerveau via l'électroencéphalographie (EEG) (ex: [5]). L'un des effets cohérent observé sur l'EEG jusqu'à présent est la modulation de la puissance spectrale de la bande alpha. Cependant, certaines études rapportent une augmentation de la puissance spectrale de la bande alpha tandis que quelques-unes n'ont montré aucun effet statistiquement significatif [6]. Il apparaît donc que les effets de l'exposition aux CEM-RF sur l'activité de la bande alpha ne sont toujours pas concluants. Une explication de ces

résultats hétérogènes pourrait résider dans les écarts entre les études concernant l'utilisation des méthodologies et des protocoles expérimentaux, les fréquences et les intensités appliquées par les systèmes d'exposition et les critères d'inclusion des participants ou tout simplement la variabilité de la technique utilisée (pour la revue, voir [6]).

Afin de caractériser davantage la modulation de la bande alpha par les CEM-RF, la magnétoencéphalographie (MEG) combinée à l'IRM cérébrale anatomique individuelle pourrait être une alternative à la résolution spatiale limitée de l'EEG. Pour cette raison, le but de notre étude était d'étudier l'effet de l'exposition GSM 900 MHz des téléphones portables sur l'activité MEG spontanée de la bande alpha au réveil avec l'espace capteur et l'espace source. En effet, comme dans l'EEG, la MEG enregistre les phénomènes corticaux avec une résolution temporelle en millisecondes, mais son principal avantage est une précision spatiale plus élevée à la fois dans l'enregistrement de surface et la reconstruction de la source. La topographie spatiale des données des capteurs MEG est visuellement et quantitativement moins tachée et déformée par les changements de conductivité électrique entre le cerveau, le crâne et le cuir chevelu par rapport aux signaux EEG provenant de la même source cérébrale physiologique [7 ; 8].

À notre connaissance, c'est la première fois qu'un protocole MEG est appliqué pour étudier l'impact potentiel des CEM-RF sur l'activité cérébrale au repos. Pour limiter les biais liés aux facteurs de confusion, nous avons également évalué la fréquence cardiaque et la variabilité de la fréquence cardiaque (VRC), en tant qu'indices de l'activité du système nerveux autonome [9].

METHODOLOGIE

Les participants

Trente-deux volontaires sains ont participé à cette étude (15 hommes et 17 femmes, âge moyen \pm SD : 24,8 \pm 3,5 ans, indice de masse corporelle

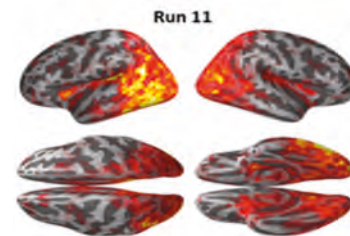


Figure 2
Exemple de résultats de la modulation du rythme de l'alpha (haute) en espace source. Les analyses de données yeux fermés au niveau de l'espace source ont montré des changements de puissance dans la région corticale temporo-occipitale confirmant les résultats obtenus en espace capteur.

moyen \pm SD : 21,61 \pm 1,87). Ils ont été sélectionnés selon des critères d'inclusion stricts. Aucun des participants n'avait d'antécédents de traumatisme crânien, de maladie neurologique ou psychiatrique ou de maladie chronique, d'invalidité ou de maladie aiguë récente. Les femmes enceintes n'ont pas été incluses dans l'étude (confirmé par le test de grossesse urinaire, le test de grossesse NADAL hCG 10 mUI / ml, nal von minden GmbH, Allemagne).

Les critères d'inclusion comprenaient également des habitudes de sommeil régulières, pas de médicaments, pas de tabac, pas de consommation de drogues (confirmé par un test multi-drogue d'urine, NarcoCheck Evolutive, France). Les participants devaient s'abstenir de consommer de l'alcool et de la caféine pendant 24 heures avant chaque session et jeûner pendant au moins deux heures et demie avant le début de la session d'enregistrement. On leur a demandé de maintenir un cycle veille-sommeil régulier (de 8 h à 23 h \pm 1 h) au moins une semaine avant l'expérience et de ne pas utiliser leur téléphone portable le jour de l'expérience. Les femmes n'ont participé que pendant la phase folliculaire de leur cycle ovarien-menstruel. Tous les participants ont donné leur consentement écrit en connaissance de cause et ont été indemnisés pour leur participation.

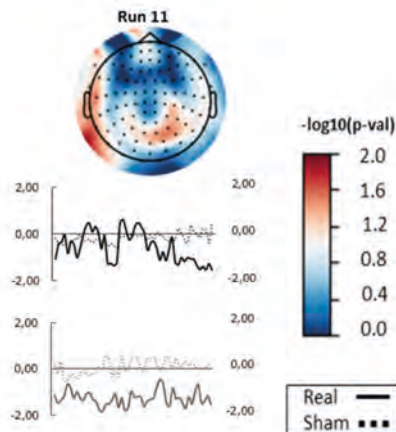


Figure 1
Exemple de résultats de la modulation du rythme de l'alpha (haute) en espace capteur. Les analyses de données yeux fermés au niveau de l'espace capteur ont montré des changements de puissance dans la région corticale temporo-occipitale confirmant les résultats obtenus en espace source. Axe abscisse : électrode par région; axe ordonnée: amplitude de la puissance spectrale de l'alpha bande.

Toutes les procédures ont été approuvées par le Comité d'éthique français CPP Ouest VI (ID n°: RCB 2017-A01702-51) et étaient conformes à la déclaration d'Helsinki.

Système d'exposition

Afin d'assurer une conception en double aveugle, les systèmes d'exposition consistaient en deux appareils téléphoniques GSM (Nokia 6650) avec exactement la même forme et la même structure, qui ne différaient que par l'émission CEM-RF, comme indiqué précédemment [1; 5].

Le signal émis était un signal GSM fonctionnant à une fréquence de 900 MHz, modulé à 217 Hz avec une puissance maximale de 2 W, équivalent à une puissance moyenne de 250 mW avec 1/8 de rapport cyclique. Les taux d'absorption spécifiques maximaux (DAS) ont été moyennés sur 10 g de tissu et 1 g de tissu ainsi que la valeur maximale qui donnent les valeurs des mesures suivantes : 0,49 W/kg, 0,70 W/kg et 0,93 W/kg, respectivement. Le SAR du téléphone factice était inférieur au niveau de détection du système (0,001 W/kg) à n'importe quelle position du fantôme et aucun champ électrique n'a été détecté à la surface du téléphone factice, comme indiqué dans nos études précédentes [1; 5].

Protocole expérimental

Les participants ont assisté à deux sessions d'enregistrement à une semaine d'intervalle à la même heure de la journée. Nous avons utilisé une conception expérimentale croisée, randomisée, en double aveugle et contrebalancée. Chaque session a été caractérisée par trois phases d'enregistrement : les valeurs de base (références) avant exposition, la période d'exposition avec CEM-RF réelle ou fictive et la période de post-exposition sans le téléphone. En raison de l'interférence du CEM-RF sur les capteurs MEG, le MEG a été enregistré

uniquement pendant la période de référence (avant exposition) et pendant la période post-exposition. L'EEG a été enregistré pendant toute la durée de la session expérimentale. Nous avons étudié les effets de l'exposition aux radiofréquences des téléphones portables sur les bandes alpha inférieures et supérieures. Le magnétoencéphalogramme a été enregistré chez des volontaires sains au repos avant et après une exposition aux radiofréquences avec les yeux ouverts et les yeux fermés. Les densités spectrales de puissance ont été estimées au niveau du capteur et de l'espace source.

RÉSULTATS

Les résultats ont indiqué un effet significatif de l'exposition aux radiofréquences sur les bandes alpha inférieures et supérieures, principalement représentées par une diminution des densités de puissance spectrale. En particulier, des analyses de données yeux ouverts dans l'espace capteur et l'espace source ont localisé la modification de la puissance dans les régions corticales pariétales et fronto-pariétales, respectivement. Les analyses de données yeux fermés au niveau du capteur et de la source ont montré des changements de puissance dans la région corticale temporo-occipitale. Aucun des autres paramètres physiologiques de la variabilité du rythme cardiaque étudiée ici n'a rapporté de différence statistiquement significative liée à la condition d'exposition.

DISCUSSION

Cette étude de magnétoencéphalographie dans l'espace capteur et l'espace source a confirmé que les radiofréquences modulent l'activité de la bande alpha. Les régions corticales impliquées dans les changements de puissance inférieurs et supérieurs semblent être liées à la condition des yeux : yeux ouverts ou yeux fermés.

ABSTRACT /

The aim of our study was to investigate the effect of GSM 900 MHz cell phone exposure on spontaneous waking MEG activity in the alpha band with the sensor and source space. In order to limit the biases associated with confounding factors, we also evaluated heart rate and heart rate variability as indices of autonomic nervous system activity. The exposure systems consisted of two GSM phone devices with exactly the same shape and structure, which differed only in RF-EMF emission. The maximum specific absorption rates were averaged over 10g of tissue and 1g of tissue, as well as the maximum value, giving the following measurement values: 0.49W/kg, 0.70W/kg and 0.93W/kg, respectively. The results indicated a significant effect of RF exposure on the lower and upper alpha bands, mainly represented by a decrease in spectral power densities. In particular, analyses of open-eye data in the sensor space and source space localized the power change in the parietal and fronto-parietal cortical regions, respectively. Analyses of closed-eye data at the sensor and source showed power changes in the temporo-occipital cortical region. None effect observed in the other physiological parameters.



Figure 3
Enregistrement magnétoencéphalographie (MEG).

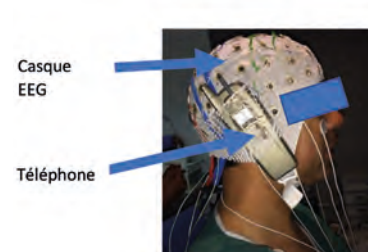


Figure 4
Enregistrement électroencéphalographie (EEG).

Références

- [1] Ghosn R, Thuroczy G, Loos N, Brenet-Dufour V, Liabeuf S, et al. (2012). "Effects of GSM 900 MHz on middle cerebral artery blood flow assessed by transcranial Doppler sonography." *Radiat Res* 178(6): 543-50, PMID: 23106209, DOI: 10.1667/RR3007.1.
- [2] Curcio G, Nardo D, Perrucci MG, Pasqualetti P, Chen TL, et al. (2012). "Effects of mobile phone signals over BOLD response while performing a cognitive task." *Clinical Neurophysiology* 123(1): 129-36, PMID: 21741302, DOI: 10.1016/j.clinph.2011.06.007.
- [3] Lv B, Shao Q, Chen Z, Ma L and Wu T (2015). "Effects of acute electromagnetic fields exposure on the interhemispheric homotopic functional connectivity during resting state." *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.*, PMID: 26736632, DOI: 10.1109/EMBC.2015.7318732.
- [4] Wei Y, Yang J, Chen Z, Wu T and Lv B (2019). "Modulation of resting-state brain functional connectivity by exposure to acute fourth-generation long-term evolution electromagnetic field: An fMRI study." *Bioelectromagnetics* 40(1): 42-51, PMID: 30562416, DOI: 10.1002/bem.22165.
- [5] Ghosn R, Yahia-Cherif L, Hugueville L, Ducorps A, Lemarchal JD, et al. (2015). "Radiofrequency signal affects alpha band in resting electroencephalogram." *J Neurophysiol* 113(7): 2753-9, PMID: 25695646, DOI: 10.1152/jn.00765.2014.
- [6] Wallace J and Selmaoui B (2019). "Effect of mobile phone radiofrequency signal on the alpha rhythm of human waking EEG: A review." *Environ Res* 175: 274-86, PMID: 31146099, DOI: 10.1016/j.envres.2019.05.016.
- [7] Hari R, Parkkonen L and Nangini C (2010). "The brain in time: insights from neuromagnetic recordings." *Ann N Y Acad Sci* 1191: 89-109, PMID: 20392277, DOI: 10.1111/j.1749-6632.2010.05438.x.
- [8] Baillet S (2017). "Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging." *Nat Neurosci* 20(3): 327-39, PMID: 28230841, DOI: 10.1038/nn.4504.
- [9] Shaffer F and Ginsberg JP (2017). "An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms." *Front Public Health* 5: 258, PMID: 29034226, DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258.

La modélisation toxicocinétique basée sur la physiologie (PBPK) pour l'exposome

Auteurs :
Céline BROCHOT,
Florence ZEMAN

De nombreuses études suggèrent que la survenue et la sévérité de maladies, notamment chroniques, sont imputables à une combinaison de facteurs génétiques et environnementaux. Les expositions aux facteurs environnementaux sont extrêmement variées, changeantes et complexes. On qualifie d'exposome l'ensemble des expositions couvrant la vie entière. Parmi les méthodologies pour caractériser l'exposome individuel, la modélisation toxicocinétique basée sur la physiologie (PBPK) permet de comprendre le lien entre exposition environnementale et exposition interne dans l'organisme. Nos travaux portent sur l'interprétation des biomarqueurs d'exposition mesurés lors d'études de biosurveillance pour prédire les expositions chimiques lors des périodes de vulnérabilité et sur l'identification de co-expositions de substances.

EXPOSITION DANS LES TISSUS CIBLES

Des études épidémiologiques montrent que l'exposition prénatale à l'acide perfluorooctanesulfonique (PFOS) et à l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) est associée à des effets néfastes sur la santé des enfants. Cependant bon nombre de ces associations statistiques restent mal caractérisées en raison d'incertitudes sur l'exposition fœtale. Nous avons mis en place une approche de modélisation afin de

fournir des indicateurs d'exposition fœtale en lien avec la survenue de ces effets et l'avons appliquée à une cohorte mère-enfant (INMA – *Infancia y Medio Ambiente*) [1].

Notre approche se base sur la transposition de concentrations en PFOS et PFOA mesurées dans le sang maternel à un instant de la grossesse en concentrations au niveau du fœtus dans les tissus cibles sur toute la période de grossesse par l'intermédiaire d'un modèle PBPK. La concentration et l'exposition cumulée (AUC) ont été calculées dans plusieurs organes cibles, soit un total de sept indicateurs. La **figure 1** présente les concentrations plasmatiques chez les fœtus INMA qui augmentent continuellement lors de la grossesse. On observe aussi que les concentrations fœtales en fin de grossesse sont similaires pour les deux composés malgré le facteur 2 entre les concentrations maternelles mesurées. Au niveau individuel, les schémas d'exposition varient considérablement d'un fœtus à l'autre.

Le **tableau 1** présente la comparaison des indicateurs entre le PFOA et le PFOS. Environ 10 % de la population disposent de tous ses indicateurs PFOA supérieurs à ceux du PFOS, 20 % présentent la situation inverse, et environ 70 % présentent un ordre différent entre PFOA et PFOS. Les expositions fœtales simulées

apportent donc des informations complémentaires aux concentrations maternelles mesurées, et permettent de prédire l'exposition prénatale dans les organes cibles pendant les fenêtres de sensibilité. Des travaux futurs mettront en relation ces indicateurs avec des effets néfastes observés chez les enfants.

EXPOSITION À DES MÉLANGES DE PYRÉTHRINOÏDES

La population française est fortement exposée aux pyréthriinoïdes, des insecticides ubiquitaires. Nous avons développé un modèle global reliant l'exposition externe à quatre pyréthriinoïdes (perméthrine, cyperméthrine, cyfluthrine et deltaméthrine) aux concentrations urinaires des cinq métabolites mesurés lors d'études de biosurveillance [2]. Le modèle global a été évalué avec des données humaines (**figure 2**). Dans l'ensemble, le modèle reproduit bien les données: 89 % des prédictions sont éloignées des données d'un facteur 3 au maximum.

Le modèle global a ensuite été appliqué pour prédire les niveaux de métabolites urinaires à partir de scénarios d'exposition réalistes pour la cohorte française ENNS – Étude Nationale Nutrition Santé. Les prédictions du modèle sont proches des données de la cohorte avec des rapports médians entre prédictions et

	PFOA > PFOS	PFOA ≤ PFOS
Charge corporelle à la naissance (µg)	68,2 %	68,2 %
Concentration plasmatique (µg/L)		
Fin du trimestre 1	79,8 %	20,2 %
Fin du trimestre 2	70,8 %	29,2 %
Naissance	65,9 %	34,1 %
Aire sous la courbe (µg.day/L)		
Cerveau	39,9 %	60,1 %
Rein	78,0 %	22,0 %
Foie	9,2 %	90,8 %

Tableau 1

Comparaison des sept indicateurs de l'exposition fœtale entre le PFOA et le PFOS pour les enfants (au stade fœtus) de la cohorte INMA. Les résultats sont présentés sous la forme de pourcentage des individus.

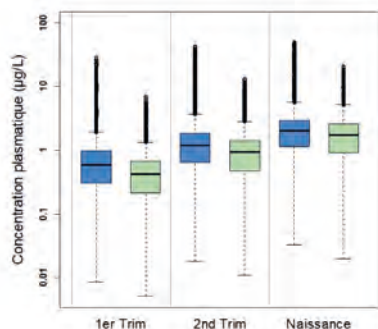


Figure 1
Concentrations plasmatiques fœtales, simulées avec le modèle PBPK, au cours de la grossesse pour le PFOA (bleu) et le PFOS (vert) pour la cohorte INMA.

données entre 0,58 et 1,5. Nous avons ensuite évalué les contributions des trois voies d'exposition et des quatre pyréthrinoides aux concentrations de métabolites urinaires. Les résultats montrent que l'exposition par voie orale est majoritaire (environ 99 %) et que la deltaméthrine concourt davantage à l'exposition externe

cumulée des pyréthrinoides qu'à l'exposition interne pour le métabolite commun 3-PBA alors que c'est l'inverse pour la perméthrine. Notre modèle global multivoie est le premier à considérer plusieurs pyréthrinoides simultanément et à inclure l'impact d'une exposition cumulée sur les biomarqueurs d'exposition, ce qui constitue une amélioration des pratiques actuelles qui traitent chaque composé séparément. Actuellement, nous poursuivons nos travaux pour étendre notre modèle aux femmes enceintes en caractérisant le passage transplacentaire de ces composés [3].

CONCLUSION

Ces deux exemples illustrent l'intérêt de la modélisation PBPK pour caractériser l'exposome individuel, qui est aussi promu par l'initiative européenne sur la biosurveillance humaine (projet européen HBM4EU). Dans ce contexte, nous identifions et évaluons l'adéquation des modèles PBPK existants pour l'évaluation des risques afin de promouvoir leur utilisation [4 ; 5].

