



RAPPORT SCIENTIFIQUE

2017/2018

04

Nourrir la connaissance pour répondre aux priorités

de la transition écologique et solidaire



06

Une année de recherche à l'Ineris:

chiffres et faits marquants



28

Comprendre et maîtriser les risques

à l'échelle d'un site industriel et d'un territoire

08

Anticiper les risques émergents

et intégrer les risques liés au changement climatique, accompagner la transition énergétique



52

Caractériser les dangers des substances et produits

et leurs impacts sur l'air, l'eau, les sols et les organismes vivants

62

ANNEXES

Nourrir la connaissance pour répondre aux priorités de la transition écologique et solidaire

La stratégie de l'Ineris repose sur une étroite synergie entre ses activités d'appui aux pouvoirs publics, d'expertise et de conseil et de recherche, principalement appliquée. La publication annuelle d'un rapport scientifique permet à l'Ineris de mettre en lumière la diversité des sujets traités par ses équipes pour nourrir la connaissance dans les domaines de la prévention et de la maîtrise des risques industriels et environnementaux.

Les priorités de l'Institut s'inscrivent pleinement dans celles de la transition écologique et solidaire, notamment la transition énergétique, l'économie circulaire, le renforcement de la maîtrise des risques dans le domaine santé-environnement et l'amélioration de la qualité de l'air. Elles intègrent aussi notre expertise dans le domaine du risque technologique au titre de la prévention des risques

majeurs, d'autant que de nouveaux enjeux – en particulier la malveillance et la cybersécurité – font leur apparition.

Nous sommes aujourd'hui à mi-parcours de notre contrat d'objectifs et de performance 2016/2020. Les objectifs que nous nous étions fixés en matière de recherche sont atteints dans leur grande majorité (cf. page 69). Notre niveau de publications ISI est élevé, comme notre taux de succès à l'Europe (43 % en 2017).

Dans la perspective de la préparation du contrat d'objectifs 2021-2025, en lien avec notre ministère de tutelle, une nouvelle évaluation de nos activités par le HCERES sera menée prochainement. Après celle conduite en 2015, cette évaluation nous permettra d'asseoir le positionnement général de l'Institut qui, dans le contexte de réduction des dépenses publiques, implique une inévitable révision de nos sujets « cœur de métier » et le renforcement des relations avec nos partenaires, en France et en Europe.

Les objectifs que nous nous étions fixés en matière de recherche sont atteints dans leur grande majorité. Notre niveau de publications ISI est élevé, comme notre taux de succès à l'Europe (43 % en 2017).



Nous tenons à remercier l'implication de l'ensemble des collaborateurs de l'Institut qui, grâce à leur mobilisation quotidienne, contribuent à la force et au rayonnement de l'Institut.

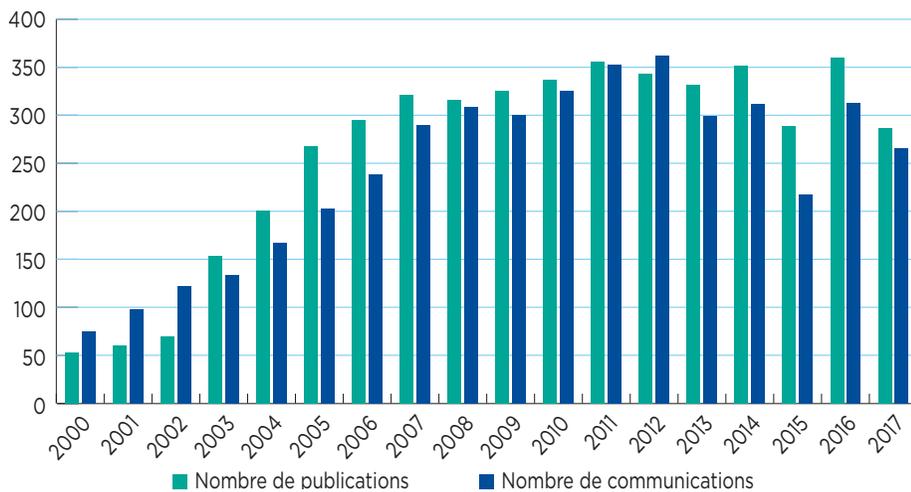
/ Raymond COINTE,
directeur général
Mehdi GHOREYCHI,
directeur scientifique /

Production scientifique de l'Ineris

sur la période 2000-2017

Production globale

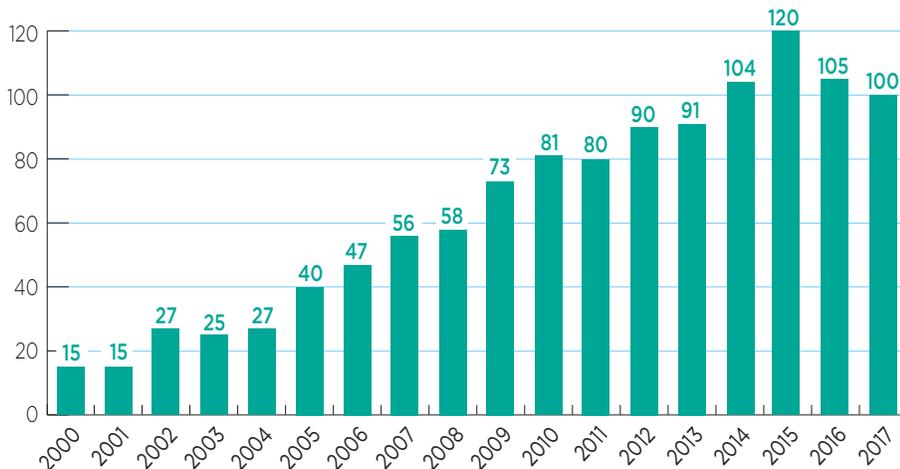
Évolution annuelle du nombre de publications et communications Ineris



Plus de
6430
références
de publications
et communications
avec la participation
d'auteurs Ineris

Articles de revues ISI

Évolution annuelle du nombre d'articles ISI



1154
articles
de revues classées ISI

Collaborations

89% des articles de revues ISI produits par l'Ineris ont été cosignés avec d'autres organismes :



+ de 790 organismes internationaux (dont 70 % sont situés en Europe)



+ de 600 organismes et laboratoires français

Contributions des doctorants

213  thèses de doctorat et HDR



25% Sur les 1154 articles ISI produits, ont été produits par un premier auteur doctorant

Une année de recherche à l'Ineris : chiffres et faits marquants



19% de l'activité de l'Ineris dédiée à la recherche en 2017

Septembre 2017



Le projet européen HUGS à mi-parcours

→ **13-15 septembre** / Rostock, Allemagne

Présentation des résultats de l'Ineris dans le cadre du projet européen HUGS (*Humins as green and sustainable precursors of eco-friendly building blocks and materials*), dédié à la valorisation des humines, sous-produits de transformation de biomasse.

Octobre 2017

Réception du Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung (BAM)

→ **23-24 octobre** / Verneuil-en-Halatte, Ineris

Séminaire de travail sur les risques liés aux nouvelles technologies, dans le cadre de l'accord de coopération scientifique et technique entre les deux organismes.



100 publications dans des revues à comité de lecture référencées ISI en 2017



Plus de **6430** publications et communications scientifiques de l'Ineris dans l'Archive ouverte nationale (HAL) de l'Ineris, dont **2000** documents en texte intégral. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/>



38 thèses de doctorat engagées au sein de l'Institut

Novembre 2017

Un prix pour les travaux de thèse de Francesca De Santis

→ **15/17 novembre** /

Santiago du Chili, Chili

Prix remis à l'occasion de la conférence internationale RaSim9 sur la sismicité induite et la réponse des massifs rocheux à l'activité minière et aux travaux souterrains. Francesca De Santis est doctorante Ineris - Géoressources à l'université de Lorraine, co-encadrée avec l'IPG Paris. Ses travaux portent sur l'analyse de données microsismiques appliquée à la prévision du risque sismique en exploitation minière profonde.

Décembre 2017

Renforcement de la coopération avec le Joint Research Center (JRC)

→ **14 décembre** / Ispra, Italie



Signature d'un protocole d'accord pour fixer les futurs axes de recherche communs. Parmi les sujets phares : nanosécurité, résilience des infrastructures face aux risques naturels et technologiques, risques émergents, métrologie de la qualité de l'air, énergie (stockage).


32 programmes
 de recherche
 nationaux en cours

Mars 2018



Alain Dorison nommé président du conseil d'administration de l'Institut

→ **décret du Président de la République en date du 7 mars (JO du 9 mars)** / Verneuil-en-Halatte, Ineris

Alain Dorison a occupé les fonctions de directeur des écoles des mines d'Albi et d'Alès, président du comité de l'inspection du conseil général de l'Économie, de l'Industrie et des Technologies (CGEJET) et membre permanent du conseil général de l'Environnement et du Développement durable (CGEDD).

Juin 2018

Terres rares & économie circulaire: le projet H2020 SecREEts est lancé

→ **12-13 juin** / Trondheim, Norvège

Réunion des 8 partenaires, dont l'Ineris, pour le lancement du projet SecREEts (*Secure European Critical Rare Earth Elements*), qui 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 au cœur du projet transfrontalier Interreg RISSC

→ **22 juin** / Cuesmes, Belgique



Conférence de presse à l'occasion du lancement du projet RISSC dédié à l'amélioration transfrontalière de la prévention et de la gestion des risques du sous-sol engendrés par les terrains sous-cavés. L'Ineris est partenaire.

Projet PRESLEY: l'hydrogène liquide comme vecteur énergétique

→ **26-27 juin** / Verneuil-en-Halatte, Ineris

Partenaire du projet européen PRESLEY (*Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen*), l'Ineris a organisé, conjointement avec Air Liquide, une visite de ses installations de recherche. Lancé en avril 2018, l'objectif principal du projet concerne la recherche prénormative pour l'utilisation sûre de l'hydrogène liquide en tant que vecteur énergétique.




34 programmes
 de recherche
 européens en cours

Juillet 2018

L'Ineris au festival d'Avignon

→ **19 juillet** / Avignon, France

Mise en lecture de la pièce de théâtre « ZAR, zone(s) à risque(s) », née de la 9^e édition du projet binôme initié par la compagnie de théâtre Les sens des mots, lors du Festival d'Avignon. Elle a été écrite par l'auteur Amine Adjina suite à sa rencontre avec Guillaume Fayet, expert en modélisation moléculaire de l'Ineris.