ABSTRACT /

The exposome encompasses life-course environmental exposures from the prenatal period onwards. Among the methodologies for characterizing the exposome, we develop physiologically based pharmacokinetic (PBPK) modelling that links chemical external exposure to internal exposure in the body. Our work concerns the interpretation of biomarkers of exposure measured in biomonitoring studies to predict chemical exposures during periods of vulnerability and to identify co-exposures.

The aim of the first study was to provide new indicators of foetal exposure for the INMA (INfancia y Medio Ambiente) birth cohort for two perfluoroalkyl substances. We developed a pregnancy PBPK model to transpose maternal PFOS and PFOA concentrations measured at the end of the first trimester of pregnancy into foetal concentrations in target tissues throughout pregnancy.

The second study aimed at developing a global toxicokinetic model that links the external exposure to four widely-used pyrethroids (deltamethrin, permethrin, cypermethrin, and cyfluthrin) to the urinary concentrations of their metabolites. The model combined with realistic cumulative and aggregated exposures to pyrethroids was applied to the French population.

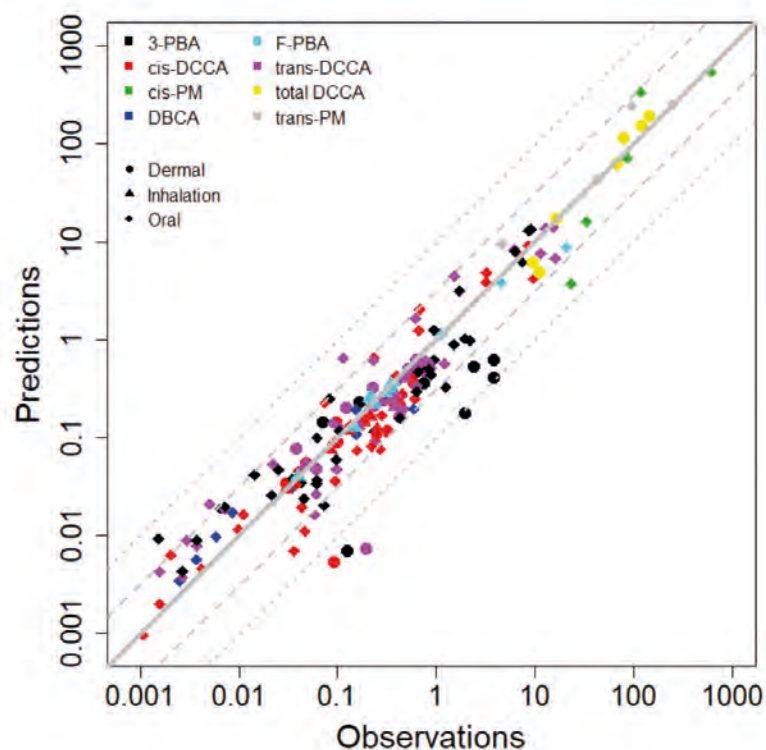


Figure 2
Comparaison des prédictions du modèle avec les données expérimentales obtenues chez l'homme après exposition orale, cutanée ou par inhalation à un pyréthrinoides. Les cinq métabolites sont représentés (3-PBA, F-PBA, cis-DCCA, trans-DCCA, DBCA) ainsi que la trans- et cis-perméthrine. La ligne pleine est la correspondance parfaite entre les prédictions et les données expérimentales. Les lignes en tirets représentent l'intervalle d'erreur de 5 et les lignes pointillées l'intervalle d'erreur de 10.

Références

- [1] Céline Brochot, Maribel Casas, Cytia Manzano-Salgado, Florence A. Zeman, Thomas Schettgen, Martine Vrijheid, Frédéric Y. Bois. Prediction of maternal and foetal exposures to perfluoroalkyl compounds in a Spanish birth cohort using toxicokinetic modelling. *Toxicology and Applied Pharmacology* 379 (2019) 114640.
- [2] Paul Quindroit, Rémy Beaudouin, Céline Brochot. Estimating the cumulative human exposures to pyrethroids by combined multi-route PBPK models: Application to the French population. *Toxicology Letters*. Volume 312, 15 September 2019, Pages 125-138
- [3] Personne S, Marcelo P, Pilard S, Baltora-Rosset S, Corona A, Robidel F, Lecomte A, Brochot C, Bach V, Zeman F. (2019). "Determination of maternal and foetal distribution of cis- and trans-permethrin isomers and their metabolites in pregnant rats by liquid chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS)." *Anal Bioanal Chem* 411(130): 8043-8052.
- [4] Dimosthenis Sarigiannis, Spyros Karakitsios, Elena Dominguez-Romero, Krystalia Papadaki, Celine Brochot, Vikas Kumar, Marta Schumacher, Moustapha Sy, Hans Mielke, Mathias Greiner, Martin Scheringer. Physiology-based toxicokinetic modeling in the frame of the European Human Biomonitoring Initiative. *Environmental Research*. Volume 172, May 2019, Pages 216-230
- [5] Marc Codaccioni, Frédéric Y. Bois, Céline Brochot. Placental transfer of xenobiotics in pregnancy physiologically-based pharmacokinetic models: structure and data. *Computational Toxicology* 12 (2019) 100111.

Modélisation toxicocinétique chez les poissons pour l'évaluation du risque environnemental

Auteurs:
Rémy BEAUDOUIN,
Cleo TEBBY

La survenue d'effets liés à l'exposition à des substances chimiques seules ou en mélange dépend de l'exposition interne des organismes. Cette dernière peut être évaluée en établissant une relation entre les concentrations dans l'environnement et les concentrations dans l'organisme. Cette relation doit notamment prendre en compte les facteurs environnementaux et biologiques qui peuvent influencer la bioaccumulation [1]. La toxicocinétique d'un contaminant décrit son devenir au cours du temps dans un organisme selon quatre processus (ADME) : l'absorption, la distribution dans les organes, le métabolisme et l'excrétion. Les modèles toxicocinétiques à fondement physiologique (appelés aussi PBPK pour *Physiologically based pharmacokinetic*) permettent une description réaliste de la toxicocinétique.

Dans le cadre d'un projet européen financé par l'EFSA (*European Food Safety Authority*) visant à promouvoir la prise en compte de la toxicocinétique dans l'évaluation des risques pour l'environnement,

notre revue de la littérature a montré que les modèles publiés ont principalement été développés pour des espèces aquatiques et en particulier des poissons [1]. Ainsi, une trentaine de publications utilisent des modèles PBPK chez des poissons téléostéens. Ces modèles existants étant spécifiques de substances particulières, d'un mode d'exposition ou de conditions expérimentales, ils ne peuvent pas être facilement utilisés dans le cadre d'évaluation de risque. Pour pallier ces limites, nous avons développé des modèles génériques pour quatre espèces couramment utilisées en écotoxicologie [2] : le poisson zèbre, la truite arc-en-ciel, le vairon tête de boule et l'épinoche à trois épines. Ces modèles ont été construits de façon à pouvoir être utilisables pour un grand nombre de substances chimiques. La structure des quatre modèles est identique mais leur paramétrisation diffère entre les espèces (figure 1). Les paramètres physiologiques de chaque espèce et leur variabilité inter-individuelle ont été estimés à partir d'une méta-analyse de données expérimentales produites à l'Ineris ou publiées. De

plus, de nouvelles approches mécanistiques ont été proposées pour inclure les effets de la croissance et de la température. Les modèles ont été évalués pour neuf contaminants environnementaux. Les prédictions sont satisfaisantes : sans calibrer le modèle avec les observations, 50 % des écarts entre prédictions et observations étaient inférieures à un facteur 3 pour six des neuf produits chimiques et 75 % des écarts à un facteur 3 pour les trois produits chimiques les plus lipophiles (figure 2).

Pour un composé perfluoré, nous disposons de mesures répétées de toxicocinétique (collaboration avec l'Inrae) qui nous ont permis d'investiguer précisément les processus ADME de ces composés persistants et ubiquitaires dans l'environnement [3] ainsi que les effets de la température de l'eau sur la toxicocinétique [4]. La modélisation a permis de préciser les voies d'excrétion majoritaires de ces substances, qui sont difficilement mesurables chez le poisson. L'effet de la température a été inclus au niveau de paramètres ADME, et notamment de façon novatrice au niveau des coefficients de partage entre le plasma et les organes. Ainsi, nous obtenons des prédictions précises des concentrations de PFOS dans les organes de truites à différentes températures (figure 3).

L'apport des modèles PBPK pour améliorer la caractérisation des effets de mélanges de substances a aussi été évalué. Notre modèle PBPK pour la truite arc-en-ciel a été appliqué pour modéliser la cinétique de la mélamine et l'acide cyanurique [5]. Les modèles PBPK des deux composés ont été combinés et un modèle de formation de cristaux pour le mélange a été ajouté pour prédire l'intensité de la formation de cristaux sous l'hypothèse que ces derniers soient formés soit dans l'urine soit dans les reins. La modélisation de la cinétique de la mélamine et de l'acide cyanurique a permis de mieux comprendre et prédire l'intensité de la formation des cristaux en cas d'expositions séquentielles d'intensité

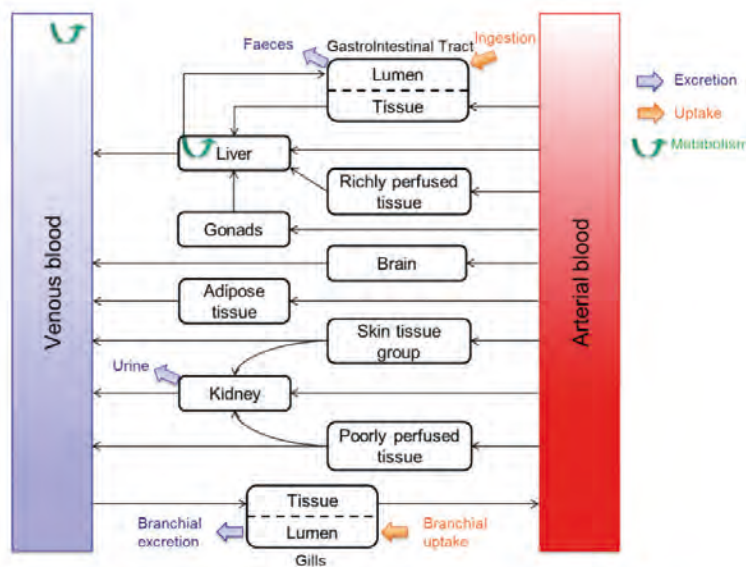


Figure 1
Schéma de la structure des modèles PBPK développés. Les sites d'absorption, d'excrétion et de métabolisme sont représentés respectivement en orange, violet et vert. Schéma issu de Grech et al. (2019).

ABSTRACT /

Risk assessment relies on understanding adverse effects of chemicals on living organisms and on estimating how exposure to a chemical can cause these adverse effects. Toxicokinetics bridge the gap between external exposure and internal concentrations at target organs. Physiologically-based toxicokinetic (PBPK) models were developed for four species of fish, with a same underlying structure and with the aim of being applicable to a wide range of chemicals. Additional experiments were carried out to adapt the model to the case of polyfluoroalkyl substances (PFAS) chemicals and to better integrate effects of water temperature. The PBPK models were also used to predict and better understand the effect of a binary mixture (melamine and cyanuric acid) in fish, using specific additional toxicodynamic submodels.

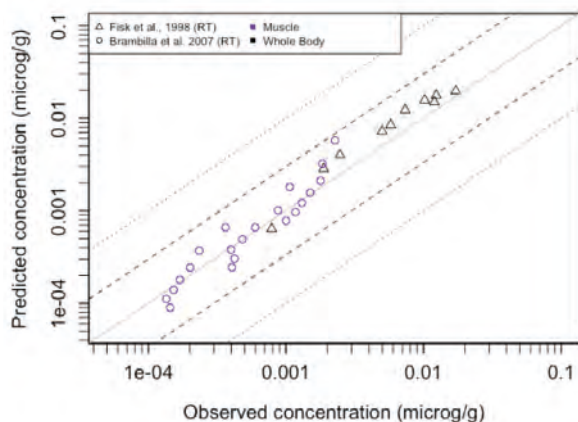


Figure 2

Comparaison des concentrations prédites et observées ($\mu\text{g/g}$) pour le PCB 152 (substance lipophile) chez la truite arc-en-ciel. Les lignes pointillées représentent un écart d'un facteur 3 et 10 par rapport aux observations. Figure issue de Grech et al. (2019).

variable ou de co-exposition. Notre étude a démontré, pour la première fois, comment les modèles PBPK pour les poissons peuvent jouer un rôle clé dans la compréhension et la prédiction des effets de mélanges. Cette étude illustre également comment des effets indésirables peuvent potentiellement se produire même lorsque les composés ne sont pas administrés ensemble en mélange.

En conclusion, les travaux de modélisation de la toxicocinétique chez le

poisson ont permis de mettre à disposition des modèles adaptés à un grand nombre de substances. Les modèles PBPK développés permettent l'intégration de données disparates en facilitant l'extrapolation entre espèces et entre des conditions expérimentales. Le couplage avec des modèles de toxicodynamie, tels que les chemins d'effets adverses (AOP), permettra de mieux comprendre les processus impliqués dans la survenue d'effets des substances chimiques seules ou en mélange.

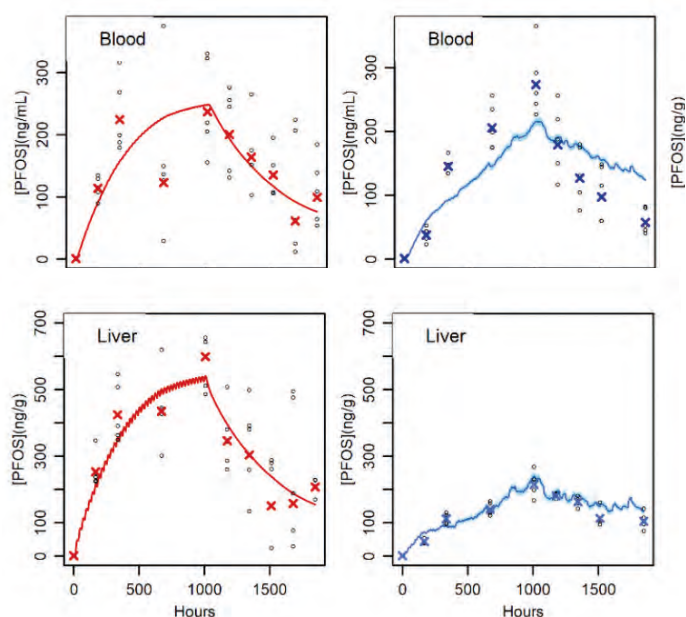


Figure 3

Résultats des simulations du modèle PBPK pour le PFOS à une température de 19 °C (courbes rouges) et 7 °C (courbes bleues) (figure extraite du mémoire de thèse de A. Vidal). Les points gris représentent les données ($n=5$ poissons) et les croix rouges ou noires les moyennes géométriques. Les lignes représentent les prédictions, et les zones colorées les intervalles de crédibilité.

Références

- [1] Grech, A., C. Brochet, J. L. Dorne, N. Quignot, F. Y. Bois, and R. Beaudouin. 2017. Toxicokinetic models and related tools in environmental risk assessment of chemicals. *Science of the Total Environment* 578:1-15.
- [2] Grech, A., C. Tebby, C. Brochet, F. Y. Bois, A. Bado-Nilles, J. L. Dorne, N. Quignot, and R. Beaudouin. 2019. Generic physiologically-based toxicokinetic modelling for fish: Integration of environmental factors and species variability. *Science of the Total Environment* 651:516-531.
- [3] Vidal, A., M. Babut, J. Garric, and R. Beaudouin. 2019. Elucidating the fate of perfluorooctanoate sulfonate using a rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) physiologically-based toxicokinetic model. *Science of the Total Environment* 691:1297-1309.
- [4] Vidal, A., M. Babut, J. Garric, and R. Beaudouin. 2020. Temperature effect on perfluorooctane sulfonate toxicokinetics in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): exploration via a physiologically based toxicokinetic model. *Aquatic toxicology na:NA*
- [5] Tebby, C., C. Brochet, J.-L. Dorne, and R. Beaudouin. 2019. Investigating the interaction between melamine and cyanuric acid using a Physiologically-Based Toxicokinetic model in rainbow trout. *Toxicology and Applied Pharmacology* 370:184-195.

Dispositifs de mesure en continu pour la surveillance des eaux de surface : évaluer les performances métrologiques en conditions maîtrisées et sur le terrain

Auteurs :

Bénédicte LEPOT,
Céline FERRET,
Nathalie
MARESCAUX

Contributeurs
externes :
Nathalie Guigues,
Sandrine Raveau,
Béatrice Lalere,
Julie Cabillic
(Laboratoire national
de métrologie et
d'essais - LNE)

La directive-cadre sur l'eau (DCE) [1] fixe des objectifs d'atteinte du bon état des eaux et un processus de mise en œuvre, rythmé par la production et l'usage de connaissances. À partir de l'état des lieux des bassins, des résultats des programmes de surveillance et des analyses économiques, des programmes de mesures et d'actions nécessaires à l'atteinte des objectifs doivent être définis puis évalués.

Le guide européen CIS N°19 [2] mentionne l'introduction de techniques alternatives à l'analyse d'échantillons ponctuels par des méthodes d'analyses classiques afin d'améliorer la qualité de l'évaluation de l'état écologique réalisé.

Malgré les nombreux freins identifiés [3], l'utilité potentielle des méthodes alternatives pour les programmes de surveillance de la DCE est reconnue, car combinées aux méthodes traditionnelles ou seules, elles permettent d'obtenir une information complémentaire sur l'état de l'environnement [4], notamment des données en temps réel.

La directive QA/QC [5] spécifie que « les États membres veillent à ce que toutes les méthodes de laboratoire, de terrain et en ligne, utilisées aux fins des programmes de surveillances chimiques soient validées et attestées

conformément à la norme EN ISO/EC-17025... »

Le besoin de disposer de méthodes alternatives validées pour la mesure des paramètres physico-chimiques *in situ* est incontournable. Ainsi, disposer de protocoles d'évaluation des performances et de validation de ces méthodes est une étape indispensable pour répondre aux exigences d'assurance et contrôle qualité (QA/QC) et promouvoir l'utilisation de ces méthodes alternatives.