Ma thèse en 180 secondes: une doctorante de l'UMR Pérیتox en finale

→ **22 juin** / Cuesmes, Belgique

Participation de la doctorante Christelle Kouakam, de l'UMR PériTox (Ineris/UPJV) à la finale nationale organisée à Toulouse. Elle avait remporté la finale régionale des Hauts-de-France en mars. Christelle Kouakam effectue ses travaux de thèse sur l'impact d'une exposition *in utero* aux pesticides sur le sommeil et la respiration du nouveau-né prématuré.





Anticiper les risques émergents

et intégrer les risques liés
au changement climatique,
accompagner la transition énergétique



Comportement au feu de réservoirs composites de stockage d'hydrogène sous pression _____ 10

Anticiper les émissions accidentelles et chroniques de nanomatériaux manufacturés et leur devenir dans l'environnement: le projet NanoFASE _____ 12

Vers une utilisation de liquides ioniques basés sur le cation pyrrolidinium pour sécuriser les batteries au lithium-ion? _____ 14

Analyse d'impuretés dans le biogaz et le biométhane _____ 16

Étude des mécanismes d'émission d'aérosols lors de la manipulation de poudres _____ 18

NORMAN: un bilan après dix ans d'activité _____ 20

Comment gérer la biomasse végétale issue des phytotechnologies? Perceptions des opérateurs de filières de valorisation _____ 22

Place du stockage souterrain d'énergie dans la transition énergétique _____ 24

Une analyse des grandes visions de perspectives internationales sur le devenir de l'environnement _____ 26

Comportement au feu de réservoirs composites de stockage d'hydrogène sous pression

Contributeur

Fabien
FOUILLEN

/

Collaborateurs

Damien HALM,
Eric LAINÉ,
Mikael
GUEGUEN
et Denis
BERTHEAU
(Institut Pprime,
CNRS, ENSMA,
université
de Poitiers),

Tom VAN
EEKELEN
(Samtech SA –
a Siemens
company)

L'utilisation de l'hydrogène à grande échelle, et notamment pour les véhicules, nécessite de maîtriser la fiabilité de stockage de ce gaz à très haute pression. Les réservoirs de type IV constitués d'une coque composite enroulée sur un revêtement en polymère, sont aujourd'hui considérés comme une technologie mature. Afin de mieux caractériser les conditions à éviter pour observer une défaillance de ce type de stockage dans des conditions accidentelles, en particulier un incendie, le projet FireComp (projet de recherche pré-normatif de trois ans) vise à caractériser le comportement thermomécanique de ce type de stockage.

Objectifs et méthode

L'un des objectifs du projet FireComp était de générer des données expérimentales permettant de comprendre le comportement des bouteilles composites sous pression lorsqu'elles sont

soumises à un incendie et de valider des modèles thermomécaniques développés. À cette fin, l'Ineris a conduit une campagne expérimentale à grande échelle en deux étapes, sur des bouteilles sous pression.

La première étape a consisté à déterminer les conditions d'incendie à retenir pour réaliser les tests. Ces conditions doivent être représentatives des situations accidentelles et correspondre aux scénarios les plus défavorables en regard de la vulnérabilité présumée au feu des bouteilles. Ces essais préliminaires ont été réalisés avec un cylindre en acier de mêmes dimensions qu'une bouteille d'H₂, instrumenté afin de déterminer le flux de chaleur incident et d'enregistrer des données expérimentales utiles à comparer aux résultats de la modélisation. La configuration qui assure une répartition homogène de l'énergie autour de la bouteille a été retenue: utilisation de quatre injecteurs (débit d'hydrogène de 1,5 g/s et débit d'oxygène de 0,5 g/s par injecteur) et utilisation d'un confinement en béton. Cette configuration permet d'étudier le comportement de l'échantillon en accord avec les résultats obtenus lors d'essais réalisés précédemment par l'Ineris, avec un feu conventionnel d'heptane.

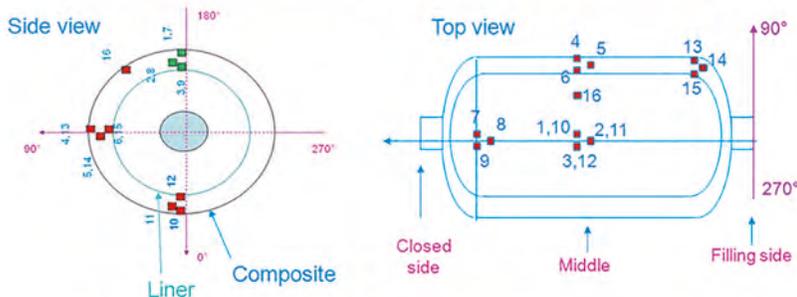
La seconde partie de l'étude a été réalisée sur des bouteilles composites réelles, en utilisant l'agression thermique déterminée précédemment. Une instrumentation complète des réservoirs a été mise en place pour suivre le comportement de son enveloppe pendant et après l'incendie avec des thermocouples situés au cœur de la paroi composite et la mesure de la pression interne (Figure 1).

Les essais ont été effectués sur des cylindres composites de 36 litres de volume à pression nominale de service puis à des pressions inférieures. Le temps de rupture et la température de la paroi composite ont été enregistrés. Une transition entre un régime de rupture et un régime de fuite a ainsi pu être mise en évidence (Figure 2).

Résultats

Ces tests ont permis de définir une stratégie de dépressurisation, qui permet de maintenir la bouteille à une pression interne ne conduisant pas à l'éclatement. Pour les tests avec une pression

Figure 1 / Montage expérimental, confinement et position des thermocouples.



■ 2,8 → Means that thermocouples 2 and 8 are superposed in this view

initiale de 700 et 525 bars, l'éclatement se produit après 238 s et 311 s respectivement. En revanche, aucun éclatement n'est observé pour les essais à pression initiale inférieure (250 et 100 bars), mais une diminution progressive de la pression est mise en évidence (après 400 s et 490 s respectivement) (Figure 3).

En parallèle des essais, un modèle a été développé en s'appuyant sur des données d'entrée simples (géométrie axisymétrique, flux homogène, rupture à la première fibre, critère de fuite basé sur la température à l'interface liner/composite...). Ce modèle permet de prédire de manière satisfaisante en regard des résultats expérimentaux, aussi bien le délai avant explosion à différentes pressions internes, que le délai avant fuite pour des pressions inférieures. La simulation axisymétrique fournit très rapidement des résultats fiables pour des incendies enveloppants.

Ce modèle étant capable de prédire l'éclatement ou la fuite d'une bouteille, il permet de limiter les essais et de concevoir des dispositifs de décompression capables d'équiper les réservoirs d'hydrogène pour s'assurer que la pression se situe toujours dans la zone de sécurité.

Les simulations devront également être étendues aux cas réels 3D afin de traiter des configurations de feu particulières (impact localisé, flux appliqué non homogène, cylindres partiellement protégés...). En ce qui concerne la modélisation du comportement des matériaux, le critère de rupture doit être amélioré: l'utilisation d'un modèle d'endommagement capable de simuler la dégradation progressive du composite et la nature probabiliste de la rupture des fibres permettrait de mieux simuler la pression d'éclatement.

Référence

Halm Damien; Fouillen Fabien; Laine Éric; Gueguen Mikael; Bertheau Denis; Van Eekelen Tom. Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and burst simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (31) : p. 20056-20070

ABSTRACT /

A type IV composite pressure vessel subjected to fire may burst because of the degradation of the outer layers, but when the inner pressure is less than a critical value, leak is observed instead of burst. This phenomenon is due to the heat transfer through the composite shell which leads to liner melting. In order to characterize this failure mechanisms, engulfing fire tests have been performed in the framework of the FireComp project whose objective is to understand and simulate the fire performance of hydrogen storage. An experimental set-up has been implemented to expose the cylinders to fire by the means of gas injectors. A complete instrumentation of the tank was implemented to follow the behavior of its envelope during and after the fire using thermocouples located inside its composite wall, and pressure measurement inside the vessel. A simple Finite Element model has been developed to simulate the coupled effects of mechanical damage and temperature. This approach accurately predicts the time leading to burst of the composite tank, as well as the transition between burst and leak.

Figure 2 / Évolution de la pression interne - Influence de la pression initiale.

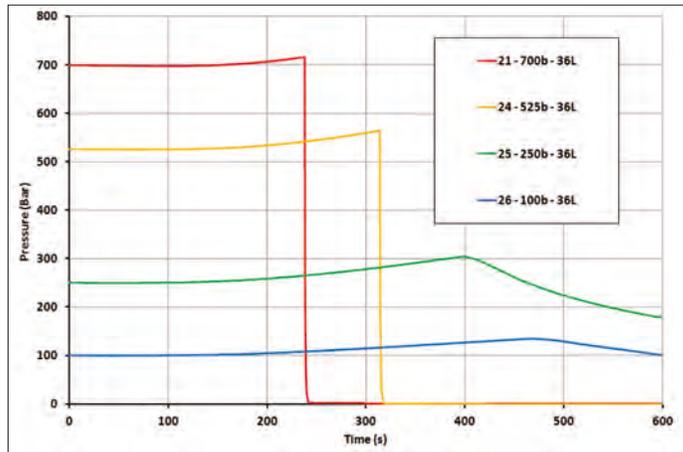
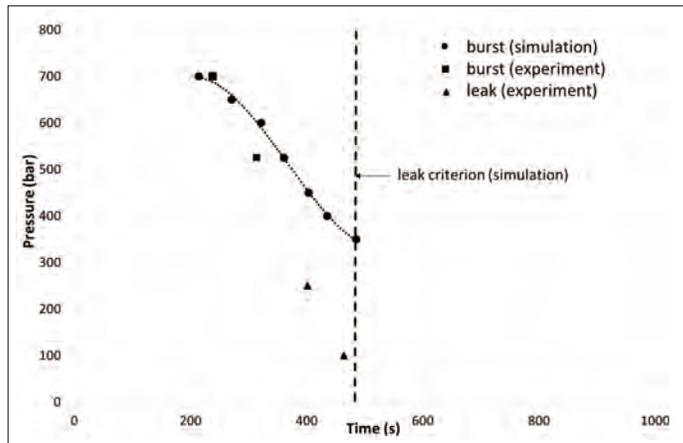


Figure 3 / Courbe d'éclatement pour un flux de 100 kW/m².