OBJECTIFS DES ESSAIS

Dans le cadre du Laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques (Aquaref), l'Ineris et le LNE ont mené une étude entre 2013-2016 pour évaluer les performances métrologiques de dispositifs de mesure dans les eaux superficielles. Les objectifs ont consisté à :

- concevoir les protocoles d'évaluation des performances en conditions contrôlées (laboratoire) et sur le terrain ;
- sélectionner un cours d'eau présentant des caractéristiques physico-chimiques suffisamment variables pour l'essai sur le terrain ;
- sélectionner des dispositifs commercialement disponibles et (iv) effectuer les tests de performance associés.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les paramètres visés ont été choisis parmi ceux vitaux pour la vie aquatique, pour lesquels un nombre de dispositifs étaient disponibles et dont les performances n'avaient pas été évaluées, à savoir : matière organique (MO), nitrate (NO₃), azote total (Nt), phosphate (PO₄), phosphore total (Pt) et ammonium (NH₄).

Une vingtaine de fabricants/fournisseurs ont été sollicités. Neuf ont répondu favorablement et ont mis à disposition 27 dispositifs de mesure. Ces dispositifs, dont les principes de mesure et de fonctionnement diffèrent, ont permis d'avoir une bonne représentativité du marché (tableau 1).

Les critères de performances métrologiques retenus (tableau 2) ont été sélectionnés en se basant sur les travaux normatifs [6].

Les essais se sont déroulés en deux temps (figure 1) en appliquant des protocoles basés sur l'exposition successive des dispositifs à un nombre variable de solutions d'étalons (figure 2). Les essais en conditions contrôlées ont été réalisés dans les laboratoires du LNE et de l'Ineris. Pour les essais sur site, réalisés entre octobre 2015 et février 2016, une station provisoire alimentée en continu en eau de l'Oise a été conçue et aménagée sur le site de l'Ineris.

RÉSULTATS

Ces essais riches en enseignement, ont permis d'évaluer en situation réelle, l'applicabilité de dispositifs alternatifs pour le suivi des paramètres supportant la biologie.

En conditions contrôlées, les performances métrologiques évaluées pour les dispositifs (MO, NO₃, Nt, PO₄ et Pt) sont du même ordre de grandeur que celles de la méthode de référence (laboratoire) : écart type de répétabilité < 5 %, biais < 10 %, écart de linéarité < 10 % et incertitude élargie combinée < 15 %. Pour le paramètre NH₄, les performances sont moins bonnes mais acceptables au regard des niveaux de concentration visés. En conditions réelles, les performances

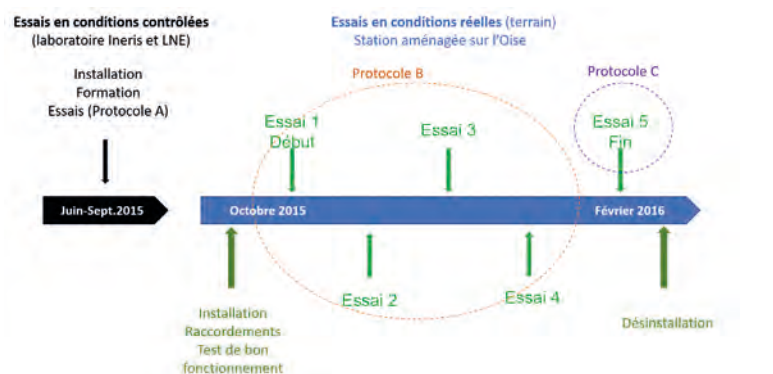


Figure 1 Déroulement des essais d'évaluation de la performance des dispositifs de mesure.

Principe de mesure	de Ammonium	Nitrates	Azote Total	Phosphate	Phosphore total	Matière organique
Electrode sélective	4	5				
Absorption UV-Vis	2	6				5
Réaction chimique	4			4	1	
Oxydation			1			3

Tableau 1
Nombre de dispositifs testés par rapport au paramètre surveillé et principe de mesure.

Performances	Au laboratoire	Sur site (3 mois minimum)
Biais	X	X (à la fin de l'essai sur site)
Répétabilité	X	X (à la fin de l'essai sur site)
Fidélité intermédiaire	-	X
Erreur	-	X
Linéarité	X	-
Limite de Quantification (LQ)	X	X
Sensibilité	X	X (à la fin de l'essai sur site)
Incertitude Combinée	X	X (à la fin de l'essai sur site)

Tableau 2
Critères de performances retenus en conditions maîtrisées (laboratoire) et en conditions réelles (sur site) – critères retenus en se basant sur le projet EN 16479-2 Draft G (2014) [6].

évaluées sont généralement moins bonnes qu'en conditions contrôlées (LQ plus fortes, fluctuation de la sensibilité des dispositifs de surveillance en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'Oise). D'un point de vue DCE, les dispositifs de mesure en continu (MO, NO₃, Nt, Pt, PO₄ et NH₄ (gamme basse)) possèdent des limites de quantification compatibles avec les niveaux de concentration mesurés dans l'Oise et ont permis de mesurer des concentrations au niveau

des seuils de qualité dits « très bon » / « bon ». Ils respectent donc les exigences de la directive QA/QC et pourraient être utilisés dans le cadre de la surveillance. Par ailleurs, cette étude a permis d'alimenter les travaux normatifs européens [6] et de fournir des premières valeurs chiffrées de performance en conditions contrôlées et réelles. Suite au retour d'expérience de ces essais, l'Ineris travaille à la conception d'une plateforme mobile d'essais multifonctions.

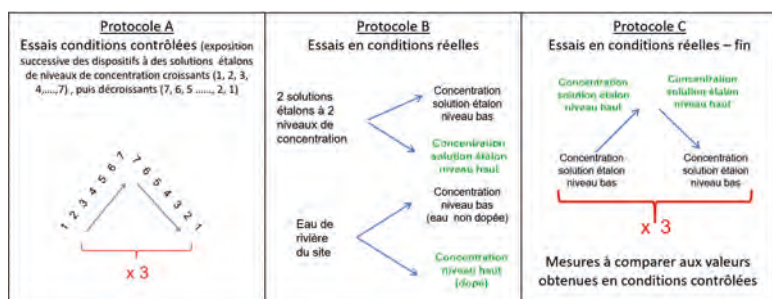


Figure 2
Protocoles mis en œuvre pour évaluer la répétabilité, le biais et la linéarité des dispositifs de mesure en continu à partir de solutions étalons de concentration connue selon le projet de norme PrEN 16479-2 Draft G (2014) [6].

ABSTRACT /

The evaluation of the metrological performances of 27 water quality monitoring devices for measuring continuously nutrients and organic matter in river waters was conducted both under controlled conditions in the laboratory and real conditions during a 3 months field trial. It consisted of (i) designing protocols to assess metrological performances under controlled and real conditions of monitoring devices (ii) selecting a site to conduct a field trial (iii) selecting monitoring devices and (iv) conducting the testing. The performances evaluated under controlled conditions are of the same order of magnitude as those of the reference method (laboratory) with the majority of the monitoring devices being characterized by: repeatability < 5%, bias < 10%, linearity deviation < 10% and combined expanded uncertainty < 15%. Moreover, the monitoring devices tested were found to have quantification limits suitable with regards to the concentration levels measured in the Oise River. Finally, from the results obtained as well as the feedback on testing a great variety of monitoring devices, it was possible to draw some recommendations for improving the measurements using the devices tested and to feed the European standardization.

Références

- [1] Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- [2] Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2009) Guidance Document No.19: Guidance on surface water chemical monitoring under the Water Framework Directive.
- [3] E6Y (2013) - Rapport sur les intérêts technico-économiques de l'analyse en continu de la qualité de l'eau et des milieux au regard des pratiques actuelles.
- [4] Allan I.J., Mills G.A., Vrana B., Knutsson J., Holmber A., Guigues N., Laschi S., Fouillac A-M., Greenwood R. (2006) Strategic monitoring for the European Water Framework directive, TrAC, 25, 704-715.
- [5] Directive 2009/90/CE de la commission du 31 juillet 2009 établissant, conformément à la directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil, des spécifications techniques pour l'analyse chimique et la surveillance de l'état des eaux.
- [6] PrEN 16479-2 Draft G (2014) Qualité de l'eau – Exigences générales et modes opératoires d'essai de performances pour les équipements de surveillance de l'eau – Partie 2 : dispositifs de mesure en continu publié en 2018 sous NF EN 17075.

Évaluer l'inflammabilité de mélanges liquides par approches prédictives en complément des mesures expérimentales

Auteurs :

Guillaume FAYET,
Patricia ROTUREAU,
Benoit TRIBUILLOY

L'inflammabilité des mélanges liquides dépend (parfois fortement) de la nature et de la concentration de leurs constituants. L'estimation de l'inflammabilité des mélanges représente donc un enjeu important de sécurité industrielle pour lequel les méthodes prédictives peuvent être d'un grand intérêt pour anticiper les risques d'incendie et d'explosion. Dans ce contexte, l'Ineris développe et utilise des méthodes prédictives permettant d'estimer le point d'éclair des mélanges liquides en complément de l'approche expérimentale.

MÉTHODES PRÉDICTIVES

Selon le niveau de connaissance du mélange et de ses composants et en fonction du contexte d'utilisation, différentes approches prédictives peuvent être utilisées. Des lois de mélange permettent d'estimer le point d'éclair du mélange à partir de ceux de ses constituants en couplant un modèle d'équilibre vapeur-liquide avec la loi de Le Chatelier, pour tenir compte de l'inflammabilité des mélanges de vapeur, même si elles restent limitées dans certains cas, comme pour les mélanges halogénés [1]. Si l'inflammabilité des différents constituants du mélange est inconnue, une approche combinant loi de mélange et modèles QSPR (pour prédire le point d'éclair des composés purs) a été mise en place pour des mélanges organiques [2]. Enfin, des modèles QSPR spécifiques aux mélanges organiques

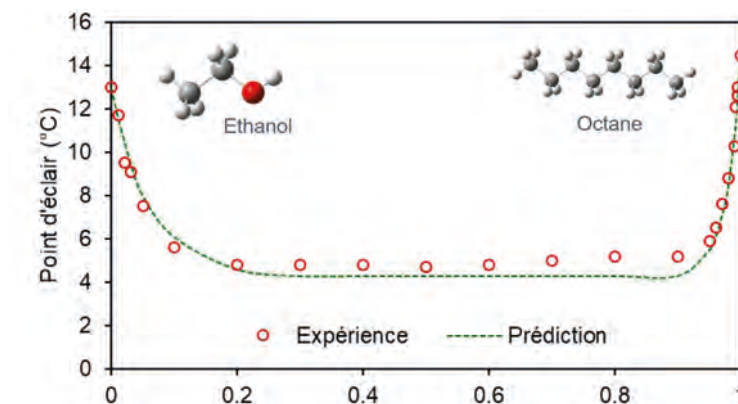


Figure 2 Points d'éclair de mélanges octane/éthanol mesurés et prédits (en utilisant le modèle UNIFAC et des points d'éclair de 13°C et 14,5°C pour l'éthanol et l'octane purs)

binaires ont été développés à partir de descripteurs de mélange tenant compte des fractions molaires des différents constituants [3]. S'ils offrent des performances moindres que la combinaison modèle QSPR/loi de mélange, cette approche sera utile pour le criblage intensif de mélanges ou pour d'autres propriétés (en l'absence de loi de mélange).

CLASSIFICATION DES LIQUIDES INFLAMMABLES ET SÉCURITÉ DES PROCÉDÉS

Les modèles prédictifs (en particulier les lois de mélanges) peuvent être utilisés à des fins réglementaires, pour peu que certaines précautions soient

suivies, comme stipulé par exemple dans le SGH pour la classification des substances. En figure 1, la loi de mélange est ainsi utilisée pour la classification d'alcools de bouche [4], en utilisant le modèle NRTL pour l'équilibre liquide-vapeur et la valeur expérimentale du point d'éclair de l'éthanol (13 °C). Elle permet des classifications claires pour le cognac et le rhum en liquide inflammable (de catégorie 3) avec un point d'éclair estimé à 28 °C (solutions aqueuses d'éthanol à 40 %), en accord avec les valeurs expérimentales (27,5 °C et 28 °C). Pour le vin de Porto et la liqueur de coco (entre 19 % et 24 %), les points d'éclair estimés sont proches du seuil réglementaire de 35 °C. Dans ce cas, les deux liquides devraient être considérés comme inflammables (de catégorie 3) de manière conservatrice, dans l'attente d'une caractérisation expérimentale du point d'éclair puis de l'épreuve de combustion entretenue ONU L.2 avant d'être, le cas échéant, considérée non classée.

Au-delà du contexte réglementaire, le point d'éclair est utilisé pour évaluer la possibilité d'inflammation de la vapeur au-dessus d'un liquide inflammable par des sources externes (en particulier des flammes). En l'absence de point d'éclair mesuré, celui du constituant le plus inflammable est parfois considéré, à tort, comme une valeur conservatrice pour le mélange.

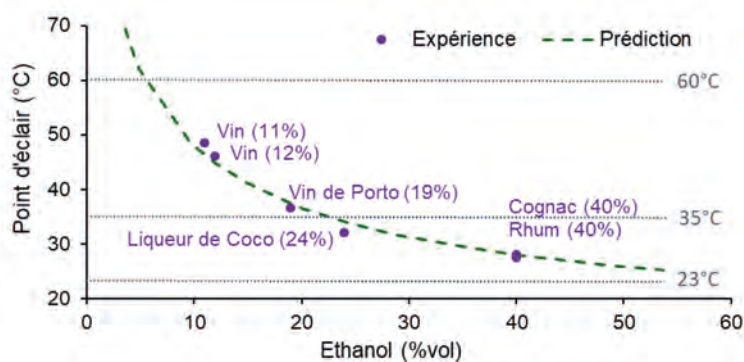


Figure 1 Points d'éclair d'alcools de bouche mesurés et comparés aux prédictions obtenues pour les solutions eau-éthanol équivalentes (en utilisant le modèle NRTL et un point d'éclair de 13 °C pour l'éthanol pur) [4].

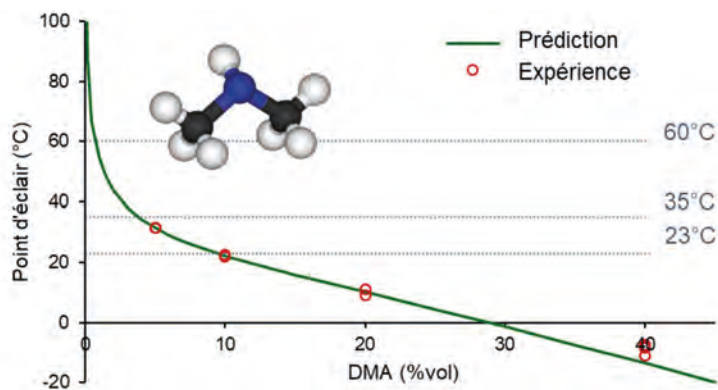


Figure 3
Points d'éclair de solutions aqueuses de diméthylamine mesurés et prédits (selon une loi de méthode ajustée) [4].

En effet, certains mélanges s'avèrent plus inflammables que leurs constituants pris à l'état pur, comme pour le mélange octane/i-propanol (en figure 2). L'approche prédictive permet parfaitement de prendre en compte ces comportements [2] et représente donc un outil puissant pour déterminer si le mélange de deux composés pourrait s'avérer plus inflammable que ces derniers. Elle est également utile pour vérifier si une modification de composition peut augmenter l'inflammabilité du mélange, par exemple par l'évaporation d'un constituant au cours du procédé ou dans des stockages de longues durées.

AIDE À LA FORMULATION INTRINSÈQUEMENT PLUS SÛRE

Ces méthodes prédictives présentent un intérêt tout particulier dans l'optimisation de campagnes expérimentales pour la définition de formulations dans une approche de type safer-by-design. Une telle démarche a été employée pour la recherche du niveau de dilution à appliquer à une solution aqueuse à 40 % de diméthylamine (DMA) (au point d'éclair particulièrement bas de -18,5 °C) pour la rendre moins inflammable [4]. Comme montré en figure 3, la mise en place d'une loi de mélange ajustée sur des points expérimentaux fiables a permis de clarifier le profil d'évolution du point d'éclair en fonction de la concentration en DMA. L'industriel à l'origine de cette étude a alors pu sélectionner un niveau de dilution réduisant les risques associés à ces stockages de DMA. Cette étude de cas démontre non seulement la possibilité d'aider à la sélection de formulations plus sûres pour des applications

industrielles, mais a illustré le potentiel de ces outils lorsque les mesures sont difficiles, comme pour la solution à 40 % en DMA pour laquelle la maîtrise de l'évaporation du DMA est difficile lors de la préparation de l'essai.

ABSTRACT /

The flammability of liquid mixtures can dramatically depend on the concentrations of its components. It can even reveal, in some cases, more flammable than its pure components. For this reason, estimating the flammability of mixtures represents a great challenge for industrial safety.

In that context, Ineris engaged efforts for the development and use of predictive methods to estimate the flash point of liquid mixtures as a complement to the classical experimental approach. Different predictive approaches were proposed according to the level of information available on the investigated mixture (in terms of properties of pure compounds) based on mixing rules and/or Quantitative Structure-Property Relationships (QSPR).

These approaches have been successfully used as a complement to experimental tests for different practical industrial applications: classification of flammable liquids in a regulatory context, process safety studies and definition of safer-by-design formulations.

Références

- [1] Fayet G., Tribouilloy B., Rotureau P., 2019, Flash point of binary mixtures of chlorinated hydrocarbons with toluene and their predictability with existing mixing rule, *Process Safety Progress*, in press, e12127. <https://doi.org/10.1002/prs.12127>.
- [2] Gaudin T., Rotureau P., Fayet G., 2014, Combining mixing rules with QSPR models for pure chemicals to predict the flash points of binary organic liquid mixtures, *Fire Safety Journal*, 74, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.04.006>.
- [3] Fayet G., Rotureau P., 2019, New QSPR Models to Predict the Flammability of Binary Liquid Mixtures, *Molecular Informatics*, 38, 1800122. <https://doi.org/10.1002/minf.201800122>.
- [4] Fayet G., Rotureau P., Tribouilloy B., 2019, Assessing the flammability of liquid mixtures by predictive approach as a complement to experimental measurements, *Chemical Engineering Transactions*, 77, 781-786. <https://doi.org/10.3303/CET1977131>.

Test d'éclatement d'un microréacteur en carbure de silicium

Auteurs :

Claire VILLEMUR,
Roland GUIDAT,
Olivier LOBET,
Jérôme
DAUBECH,
Patricia VICOT

L'utilisation des microréacteurs, dispositifs de diamètre inférieur au millimètre dans lesquels se déroule une réaction chimique, s'est beaucoup développée ces dernières années dans les usines de production [1]. Ces réacteurs offrent en effet de meilleurs transferts massiques et thermiques que les réacteurs conventionnels discontinus permettant d'opérer à plus haute température et selon une cinétique chimique plus rapide. Le débit de production est ainsi similaire à celui des réacteurs classiques mais en traitant une quantité de matière à l'instant « t » plus faible, ce qui conduit à une réduction des dommages résultant d'une dérive. Il s'agit d'une technologie intrinsèquement plus sûre. Cependant, un dysfonctionnement tel qu'un arrêt du refroidissement peut provoquer la formation de points chauds conduisant à un emballement de réaction accompagné d'une production de gaz et vapeur. Contrairement à un réacteur discontinu, un microréacteur, généralement rempli de

liquide, ne dispose pas de volume libre capable d'amortir la surpression. Cette dernière peut alors augmenter très rapidement localement, rendant inefficace une soupape ou un disque de rupture et pouvant conduire à la rupture du microréacteur. L'augmentation de pression liée à un emballement dans un microréacteur a encore été peu étudiée et les utilisateurs s'interrogent sur ses effets et ses conséquences possibles sur l'environnement direct, en particulier sur les travailleurs. La société Corning, qui produit des microréacteurs, a ainsi sollicité l'Ineris afin de déterminer les conséquences d'une montée en pression rapide dans un microréacteur. Pour ce faire, l'Ineris a réalisé un test d'éclatement pneumatique sur un réacteur industriel de type Corning® Advanced-Flow™ Reactors (AFR) et évalué les effets de pression et de projection liés à l'explosion. Ce microréacteur, qui peut contenir jusqu'à 5 L de mélange réactionnel, ressemble à un échangeur de chaleur à plaques avec un empilement

de plaques de SiC (carbure de silicium) interposées entre des plaques métalliques pour le fluide caloporteur. Ce dernier est disposé sur un châssis et entouré d'une enveloppe en inox destinée à protéger les personnes contre la projection de liquide (figures 1 et 2).

TEST D'ÉCLATEMENT

Le test a été réalisé dans la zone pyrotechnique de l'Ineris sur un réacteur comprenant deux plaques de SiC et trois plaques métalliques entourées de l'enveloppe protectrice. La rupture d'une des plaques de SiC a été provoquée en introduisant rapidement de l'air comprimé provenant d'un réservoir pressurisé pour simuler une augmentation rapide de pression dans le réacteur. L'essai a été réalisé en effectuant plusieurs charges soudaines successives de la plaque jusqu'à son éclatement, à l'aide de vannes automatiques. Afin d'enregistrer des informations sur la surpression et la projection de fragments lors de l'éclatement, des capteurs de pression et une caméra rapide ont été installés sur le réacteur et à proximité (figure 3).

OBSERVATIONS DES EFFETS ET ESTIMATION DES IMPACTS SUR LES PERSONNES ET L'ENVIRONNEMENT

La rupture pneumatique de la plaque s'est produite à 168 bars, au-dessus de la pression de conception du réacteur

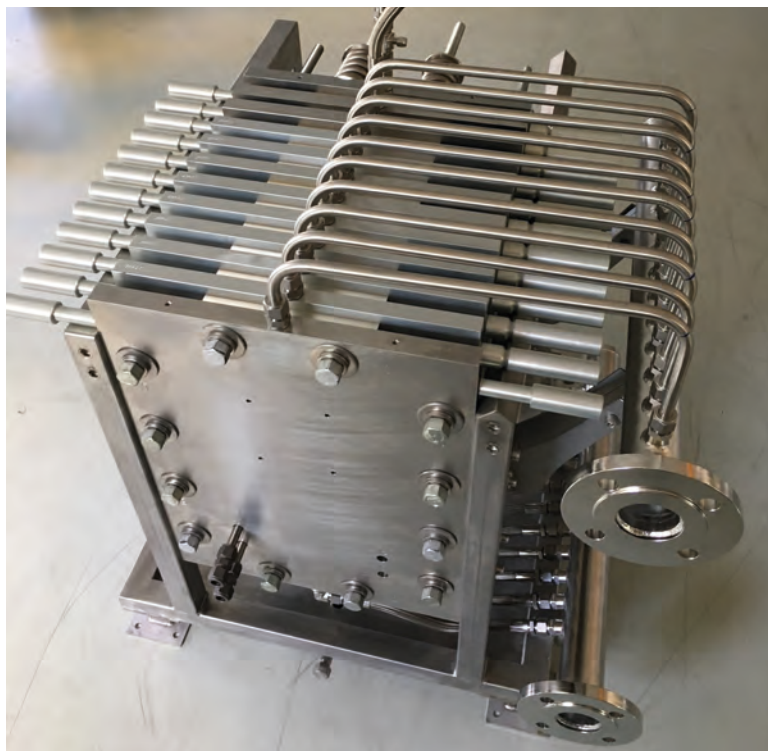


Figure 1
Microréacteur Corning® Advanced-Flow™ Reactors (AFR).



Figure 2
Vue d'une plaque en carbure de silicium avec son canal réactionnel.



Figure 3
Installation expérimentale (capteurs de pression atmosphériques et capteur de pression sur plaque SiC, caméras non visibles sur l'image).

(18 bars). Après l'éclatement, la structure globale du réacteur n'a pas montré de dommages significatifs (**figure 4**). Les deux plaques SiC ont été brisées et les deux plaques métalliques entourant la plaque pressurisée désengagées. Seule la partie inférieure de l'enveloppe de protection a été arrachée.

La pression enregistrée à proximité du réacteur lors de l'éclatement n'a pas montré d'augmentation significative. L'intensité de l'onde de pression observée à 1 m (6 mbar) est bien inférieure au seuil d'apparition des effets sur les individus et les structures (20 mbar) [3].

Vingt-quatre débris de SiC de poids inférieur à 25 g ont été projetés par l'éclatement à travers de petites ouvertures de l'enveloppe à une distance maximale de 6 m. L'énergie cinétique des projectiles a été calculée à partir de l'enregistrement de la caméra rapide. La valeur maximale était inférieure à 1 J, ce qui est en dessous du seuil d'occurrence des blessures importantes (8 J) et des dommages sur les structures ($3,7 \cdot 10^5$ J) définis dans la réglementation pyrotechnique française [4].

CONCLUSION

Le test d'éclatement sur le micro-réacteur a montré que dans les conditions de test, les effets de projection et de pression observés sont limités, rendant faible le risque de blessure ou d'impact sur l'environnement proche. Le mécanisme de rupture du SiC conduit à une ouverture multiple de la plaque de SiC, ce qui semble limiter l'effet de la pression et de l'énergie



Figure 4
État du microréacteur après essai.

cinétique des fragments. Les effets de projection ont également été limités par l'enveloppe de protection qui a empêché l'éjection d'un certain nombre de fragments de plaques à l'extérieur de la structure du réacteur et par la fixation des plaques au châssis.

Bien que le test ait été réalisé avec de l'air comprimé, il donne une tendance de ce qui pourrait se passer lors d'un emballement de réaction entraînant une augmentation rapide de la pression.

Cet exemple d'expertise à l'entreprise illustre les capacités expérimentales de l'Ineris pour accompagner le développement de systèmes industriels innovants et plus sûrs d'un point de vue de la sécurité.

ABSTRACT /

Inherently Safer Technology is a growing interest concept in designing safer plant. The micro reactor technology has notably gained more and more interest, and its penetration in production plants is expected to increase rapidly.

This kind of equipment offers a much better heat transfer than conventional equipment; the higher heat release management allowing to operate at a higher temperature leading to faster kinetics. They also provide a better mass transfer that can increase the reaction rate. Therefore, they allow producing much in smaller volumes, reducing the consequences of an accident.

However, operating at higher temperatures leads to operate at more severe condition.

A sudden shut down of the feeding pump or cooling circulation may lead to a temperature increase and a runaway. Equally, a sudden gas release due to a hot spot may lead to a local pressure increase, creating a pressure wave in a tube fill of liquid which kinetic and intensity is not easy to determine and may lead locally to a mechanical failure.

Although the volume affected by an explosion is much smaller than in a conventional reactor, the consequences may be decisive, mainly if an operator stays close to the reactor.

So far, no study of the pressure increase in a flow of liquid has been published.

This document describes and presents the results of a real bursting test of a CORNING AFR® G4 industrial silicon carbon reactor performed at the site of Ineris in France. Even though the design pressure of the reactor is 18 bar, it busted over 150 bar. The kinetic energy of particles ejected after the bursting and the pressure level a 1 meter were measured. All are below the minimum level of significant injury for human body and the maximum level that could be achieved for similar equipment in metal.

Références

- [1] Jensen K.F., 2017, Flow Chemistry-Microreaction Technology comes of Age, AIChE Journal, mars 2017, Vol 63, N°3, Cambridge, USA.
- [2] Heudier L., 2015, Les éclatements de capacité, phénoménologie et modélisation des effets, Oméga 15, INERIS, Verneuil-en-Halatte, France.
- [3] FR, 2005, arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.
- [4] FR, 2007, Circulaire DPPR/SEI2/IH-07-0111 du 20 avril 2007 relative à l'application du décret fixant les règles d'évaluation des risques et de prévention des accidents dans les établissements pyrotechniques.

PROGRAMMES DE RECHERCHE

MENÉS EN 2019

PROGRAMMES EUROPÉENS /

Horizon H2020	
ACTRIS-PPP	Aerosols, clouds and trace gases research infrastructure-preparatory phase project
ACTRIS IMP	ACTRIS Implementation Project
AQUALITY	Multi-sensor automated water quality monitoring and control system for continuous use in recirculation aquaculture systems
BIORIMA	Risk management of nano-material
CALIBRATE	Nano risk governance
CHEOPS	Achieving low-cost highly efficient perovskite solar cells
Circular Flooring	New Products from Waste PVC Flooring and Safe End-of-Life Treatment of Plasticisers
DEMOBASE	Design and modelling for improved battery safety and efficiency
EC4SAFENANO	European centre for risk management and safe innovation in nanomaterials & nanotechnologies
EDEN	End-user driven demo for cbrNe
EUROMIX	A tiered strategy for risk assessment of mixtures of multiple chemicals
EuToxRisk21	An integrated european 'Flagship' programme driving mechanism-based toxicity testing and risk assessment for the 21st century
FLEDGED	Flexible dimethyl ether (DME) production from biomass gasification with sorption-enhanced processes
FORCES	Constrained aerosol forcing for improved climate projections
Gov4Nano	Implementation of risk governance: meeting the needs of nanotechnology
HBM4EU	Coordinating and advancing human biomonitoring in Europe to provide evidence for chemical policy making
HELIS II	Advanced european lithium sulphur cells for automotive applications NanoFase
HUGS	Humins as green and sustainable precursors of eco-friendly building blocks and materials
InnovEOX	Training a new generation of researchers in Innovative Electrochemical Oxidation processes
NanoReg 2	Support for regulation needs in nanotechnologies
OpenRiskNet	Open e-infrastructure to support data sharing, knowledge integration and in silico analysis and modelling in risk assessment
PAPILA	Prediction of air pollution in Latin America
PRESLHY	Pre-normative research for the safe use of cryogenic liquid hydrogen
SECREEETS	Secure european critical rare earth elements
ZELCOR	Zero waste ligno-cellulosic biorefineries by integrated lignin valorisation

LIFE – Programme for the environment and climate action

LIFE Ask REACH	Enabling REACH consumer information rights on chemicals in articles by IT-tools
VERMEER	Integrating VEGA, toxRead, MERLIN-Expo, and ERICA in a platform for risk assessment and substitution of risky substance

Interreg – programme de coopération territoriale européenne Interreg France-Wallonie-Vlaanderen

DIADEM	Development of an integrated approach for the diagnosis of water quality in the Meuse
NewCLand	Plus-value d'une valorisation transfrontalière des terres marginales en support à une économie biobasée
Progres	Project Accelerating Growth, Resources and Enterprise Support
RISSC	Amélioration transfrontalière de la prévention et de la gestion des risques du sous-sol engendrés par les terrains sous-cavés
VALSE	Nouvelles ressources transfrontalières: vers une validation de scénarii de valorisation de sédiments et autres matériaux

EMPIR - European Metrology Programme for Innovation and Research

BIOMETHANE	Metrology for biomethane
Heroes	Recommending uncertainty requirements for extending the application of the SRM
IMPRESS 2	Innovative Metrology for Pollution Regulation of Emissions from Stacks and Area Sources

ERIC - European Research Infrastructure Consortium

EPOS	European Plate Observing System
------	---------------------------------

RFCS - Research fund for coal and steel

MEGA	Methane production through underground coal gasification from deep European coal seams
MERIDA	Management of environmental risks during and after mine closure
RAFF	Risk assessment of final pits during flooding
SUMAD	Sustainable use of mining waste dumps

EuroNanoMed

NanoGrowSkin	A transversal research project that combines regenerative medicine technologies
--------------	---

COST - European Cooperation in Science and Technology

BioDiv-Support	Scenario-based decision support for policy planning and adaptation to future changes in biodiversity and ecosystem services
----------------	---

PROGRAMMES NATIONAUX /

Agence nationale de la recherche (ANR)

Argonaut	Suivi des émissions de polluants et de gaz à effet de serre à haute résolution depuis l'espace
FEATS	Utilisation des embryons de poisson zèbre pour l'évaluation du risque toxicologique : cas des perturbateurs endocriniens agissant sur l'aromatase cérébrale
PREVIPOL	Allergie au pollen : vers un système de prévision du risque
ROSTOCK'H	Risques et opportunités du stockage géologique d'hydrogène en cavités salines en France et en Europe
SERENADE	Vers une conception de nanomatériaux innovants, durables et sûrs

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)

ACIBIOQA	Amélioration des connaissances des installations biomasse sur la qualité de l'air
AMI HYDROGENE GRHYD	Gestion des réseaux par l'injection d'hydrogène pour décarboner les énergies
AMP'AIR	Amélioration de la représentation des émissions agricoles d'ammoniac pour une meilleure prévision de la qualité de l'air en France
APOLLO	Analyse économique des impacts de la pollution atmosphérique de l'ozone sur la productivité agricole et sylvicole
BRAINSOL	Évaluation de la toxicité pour le cerveau des mélanges de polluants retrouvés au niveau de sites et sols pollués
CARPE	Caractérisation et réduction des émissions des procédés poudres métalliques – Hautes énergies
CARTHAGE	Contribution de l'air dans les risques et transferts associés aux HAP en agricultures urbaines : gestion et évaluation
CARVE 2	Seconde campagne de mesure de particules à l'émission des foyers domestiques alimentés au bois dans la vallée de l'Arve
CONCEPTECH	Conception d'appareils domestiques de chauffage au bois performants
EVALPHYTO	Suite du projet Phytosed
EVORA	Détermination des émissions d'espèces semi-volatiles organiques par classes de volatilité – impact sur la modélisation de la qualité de l'air
EXTRA-ZN	Production de biomasses enrichies en Zn par phytoextraction pour l'écocatalyse
IDOLES	Innovation et pré-développement d'éléments lithium-ion optimisés à électrolytes liquides
METERDIOX-TER	Vers un dispositif de détection de dioxines à l'émission de sources fixes
MethanEmis	Recommandations et travaux en cours en vue de limiter les émissions de méthane dans les installations de méthanisation agricole
NANOWET	Incinération haute température de déchets halogénés/soufrés et nanodéchets – Caractérisation des émissions et évaluation du procédé de lavage des fumées
PhytEO	Phytostabilization and Essential. La production d'huiles essentielles : une filière éco-innovante de reconversion des sites historiquement pollués
POLQA	Politiques d'amélioration de la qualité de l'air grâce aux pratiques agricoles
PRESSENS	Émissions de composés volatiles et particulaires par les désodorisants non combustibles utilisés dans les environnements intérieurs : définition d'un protocole d'essai, évaluation des émissions et analyses

QABINE 2	Qualité de l'air dans les habitacles en déplacement 2
QAI ARVE	Impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air intérieur
RHAPSODIE	Répartition gazeuse et particulaire des HAPs, nitro-HAP et oxy-HAP émis par des véhicules Euro 6 diesel et essence
RHAPSODIE 2	Émission de polluants non réglementés des véhicules légers et impact des carburants
REGIC	Renforcement par géosynthétique intelligent pour risque cavités
RIVAGE	Réduction des transferts dans les végétaux potagers par amendement : gestion et évaluation
SODEMASS	Déconvolution des sources de combustion de biomasse
TIPOMO	Etude du transfert, indice de préoccupation : outil pour valorisation des friches moyennement contaminées
TOXINTRANSPORT	Caractérisation des particules inhalées : s'approcher de l'impact sur le vivant

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)

ACCEDERA	Amélioration de la précision des mesures personnelles aux fréquences radio et caractérisation des niveaux d'exposition
AIDEZ	Amélioration des essais <i>in vivo</i> pour l'identification des perturbateurs endocriniens à l'aide de poissons zèbres génétiquement modifiés
AMPERE	Caractérisation de l'exposition résidentielle aux ondes radiofréquences
ECLAIR	Sources pré-déformées pour des analyses haute résolution de l'impact du rayonnement radiofréquence sur l'activité cérébrale
Indee	Caractérisation et identification de perturbateurs endocriniens environnementaux dans les milieux aquatiques : une approche inter-espèces
LULI	Développement d'un dispositif innovant <i>in vitro</i> pour l'évaluation toxicologique de xénobiotiques inhalés : poumon/foie
NANOTOXY	Capteur innovant photonique pour mesure du potentiel REDOX des aérosols nano structurés
NeuroPrem-RF	Impact de l'exposition chronique aux champs électromagnétiques de types radiofréquences sur le développement physiologique du nouveau-né prématuré
PPV DITHIO	Fiche de pharmacovigilance Dithiocarbamates
PPV CAMP EXPL	Campagne exploratoire Anses/Atmo/Ineris
RFEXPO-ELFE	Exposition aux radiofréquences des enfants de la cohorte ELFE
SKIN-RF	Réponse adaptative par exposition aux RF sur les dommages de la peau humaine induite par rayonnement UV solaire

Ministère de la Transition écologique

PEPPER	Plateforme public-privé pour la pré-validation de méthodes de caractérisation des perturbateurs endocriniens
Empreintes environnementales	Identification des sources de contamination et intelligence artificielle

Conseil régional des Hauts-de-France

PHYTOEXCO	Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur <i>Arabidopsis halleri</i> en co-culture avec le saule
-----------	--

GOVERNANCE SCIENTIFIQUE

L'orientation et l'évaluation scientifique sont assurées par un conseil scientifique, trois commissions scientifiques spécialisées et une commission d'orientation de la recherche et de l'expertise.