Anticiper les émissions accidentelles et chroniques de nanomatériaux manufacturés et leur devenir dans l'environnement : le projet NanoFASE

Contributeurs

Bruno DEBRAY,

Jean-Marc
LACOME,

Olivier
AGUERRE-CHARIOL,

Isaline FRABOULET,

Alexis VIGNES,

Benjamin
TRUCHOT

/

Collaborateurs

Eric CLIMENT
et Pascal FEDE,
(Institut
de mécanique des
fluides
de Toulouse)

Les nanomatériaux sont des matériaux composés de nano-objets (nanoparticules) de dimension nanométrique (inférieure à 100 nm). Ils peuvent être libres, agrégés, agglomérés, liés à une matrice ou incorporés dans un liquide. Au cours de leur cycle de vie, les nanomatériaux sont susceptibles de relarguer des nano-objets suivant des mécanismes très variés (Figure 1).

Dans le cadre du projet européen NanoFASE (<http://nanofase.eu/>), l'Ineris s'est intéressé aux scénarios d'émission chronique et accidentelle au cours des premières phases du cycle de vie, à savoir la synthèse des nanoparticules et leur incorporation dans des matériaux [1]. Au cours de ces étapes, les nanoparticules existent généralement sous forme de poudre, forme la plus émissive. C'est durant ces étapes que les flux d'émission localisés sont potentiellement les plus importants et susceptibles de conduire localement aux concentrations les plus élevées dans l'air et les milieux. D'un point de vue environnemental, il est donc essentiel de pouvoir qualifier et quantifier ces émissions. Les résultats obtenus par d'autres partenaires [2] tendent toutefois à montrer que la contribution des émissions au cours des premières étapes du cycle de vie ne représente qu'une très faible part due au flux global de nanomatériaux dans l'environnement, qui sera principalement issu des émissions diffuses au cours des étapes d'utilisation des matériaux et pendant leur fin de vie.

Un premier inventaire des procédés de synthèse de nanoparticules a été effectué, ainsi qu'une analyse générique des risques sur des configurations typiques de procédés de production de nanoparticules courantes : dioxyde de titane, noir de carbone et silice nanométrique. Il en ressort que les risques d'émission accidentelle sont principalement concentrés sur les phases de transfert et manipulation interne qui suivent la synthèse des particules et sont relativement similaires pour ces trois types de nanomatériaux. Parmi les scénarios les plus probables figure la fuite de canalisation de transport. En particulier, le cas d'un transport pneumatique conduit potentiellement aux conséquences les plus importantes en termes

de quantité de matière rejetée et de zone impactée par les retombées. Ce scénario s'est déjà produit sur un site industriel mettant en œuvre du noir de carbone, conduisant à des retombées à plusieurs kilomètres autour du site (ARIA 43049).

Dans le cadre d'une évaluation des risques associés aux activités de production et de transformation de nanomatériaux, il serait donc utile, pour un tel scénario, de disposer de modèles permettant d'évaluer les quantités rejetées, les concentrations et la distribution granulométrique des particules en fonction de la distance depuis le point d'émission. Une première étude bibliographique [3] a montré qu'il n'existait pas de modèle adapté permettant de prendre en compte les phénomènes d'agglomération au cours des premiers instants de la dispersion, en aval de la brèche.

Travaux

L'Ineris a développé, dans le cadre de la thèse de doctorat de Hong Duc Le [4], un modèle spécifique en utilisant l'approche eulérienne-lagrangienne du code CFD¹ Code_saturne. Ce travail visait à simuler les transformations des nanoparticules et leurs évolutions spatio-temporelles. Ces particules sont soumises à de très nombreuses forces et phénomènes, notamment dans le champ proche d'un rejet accidentel. Les travaux ont porté sur les phénomènes jugés prépondérants au regard du scénario prioritaire de fuite sur une canalisation de transport et sur leur étude de sensibilité. Ils ont abouti à la simulation de formes complexes (non sphériques) d'agglomérats de nanoparticules par un modèle fractal afin d'appréhender de manière réaliste les forces de traînée auxquelles ces agglomérats sont soumis dans une hypothèse d'écoulement turbulent. Cette simulation a également permis d'étudier la fragmentation des agglomérats dès lors que la vitesse de rejet est élevée. Un nouveau modèle a été mis au point [4] : il simule la probabilité de collision des agglomérats, ce qui permet d'appréhender leur interaction (agglomération, fragmentation, rebond...). Les développements, pour certaines parties du modèle, ont été validés par les résultats d'expérimentations

disponibles. Pour d'autres, du fait de l'absence de résultats expérimentaux, la cohérence scientifique a été vérifiée par des comparaisons avec des approches théoriques.

Le modèle développé permet de reconstituer l'évolution des concentrations et leur granulométrie dans le cadre de scénarios de rejets accidentels massifs (WP4) ou de scénarios d'émissions chroniques.

En effet, le modèle peut être couplé à des outils de dispersion atmosphérique plus conventionnels pour évaluer la distribution des concentrations de nanoparticules et leurs devenir et retombées dans le champ lointain (WP6).

Dans le cas d'émissions chroniques, il s'agit des gaz de process et des débits de ventilations des locaux de production, qui sont filtrés avant rejet par les cheminées du site. Les quantités émises sont très dépendantes du procédé de production mais aussi de l'efficacité des dispositifs de filtration et de traitement d'air mis en place. Les nanoparticules subissent aussi des transformations au cours des étapes de traitement d'air qui, à ce stade, ne sont pas bien connues et documentées [5].

L'Ineris a développé une méthodologie faisant appel à une gamme très variée d'instruments (prélèvements sur filtre, ELPI, MPS, impacteurs, nanobadge...) afin de mesurer et caractériser les émissions d'installations industrielles et de détecter et mesurer la présence de nanoparticules dans l'air ambiant autour de ces installations. Cette méthode permet aussi de quantifier et caractériser les retombées au sol et dans les eaux de surface. Les concentrations mesurées dans les milieux environnementaux autour du site peuvent être comparées aux prédictions obtenues par la modélisation.

Application

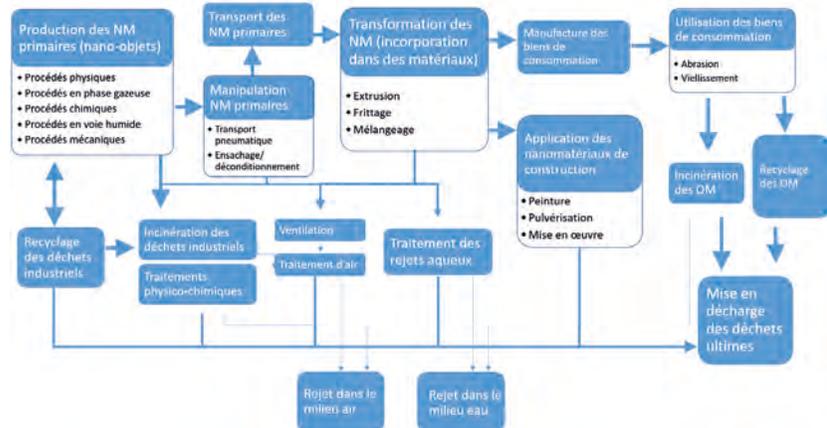
Cette méthodologie a été appliquée sur deux sites industriels produisant et mettant en œuvre des nanomatériaux, en France et au Danemark. Les résultats de ces campagnes sont en cours d'exploitation. Les premières valeurs obtenues sont très basses, notamment au regard des nombreux autres types de particules présents dans l'environnement, d'origine naturelle ou anthropique. D'un point de vue qualitatif, ces campagnes de mesure ont permis de montrer que les particules évoluaient très peu après leur émission.

¹ Computational Fluid Dynamics.

ABSTRACT /

The development of the nanomaterials industry leads to putting an increasing number of manufactured nanomaterials on the market. In order to better anticipate future risks on the environment, the European Union is financing the project NanoFASE (<http://nanofase.eu/>) relative to the study of the environmental fate of nanomaterials in the environment. The project aims at developing an integrated exposure framework that allows all stakeholders to assess the environmental fate of nano releases from industrial nano-enabled products along their lifecycle. Ineris is involved in two work packages dedicated to estimating the emissions of ENM along their life cycle (WP4) and modelling the air dispersion of ENM emitted from different processes (WP6). Ineris develops a catalogue of emission scenarios from industrial activities, both in normal and accidental situations. It also develops a series of models for estimating the consequences in terms of air concentration and ground deposition of such emission scenarios. Ineris also performed a series of measurements around industrial plants to obtain data for checking the consistency of the developed models.

Figure 1 / Cycle de vie des nanomatériaux – source Ineris.



Références

[1] John A.C.; Kupper M.; Manders-Groot A.M.M.; Debray B.; Lacomme J.-M.; Kuhlbusch T.A.J. Emissions and possible environmental implication of engineered nanomaterials (ENMs) in the atmosphere. *Atmosphere*, 2017, 8 (5): p. art. 84.

[2] Gottschalk F. and Nowack B. The release of engineered nanomaterials to the environment. *J. Environ. Monit.*; 2011, 13, 1145.

[3] Le H.D.; Lacomme J.-M.; Vignes A.; Debray B.; Truchot B.; Fedeb P.; Climent C. E. A few fundamental aspects related to the modelling of an accidental massive jet release of nanoparticles. 15th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 2016.

[4] Le H.D.; Modelling of nanoparticles laden jet from a conveying pipe leakage, thèse de doctorat soutenue le 04-06-2018 à l'Ineris à Verneuil-en-Halatte, dans le cadre de l'École doctorale mécanique, énergétique, génie civil et procédés (Toulouse), en partenariat avec l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (laboratoire).

[5] Le H.D.; Sommerfeld M.; Fedeb P.; Climent E.; Truchot B.; Debray B.; Lacomme J.-M.; Vignes A. Collision probability coefficient between an agglomerate and a spherical particle and between two agglomerates by Monte-Carlo method. Submitted to *Journal Powder Technology*, 2018.