CONSEIL SCIENTIFIQUE

Présidente Corinne GENDRON

- Avocate, MBA, Ph.D.
- Professeure titulaire
Département de stratégie,
responsabilité sociale et environnementale
École des sciences de la gestion,
Université du Québec à Montréal (UQAM)
Québec, Canada

Vice-président Philippe FREYSSINET

- Directeur de la stratégie, de la recherche
et de la communication
BRGM

Membres

Michel De LARA

- CERMICS, université Paris Est,
- École des Ponts Paris-Tech

Isabelle MOMAS

- Université Paris Descartes, Faculté de pharmacie

Michel SARDIN

- Professeur
ENSIC, université de Lorraine

Valérie CABUIL

- Rectrice de la région académique Hauts-de-France,
rectrice de l'académie de Lille

Mme Nadine GABAS

- Qualité Sécurité-Environnement
ENSIACET

COMMISSIONS SCIENTIFIQUES SPÉCIALISÉES

Commission scientifique « Risques accidentels »

Président Éric CLIMENT

- Directeur adjoint
Institut de mécatroniques des fluides de Toulouse

Vice-président Murès ZAREA

- Directeur de programmes R&D
Engie

Hervé BREULET

- Directeur des risques accidentels
Institut scientifique de service public (Belgique)

André CARRAU

- Ingénieur senior
EDF

Nabiha CHAUMEIX

- Institut des sciences de l'ingénierie
et des systèmes (INSIS)
CNRS

Éric CHOJNACKI

- Expert
IRSN

Lionel ESTEL

- Professeur
Laboratoire de sécurité des procédés chimiques
INSA Rouen

Olivier GUILLAUME

- Chercheur-expert
EDF R&D

Laurent JOUBERT

- Professeur
Département Chimie, université de Rouen

Marc-Xavier JOUBERT

- Directeur environnement risques industriels
Suez

Thierry MEYER

- Maître d'enseignement et de recherche,
Groupe sécurité chimique et physique
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Guy MIGAULT

- Corporate process manager
Solvay

Isabelle PEZRON

- Professeur
Département Génie des procédés
Université technologique de Compiègne

Valérie SAUVANT-MOYNOT

- IFP Énergies nouvelles

Laure SAUVAGE

- Directrice de projets
Adage Environnement

Claude VALOT

- Consultant senior
Dedale

Commission scientifique « Risques chroniques »

Présidente Jeanne GARRIC

- Directrice adjointe scientifique du département Eaux,
directrice de recherche
Irstea

Vice-président Jean-François DOUSSIN

- Professeur de chimie atmosphérique
Université de Créteil

Armelle BAEZA

- Professeur en toxicologie environnementale
Université Paris VII - Diderot

Nils Axel BRAATHEN

- Administrateur principal, division des Performances et de l'Information environnementales de la direction de l'Environnement
OCDE

Séverine DEGUEN

- Enseignant-chercheur de biostatistique et d'épidémiologie environnementale
Ecole de hautes études en santé publique (EHESP)

Cécile DELATTRE

- Pilote d'affaire environnement
RTE

George FAVRE

- Responsable de programme R&D
LNE

Sophie GODIN-BEEKMANN

- Directrice de recherche, laboratoire Atmosphère, Milieux, Observations spatiales
IPSL

Isabelle LAMY

- Directeur de recherche
Inra

Agnès LEFRANC

- Chef du service de Santé environnementale
Mairie de Paris

Laurent MENUT

- Directeur de recherche
Laboratoire de métrologie dynamique
École polytechnique

Patricia MERDY

- Maître de conférences
Département de chimie, laboratoire
Processus de transferts et d'échanges
dans l'environnement
Université de Toulon

Luc MOSQUERON

- Expert R&D
Veolia Environnement

Alexandre PERY

- Directeur du centre Maine
ABIÉS, Agroparis tech

Jean PRYGIEL

- Expert en études et innovation
Agence Eau Artois Picardie

Emmanuelle VULLIET

- Group leader Technology ans Research in Analytical
Chemistry for Environment, health and their interactions
ISA Lyon

**Commission scientifique
« Risques sol et sous-sol »****Président Patrick DE BUHAN**

- Professeur de mécanique
ENPC, CGEDD

Vice-présidente Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF

- Professeur de géologie de l'ingénieur
CNAM

Serge BROUYERE

- Chef de travaux Urban environnement engineering
Université de Liège

Christophe CHEVALIER

- Directeur service sols, roches et ouvrages géotechniques
Ifsttar

Hervé CUCHE

- Retraité Solvay, ingénieur génie minier

Philippe DE DONATO

- Directeur adjoint UMR Géoressources
Université de Lorraine

Guilhem DEVEZ

- Chef de la division géologie-géotechnique
EDF

Anne-Marie DUVAL

- Directrice déléguée de recherche
Cerema

Evelyne FOERSTER

- Chef du laboratoire d'études de mécanique sismique
CEA

Albert GENTER

- Directeur général adjoint
Es Géothermie

Catherine JACQUARD

- Directrice technique, ingénieur géologue
Fondasol

Vincent LAGNEAU

- Directeur adjoint du centre de géosciences
École des Mines ParisTech

Frédéric PLAS

- Directeur de recherche et développement Géosciences
Andra

Amei REJEB

- Vice-présidente R&D
OCP international

Jean SCHMITTBUHL

- Directeur de recherche
École et observatoire des sciences de la terre

COMMISSION D'ORIENTATION DE LA RECHERCHE ET DE L'EXPERTISE (CORE)

Mandat 2018-2020

La Core représente la concrétisation de la démarche d'ouverture de l'Institut à l'échelle de sa gouvernance. Aux côtés du conseil scientifique et des commissions scientifiques spécialisées, elle a pour mission de rendre des avis et émettre des recommandations sur les thématiques de travail, les programmes et les études de l'Ineris.

La Core est composée de plusieurs collèges représentatifs de l'ensemble des parties prenantes de la société civile impliquées sur les questions de risque industriel et environnemental : monde académique, ONG et associations représentant les citoyens, élus du territoire, organisations syndicales, industriels, services de l'État.

L'Ineris rend hommage à la mémoire de Vincent Perrot, animateur du secteur santé de la CLCV et ancien président de la CLCV Paris, qui a apporté une contribution précieuse à la Core ces six dernières années.

Personnalités qualifiées de l'enseignement supérieur ou de la recherche

Brice LAURENT

- Chargé de recherche
Centre de sociologie de l'innovation,
Mines ParisTech

Clément MABI

- Maître de conférences en science de l'information et de la participation
UTC Compiègne

Collège Industriels

Frédéric LECHAUDEL

- chef du département réglementation, advocacy & représentations externes
Total SA

Henri MOLLERON (vice-président)

- Directeur Environnement
COLAS

Sylvaine RONGA-PEZERET

- Médecin toxicologue
Service des études médicales
EDF

Mme Marie ZIMMER

- Expert technique réglementations produits
France Chimie

Collège Associations

Maxime COLIN

- Chargé de mission juridique
France nature environnement (FNE)

Francis GLEMET

- Porte-parole
Coordination nationale médicale santé environnement (CNMSE)

Jean-Yves LEBER

- Porte-parole
Écologie sans frontière (ESF)

Vincent PERROT

- Animateur du secteur santé
Consommation, logement, cadre de vie (CLCV)

Collège Syndicats

Gérald HAYOTTE (président)

- Confédération française démocratique du travail (CFDT)

Collège Élus

René DROUIN

- Maire de Moyeuve-Grande

Irène FELIX

- Conseillère départementale du Cher
- Conseillère municipale de Bourges
- Secrétaire générale FNESR

Michel GUILLOUX

- Adjoint au maire de Feyzin

Marine TONDELIER

- Conseillère communautaire d'Hénin-Carvin
- Conseillère municipale d'Hénin-Beaumont

Collège État

Patrick BERGEOT

- Chef du service de la recherche (représenté par **Sylvain ROTILLON**, chef de la mission Gouvernance de l'environnement, science et société)
Ministère en charge de l'environnement

Cédric BOURILLET

- Directeur général de la prévention des risques (représenté par **Delphine RUEL**, sous-directrice des risques accidentels)
Ministère en charge de l'environnement

38 THESES DE DOCTORAT EN COURS AU 31 DECEMBRE 2019

RISQUES CHRONIQUES

Alexandre PERLEIN	Évaluation des performances techniques et environnementales d'un projet biobasé à potentiel maximal: de l'outil d'aide à la décision au terrain, et inversement	2019/2022
Amélie CANT	Approche multimarqueur de la génotoxicité chez l'épinoche à trois épines pour une application en biosurveillance de la qualité des milieux aquatiques	2019/2022
Andrea RIVERO ARZE	Interaction et accumulation des nanoparticules chez les organismes aquatiques	2018/2021
Armelle CHRISTOPHE	Étude des polluants PE chez les embryons de poisson zèbre: apport des modèles génétiquement modifiés (transgéniques, Knock out) pour prédire les impacts toxicologiques sur la santé humaine et environnementale	2019/2022
Arnaud GRIGNET	Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur <i>Arabidopsis halleri</i> en co-culture avec le saule (PHYTOEXCO)	2017/2020
Camille MOUGIN	Impact d'expositions aux champs électromagnétiques du téléphone portable sur les processus cellulaires de maturation et de plasticité cérébrales et identification de biomarqueurs d'effets cérébraux	2018/2021
Camille NOBLET	Caractérisation chimique de l'aérosol organique atmosphérique en utilisant des approches d'analyses non ciblées	2018/2021
Clémence CHARDON	Développement de l'approche EDA: optimisation de la méthodologie et application à la caractérisation de perturbateurs endocriniens (PE) spécifiques du zebrafish dans les eaux de surface	2018/2021
Corentin MIT	Modélisation mécanistique du lien entre les biomarqueurs d'effets précoces et les impacts sur les populations chez l'épinoche à trois épines	2019/2022
Corentin REGRAIN	Optimisation des outils d'évaluation de l'exposition spatialisée et intégrée	2017/2020
Florian PHILIPPE	Analyse physico-chimique et compréhension des mécanismes de génération des particules aérosols issues du freinage d'un véhicule automobile	2017/2020
Hugo ROLLIN	Utilisation des données de micro-capteurs pour la modélisation et la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine	2019/2022
Ibtihel BEN DHIAB	Etude de la biodistribution quantitative et qualitative de nanoparticules d'oxyde de titane (TiO ₂) après inhalation chez le rat	2017/2020
Jasmina WALLACE	Brain activity and alpha band analysis after exposure to radiofrequency signal (900 MHz) on healthy volunteers: EEG/MEG study combined with an anatomical MRI	2016/2019
Julie DE OLIVEIRA	Utilisation de poissons zèbres génétiquement modifiés pour l'étude des mécanismes et des effets des perturbateurs endocriniens	2017/2020
Lei JIANG	Improvement of high resolution air quality simulation and forecast - Focus on urban and peri urban areas on pollution episodes in France	2017/2020
Leïla SIMON	Détermination des sources de polluants atmosphériques carbonés (gazeux et particulaires) en Ile-de-France	2019/2022
Maiqi XIANG	Technique de prélèvement d'aérosol sur grille met poreuse	2017/2020
Marc CODACCIONI	Development of a pregnancy-Physiologically Based Toxicokinetic (p-PBTK) model for high-throughput screening of chemicals	2016/2019
Marie DELLISE	Évaluation multicritère et multi-objectif à l'échelle locale des performances des entreprises en regard des Meilleures Technique Disponibles	2017/2020

Sabrina MADIEDO-PODVRSAN	Barrières pulmonaires <i>in vitro</i> cultivées en condition dynamique et couplées à une biopuce hépatique : application en toxicologie prédictive	2019/2022
Ségoène SIMEON	Modélisation mathématique systémique de la toxicité envers la reproduction et le développement du poisson zèbre	2017/2020
Thi Cuc MAI	Dysfonctionnement de la régulation thermique après exposition chronique chez les rongeurs	2017/2020
Wang GAO	Réseaux bayésiens : méthodologie et application à l'inférence sur la structure des schémas de mode d'action en toxicologie prédictive	2017/2020
Wassim ALMOUALLEM	Étude du transfert et de la persistance des Composés Aromatiques Polycycliques Oxygénés (CAP-O) dans les sols et les eaux souterraines issus de sites et sols pollués	2018/2021
Zhizhao WANG	Influence des émissions anthropiques sur la formation d'aérosol organique en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'environnement	2019/2022
RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL		
Ever Dennys COARITA TINTAYA	Modélisation du comportement hydromécanique des argilites : anisotropies structurale et induite, relation endommagement/perméabilité	2017/2020
Dalija NAMJESNIK	Seismicity in a flooded abandoned coal mine at Gardanne, Provence, France	2017/2020
Élodie LACROIX	Développement d'outils de monitoring pour la détection des fuites d'hydrogène (H2) à l'aplomb des sites de stockage géologique	2018/2021
Imen ZAIER	Rôle du transport particulaire lié à la déstructuration de gypses poreux dans le développement de cavités de dissolution	2017/2020
Kamel DRIF	Développement d'outils de monitoring des réservoirs géothermiques profonds à partir du suivi haute résolution de la micro-sismicité induite et d'approches d'intelligence artificielle Development of advanced microseismic monitoring and machine learning tools for enhanced geothermal systems (EGS)	2019/2022
RISQUES ACCIDENTELS		
Audrey SANTANDREA	Compréhension des spécificités des particules nanométriques pour une meilleure prédiction des conséquences des explosions de poussières	2017/2020
Cléante LANGREE	Vers la modélisation de la propagation de vitesse de flamme pour des déflagrations consécutives à des rejets industriels accidentels	2018/2021
Hamza EL YAMANI	Caractérisation du comportement de matériaux dissipatifs isolants sous chocs	2018/2021
Stéphanie EL-ZAHLANIEH	Étude expérimentale des inflammations d'aérosols liquides : application aux brouillards d'hydrocarbures	2019/2022
Tamara OUEIDAT	Maîtrise des risques cyber-physiques dans les installations classées	2018/2021
Thi Thu Dieu NGUYEN	Understanding and modeling the Thermal Runaway of Li-ion batteries	2017/2020
OUVERTURE A LA SOCIÉTÉ		
Lucile OTTOLINI	Institutionnalisation de l'ouverture à la société civile au sein des organismes de recherche : vers de nouvelles interactions sciences/sociétés ?	2017/2020

Publications 2019

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques accidentels	LIU, Qi; PROUST, Christophe; GOMEZ, François; LUART, Denis; LEN, Christophe	Improving the Predictability of Chemical Equilibrium Software	Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58 (1): p. 411-419
	PETIT, Martin; MARLAIR, Guy; ABADA, Sara; WANG, Cao-Yang	Safety tests for Li-secondary batteries: Modeling Safety Tests/ Events	GARCHE, Jurgen; BRANDT, Klaus - Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications. Li-Battery Safety. Amsterdam: Elsevier, 2019, p. 428-453
	LE COZE, Jean-Christophe	Safety as strategy: Mistakes, failures and fiascos in high-risk systems	Safety Science, 2019, 116: p. 259-274
	JANES, Agnès; VIGNES, Alexis; DUFAUD, Olivier	Ignition temperatures of dust layers and bulk storages in hot environments	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 59: p. 106-177
	LE COZE, Jean-Christophe	How safety culture can make us think	Safety Science, 2019, 118: p. 221-229
	GAUDIN, Théophile; LU, Huiling; FAYET, Guillaume; BERTHAULD-DRELICH, Audrey; ROTUREAU, Patricia; POURCEAU, Gwladys; WADOUACHI, Anne; VAN HECKE, Elizabeth; NESTERENKO, Aïla; PEZRON, Isabelle	Impact of the chemical structure on amphiphilic properties of sugar-based surfactants: A literature overview	Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 270: p. 87-100
	VYAZMINA, Elena; LECOQ, Guillaume; COMMANAY, J.; GREGOIRE, Yann; JALLAIS, Simon; KRUMENACKER, L.; MAHON, A.; TRELAT, S.; TRIPATHI, A.	Overpressure Effects from Propane Detonation: Comparison of Simulation Results with Experimental Data	SNEGIREV, A.; TAMANINI, F.; BRADLEY, D.; LIU, N.; MOLKOV, V.; CHAUMEIX, N. - Proceedings of the ninth international seminar on fire and explosion hazards. 2019, p. 257-268
	LE COZE, Jean-Christophe	Storytelling or theory building? Hopkins' sociology of safety	Safety Science, 2019, 120: p. 735-744
	SANTANDREA, Audrey; PACAULT, S.; PERRIN, Laurent; VIGNES, Alexis; DUFAUD, Olivier	Nanopowders explosion: Influence of the dispersion characteristics	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62: p. art. 103942
	FAYET, Guillaume; ROTUREAU, Patricia	New QSPR Models to Predict the Flammability of Binary Liquid Mixtures	Molecular Informatics, 2019, 38 (8-9): p. art. 1800122
	LIU, Qi; PROUST, Christophe; GOMEZ, François; LUART, Denis; LEN, Christophe	Sensitivity of the predictability of chemical equilibrium software to the choice of the products	Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58 (8): p. 2654-2660
	GUENNOC, Fanny	Activité et influence des préventeurs au sein d'une organisation à risque. Le cas d'un site de production dans le secteur de la chimie pharmaceutique	Thèse de doctorat. Université de Bretagne Sud, 07/05/2019
	MAZRI, Chabane; TSOUKIAS, Alexis; DANIELL, Katherine A.	Decision support in participatory contexts: the organisational design dimension	International Journal of Decision Support System Technology, 2019, 11 (3)