Vers une utilisation de liquides ioniques basés sur le cation pyrrolidinium

pour sécuriser les batteries au lithium-ion ?

Contributeurs

Guy MARLAIR,

Pascal PANDARD,

Amandine LECOQ,

Gebrekidan G. ESHETU

Collaborateur

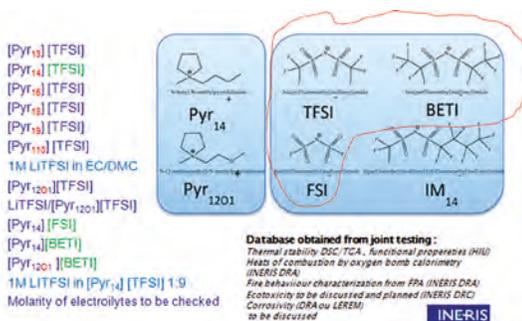
Stefano PASSERINI
(Helmoltz-Institut Ulm)

Depuis 2010, l'Ineris consolide l'évaluation des profils de danger présenté par les liquides ioniques (LIs) [1;2] dont l'utilisation est étudiée pour diverses applications, en particulier le stockage d'énergie [3]. Pour les batteries lithium et sodium-ion, un intérêt de plus en plus marqué pour les LIs de type *pyrrolidinium* [PYR_{1,y}]+[anion fluoré] est confirmé par la littérature. Dans le cadre d'une recherche collaborative avec l'institut de recherche allemand Helmholtz-Institut Ulm (HIU), l'Ineris a mené une étude paramétrique sur une dizaine de liquides ioniques appartenant à cette sous-famille de LIs construite sur le cation pyrrolidinium. Les structures chimiques détaillées des liquides ioniques étudiés ainsi que les paramètres de l'étude sont illustrés à la **Figure 1**.

Matériels et méthodes

Les liquides ioniques ont été synthétisés par HIU (pureté de 99,99 %) et les lots partagés entre HIU et l'Ineris. HIU a pris en charge les évaluations de stabilité thermique court et long terme des LIs sur la base d'analyses thermogravimétriques (ATG) avec méthode dynamique et isotherme. L'Ineris a réalisé : (a) des essais de réaction au feu (résistance à l'inflammation, impact thermique et chimique du feu) en s'appuyant sur la méthode développée dans le cadre de travaux antérieurs [4] à l'aide du calorimètre de Tewarson ; (b) de tests standardisés selon les lignes directrices de l'OCDE (biodegradabilité : 301B, 301F, 302B ; écotoxicité : 201) pour établir de premières données relatives à l'évaluation des impacts environnementaux en termes de biodégradabilité et d'écotoxicité court terme.

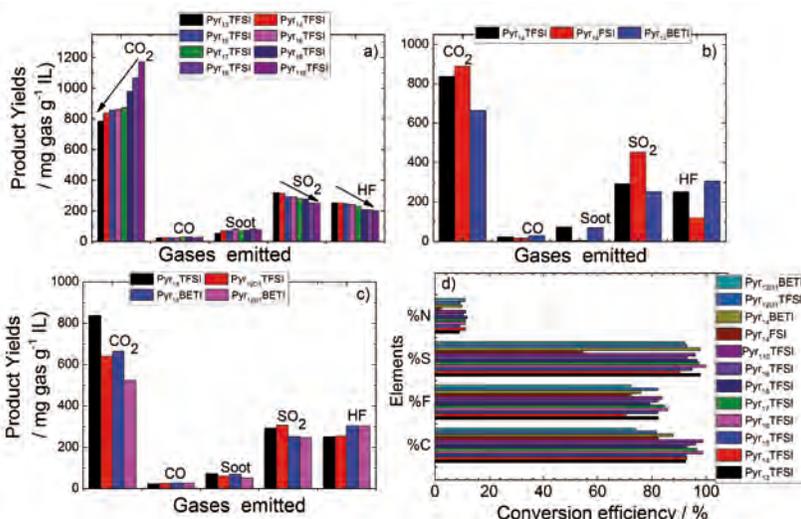
Figure 1 / Structure des liquides ioniques étudiés.



Principaux résultats

Les données de stabilité thermique court terme (vitesse de chauffe de 10 °C/min) sont illustrées en termes de perte de masse en fonction du temps et en termes de T_{onset} et s'avèrent assez remarquables. L'effet de la longueur de la chaîne alkyl se révèle modéré : lorsque l'on passe d'une chaîne alkyl sur le cation de 3 à 10 carbones (avec le TFSI), une dégradation progressive de la T_{onset} d'environ 50 degrés est observée. Un changement de contre-anion modifie la stabilité thermique comme suit : TFSI > BETI >> FSI. Une fonction *éther* [PYR₁₂₀₁] sur la chaîne alkyl (favorable à la viscosité) ne modifie pas de manière sensible la stabilité thermique court terme (anions TFSI et BETI). L'influence de l'anion sur la stabilité thermique long terme par ATG isotherme pour le cation [PYR_{1,4}] est remarquable pour les anions TFSI et BETI (<1% de perte de masse au bout de 8 h à 25 °C) pour les anions TFSI et BETI, mais se révèle moins favorable pour le FSI (perte de masse > 15% après 8 h à 200 °C).

Figure 2 / Nature et facteurs d'émission des produits gazeux issus de la combustion en condition d'incendie (essais au calorimètre de Tewarson).



La remarquable résistance à l'inflammation observée lors des essais de réaction au feu confirme le caractère retardateur de flammes propres aux liquides ioniques, ici renforcé par la présence d'un contre-anion fluoré (Figure 2c). Les profils de débits calorifiques confirment le net avantage des LIs étudiés quelle que soit la longueur de chaîne alkyl (avec le TFSI) vis-à-vis du risque feu / comparativement

à une solution de sel LiTFSI en solution 1M dans (EC-DMC). Ces essais confirment aussi la moindre performance et une décomposition plus énergétiquement du FSI par rapport à TFSI et BETI.

Par les essais de calorimétrie incendie, la possible combustion sous l'action d'une source de chaleur externe est démontrée, et les données nécessaires à l'évaluation des impacts thermiques et chimiques associés à une combustion en condition d'incendie selon la méthode décrite en référence [7] ont été collectées. L'influence des paramètres étudiés sur les taux de production d'effluents polluants ou toxiques est illustrée à la Figure 2. À noter, sans surprise, une conversion du soufre en SO₂ et du fluor en HF avec des rendements proches de la stœchiométrie en conditions de feu bien ventilé.

Concernant les aspects environnementaux, les résultats obtenus confirment l'influence de la longueur de la chaîne alkyl sur la biodégradabilité et l'écotoxicité des produits étudiés. Ainsi, une absence totale de biodégradabilité aérobie a été constatée pour les composés avec les chaînes les plus courtes ([PYR₁₂₀₁] à [PYR₁₆]) même dans des conditions de biodégradation plus favorables (OCDE 302B). À l'inverse, les composés [PYR₁₇] à [PYR₁₁₀] ont été classés comme facilement biodégradables à l'exception du [PYR₁₉]

En ce qui concerne les effets inhibiteurs sur la mobilité de *Daphnia magna*, les composés avec les chaînes les plus longues se sont révélés comme les plus toxiques (Figure 3). L'amplitude des effets toxiques observés (deux ordres de grandeurs) est moindre que pour les composés de la famille des imidazolium et tend préférentiellement vers une préconisation de l'utilisation des composés de la famille des pyrrolidinium d'un point de vue environnemental.

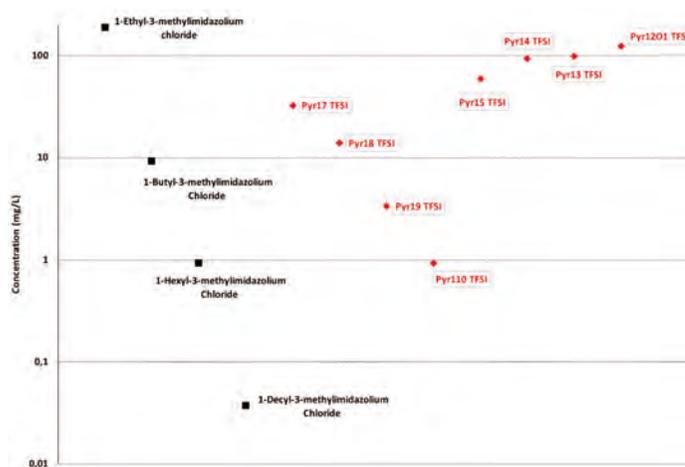
Conclusions et perspectives

Ce travail constitue une source de données unique à ce jour sur les liquides ioniques centrés sur les alkyl pyrrolidinium. L'étude met en évidence un avantage bien réel de l'ensemble de la famille de LI étudiés au regard du danger d'emballement thermique des batteries au lithium-ion, le caractère « retardateur de flammes » souvent constaté pour les liquides ioniques, étant renforcé ici par le choix d'un contre-anion fluoré, TFSI semblant constituer un optimum. Cette étude a fait l'objet d'une publication conjointe avec le partenaire HIU dans la revue *ChemSusChem* avec une qualification de *very important paper* [5] sans doute en raison de l'éclairage significatif qu'il apporte vers une sécurité opérationnelle améliorée des batteries rechargeables au lithium-ion.

ABSTRACT /

A comprehensive insight into the thermal hazard and combustion behaviour in fire conditions of a series of pyrrolidinium based ionic liquids (ILs) associated with a fluorine-containing anion targeted for energy storage applications is provided. The work has been carried out in collaboration with the German institute HUI. Results constitute a solid database for sustainable use of these alternative solvents to conventional organic carbonate to build up safer electrolytes for lithium and sodium batteries, integrating trade-off between safety and functionality in terms of conductivity and viscosity of pyrrolidinium based ILs. Safety advantages are clearly rated with their bias according to changes in alkyl chain length, anion used and use or an ether function.

Figure 3 / Évaluation de la toxicité court terme (CE50, *D. magna*, 48 h) des liquides ioniques étudiés en comparaison avec d'autres LI testés précédemment à l'Ineris.



Références

- [1] Diallo A.-O.; Len C.; Morgan A.B.; Marlair G. Revisiting physico-chemical hazards of ionic liquids. *Sep. Pur. Techn.*; 2012, 97 (SI) : p. 228-234
- [2] Bado-Nilles A.; Diallo A.-O.; Marlair G. et Pandard P.; Développement d'approches d'évaluation des dangers (éco)toxicologiques de substances émergentes issues de la chimie verte, Ineris, *Rapport scientifique 2014-2015*, pp 54-55 (cf aussi *J. Haz. Mater.* 2015 (283) 202-210)
- [3] Chancelier L.; Diallo A.-O.; Santini C.C.; Marlair G.; Gutel T.; Mailley S. & Len C.; *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014, 16, 1967
- [4] Diallo A.-O.; Morgan A.-B.; Len C.; Marlair G.; An innovative experimental approach aiming to understand and quantify the actual fire hazards of ionic liquids. *Energy Environ. Sci.*, 2013, 6(3), 699-710
- [5] Eshetu G.G.; Jeong S.; Pandard P.; Lecocq A.; Marlair G. & Passerini S.; Comprehensive Insights into Thermal Stability, Biodegradability, and Combustion Chemistry of Pyrrolidinium-Based Ionic Liquids, *Chem Sus Chem* 2017, 10, 3146-3159

Analyse d'impuretés dans le biogaz et le biométhane

Contributeurs

Hugues
BIAUDET,

Ahmad
EL MASRI,

François
LESTREMAU,

Isabelle
ZDANEVITCH

Avec environ 17000 usines de biogaz en Europe, la production de biogaz est désormais un procédé reconnu pour traiter les déchets et les transformer en énergie. Le biogaz est un mélange principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). De nombreux sous-produits peuvent cependant être potentiellement générés lors de la fabrication du biogaz (composés soufrés comme le sulfure d'hydrogène ou les mercaptans, azotés comme l'ammoniac, les terpènes, les siloxanes, les hydrocarbures halogénés, les cétones, les alcools et les esters).

Par conséquent, avant d'être utilisé en tant que combustible, le biogaz doit être amélioré et sa qualité contrôlée, car ces sous-produits peuvent être nuisibles pour les infrastructures (corrosion) ou représenter un risque sanitaire.

Travaux

Les projets de norme pour le biométhane (biogaz purifié) destiné à être injecté dans les réseaux de gaz naturel (prEN 16723-1) [1] et à être utilisé comme carburant de véhicule (prEN 16723-2) [2] fixent des exigences concernant un grand nombre de paramètres, y compris des teneurs maximales en impuretés. Ces dernières sont basées sur des considérations relatives à la santé, à la sécurité et à l'environnement. Pour que ces spécifications puissent être mises en œuvre, des méthodes d'échantillonnage et d'analyse fiables, partagées par les laboratoires d'analyses, doivent préalablement être développées et validées pour chaque paramètre. Le projet européen EMPIR ENG 54 « Metrology for biogas », auquel l'Ineris a participé, avait notamment

pour objectif d'évaluer les aspects métrologiques en termes d'échantillonnage, de stabilité et d'analyse de certains résidus organiques du biogaz inclus dans le projet de spécifications pour le biométhane : les siloxanes, les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes), les composés soufrés, les HAP et les hydrocarbures halogénés. Dans le cadre de ce projet, l'Ineris a particulièrement contribué aux études sur les BTEX et les hydrocarbures halogénés ainsi que sur la constitution de guides sur les méthodes d'échantillonnage et de stockage des échantillons avant analyse.

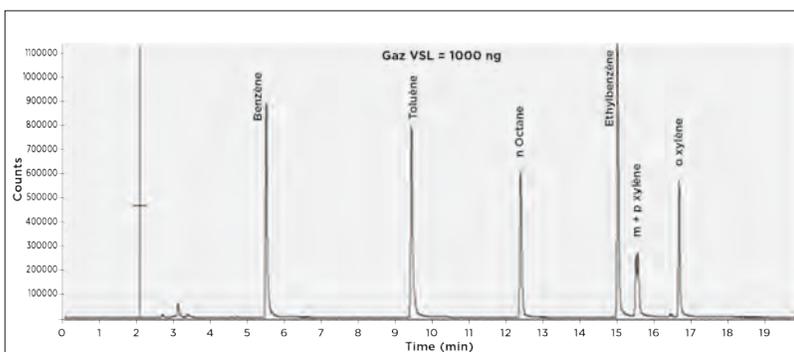
Résultats

De par sa grande quantité de méthane, le biogaz engendre des difficultés métrologiques spécifiques lors de la mise en œuvre de méthodes d'échantillonnage et d'analyse de composés organiques. L'un des plus grands défis de l'échantillonnage de biogaz consiste à collecter des échantillons en évitant que leur composition ne change entre le moment de l'échantillonnage et celui de l'analyse. La plupart des impuretés présentes dans le biogaz ont tendance à s'adsorber sur la surface interne des récipients d'échantillonnage et à être réactives. De plus, aucune technique analytique n'est suffisamment efficace pour pouvoir mesurer simultanément des impuretés présentant des propriétés physico-chimiques très diverses. Ainsi, le projet « Metrology for biogas » a permis d'évaluer une large gamme de dispositifs d'échantillonnage : canisters, sacs d'échantillonnage, adsorbants de différentes natures...

L'Ineris s'est focalisé sur le prélèvement sur tubes d'adsorbants des BTEX et des hydrocarbures halogénés. Les analyses ont été effectuées par chromatographie en phase gazeuse couplée à des détecteurs par ionisation de flamme et de spectrométrie de masse (exemple des BTEX en Figure 1).

Les tubes d'adsorbants permettent de préconcentrer les composés d'intérêt sur un support. Une désorption thermique des tubes a été effectuée, directement couplée à l'analyseur, ce qui a permis d'obtenir des limites de détection très basses (de l'ordre de 10 ng piégés par tube). Les adsorbants sont cependant sélectifs et des effets de compétition d'adsorption peuvent se produire. Ainsi, pour l'analyse des BTEX par Carbotrap X (adsorbant à base de noir de carbone graphitisé), de faibles rendements de piégeage ont été constatés. L'utilisation de Carbotrap 300 (adsorbant de même nature que le Carbotrap X mais avec une

Figure 1 / Exemple de chromatogramme de l'analyse des BTEX dans le biogaz.



porosité différente) a permis de déterminer que ce support était adapté. Ces résultats ont été confirmés lors de l'étude de stabilité à court terme (pas de perte constatée pour au moins 7 jours de stockage), notamment en comparaison d'autres supports de prélèvements tels que les sacs d'échantillonnage et les canisters (**Figure 2**). Ces travaux ont aussi permis d'aboutir à une méthode validée de prélèvement et d'analyse des BTEX dans le biogaz.

Les hydrocarbures halogénés sont des substances beaucoup plus réactives. L'utilisation de tube Tenax n'a pas pu être validée car une grande dispersion dans les résultats a été observée ainsi que des problèmes de justesse pour certains composés. De meilleurs résultats ont été obtenus avec l'utilisation de tubes contenant du Carbotrap 300 mais la validation de la méthode a également mis en évidence une variabilité importante (de l'ordre de 60 % à la limite de quantification). Le piégeage de ces substances par Carbotrap 300 est cependant stable pour une durée d'au moins 15 jours. Globalement, la méthode développée ne présentait pas un niveau de robustesse suffisant pour une application en routine.

Le projet EMPIR ENG 54 a permis le développement de méthodes de références mais a également mis en évidence les difficultés à analyser certaines substances d'intérêt dans le biogaz. Ainsi, un projet, EMRP 16ENG05 « Metrology for biomethane », est actuellement en cours pour apporter des éléments complémentaires pour l'analyse des substances présentant des difficultés analytiques ainsi que pour développer des méthodes pour d'autres substances non considérées dans le projet initial. Dans ce cadre, l'Ineris poursuit ses travaux sur l'analyse des hydrocarbures halogénés et est également impliqué dans l'analyse de résidus d'huiles de compresseur, de l'acide fluorhydrique et de l'acide chlorhydrique dans le biométhane.

Références

[1] EN 16723e1, Natural Gas and Biomethane for Use in Transport and Biomethane for Injection in the Natural Gas Network - Part 1: Specifications for Biomethane for Injection in the Natural Gas Network. Standard; European Organization for Standardization, CEN, Brussels, Belgium, 2016.

[2] prEN 16723e2, Natural Gas and Biomethane for Use in Transport and Biomethane for Injection in the Natural Gas Network - Part 2: Automotive Fuel Specifications. Standard; European Organization for Standardization, CEN, Brussels, Belgium, 2014.

[3] Arrhenius K.; Yaghooby H.; Rosell L.; Büker O.; Culleton L.; Bartlett S.; Murugan A.; Brewer P.; Li J.; van der Veen A.M.H.; Krom I.; Lestremou F.; Beranek J.; Suitability of vessels and adsorbents for the short-term storage of biogas/biomethane for the determination of impurities e Siloxanes, sulfur compounds, halogenated hydrocarbons, BTEX, Biomass and bioenergy 105 (2017) 127-135.

ABSTRACT /

Biogas production is now a recognized process for treating waste and converting it into energy. Biogas is a mixture of mainly methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). However, many by-products, in particular volatile organic compounds (VOCs), can potentially be produced during the production of biogas. Therefore, before being used as fuel, biogas quality needs to be improved as some by-products may be harmful to infrastructure or represent a health risk.

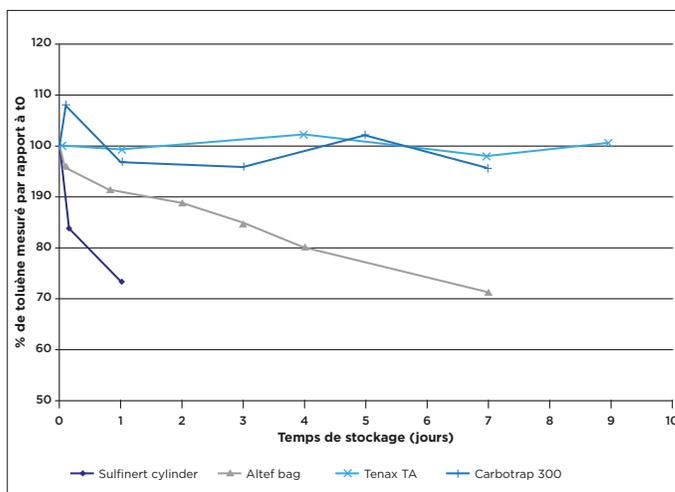
The draft standards for biomethane (purified biogas) intended to be injected into the natural gas networks (prEN 16723-1) and to be used as vehicle fuel (prEN 16723-2) set requirements for a large number of parameters including the content of impurities. Before these specifications can be implemented, reliable sampling and analysis methods must be developed and validated for each parameter.