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques accidentels	LIU, Qi; TADRENT, Sarra; PROUST, Christophe; GOMEZ, François; KHELFA, Anissa; LUART, Denis; LEN, Christophe	Theoretical analysis of the "green" synthesis of aniline by reduction of nitrobenzene	Chemical Engineering Science, 2020, 211 : p. art. 115275
	WILLMANN, Christophe; TRUCHOT, Benjamin	New energy carriers and additional risks for user safety in tunnels	Proceedings of the 15th International Interflam Conference. 2019, p. 1833-1844
	MURALIDHARA, Anitha; GRUTER, Gert-Jan; LEN, Christophe; MARLAIR, Guy	Exploratory analysis of fire risks pertaining to furanic platform chemicals	Proceedings of the 15th International Interflam Conference. 2019, p. 1661-1669
	LE COZE, Jean-Christophe	Hopkins' view of structure and culture (one step closer to strategy)	Safety Science, 2020, 122 : p. art. 104541
	LE COZE, Jean-Christophe	Safety Science Research: Evolution, Challenges and New Directions	Boca Raton : CRC Press, 2019
	LE COZE, Jean-Christophe	Visualising Safety	LE COZE, Jean-Christophe - Safety Science Research : Evolution, Challenges and New Directions. Boca Raton : CRC Press, 2019, p. 151-172
	DUCLOS, Audrey	Développement et mise au point de modèles phénoménologiques et de maîtrise des risques d'explosion pour la filière émergente hydrogène-énergie	Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne, 29/10/2019
	MURALIDHARA, Anitha	Physico-chemical safety issues pertaining to biosourced furanics valorization with a focus on humins as biomass resource	Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne, 10/10/2019
	MENICACCI, Eleonora	Compréhension et prédiction des mécanismes d'incompatibilités chimiques à l'aide de la DFT	Thèse de doctorat. Université de Paris 6, 29/11/2019
	GAUDIN, Théophile; ROTUREAU, Patricia; PEZRON, Isabelle; FAYET, Guillaume	Estimating the adsorption efficiency of sugar-based surfactants from QSPR models	International Journal of Quantitative Structure-Property Relationships, 2019, 4 (2) : p. art. 2
	LEES, Philip; GANT, Simon; BETTIS, Richard; VIGNES, Alexis; LACOME, Jean-Marc; DUFAUD, Olivier	Review of recent incidents involving flammable mists	Proceedings of Hazards 29. 2019
	GREGOIRE, Yann; LEPRETTE, Emmanuel; PROUST, Christophe	Function Testing of Passive Explosion Isolation Flap Valves	SNEGIREV, A.; TAMANINI, F.; BRADLEY, D.; LIU, N.; MOLKOV, V.; CHAUMEIX, N. - Proceedings of the ninth international seminar on fire and explosion hazards. 2019, p. 345-355
	GREGOIRE, Yann; LEPRETTE, Emmanuel; PROUST, Christophe	On the Usefulness of Phenomenological Approach to Model Explosions in Complex Industrial Systems	SNEGIREV, A.; TAMANINI, F.; BRADLEY, D.; LIU, N.; MOLKOV, V.; CHAUMEIX, N. - Proceedings of the ninth international seminar on fire and explosion hazards. 2019, p. 1234-1245
DAUBECH, Jérôme; LEPRETTE, Emmanuel; PROUST, Christophe; LECOQ, Guillaume	Further insight into the gas flame acceleration mechanisms in pipes. Part I: Experimental work	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62 : p. art. 103930	
LECOQ, Guillaume; LEPRETTE, Emmanuel; DAUBECH, Jérôme; PROUST, Christophe	Further insight into the gas flame acceleration mechanisms in pipes. Part II: Numerical work	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62 : p. art. 103919	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques accidentels	NGUYEN, Thi Thu Dieu; ABADA, Sara; LECOQ, Amandine; BERNARD, Julien; PETIT, Martin; MARLAIR, Guy; GRUGEON, Sylvie; LARUELLE, Stéphane	Understanding the Thermal Runaway of Ni-Rich Lithium-Ion Batteries	World Electric Vehicle Journal, 2019, 10 (4): p. art. 79
	VIGNES, Alexis; KRIETSCH, Arne; DUFAUD, Olivier; SANTANDREA, Audrey; PERRIN, Laurent; BOUILLARD, Jacques	Course of explosion behaviour of metallic powders - From micron to nanosize	Journal of Hazardous Materials, 2019, 379: p. art. 120767
	MURALIDHARA, Anitha; BADO-NILLES, Anne; MARLAIR, Guy; ENGELEN, Victor; LEN, Christophe; PANDARD, Pascal	Humins in the environment: early stage insights on ecotoxicological aspects	Biofuels Bioproducts & Biorefining, 2019, 13 (3): p. 464-470
Risques chroniques	CURCI, Gabriele; ALYUZ, Ummugulsum; BARO, Rocio; BIANCONI, Roberto; BIESER, Johannes; CHRISTENSEN, Jesper H.; COLETTE, Augustin; FARROW, Aidan; FRANCIS, Xavier V.; JIMENEZ-GUERRERO, Pedro; IM, Ulas; LIU, Peng; MANDERS, Astrid; PALACIOS-PENA, Laura; PRANK, Marje; POZZOLI, Luca; SOKHI, Ranjeet; SOLAZZO, Efsio; TUCCELLA, Paolo; UNAL, Alper; VIVANCO, Marta G.; HOGREFE, Christian; GALMARINI, Stefano	Modelling black carbon absorption of solar radiation: combining external and internal mixing assumptions	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: p. 181-204
	THEOBALD, Mark; VIVANCO, Marta G.; AAS, Wenche; ANDERSSON, Camilla; CIARELLI, Giancarlo; COUVIDAT, Florian; CUVELIER, Kees; MANDERS, Astrid; MIRCEA, Mihaela; PAY, Maria-Teresa; TSYRO, Svetlana; ADANI, Mario; BERGSTROM, Robert; BESSAGNET, Bertrand; BRIGANTI, Gino; CAPPELLETTI, Andrea; D'ISIDORO, Massimo; FAGERLI, Hilde; MAR, Kathleen; OTERO, Noelia; RAFFORT, Valentin; ROUSTAN, Yelva; SCHAAP, Martijn; WIND, Peter; COLETTE, Augustin	An evaluation of European nitrogen and sulfur wet deposition and their trends estimated by six chemistry transport models for the period 1990-2010	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: p. 379-405
	BRACK, Werner; AIT-AISSA, Selim; BACKHAUS, Thomas; DULIO, Valeria; ESCHER, Beate I.; FAUST, Michael; HILSCHEROVA, Klara; HOLLENDER, Juliane; HOLLERT, Henner; MULLER, Christin; MUNTKE, John; POSTHUMA, Leo; SEILER, Thomas B.; SLOBODNIK, Jaroslav; TEODOROVIC, Ivana; TINDALL, Andrew J.; DE ARAGAO UMBUZEIRO, Gisela; ZHANG, Xiaowei; ALTENBURGER, Rolf	Effect-based methods are key. The European Collaborative Project SOLUTIONS recommends integrating effect-based methods for diagnosis and monitoring of water quality	Environmental Sciences Europe, 2019, 31: p. art. 10
	KIM, Youngseob; SARTELET, Karine; COUVIDAT, Florian	Modeling the effect of non-ideality, dynamic mass transfer and viscosity on SOA formation in a 3-D air quality model	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19 (2): p. 1241-1261

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	ALTENBURGER, Rolf; BRACK, Werner; BURGESS, Robert M.; BUSCH, Wibke; ESCHER, Beate I.; FOCKS, Andreas; HEWITT, L.M.; JACOBSEN, Bo N.; LOPEZ DE ALDA, Miren; AIT-AISSA, Selim; BACKHAUS, Thomas; GINEBREDA, Antoni; HILSCHEROVA, Klara; HOLLENDER, Juliane; HOLLERT, Henner; NEALE, Peta A.; SCHULZE, Tobias; SCHYMANSKI, Emma L.; TEODOROVIC, Ivana; TINDALL, Andrew J.; DE ARAGAO UMBUZEIRO, Gisela; VRANA, Branislav; ZONJA, Bozo; KRAUSS, Martin	Future water quality monitoring: improving the balance between exposure and toxicity assessments of real-world pollutant mixtures	Environmental Sciences Europe, 2019, 31 : p. art. 12
	ZGHEIB, Elias; GAO, Wang; LIMONCIEL, Alice; ALADJOV, Hristo; YANG, Huan; TEBBY, Cléo; GAYRAUD, Ghislaine; JENNINGS, Paul; SACHANA, Magdalini; BELTMAN, Joost; BOIS, Frédéric Y.	Application of three approaches for quantitative AOP development to renal toxicity	Computational Toxicology, 2019, 11 : p. 1-13
	BEGGIO, Giovanni; SCHIEVANO, Andrea; £BONATO, Tiziano; HENNEBERT, Pierre; PIVATO, Alberto	Statistical analysis for the quality assessment of digestates from separately collected organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and agro-industrial feedstock. Should input feedstock to anaerobic digestion determine the legal status of digestate?	Waste Management, 2019, 87 : p. 546-558
	SARIGIANNIS, D.A.; KARAKITSIOS, Spyros; DOMINGUEZ-ROMERO, Elena; PAPADAKI, Krystalia; BROCHOT, Céline; KUMAR, Vikas; SCHUMACHER Marta; SY, Moustapha; MIELKE, Hans; GREINER, Mathias; MENGELERS, Marcel; SCHERINGER, Martin	Physiology-based toxicokinetic modelling in the frame of the European Human Biomonitoring Initiative	Environmental Research, 2019, 172 : p. 216-230
	HANI, Younes; TURIES, Cyril; PALLUEL, Olivier; DELAHAUT, Laurence; BADO-NILLES, Anne; GEFFARD, Alain; DEDOURGE-GEFFARD, Odile; PORCHER, Jean-Marc	Effects of a chronic exposure to different water temperatures and/or to an environmental cadmium concentration on the reproduction of the threespine stickleback (<i>Gasterosteus aculeatus</i>)	Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 174 : p. 48-57
	BATTISTONI, Maria; DI RENZO, Francesca; MENEGOLA, Elena; BOIS, Frédéric Y.	Quantitative AOP based teratogenicity prediction for mixtures of azole fungicides	Computational Toxicology, 2019, 11 : p. 72-81
	OUNOUGHENE, Ghania; CHIVAS-JOLY, Carine; LONGUET, Claire; LE BIHAN, Olivier; LOPEZ-CUESTA, José-Marie; LE COQ, Laurence	Evaluation of nanosilica emission in polydimethylsiloxane composite during incineration	Journal of Hazardous Materials, 2019, 371 : p. 415-422
	BESSAGNET, Bertrand; COUVIDAT, Florian; LEMAIRE, Vincent	A statistical physics approach to perform fast highly-resolved air quality simulations. A new step towards the meta-modelling of chemistry transport models	Environmental Modelling & Software, 2019, 116 : p. 100-109
	VIONE, Davide; ALBINET, Alexandre; BARSOTTI, Francesco; MEKIC, Majda; JIANG, Bin; MINERO, Claudio; BRIGANTE, Marcello; GLIGOROVSKI, Sasho	Formation of substances with humic-like fluorescence properties, upon photoinduced oligomerization of typical phenolic compounds emitted by biomass burning	Atmospheric Environment, 2019, 206 : p. 197-207

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	SERRA, Hélène; SCHOLZE, Martin; ALTENBURGER, Rolf; BUSCH, Wibke; BUDZINSKI, Hélène; BRION, François; AIT-AISSA, Selim	Combined effects of environmental xeno-estrogens within multi-component mixtures: Comparison of in vitro human - and zebrafish - based estrogenicity bioassays	Chemosphere, 2019, 227 : p. 334-344
	TEBBY, Cl�eo; BROCHOT, Céline; DORNE, Jean-Lou; BEAUDOUIN, Rémy	Investigating the interaction between melamine and cyanuric acid using a Physiologically-Based Toxicokinetic model in rainbow trout	Toxicology and Applied Pharmacology, 2019, 370: p. 184-195
	MAJDI, Marwa; SARTELET, Karine; LANZAFAME, Grazia-Maria; COUVIDAT, Florian; KIM, Youngseob; CHRIT, Mounir; TURQUETY, Sol�ene	Precursors and formation of secondary organic aerosols from wildfires in the Euro-Mediterranean region	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19 (8): p. 5543-5569
	CHOLAKIAN, Arineh; COLETTE, Augustin; COLL, Isabelle; CIARELLI, Giancarlo; BEEKMANN, Matthias	Future climatic drivers and their effect on PM10 components in Europe and the Mediterranean Sea	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19 (7): p. 4459-4484
	ROSTKOWSKI, Paweł; HAGLUND, Peter; AALIZADEH, Reza; ALYGIZAKIS, Nikiforos; THOMAIDIS, Nikolaos; BELTRAN ARANDES, Joaquin; NIZZETTO, Pernilla Bohlin; BOOIJ, Petra; BUDZINSKI, Hélène; BRUNSWICK, Pamela; COVACI, Adrian; GALLAMPOIS, Christine; GROSSE, Sylvia; HINDLE, Ralph; IPOLYI, Ildiko; JOBST, Karl; KASERZON, Sarit L.; LEONARDS, Pim; LESTREMAU, François; LETZEL, Thomas; MAGNER, Jorgen; MATSUKAMI, Hidenori; MOSCHET, Christoph; OSWALD, Peter; PLASSMANN, Merle; SLOBODNIK, Jaroslav; YANG, Chun	The strength in numbers : comprehensive characterization of house dust using complementary mass spectrometric techniques	Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019, 411 (10): p. 1957-1977
	TSIROS, Periklis; BOIS, Frédéric Y.; DOKOUMETZIDIS, Aristides; TSILIKI, Georgia; SARIMVEIS, Haralambos	Population pharmacokinetic reanalysis of a Diazepam PBPK model: a comparison of Stan and GNU MCSim	Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics, 2019, 46 (2): p. 173-192
	QUINDROIT, Paul; BEAUDOUIN, Rémy; BROCHOT, Céline	Estimating the cumulative human exposures to pyrethroids by combined multi-route PBPK models: Application to the French population	Toxicology Letters, 2019, 312: p. 125-138
	WALLACE, Jasmina; SELMAOUI, Brahim	Effect of mobile phone radiofrequency signal on the alpha rhythm of human waking EEG: A review	Environmental Research, 2019, 175: p. 274-286
	BARCA, Cristian; MARTINO, Mathieu; HENNEBERT, Pierre; ROCHE, Nicolas	Kinetics and capacity of phosphorus extraction from solid residues obtained from wet air oxidation of sewage sludge	Waste Management, 2019, 89: p. 275-283

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	MIRCEA, Mihaela; BESSAGNET, Bertrand; D'ISIDORO, Massimo; PIROVANO, Guido; AKSOYUGLU, Sebnem; CIARELLI, Giancarlo; TSYRO, Svetlana; MANDERS, Astrid; BIESER, Johannes; STERN, Rainer; VIVANCO, Marta G.; CUVELIER, Cornelius; AAS, Wenche; PREVOT, André S.H.; AULINGER, Armin; BRIGANTI, Gino; CALORI, Giuseppe; CAPPELLETTI, Andrea; COLETTE, Augustin; COUVIDAT, Florian; FAGERLI, Hilde; FINARDI, Sandro; KRANENBURG, Richard; ROUIL, Laurence; SILIBELLO, Camillo; SPINDLER, Gerald; POULAIN, Laurent; HERRMANN, Hartmut; JIMENEZ, Jose L.; DAY, Douglas, A.; TIITTA, Petri; CARBONE, Samara	EURODELTA III exercise: An evaluation of air quality models' capacity to reproduce the carbonaceous aerosol	Atmospheric Environment: X, 2019, 2: p. art. 100018
	BEDOYA-VELASQUEZ, Andres Esteban; TITOS, Gloria; BRAVO-ARANDA, Juan Antonio; HAEFFELIN, Martial; FAVEZ, Olivier; PETIT, Jean-Eudes; CASQUERO-VERA, Juan Andres; OLMO-REYES, Francisco Jose; MONTILLA-ROSETO, Elena; ALADOS-ARBOLEDAS, Lucas; GUERRERO-RASCADO, Juan Luis	Long-term aerosol optical hygroscopicity study at the ACTRIS SIRTa observatory: synergy between ceilometer and in situ measurements	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: p. 7883-7896
	CAUDEVILLE, Julien; HABRAN, Sarah	Systèmes d'information de surveillance en santé-environnement	Environnement Risques & Santé, 2019, 18 (3): p. 235-244
	BROCHOT, Céline; CASAS, Maribel; MANZANO-SALGADO, Cyntia; ZEMAN, Florence Anna; SCHETTGEN, Thomas; VRIJHEID, Martine; BOIS, Frédéric Y.	Prediction of maternal and foetal exposures to perfluoroalkyl compounds in a Spanish birth cohort using toxicokinetic modelling	Toxicology and Applied Pharmacology, 2019, 379: p. art. 114640
	FRENEY, Evelyn; ZHANG, Yunjiang; CROTEAU, Philip; AMODEO, Tanguy; WILLIAMS, Leah; TRUONG, François; PETIT, Jean-Eudes; ET AL.; FAVEZ, Olivier	The second ACTRIS inter-comparison (2016) for Aerosol Chemical Speciation Monitors (ACSM): Calibration protocols and instrument performance evaluations	Aerosol Science and Technology, 2019, 53(7): 830-842
	BRION, François; DE GUSSEM, Vincent; BUCHINGER, Sebastian; HOLLERT, Henner; CARERE, Mario; PORCHER, Jean-Marc; PICCINI, Benjamin; FERAY, Christine; DULIO, Valeria; KONEMANN, Sarah; SIMON, Eszter; WERNER, Inge; KASE, Robert; AIT-AISSA, Selim	Monitoring estrogenic activities of waste and surface waters using a novel in vivo zebrafish embryonic (EASZY) assay: Comparison with in vitro cell-based assays and determination of effect-based trigger values	Environment International, 2019, 130: p. art. 104896
	BOSSA, Nathan; CHAURAND, Perrine; LEVARD, Clément; VICENTE, Jérôme; BORSCHNECK, Daniel; GEANTET, Christophe; AGUERRE-CHARIOL, Olivier; ROSE, Jérôme	Mechanisms limiting the release of TiO ₂ nanomaterials during photocatalytic cement alteration: the role of surface charge and porous network morphology	Environmental Science Nano, 2019, 6 (2): p. 624-634
	ANDRE, L.; ZDANEVITCH, Isabelle; PINEAU, C.; LENCAUCHEZ, Jeanne; DAMIANO, A.; PAUSS, A.; RIBEIRO, T.	Dry anaerobic co-digestion of roadside grass and cattle manure at a 60 L batch pilot scale	Bioresource Technology, 2019, 289: p. art. 121737