The European project EMPIR ENG 54 "Metrology for biogas" aimed to evaluate the metrological aspects in terms of sampling, stability and analysis of certain organic biogas residues. As part of this project, Ineris has particularly contributed to the studies on BTEX and halogenated hydrocarbons as well as the constitution of guides on sampling methods and storage of samples before analysis. Sampling with adsorbent tubes coupled were evaluated with analysis by gas chromatography/ionization flame and mass spectrometry detectors were evaluated for both family of substances.

For BTEX, sampling and short-term storage were determined adequate using Carbotrap 300. This sorbent was also suited for halogenated hydrocarbons but larger variabilities were observed for these compounds.

Evaluation of suitable analytical methods for measuring impurities in biogas is continuing through a follow up project EMRP 16ENG05 "Metrology for biomethane".

Figure 2 / Stabilité à court terme pour des canisters, des sacs d'échantillonnage et des adsorbants pour le toluène (adapté de [3]).



Étude des mécanismes d'émission d'aérosols

lors de la manipulation de poudres

Contributeurs

Olivier
LE BIHAN,
Olivier
AGUERRE-
CHARIOL

/

Collaborateurs

Somik
CHAKRAVARTY,
Marc FISCHER,
Martin
MORGENEYER

(Université
de technologie
de Compiègne)

La manutention et la mise en œuvre des matériaux granulaires peuvent libérer de fines particules de poussière qui, dans un contexte industriel, peuvent affecter la santé et la sécurité des travailleurs, le fonctionnement global de l'installation et mener à des émissions dans l'environnement. La capacité d'un matériau à libérer des particules, puis leur émission, dépendent de plusieurs mécanismes et paramètres relatifs au matériau mais aussi au procédé. Ces émissions sont généralement mesurées par des tests d'empoussièremement à l'échelle du laboratoire. Ces tests reposent principalement sur des études expérimentales et manquent de capacité prédictive fiable en raison d'une compréhension limitée des mécanismes mis en jeu et des interactions complexes concernant les particules entre elles mais aussi leur interaction avec le dispositif les contenant et le fluide porteur, survenant simultanément pendant la génération de poussières.

L'Ineris a mené, en partenariat avec l'université de technologie de Compiègne un travail basé sur des approches expérimentales et statistiques pour comprendre les mécanismes de génération de poussières en étudiant : a) les effets des caractéristiques des particules et poudres en vrac sur l'émission de poussières ; b) la nature et l'ampleur des interactions entre particules, entre particules et parois du contenant ainsi qu'entre particules et fluide porteur ; c) l'évolution de l'empoussièremement et des mécanismes de génération pour des applications mettant en œuvre une poudre sur une longue durée.

Méthode

Les études de pulvérulence présentées ici ont été réalisées à l'échelle laboratoire dans un système

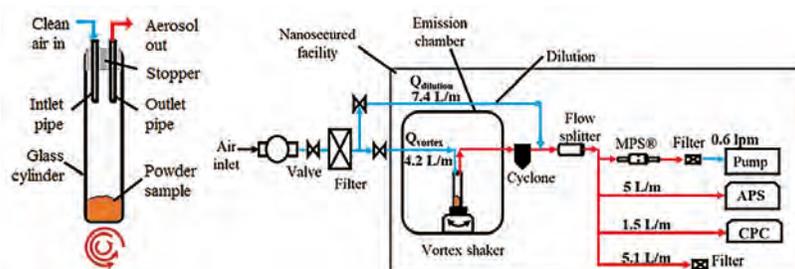
vortex basé sur l'agitation d'un tube à essai contenant une poudre (Figure 1), système installé au sein de la plateforme S-nano de l'Institut.

Résultats

Un premier axe de travail a porté sur une meilleure connaissance du mouvement de la poudre au sein du dispositif expérimental [2]. Le traçage radioactif de particules de poudre, apporté par les universités de Greenwich et Birmingham, a permis d'étudier leur mouvement à l'intérieur d'un tube à essai cylindrique agité par agitateur vortex. Le mouvement montre une nature cyclique (Figure 2) ; il est symétrique et isotrope (position et vitesse) dans le plan horizontal, les vitesses radiales les plus basses et les plus élevées étant proches du centre du tube et de la paroi, respectivement. Les particules ont tendance à s'élever lentement au milieu du tube tout en descendant rapidement près de la paroi. Les valeurs les plus élevées de la vitesse se trouvent dans le haut du tube et près de la paroi interne du tube, où les densités de population de particules sont les plus faibles. Les valeurs plus élevées de la vitesse pourraient provenir d'une diminution du nombre de chocs due à des densités de population plus faibles. L'augmentation de la taille des particules et des vitesses de rotation des tourbillons tend à augmenter la vitesse des particules tandis que l'augmentation de la masse de poudre conduit à une diminution de la vitesse des particules pour des vitesses de rotation allant jusqu'à 1 500 tr / min.

Un second axe d'étude a porté sur les mécanismes de génération de poussière : les résultats montrent que les mécanismes en jeu diffèrent en fonction de la taille des particules et de la distribution en taille de la poudre [1]. Pour les échantillons considérés et les conditions expérimentales données, les différences dans les modèles initiaux de libération de poussière peuvent être expliquées en considérant trois groupes différents de poudres : des poudres contenant des particules cohésives fines, des poudres bi-modales (constituées de fines et de grosses particules) et, enfin, des poudres constituées de grosses particules. La cohésion globale, particulièrement celle due aux forces de van der Waals (mesurée à l'aide de testeurs de cisaillement) détermine le niveau de poussières pour les poudres fines : l'augmentation de la cohésion

Figure 1 / Schéma de principe de l'agitateur vortex (à gauche), et de sa mise en œuvre (à droite). [1 ; 2 ; 3]



globale réduit les émissions de poussière. Pour leur part, les grosses particules peuvent émettre de la poussière uniquement par usure des particules primaires en particules fines aérosolisables. Dans le cas des poudres bi-modales, les émissions sont la combinaison de ces deux mécanismes.

Une étude plus approfondie a été menée sur une sélection d'échantillons (carbure de silicium [3], alumine et coke d'acétylène). L'empoussièrément initial apparaît comme déterminé par la fraction de fines particules respirables présentes dans la poudre. En revanche, il n'en est pas de même sur le long terme : la poussière est générée par la fragmentation et/ou l'abrasion des particules primaires, ce qui conduit à la production et à l'émission de fines particules-filles. Les échantillons ayant de grandes particules de forme irrégulière sont susceptibles de générer une grande quantité de poussière en réduisant des aspérités lors des collisions des particules entre elles ou contre la paroi (ex. F220, Figure 3), se rapprochant ainsi progressivement d'une forme plus sphérique [3]. Au contraire, les particules plus petites sont plus résistantes à l'abrasion et génèrent relativement moins de poussière.

Les résultats obtenus aident à comprendre l'influence des paramètres de la poudre et du procédé qui peuvent être exploités pour réduire la production de poussière. De plus, les résultats expérimentaux peuvent être utilisés pour développer et valider des modèles numériques afin de prédire l'empoussièrément.

Remerciements

Depuis son origine (2008), l'activité de recherche sur la pulvéulence des poudres est menée en partenariat avec l'UTC (Dr Morgeneyer). Ce partenariat a notamment permis de bénéficier de la thèse de Somik Chakravarty (2015-2018) financée dans le cadre du projet Marie Curie « T-MAPPP », et du post-doctorat de Marc Fischer, financé par la région Hauts de France (2017-2018).

Références

[1] Chakravarty S.; Fischer M.; Garcia-Trinanes P.; Parker D.; Le Bihan O.; Morgeneyer M.; Study of the particle motion induced by a vortex shaker, *Powder Technology* POWTEC-D-17-01165R1, 2017

[2] Chakravarty S.; Le Bihan O.; Fischer M.; Morgeneyer M.; Dust generation in powders: Effect of particle size distribution, EPJ Web of Conferences 140, DOI: 10.1051/epjconf/201714013018, *Powders & Grains* 2017

[3] Chakravarty S.; Fischer M.; Garcia-Trinanes P.; Dalle M.; Meunier L.; Aguerre-Chariol O.; Le Bihan O.; Morgeneyer M.; Long-term dust generation from silicon carbide powders, February 2018, *Process Safety and Environmental Protection* 116. DOI:10.1016/j.psep.2018.01.021

ABSTRACT /

Handling and processing of granular material release fine solid dust particles, which in an occupational setting, can severely affect worker health and safety, the overall plant operation and can release particles to the environment. Dustiness or the ability of a material to release dust particles depends on several material and process properties and is usually measured by lab-scale dustiness testers. Ineris and its partners use an experimental approach (vortex shaker) to understand the dust generation mechanisms. The results indicate that these mechanisms differ based on particle size and size distribution of the powder [1]. Analysis of a traced particle motion inside a cylindrical tube agitated by a vortex shaker dustiness tester shows the cyclic nature of the particle motion [2]. For the given samples and the experimental conditions, the initial dustiness is determined by the fraction of fine respirable particles present in the powder, but the long-term dust generation patterns and levels are influenced by the material attrition behavior [3].

Figure 2 / Trajectoire type de la particule de poudre, au sein d'un agitateur vortex – plan horizontal et plan vertical [1]

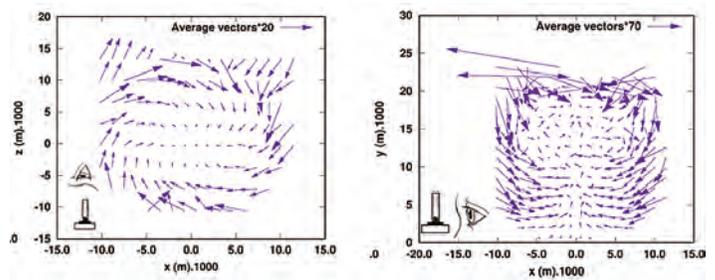
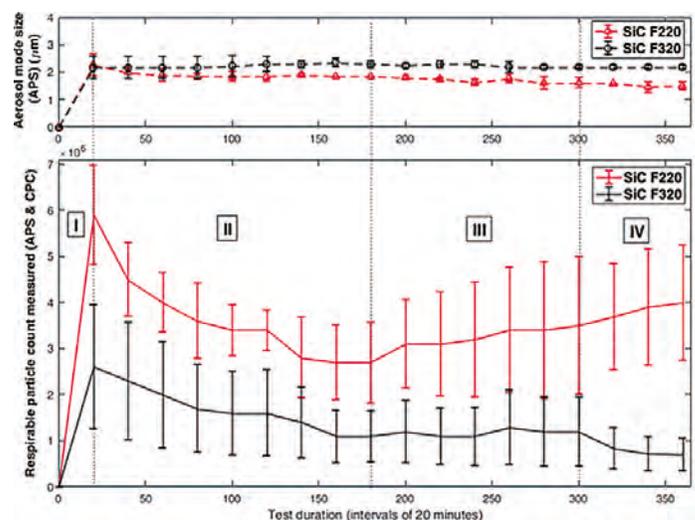


Figure 3 / Évolution temporelle du diamètre moyen et de la concentration en nombre de l'aérosol généré, pour deux poudres de SiC. La poudre F220 s'avère beaucoup plus fragile que la F320 [3].



NORMAN: un bilan après dix ans d'activité

Contributeur
Valeria DULIO

Le réseau NORMAN a vu le jour en tant que consortium de 17 partenaires en réponse à un appel à projets européen. Dix ans plus tard, il est devenu, sous la coordination de l'Ineris, une association loi 1901 de plus de 70 adhérents (instituts de recherche, laboratoires de référence, agences de l'environnement et représentants de l'industrie) originaires de 21 pays, principalement en Europe mais également au-delà. Le séminaire organisé fin 2016 à Bruxelles pour fêter les dix ans d'existence du réseau a permis d'échanger avec les parties prenantes au niveau international sur les principaux enjeux et perspectives d'évolution à moyen et long terme.

Une plateforme européenne sur les substances d'intérêt émergent dans l'environnement

Des progrès considérables sur la surveillance des contaminants chimiques dans l'environnement ont été réalisés ces dernières années. Il reste cependant encore de nombreuses substances présentes dans l'environnement qui ne sont pas surveillées et pour lesquelles des questions restent ouvertes sur leurs effets à long terme, sans compter les difficultés analytiques pour déterminer de manière fiable les niveaux de concentration dans les différents compartiments (eaux, air, sols). La caractérisation des risques associés à ces substances exige, comme préalable, le développement de méthodes de mesure fiables. Il est également important de comprendre comment ces substances sont émises ou formées dans l'environnement et quels sont leurs effets, non seulement comme substances individuelles, mais aussi en tant que mélanges. Le sujet est bien trop vaste pour qu'il soit considéré exclusivement à l'échelle nationale. Seule une coopération à plus grande échelle peut permettre d'agir efficacement de manière préventive sur la contamination chimique de l'environnement. C'est la raison d'être du réseau NORMAN.

Au cours de ces dix ans d'activité NORMAN a produit :

- EMPODAT – une base de données géoréférencées sur l'occurrence des substances émergentes dans l'environnement ;
- NORMAN MassBank – une base de données de spectres de masse pour faciliter l'identification des substances « inconnues » ;
- une approche innovante de la priorisation des substances, qui vise à prendre en compte les manques de connaissances des substances émergentes ;

- le premier essai collaboratif sur les techniques d'analyses non ciblées ;
- plus de 30 colloques et réunions d'experts sur de nombreux sujets émergents ;
- 10 bulletins de veille scientifique depuis 2007 (Figure 1).

Parmi les dispositifs innovants sur lesquels NORMAN est actif, il y a lieu de signaler l'analyse non ciblée, basée sur les techniques de spectrométrie de masse haute résolution (HRMS), mais aussi les outils biologiques et les échantillonneurs passifs.

Un des points forts de l'analyse non ciblée est de permettre la détection simultanée d'un large nombre (milliers) de substances chimiques, y compris de substances jamais étudiées auparavant et encore inconnues. Un effort collaboratif est cependant essentiel pour une utilisation efficace de ces techniques. NORMAN vise à améliorer la comparabilité et l'harmonisation des données issues des techniques HRMS ainsi qu'au développement d'outils pour promouvoir le partage systématique de l'information disponible parmi les utilisateurs. Une initiative remarquable à cet égard est la *Digital Sample Freezing Platform* (DSFP), une échantillothèque digitale qui permet la bancarisation et l'échange de l'information contenue dans les spectres de masse des échantillons. L'enjeu pour NORMAN est aujourd'hui de démontrer le potentiel de ce nouveau concept d'échantillothèque. Une échantillothèque digitale permet de rechercher *a posteriori*, et de manière rapide et simultanée, la présence d'un large nombre de substances, potentiellement préoccupantes, dans les échantillons environnementaux et ce pour un diagnostic chimique élargi et capitalisable à long terme.

Un deuxième volet stratégique des activités de NORMAN s'adresse aux outils biologiques tels que les bioessais *in vitro* et *in vivo*. L'intérêt principal de ces outils repose dans leur capacité à renseigner sur la toxicité de l'ensemble des substances actives présentes dans un échantillon environnemental. L'introduction de ces outils dans une future surveillance nécessite au préalable la mise en place d'un protocole qui devra définir les critères de performance et d'assurance qualité de ces outils ainsi que les valeurs seuils nécessaires à l'interprétation des résultats. Dans ce cadre, en synergie avec d'autres projets de recherche tels que le projet SOLUTIONS, NORMAN porte sur la table de discussion européenne (« *Effect-based Methods* »

activité coordonnée par la Commission européenne – DG Environnement¹) une méthode pour la définition des valeurs seuil associées aux différents modes d’actions ciblés par les bioessais. NORMAN contribue donc à promouvoir une position commune des experts européens sur l’utilisation des bioessais pour la future surveillance des milieux aquatiques.

Les principaux acteurs européens et nationaux réunis au cours d’un séminaire

Les participants au séminaire des dix ans de NORMAN ont souligné l’importance de la recherche sur les contaminants émergents dans un contexte où des changements importants pour la société et pour l’industrie sont en cours à l’échelle planétaire (vieillesse de la population, changement climatique, nouvelles technologies, économie circulaire). Beaucoup de substances sont encore mal étudiées, le développement d’infrastructures à l’avant-garde pour la génération de nouvelles données environnementales de qualité et exploitables à l’échelle internationale est fondamentale pour un développement durable. Les collaborations de NORMAN avec l’ECHA (*European Chemical Agency*) et la DG Environnement sont d’intérêt pour mieux lier les données d’exposition dans l’environnement avec les informations sur les substances présentes sur le marché. Après plus de dix années d’activité, NORMAN est devenu un réseau reconnu et essentiel, en appui aux politiques publiques européennes.

Les participants au séminaire ont souligné l’intérêt du réseau pour :

- la mise en commun des résultats de différents projets de recherche autour d’une position commune sur des sujets à enjeux, ce qui permet d’accélérer la mise en place de nouvelles stratégies de surveillance environnementale ;
- les échanges réguliers entre le monde académique et experts de terrain, ce qui stimule les scientifiques à répondre à des questions concrètes pour la future réglementation.

NORMAN est un outil original et opérationnel qui permet de prendre en compte les nouvelles connaissances pour l’avancement des politiques environnementales liées à la contamination chimique et aux problématiques associées aux substances émergentes.

Pour en savoir plus : www.norman-network.net

¹ Service de la Commission européenne chargé de la politique de l’UE en matière d’environnement.

ABSTRACT /

In 2005, the EC funded the NORMAN project to promote the creation of a permanent network of reference laboratories and research centres, including academia, industry, standardization bodies and NGOs to deal with emerging substances in the environment. NORMAN’s main objectives are to improve exchange of information on contaminants of emerging concern (CECs) and to foster harmonization of protocols and improvement of data quality.

Today, NORMAN is an independent and highly recognized network of more than 70 members from all of Europe and beyond. The workshop that was organized to mark the 10th anniversary of the network was an opportunity to take stock of the work done so far and to discuss with the stakeholders (DG ENV, EEA, ECHA, national agencies) the way forward to improving EU-wide collaborations on CECs and related policy-making.

It was recognised that a global economy results in worldwide exposure to chemical stressors, including CECs. There was consensus about the crucial role played by research for identification and regulation of CECs. This is even more important in the current context where important global changes of society and industrial activities are taking place as a result of population growth and an ageing population, climate change, new technologies and circular economy.

After 10 years of activities, NORMAN has become an essential network in support of EU policies, which facilitates the transfer of state-of-the-art scientific knowledge to policy-makers and regulatory bodies.

Figure 1 / Bulletin de veille NORMAN.



Référence

Dulio Valeria ; Van Bavel Bert ; Brorstrom-Lunden Eva ; Harmsen Joop ; Hollender Juliane ; Schlabach Martin ; Slobodnik Jaroslav ; Thomas Kevin ; Koschorreck Jan. Emerging pollutants in the EU: 10 years of NORMAN in support of environmental policies and regulations. *Environmental Science Europe*, 2018, 30: p. art. 5.

Comment gérer la biomasse végétale issue des phytotechnologies ?