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	MENUT, Laurent; BESSAGNET, Bertrand	What Can We Expect from Data Assimilation for Air Quality Forecast? Part I: Quantification with Academic Test Cases	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36 (2): p. 269-279
	BESSAGNET, Bertrand; MENUT, Laurent; COUVIDAT, Florian; MELEUX, Frédéric; SIOUR, Guillaume; MAILLER, Sylvain	What Can We Expect from Data Assimilation for Air Quality Forecast? Part II: Analysis with a Semi-Real Case	Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36 (7)
	PETIT, Jean-Eudes; PALLARES, Cyril; FAVEZ, Olivier; ALLEMAN, Laurent Y.; BONNAIRE, Nicolas; RIVIERE, Emmanuel	Sources and Geographical Origins of PM10 in Metz (France) Using Oxalate as a Marker of Secondary Organic Aerosols by Positive Matrix Factorization Analysis	Atmosphere, 2019, 10 (7): p. art. 370
	CATTEAU, Audrey; LE GUERNIC, Antoine; MARCHAND, Adrien; HANI, Younes; PALLUEL, Olivier; TURIÉS, Cyril; BADO-NILLES, Anne; DEDOURGE-GEFFARD, Odile; GEFFARD, Alain; PORCHER, Jean-Marc	Impact of confinement and food access restriction on the three-spined stickleback (<i>Gasterosteus aculeatus</i> , L.) during caging: a multi-biomarker approach	Fish Physiology and Biochemistry, 2019, 45: p. 1261-1276
	HOLLENDER, Juliane; VAN BAVEL, Bert; DULIO, Valeria; FARMEN, Eivind; FURTMANN, Klaus; KOSCHORRECK, Jan; KUNKEL, Uwe; KRAUSS, Martin; MUNTHER, John; SCHLABACH, Martin; SLOBODNIK, Jaroslav; STROOMBERG, Gerard; TERNES, Thomas; THOMAIDIS, Nikolaos; TORNERO, Victoria	High resolution mass spectrometry-based non-target screening can support regulatory environmental monitoring and chemicals management	Environmental Sciences Europe, 2019, 31: p. art. 42
	LANZONI, Anna; CASTOLDI, Anna F.; KASS, G.E.; TERRON, Andrea; DE SEZE, Guilhem; BAL-PRICE, Anna; BOIS, Frédéric Y.; DELCLOS, K. Barry; DOERGE, Daniel R.; FRITSCHE, Ellen; HALLDORSSON, Thorhallur; KOLOSSA-GEHRING, Marika; BENNEKOU, Susanne Hougaard; KONING, Frits; LAMPEN, Alfonso; LEIST, Marcel; MANTUS, Ellen; ROUSSELLE, Christophe; SIEGRIST, Mickael; STEINBERG, Pablo; TRITSCHER, Angelika; VAN DE WATER, Bob; VINEIS, Paolo; WALKER, Nigel; WALLACE, Heather; WHELAN, Maurice; YOUNES, Maged	Advancing human health risk assessment	EFSA Journal, 2019, 14 (suppl. 1): p. art. e170712
	ANDRIANOME, Soafara; YAHIA-CHERIF, Lydia; SELMAOUI, Brahim	Effect of short exposure to radiofrequency electromagnetic fields on saliva biomarkers: a study on the electrohypersensitive individuals	International Journal of Radiation Biology, 2019, 95 (6): p. 788-792
	VIDAL, Alice; BABUT, Marc; GARRIC, Jeanne; BEAUDOUIN, Rémy	Elucidating the fate of perfluorooctanoate sulfonate using a rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) physiologically-based toxicokinetic model	Science of the Total Environment, 2019, 691: p. 1297-1309
	ZIEGLER-DEVIN, Isabelle; MENANA, Zahra; CHRUSCIEL, Laurent; CHALOT, Michel; BERT, Valérie; BROSSE, Nicolas	Steam explosion pretreatment of willow grown on phytomanaged soils for bioethanol production	Industrial Crops and Products, 2019, 140: p. art. 111722

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	PINTO, Caroline; HAO, Ruixin; GRIMALDI, Marina; THRIKAWALA, Savini; BOULAHTOUF, Abdelhay; AIT-AISSA, Selim; BRION, François; GUSTAFSSON, Jan-Ake; BALAGUER, Patrick; BONDESSON, Maria	Differential activity of BPA, BPAF and BPC on zebrafish estrogen receptors in vitro and in vivo	Toxicology and Applied Pharmacology, 2019, 380: p. art. 114709
	CODACCIONI, Marc; BOIS, Frédéric Y.; BROCHOT, Céline	Placental transfer of xenobiotics in pregnancy physiologically-based pharmacokinetic models: Structure and data	Computational Toxicology, 2019, 12: p. art. 100111
	ALBINET, Alexandre; LANZAFAME, Grazia-Maria; SRIVASTAVA, Deepchandra; BONNAIRE, Nicolas; NALIN, Federica; WISE, Stephen A.	Analysis and determination of secondary organic aerosol (SOA) tracers (markers) in particulate matter standard reference material (SRM 1649b, urban dust)	Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019, 411 (23): p. 5975-5983
	CHAKRAVARTY, Somik; FISCHER, Marc; LE BIHAN, Olivier; MORGENEYER, Martin	Towards a theoretical understanding of dustiness	Granular Matter, 2019, 21 (4): p. art. 97
	AMINZADEH, Reza; THIELENS, Arno; GAILLOT, Davy Paul; LIENARD, Martine; KONE, Lamine; AGNEESSENS, Sam; VAN TORRE, Patrick; VAN DEN BOSSCHE, Matthias; VERLOOCK, Leen; DONGUS, Stefan; EEFTEENS, Marloes; HUSS, Anke; VERMEULEN, Roel; DE SEZE, René; CARDIS, Elisabeth; ROGIER, Hendrik; ROOSLI, Martin; MARTENS, Luc; JOSEPH, Wout	A multi-band body-worn distributed exposure meter for personal radio-frequency dosimetry in diffuse indoor environments	IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (16): p. 6927-6937
	GIUSTI, Anna; ATLURI, Rambabu; TSEKOVSKA, Rositsa; GAJEWICZ, Agnieszka; APOSTOLOVA, Margarita D.; BATTISTELLI, Chiara L.; BLEEKER, Eric A.J.; BOSSA, Cecilia; BOUILLARD, Jacques; DUSINSKA, Maria; GOMEZ-FERNANDEZ, Paloma; GRAFSTROM, Roland; GROMELSKI, Maciej; HANDZHIYSKI, Yordan; RAUN JACOBSEN, Nicklas; JANTUNEN, Paula; JENSEN, Keld Alstrup; MECH, Agnieszka; NAVAS, José Maria; NYMARK, Penny; OOMEN, Agnes G.; PUZYN, Tomasz; RASMUSSEN, Kirsten; RIEBELING, Christian; RODRIGUEZ-LLOPIS, Isabel; SABELLA, Stefania; RIEGO SINTES, Juan; SUAREZ-MERINO, Blanca; TANASESCU, Speranta; WALLIN, Hakan; HAASE, Andrea	Nanomaterial grouping: Existing approaches and future recommendations	NanoImpact, 2019, 16: p. art. 100182
	KARAGULIAN, Federico; BARBIERE, Maurizio; KOTSEV, Alexander; SPINELLE, Laurent; GERBOLES, Michel; LAGLER, Friedrich; REDON, Nathalie; CRUNAIRE, Sabine; BOROWIAK, Annette	Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring	Atmosphere, 2019, 10 (9): p. art. 506
	SAUER, Pavel; TUMOVA, Jitka; STEINBACH, Christoph; GOLOVKO, Oksana; KOMEN, Hans; MAILLOT-MARECHAL, Emmanuelle; MACHOVA, Jana; GRABIC, Roman; AIT-AISSA, Selim; KROUPOVA, Hana Kocour	Chronic simultaneous exposure of common carp (Cyprinus carpio) from embryonic to juvenile stage to drosiprenone and gestodene at low ng/L level caused intersex	Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 188: p. art. 109912

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	GUIGUES, Nathalie; LEPOT, Bénédicte; CABILLIC, Julie; RAVEAU, Sandrine; FERRET, Céline; MARESCAUX, Nathalie; LALERE, Béatrice	Assessing the performance of measurement devices for continuously monitoring of organic matter and nutrient in river water	Accreditation and Quality Assurance, 2019: p. Accepté
	CHOLAKIAN, Arineh; BEEKMANN, Matthias; COLL, Isabelle; CIARELLI, Giancarlo; COLETTE, Augustin	Biogenic secondary organic aerosol sensitivity to organic aerosol simulation schemes in climate projections	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: p. 13209-13226
	CALAS, Aude; UZU, Gaëlle; BESOMBES, Jean-Luc; MARTINS, Jean; REDAELLI, Mattéo; WEBER, Samuel; CHARRON, Aurélie; ALBINET, Alexandre; CHEVRIER, Florie; BRULFERT, Guillaume; MESBAH, Boualem; FAVEZ, Olivier; JAFFREZO, Jean-Luc	Seasonal Variations and Chemical Predictors of Oxidative Potential (OP) of Particulate Matter (PM), for Seven Urban French Sites	Atmosphere, 2019, 10 (11): p. art. 698
	CARNESECCHI, Edoardo; SVENDSEN, Claus; LASAGNI, Stefano; GRECH, Audrey; QUIGNOT, Nadia; AMZAL, Billy; TOMA, Cosimo; TOSI, Simone; RORTAIS, Agnes; CORTINAS-ABRAHANTES, Jose; CAPRI, Ettore; KRAMER, Nynke; BENFENATI, Emilio; SPURGEON, David; GUILLOT, Gilles; CHRISTIAN, Jean Lou; DORNE, Michel	Investigating combined toxicity of binary mixtures in bees: Meta-analysis of laboratory tests, modelling, mechanistic basis and implications for risk assessment	Environment International, 2019, 133: p. art. 105256
	HE, Yao; SUN, Yele; WANG, Qingqing; ZHOU, Wei; XU, Weiqi; ZHANG, Yunjiang; XIE, Conghui; ZHAO, Jian; DU, Wei; QIU, Yanmei; LEI, Lu; FU, Pingqing; WANG, Zifa; WORSNOP, Douglas	A Black Carbon-Tracer Method for Estimating Cooking Organic Aerosol From Aerosol Mass Spectrometer Measurements	Geophysical Research Letters, 2019, 46 (14): p. 8474-8483
	RAMME, Anja Patricia; KOENIG, Leopold; HASENBERG, Tobias; SCHWENK, Christine; MAGAUER, Corinna; FAUST, Daniel; LORENZ, Alexandra K.; KREBS, Anna-Catharina; DREWELL, Christopher; SCHIRRMANN, Kerstin; VLADETIC, Alexandra; LIN, Grace-Chiaen; PABINGER, Stephan; NEUHAUS, Winfried; BOIS, Frédéric Y.; LAUSTER, Roland; MARX, Uwe; DEHNE, Eva-Maria	Autologous induced pluripotent stem cell-derived four-organ-chip	Future Science OA, 2019: p. art. FSO413
	HENNEBERT, Pierre	Proposition of threshold for waste contaminated with mercury (compounds) in application of the Minamata convention on mercury and impact assessment	Detritus, 2019: p. art. FSO413
	BARRICK, Andrew; CHATEL, Amelie; MANIER, Nicolas; KALMAN, Judit; NAVAS, José Maria; MOUNEYRAC, Catherine	Investigating the Impact of Manufacturing Processes on the Ecotoxicity of Carbon Nanofibers: A Multi-Aquatic Species Comparison	Environmental Toxicology and Chemistry, 2019, 38 (10): p. 2314-2325
	FAUST, Michael; BACKHAUS, Thomas; ALTENBURGER, Rolf; DULIO, Valeria; VAN GILS, Jos; GINEBREDA, Antoni; KORTENKAMP, Andrea; MUNTHE, John; POSTHUMA, Leo; SLOBODNIK, Jaroslav; TOLLEFSEN, Knut Erik; VAN WEZEL, Annemarie; BRACK, Werner	Prioritisation of water pollutants: the EU Project SOLUTIONS proposes a methodological framework for the integration of mixture risk assessments into prioritisation procedures under the European Water Framework Directive	Environmental Sciences Europe, 2019, 31: p. art. 66

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	HENNEBERT, Pierre	Proposition of threshold for waste contaminated with mercury (compounds) in application of the Minamata convention on mercury and impact assessment	SARDINIA 2019 : Proceedings of the 17th International waste management and landfill symposium. Italy : CISA Publisher, 2019
	HENNEBERT, Pierre	The sorting of waste for a circular economy: sampling when (very) few particles have (very) high concentrations of contaminant or valuable element	SARDINIA 2019 : Proceedings of the 17th International waste management and landfill symposium. Italy : CISA Publisher, 2019
	HENNEBERT, Pierre	Literature evidence on the brominated flame retardant content in plastics of construction, of textiles/furnitures and of non-food packaging: should they be sorted before recycling?	SARDINIA 2019 : Proceedings of the 17th International waste management and landfill symposium. Italy : CISA Publisher, 2019
	CIARELLI, Giancarlo; THEOBALD, Mark; VIVANCO, Marta G.; BEEKMANN, Matthias; AAS, Wenche; ANDERSSON, Camilla; BERGSTROM, Robert; MANDERS-GROOT, Astrid M.M.; COUVIDAT, Florian; MIRCEA, Mihaela; TSYRO, Svetlana; FAGERLI, Hilde; MAR, Kathleen; RAFFORT, Valentin; ROUSTAN, Yelva; PAY, Maria-Teresa; SCHAAP, Martijn; KRANENBURG, Richard; ADANI, Mario; BRIGANTI, Gino; CAPPELLETTI, Andrea; D'ISIDORO, Massimo; CUVELIER, Cornelis; CHOLAKIAN, Arineh; BESSAGNET, Bertrand; WIND, Peter; COLETTE, Augustin	Trends of inorganic and organic aerosols and precursor gases in Europe: insights from the EURODELTA multi-model experiment over the 1990–2010 period	Geoscientific Model Development, 2019, 12 : p. 4923-4954
	BOICHU, Marie; FAVEZ, Olivier; RIFFAULT, Véronique; PETIT, Jean-Eudes; ZHANG, Yunjiang; BROGNIEZ, Colette; SCIARE, Jean; CHIAPPELLO, Isabelle; CLARISSE, Lieven; ZHANG, Shouwen; PUJOL-SOHNE, Nathalie; TISON, Emmanuel; DELBARRE, Hervé; GOLOUB, Philippe	Large-scale particulate air pollution and chemical fingerprint of volcanic sulfate aerosols from the 2014–2015 Holuhraun flood lava eruption of Baroarbunga volcano (Iceland)	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19 : p. 14253-14287
	JIANG, Jianhui; AKSOYOGLU, Sebnem; EL-HADDAD, Imad; CIARELLI, Giancarlo; DENIER VAN DER GON, Hugo; CANONACO, Francesco; GILARDONI, Stefania; PAGLIONE, Marco; MINGUILLON, Maria Cruz; FAVEZ, Olivier; ZHANG, Yunjiang; MARCHAND, Nicolas; HAO, Liqing; VIRTANEN, Annele; FLOROU, Kalliopi; O'DOWD, Collin; OVADNEVAITE, Jurgita; BALTENSPERGER, Urs; PREVOT, André S.H.	Sources of organic aerosols in Europe: A modelling study using CAMx with modified volatility basis set scheme	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(24): 15247-15270
BESSET, Dimitri; SELMAOUI, Brahim; TOURNEUX, Pierre; LEKE, André; DELANAUD, Stéphane; DE SEZE, René; BLANCHARD, Erwan Stephan	Environmental radiofrequency electromagnetic field levels in a department of pediatrics	Environmental Research, 2020, 181 : art. 108894	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	LANGUILLE, Baptiste; GROS, Valérie; PETIT, Jean-Eudes; HONORE, Cécile; BAUDIC, Alexia; PERRUSSEL, Olivier; FORET, Gilles; MICHOU, Vincent; TRUONG, François; BONNAIRE, Nicolas; SARDA-ESTEVE, Roland; DELMOTTE, Marc; FERON, Anais; MAISONNEUVE, Franck; GAIMOZ, Cécile; FORMENTI, Paola; KOTTHAUS, Simone; HAEFFELIN, Martial; FAVEZ, Olivier	Wood burning: a major source of Volatile Organic Compounds during wintertime in the Paris region	Science of the Total Environment, 2020, 711: art. 135055
	FILELLA, Montserrat; HENNEBERT, Pierre; OKKENHAUG, Gudny; TURNER, Andrew	Occurrence and fate of antimony in plastics	Journal of Hazardous Materials, 2019: p. Accepté
	HENNEBERT, Pierre	Hazard classification of waste: review of available practical methods and tools	Detritus, 2019, 7: p. 13-28
	VELLY, Nathalie	Comment sont gérés les sols pollués ?	Year book Santé et Environnement. Montrouge: John Libbey Eurotext Ltd., 2019, p. 281-284
	BRIGNON, Jean-Marc; CANTUARIAS, Carmen; CHAPON, Valentin; MOMBELLI, Enrico	Rejets de micropolluants: un essai de comparaison économique entre traitement et substitution à la source	TSM - Techniques sciences méthodes, 2019 (3): p. 27-40
	BESSAGNET, Bertrand	La pollution de l'air en Chine	Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2019 (96): p. 46-49
	LEOZ-GARZIANDIA, Eva	Les impacts de la pollution de l'air	Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2019 (96): p. 9-12
	YANG, Yifan; XIAOFENG, Xu; ZHANG, Yunjiang; ZHENG, Shanshan; WANG, Lingrui; LIU, Dantong; GUSTAVE, Williamson; JIANG, Lei; HUA, Yan; DU, Songshan; TANG, Lili	Seasonal size distribution and mixing state of black carbon aerosols in a polluted urban environment of the Yangtze River Delta region, China	Science of the Total Environment, 2019, 654: p. 300-310
	IM, Ulas; BRANDT, Jorgen; GEELS, Camilla; HANSEN, Kaj M.; CHRISTENSEN, Jesper H.; ANDERSEN, Mikael S.; SOLAZZO, Efisio; KIOUSIOUKIS, Ioannis; ALYUZ, Ummugulsum; BALZARINI, Alessandra; BARO, Rocio; BELLASIO, Roberto; BIANCONI, Roberto; BIESER, Johannes; COLETTE, Augustin; ET AL.	Multi-model Assessment of Air Pollution-Related Premature Mortality in Europe and U.S.: Domestic Versus Foreign Contributions	MENSINK, Clemens; GONG, Wanmin; HAKAMI, Amir - Air pollution modeling and its application XXVI. Cham: Springer, 2020, p. 461-467
	VIATTE, Camille; WANG, Tianze; VAN DAMME, Martin; DAMMERS, Enrico; MELEUX, Frédéric; CLARISSE, Lieven; SHEPHARD, Mark; WHITBURN, Simon; COHEUR, Pierre-François; CADY-PEREIRA, Karen; CLERBAUX, Cathy	Atmospheric ammonia variability and link with PM formation: a case study over the Paris area	Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(1): 577-596
GRIGNET, Arnaud; DE VAUFLEURY, Annette; PAPIN, Arnaud; BERT, Valérie	Urban soil phytomanagement for Zn and Cd in situ removal, greening, and Zn-rich biomass production taking care of snail exposure	Environmental Science and Pollution Research, 2019: p. Accepté	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	PERSONNE, Stéphane	Développement d'un modèle toxicocinétique basé sur la physiologie pour la perméthrine et ses métabolites chez la rate gestante	Thèse de doctorat. Université d'Amiens, 25/01/2019
	QUINDROIT, Paul	Reconstruction de doses d'exposition pour des mélanges de substances chimiques ayant des métabolites communs : application à la famille des pyréthrinoides	Thèse de doctorat. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 18/11/2019
	DAVID, Viviane	Compréhension et prédiction des effets de substances chimiques sur la dynamique de population de l'épinoche à trois épines en mésocosmes	Thèse de doctorat. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 11/12/2019
	CATTEAU, Audrey	Pertinence d'une approche de biosurveillance active utilisant l'épinoche à trois épines (<i>Gasterosteus aculeatus</i>) dans l'évaluation d'une contamination par des effluents de station d'épuration	Thèse de doctorat. Université de Reims Champagne-Ardenne, 20/12/2019
	BELIS, Claudio A.; FAVEZ, Olivier; MIRCEA, Mihaela; DIAPOULI, E.; MANOUSAKAS, M.I.; VRATOLIS, Stergios; GILARDONI, Stefania; PAGLIONE, M.; DECESARI, S.; MOCNIK, Grisa; MOOIBROEK, Dennis; SALVADOR, P.; TAKAHAMA, S.; VECCHI, Roberta; PAATERO, Pentti	European guide on air pollution source apportionment with receptor models	Luxembourg: European Union, 2019 (JRC technical reports, JRC117306; EUR 29816)
	SAMAKE, Abdoulaye; JAFFREZO, Jean-Luc; FAVEZ, Olivier; WEBER, Samuel; JACOB, Véronique; ALBINET, Alexandre; RIFFAULT, Véronique; PERDRIX, Esperanza; WAKED, Antoine; GOLLY, Benjamin; SALAMEH, Dalia; CHEVRIER, Florie; OLIVEIRA, Diogo; BONNAIRE, Nicolas; BESOMBES, Jean-Luc; MARTINS, Jean M.F.; CONIL, Sébastien; GUILLAUD, Géraldine; MESBAH, Boualem; ROCQ, Benoit; ROBIC, Pierre-Yves; HULIN, Agnès; LE MEUR, Sébastien; DESCHEEMAECKER, Maxence; CHRETIEN, Eve; MARCHAND, Nicolas; UZU, Gaëlle	Polyols and glucose particulate species as tracers of primary biogenic organic aerosols at 28 French sites	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: p. 3357-3374
	RIVIERE, Emmanuel; BERNARD, Julien; HULIN, Agnès; VIRGA, Jonathan; DUGAY, Fabrice; CHARLES, Marie-Aline; CHEMINAT, Marie; CORTINOVIS, Jérôme; DUCROZ, François; LABORIE, Anne; MALHERBE, Laure; PIGA, Damien; REAL, Elsa; ROBIC, Pierre-Yves; ZAROS, Cécile; SEYVE, Emie; LEPEULE, Johanna	Air pollution modeling and exposure assessment during pregnancy in the French Longitudinal Study of Children (ELFE)	Atmospheric Environment, 2019, 205: p. 103-114
	DAVID, Viviane; JOACHIM, Sandrine; TEBBY, Cléo; PORCHER, Jean-Marc; BEAUDOUIN, Rémy	Modelling population dynamics in mesocosms using an individual-based model coupled to a bioenergetics model	Ecological Modelling, 2019, 398: p. 55-66

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	CIARELLI, Giancarlo; COLETTE, Augustin; SCHUCHT, Simone; BEEKMANN, Matthias; ANDERSSON, Camilla; MANDERS-GROOT, Astrid M.M.; MIRCEA, Mihaela; TSYRO, Svetlana; FAGERLI, Hilde; GONZALEZ ORTIZ, Alberto; ADANI, Mario; BRIGANTI, Gino; CAPPELLETTI, Andrea; D'ISIDORO, Massimo; CUVELIER, Cornelius; COUVIDAT, Florian; MELEUX, Frédéric; BESSAGNET, Bertrand	Long-term health impact assessment of total PM2.5 in Europe during the 1990-2015 period	Atmospheric Environment , 2019, 3: p. art. 100032
	WEBER, Samuel; SALAMEH, Dalia; ALBINET, Alexandre; ALLEMAN, Laurent Y.; WAKED, Antoine; BESOMBES, Jean-Luc; JACOB, Véronique; GUILLAUD, Géraldine; MESHBAH, Boualem; ROCQ, Benoit; HULIN, Agnès; DOMINIK-SEGUE, Marta; CHRETIEN, Eve; JAFFREZO, Jean-Luc; FAVEZ, Olivier	Comparison of PM10 sources profiles at 15 French sites using a harmonized constrained positive matrix factorization approach	Atmosphere , 2019, 10 (6): p. art. 310
	SAMAKE, Abdoulaye; JAFFREZO, Jean-Luc; FAVEZ, Olivier; WEBER, Samuel; JACOB, Véronique; CANETE, Trishalee; ALBINET, Alexandre; CHARRON, Aurélie; RIFFAULT, Véronique; PERDRIX, Esperanza; WAKED, Antoine; GOLLY, Benjamin; SALAMEH, Dalia; CHEVRIER, Florie; OLIVEIRA, Diogo; BESOMBES, Jean-Luc; MARTINS, Jean M.F.; BONNAIRE, Nicolas; CONIL, Sébastien; GUILLAUD, Géraldine; MESBAH, Boualem; ROCQ, Benoit; ROBIC, Pierre-Yves; HULIN, Agnès; LE MEUR, Sébastien; DESCHEEMAECCKER, Maxence; CHRETIEN, Eve; MARCHAND, Nicolas; UZU, Gaëlle	Arabitol, mannitol, and glucose as tracers of primary biogenic organic aerosol: the influence of environmental factors on ambient air concentrations and spatial distribution over France	Atmospheric Chemistry and Physics , 2019, 19: p. 11013-11030
	DAVID, Viviane; JOACHIM, Sandrine; PORCHER, Jean-Marc; BEAUDOUIN, Rémy	Modelling BPA effects on three-spined stickleback population dynamics in mesocosms to improve the understanding of population effects	Science of the Total Environment , 2019, 692: p. 854-867
	SRIVASTAVA, Deepchandra; FAVEZ, Olivier; PETIT, Jean-Eudes; ZHANG, Yunjiang; SOFOWOTE, U.M.; BONNAIRE, N.; PERRAUDIN, Emilie; GROS, Valérie; VILLENAVE, E.; ALBINET, Alexandre	Speciation of organic fractions does matter for aerosol source apportionment. Part 3: Combining off-line and on-line measurements	Science of the Total Environment , 2019, 690: p. 944-955
	ZHANG, Yunjiang	Multi-year source apportionment of organic aerosols and their impacts on aerosol light absorption in the Paris region, France	Thèse de doctorat. Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 01/02/2019
	MARCHAND, Adrien; TEBBY, Cléo; BEAUDOUIN, Rémy; CATTEAU, Audrey; PORCHER, Jean-Marc; TURIES, Cyril; BADO-NILLES, Anne	Reliability evaluation of biomarker reference ranges for mesocosm and field conditions: Cellular innate immunomarkers in <i>Gasterosteus aculeatus</i>	Science of the Total Environment , 2020, 698: p. art. 134333

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	CAILLAUD, D.; ANNESI-MAESANO, Isabelle; BOURIN, A.; CHINET, T.; COLETTE, Augustin; DE BLAY, F.; DIXSAUT, Gilles; HOUSSET, B.; KLEINPETER, J.; MALHERBE, Laure; ROUSSEL, I.; DALPHIN, J.C.; CHARPIN, D.; Groupe PAPPEI	La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire en France. Document d'experts du groupe Pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF)	Revue des Maladies Respiratoires, 2019, 36(10): 1150-1183
	ZHANG, Yunjiang; FAVEZ, Olivier; CANONACO, Francesco; LIU, Dantong; MOCNIK, Grisa; AMODEO, Tanguy; SCIARE, Jean; PREVOT, André S.H.; GROS, Valérie; ALBINET, Alexandre	Evidence of major secondary organic aerosol contribution to lensing effect black carbon absorption enhancement	NPJ Climate and Atmospheric Science, 2018, 1: p. art. 47
	BRACK, Werner; AIT-AISSA, Selim; BACKHAUS, Thomas; BIRK, Sebastian; BARCELO, Damià; BURGESS, Robert M.; COUSINS, Ian; DULIO, Valeria; ESCHER, Beate I.; FOCKS, Andreas; VAN GILS, Jos; GINEBREDA, Antoni; HERING, Daniel; HEWITT, L.M.; HILSCHEROVA, Klara; HOLLENDER, Juliane; HOLLERT, Henner; KOCK, Marianne; KORTENKAMP, Andrea; LOPEZ DE ALDA, Miren; MULLER, Christin; POSTHUMA, Leo; SCHUURMANN, Gerrit; SCHYMANSKI, Emma L.; SEGNER, Helmut; SLEEUWAERT, Franck; SLOBODNIK, Jaroslav; TEODOROVIC, Ivana; UMBUZEIRO, Gisela; VOULVOULIS, Nick; VAN WEZEL, Annemarie; ALTENBURGER, Rolf	Strengthen the European collaborative environmental research to meet European policy goals for achieving a sustainable, non-toxic environment	Environmental Sciences Europe, 2019, 31: p. art. 63
	ZHANG, Yunjiang; FAVEZ, Olivier; PETIT, Jean-Eudes; CANONACO, Francesco; TRUONG, François; BONNAIRE, Nicolas; CRENN, Vincent; AMODEO, Tanguy; PREVOT, André S.H.; SCIARE, Jean; GROS, Valérie; ALBINET, Alexandre	Six-year source apportionment of submicron organic aerosols from near-continuous measurements at SIRTa (Paris area, France)	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19: p. 14755-14776
	PERSONNE, Stéphane; MARCELO, Paulo; PILARD, Serge; BALTORA-ROSSET, Sylvie; CORONA, Aurélie; ROBIDEL, Franck; LECOMTE, Anthony; BROCHOT, Céline; BACH, Véronique; ZEMAN, Florence Anna	Determination of maternal and foetal distribution of cis - and trans - permethrin isomers and their metabolites in pregnant rats by liquid chromatography tandem mass spectrometry (LC-MS/MS)	Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019: p. Accepté
	PANDOLFI, Marco; MOOIBROEK, Dennis; HOPKE, Philip K.; VAN PINXTEREN, Dominik; QUEROL, Xavier; HERRMANN, Hartmut; ALASTUEY, Andres; FAVEZ, Olivier; HUGLIN, Christoph; PERDRIX, Esperanza; RIFFAULT, Véronique; SAUVAGE, Stéphane; VAN DER SWALUW, Eric; TARASOVA, Oksana; COLETTE, Augustin	Long range and local air pollution: what can we learn from chemical speciation of particulate matter at paired sites?	Atmospheric Chemistry and Physics, 2019: p. Accepté

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	MAJIRA, Amel; GODON, Blandine; FOULON, Laurence; VAN DER PUTTEN, Jacinta C.; CEZARD, Laurent; THIERRY, Marina; PION, Florian; BADO-NILLES, Anne; PANDARD, Pascal; JAYABALAN, Thangavelu; AGUIE-BEGHIN, Véronique; DUCROT, Paul-Henri; LAPIERRE, Catherine; MARLAIR, Guy; GOSSELINK, Richard; BAUMBERGER, Stéphanie; COTTYN, Betty	Enhancing the antioxidant activity of technical lignins by combining solvent fractionation and ionic-liquid treatment	ChemSusChem, 2019, 12(21): 4799-4809
	CAUDEVILLE, Julien; REGRAIN, Corentin; BONNARD, Roseline; LETINOIS, Laurent; TOGNET, Frédéric; BROCHOT, Céline; BACH, Véronique; CHARDON, Karen; ZEMAN, Florence Anna	Caractérisation de l'exposition environnementale spatialisée à un pyréthrianoïde en Picardie	Environnement Risques & Santé, 2019, 18 (5): p. 392-400
	LANZAFAME, Grazia-Maria	Mesure et modélisation de l'aérosol organique secondaire. Sources et impact sur la qualité de l'air	Thèse de doctorat. Université de Paris 6, 12/12/2019
Risques du sol et du sous-sol	GAL, Frédéric; POKRYSZKA, Zbigniew; LABAT, Nadège; MICHEL, Karine; LAFORTUNE, Stéphane; MARBLE, Andre	Soil-gas concentrations and flux monitoring at the Lacq-Rousse CO ₂ -geological storage pilot site (French Pyrenean Foreland): From pre-injection to post-injection	Applied Sciences, 2019, 9 (4): p. Art. 645
	LAOUAFA, Farid; GUO, Jianwei; QUINTARD, Michel	Modeling of salt and gypsum dissolution: applications, evaluation of geomechanical hazards	European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2019: p. Accepté
	YANG, Jie; YIN, Zhen-Yu; LAOUAFA, Farid; HICHER, Pierre-Yves	Analysis of suffusion in cohesionless soils with randomly distributed porosity and fines content	Computers and Geotechnics, 2019, 111 : p. 157-171
	RILLARD, Jean; POURRET, Olivier; CENSI, Paolo; INGUAGGIATO, Claudio; ZUDDAS, Pierpaolo; TOULHOAT, Pierre; GOMBERT, Philippe; BRUSCA, Lorenzo	Behavior of rare earth elements in an aquifer perturbed by CO ₂ injection: Environmental implications	Science of the Total Environment, 2019, 687 : p. 978-990
	YANG, Jie; YIN, Zhen-Yu; LAOUAFA, Farid; HICHER, Pierre-Yves	Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media	Acta Geotechnica, 2019, 14(6) : 1615-1627
	LAFORTUNE, Stéphane; POKRYSZKA, Zbigniew; CHARMOILLE, Arnaud	Underground gas production and migration induced by mining subsidence	ISRM Congress 2019 Proceedings. 2019
	SOULEY, Mountaka; AUVRAY, Christophe; LAFRANCE, Noémie; WATELET, Jean-Marc; RENAUD, Vincent	Long term behavior of a chalk: effect of relative humidity and flooding	ISRM Congress 2019 Proceedings. 2019
	DE SANTIS, Francesca	Rock mass mechanical behavior in deep mines : in situ monitoring and numerical modelling for improving seismic hazard assessment	Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 05/02/2019
	YANG, Jie	Numerical analyses of the multi-physics problem of sinkholes in the vicinity of a dike or a linear geo-structure	Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes, 08/07/2019

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques du sol et du sous-sol	HASSOUN, Mouhamad	Modélisation physique du renforcement par géosynthétique des remblais granulaires et cohésifs sur cavités	Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 20/02/2019
	YANG, Jie; YIN, Zhen-Yu; LAOUAFA, Farid; HICHER, Pierre-Yves	Hydromechanical modeling of granular soils considering internal erosion	Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(2): 157-172
	HASSOUN, Mouhamad; AL HEIB, Marwan; FAKIH, R.; EMERIAULT, Fabrice; VILLARD, Pascal	Étude expérimentale du renforcement d'une cavité par géosynthétique en présence d'un remblai cohésif	Proceedings of the 17th ECSMGE : Geotechnical Engineering foundation of the future. 2019
	PALGUNADI, Kadek; POIATA, Natalia; KINSCHER, Jannes; BERNARD, Pascal; DE SANTIS, Francesca; CONTRUCCI, Isabelle	Methodology for Full Waveform Near Real-Time Automatic Detection and Localization of Microseismic Events Using High (8 kHz) Sampling Rate Records in Mines: Application to the Garpenberg Mine (Sweden)	Seismological Research Letters, 2020, 91(1): 399-414
	DE SANTIS, Francesca; CONTRUCCI, Isabelle; KINSCHER, Jannes; BERNARD, Pascal; RENAUD, Vincent; GUNZBURGER, Yann	Impact of geological heterogeneities on induced-seismicity in a deep sublevel stoping mine	Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(2) : 697-717
	GOMBERT, Philippe; ABDOULAYE, Gueye; BEN HAMED, Haikel; BEJI, Hassen; LAOUAFA, Farid	Installation of a thermal energy storage site in an abandoned mine in Picardy (France). Part 1: Selection criteria and equipment of the experimental site	Environmental Earth Sciences, 2019, 78: p. art. 174
	DE SANTIS, Francesca; RENAUD, Vincent; CONTRUCCI, Isabelle; GUNZBURGER, Yann; BERNARD, Pascal	Rock mass behavior in deep mines: in situ monitoring and numerical modelling	ISRM Congress 2019 Proceedings. 2019
	RENAUD, Vincent; CHERKAOUI, Auxane; WATELET, Jean-Marc; GOMBERT, Philippe; KREZIAK, Charles	Understanding the instability mechanisms of chalk mines in presence of water (France)	ISRM Congress 2019 Proceedings. 2019
Direction scientifique	LACROIX, Denis; LAURENT, Louis; DE MENTHIERE, Nicolas; SCHMITT, Bertrand; BETHINGER, Audrey; DAVID, Bernard; DIDIER, Christophe; PARENT DU CHATELET, Jacques	Multiple visions of the future and major environmental scenarios	Technological Forecasting and Social Change, 2019, 144: p. 93-102
	RICHER-DE-FORGES, Anne C.; CARRE, Florence; MCBRATNEY, Alex B.; BOUMA, Johan; ARROUAYS, Dominique	Global Soil Security: Towards More Science-Society Interfaces. Proceedings of the Global Soil Security 2016 Conference, December 5-6, 2016, Paris, France	Leiden: CRC PRESS, 2019

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata - BP2 - 60550 Verneuil-en-Halatte
+33 (0)3 44 55 66 77
ineris@ineris.fr - www.ineris.fr