Perceptions des opérateurs de filières de valorisation

Contributeurs

Valérie BERT,
Isabelle
ZDANEVITCH,
Serge COLLET,
Rodolphe
GAUCHER

La production de cultures énergétiques est considérée comme une menace pour la sécurité alimentaire et le développement durable. Cependant, ces cultures peuvent s'effectuer sur des sols peu fertiles ou présentant une contamination ce qui permet d'éviter la compétition avec les sols agricoles tout en augmentant la production d'énergies renouvelables encouragée par la Directive 2009/28/EC et la restauration de ces sols grâce aux phytotechnologies. Les phytotechnologies sont des options de gestion des sols pollués basées sur

l'utilisation de végétaux herbacés et ligneux souvent choisis pour être en synergie avec la microflore existante et des amendements apportés au sol. Ces techniques offrent la possibilité de produire de la biomasse renouvelable pour l'économie biobasée (ex: bioénergie, biocatalyse, biomatériaux) et d'améliorer les services écosystémiques en restaurant, par exemple, la structure, la qualité et les fonctions du sol. Les végétaux phytostabilisateurs affichent des concentrations en métaux identiques aux concentrations habituellement mesurées chez des végétaux se développant sur des sols non pollués tandis que les végétaux phytoextracteurs présentent des concentrations nettement supérieures à ces valeurs. Des essais de combustion conduits sur des saules enrichis en métaux (Cd et Zn) ont montré que leur valorisation était possible à condition que les chaudières soient équipées de filtres efficaces [1]. Cependant, pour la combustion et la méthanisation, la possibilité d'épandre respectivement les cendres et le digestat pourrait, dans certains cas, être problématique. Elle dépend en effet de la qualité des résidus et du cadre réglementaire. La perception par les opérateurs de filières de valorisation des biomasses issues de phytotechnologies ayant été peu étudiée, une étude pour recueillir les opinions d'exploitants de chaudières à biomasse et de méthaniseurs a été réalisée. Cette étude a été conduite *via* des questionnaires auprès de vingt exploitants Européens issus de quatre pays (France, Allemagne, Suède et Autriche) dans le cadre du projet Greenland.

Tableau 1 / Connaissance des phytotechnologies, conditions d'acceptation des biomasses végétales issues des phytotechnologies en méthanisation (A) et en chaudière (B).

A -	Phytotechnologies knowledge	Phytostabilising plants use	Phytoextracting plants use	Advantages	Disadvantages
FR1	Yes	Yes	Yes	(1), (2)	(1)
FR2	No	Yes	No	(3)	(1), (3), (4), (5)
FR3	Yes	Yes	No	(1), (3), (4), (5)	(1), (3), (4), (5)
FR4	Yes	Yes	Yes	(4), (5)	(1), (5)
FR5	No	Yes	Yes	(1), (2), (3), (4), (5)	(1)
GE1	No	Yes	Yes	(2), (3), (4)	(5)
GE2	No	Yes	Yes	(1)	(1), (2)
GE3	No	Yes	Yes	(1)	(1), (2)
GE4	No	Yes	Yes	(1), (2)	(1), (5)
AT1	No	Yes	Yes	(2), (3), (4), (5)	(1), (5)
AT2	No	Yes	Yes	(2), (3), (4), (5)	(1), (5)
B -	Phytotechnologies knowledge	Phytostabilising plants status	Phytoextracting plants status	Advantages	Disadvantages
FR1	Yes	Biomass	Biomass or waste	(1), (3), (5)	(1), (2), (4), (5)
FR2	Yes	Biomass	Waste	(1), (3), (4), (5)	(1), (2), (4), (5)
FR3	No	Biomass	Waste	(1), (2), (3), (4), (5)	(1), (2), (5)
FR4	Yes	Biomass	Waste	(1), (2), (3), (4), (5)	(1), (2)
GE1	No	Biomass	Biomass or waste	(1), (2), (4)	(1), (2), (5)
GE2	No	Biomass	Biomass	(1), (2), (3), (4)	none
SW1	No	Waste	Waste	(1), (4)	(3)
SW2	Yes	Biomass	Waste	(4), (5)	(1), (2), (4), (5)
SW3	No	Biomass	Biomass or waste	(5)	(1), (2), (4)

Advantages are: Providing source diversification (1), local biomass source increase (2), non food landing competition (3), sustainable development suitability (4), economical interest (5).

Disadvantages are: additional control (1), installation modification (2), unsustainable development (3), no economical interest (4), waste treatment assimilation (5).

Acceptabilité par les opérateurs de plateformes de méthanisation

Huit des onze opérateurs questionnés ne connaissaient pas les phytotechnologies. Interrogés sur l'acceptation de biomasse issue de phytostabilisation, les opérateurs ont estimé qu'ils pourraient accepter cette biomasse dans leurs installations après avoir vérifié ses concentrations en métaux et à condition que les éventuels polluants présents n'occasionnent pas d'effets négatifs sur leurs équipements et la performance des micro-organismes et qu'il y ait un intérêt économique (ex: subvention).

Concernant l'acceptation de biomasses issues de phytoextraction, deux des onze opérateurs ne

l'accepteraient pas en première intention. Les autres opérateurs pourraient accepter des plantes enrichies en métaux dans leurs installations, après avoir vérifié les concentrations en éléments traces dans le digestat ou le compost, en plus des conditions énoncées précédemment.

Les principaux freins perçus :

Finalement, les opérateurs pensent qu'ils pourraient y avoir plus de désavantages que d'avantages à utiliser des plantes ayant poussé sur des sols pollués, surtout des plantes issues de la phytoextraction du fait des possibles contrôles additionnels résultant des modifications apportées à leurs installations. En termes d'image, les opérateurs étrangers ont mentionné la crainte de voir leur activité assimilée à du traitement de déchets.

Les principaux avantages perçus :

Les opérateurs ont principalement mis en avant la diversification des sources d'approvisionnement et la non-compétition avec des terres utilisées pour l'alimentation.

Acceptabilité par les acteurs de la filière bois-énergie

Quatre des neuf opérateurs questionnés ne connaissaient pas les phytotechnologies. Six opérateurs considéraient le bois de phytostabilisation comme ayant des concentrations proches de celles mesurées dans du bois issu de forêts. Par contre, du bois enrichi en métaux issu de phytoextraction était considéré intuitivement par cinq des opérateurs comme un déchet du fait que les cendres pourraient ne plus être valorisables par retour au sol et que leurs équipements pourraient être impactés par les métaux.

Les principaux freins perçus :

Les acteurs de la filière bois ont pensé qu'ils devraient effectuer davantage de contrôles, qu'ils pourraient avoir à modifier leurs installations et que celles-ci risqueraient d'être assimilées à du traitement de déchets.

Les principaux avantages perçus :

Les opérateurs ont mis en avant la diversification des sources d'approvisionnement et la non-compétition avec des terres utilisées pour l'alimentation. Ils pensaient également que le bois issu des phytotechnologies pourrait être moins cher que le bois habituellement commercialisé.

Conclusions

Les résultats de cette étude suggèrent que les biomasses végétales issues des phytotechnologies pourraient être utilisées en méthanisation et en

ABSTRACT /

A survey was carried out in 4 European countries to gather end-user's perceptions of using plants from phytotechnologies in combustion and anaerobic digestion (AD). 9 actors of the wood energy sector and 11 AD platform operators from France, Germany, Austria and Sweden were interviewed. Questions related to installation, input materials, performed analyses, phytostabilization and phytoextraction. Although the majority of respondents did not know phytotechnologies, results suggested that plant biomass from phytomanaged areas could be used in AD and combustion, under certain conditions. As a potential advantage, these plants would not compete with plants grown on agricultural lands, contaminated lands being not suitable for food/feed production. Main limitations would be related to additional controls in inputs, end-products and installations that might generate additional costs. In most cases, the price of biomass from phytotechnologies was mentioned as a driver to potentially use it. Plants used in phytostabilisation were thought to be less risky and benefited from a better theoretical acceptance than those issued from phytoextraction.

combustion, sous certaines conditions. Selon les opérateurs, les limites majeures proviendraient des contrôles supplémentaires qu'ils pourraient être amenés à réaliser sur la biomasse, les émissions et leurs installations, engendrant potentiellement des coûts supplémentaires. Le prix de la biomasse issue des phytotechnologies, s'il est équivalent ou inférieur à celui du marché, pourrait être un argument en faveur de l'utilisation de ces plantes. De même, les plantes issues de la phytostabilisation semblaient poser moins de difficultés et par conséquent bénéficieraient d'après les acteurs des filières questionnées d'une meilleure acceptabilité que les plantes issues de la phytoextraction.

Remerciements

Cette étude a été financée dans le cadre du projet européen Greenland (FP7-KBBE-266124).

Références

[1] Delplanque M.; Collet S.; Del Gratta F.; Schnuriger B.; Gaucher R.; Robinson B.; Bert V. 2013. Bioenergy production by Salix used for phytoextraction: field study and process viability. *Biomass and Bioenergy* 49: 160-170.

Bert V.; Douay F.; Faure O.; Cadere F. 2017. Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (Nouveaux résultats de recherche et démonstration). ADEME. Ed. ADEME Collection Expertises. P68. ISBN : 979-10-297-0786-5. <http://www.ineris.fr/centre/doc/guidephyto2-mars2017-1496923668.pdf>

Bert V.; Neu S.; Zdanevitch I.; Friesl-Hanl W.; Collet S.; Gaucher R.; Puschenreiter M.; Müller I. & Kumpiene J. (2017) How to manage plant biomass originated from phytotechnologies? Gathering perceptions from end-users, *International Journal of Phytoremediation*, 19:10, 947-954, DOI: 10.1080/15226514.2017.1303814

Place du stockage souterrain d'énergie dans la transition énergétique

Contributeurs

Philippe
GOMBERT,

Mehdi
GHOREYCHI,

Franz LAHAIE,

Romuald
SALMON,

Alain
THORAVAL

La loi de 2015 sur la transition énergétique vise à porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation d'énergie en 2020, ce qui représente environ 350 TWh. Du fait du caractère intermittent de certaines d'entre elles, il sera nécessaire de stocker l'énergie non consommée lors de pics de production pour la redistribuer ultérieurement. Compte tenu des volumes de stockage nécessaires, le milieu souterrain peut être attrayant pour stocker de grandes quantités d'énergie avec un moindre impact en surface [1].

Les stockages souterrains en France et dans le monde

Les premiers stockages de fluides (notamment gaz naturel et hydrocarbures) dans le sous-sol datent de 1940 aux États-Unis et de 1956 en France [2]. L'essentiel des stockages de gaz naturel et d'hydrocarbures en France se trouve dans 23 sites représentant une centaine de réservoirs souterrains : 12 en aquifères, 87 au sein de cavités et un gisement dit déplété, à savoir exploité dans le passé et actuellement dépressurisé (Figures 1 et 2).

Le stockage en aquifère consiste à injecter du gaz naturel dans un aquifère profond, non utilisable pour l'eau potable et isolé par une roche imperméable. En France, leur volume utile total est voisin de 11 milliards de mètres cubes.

Le stockage en cavité est de deux types : 78 cavités dites salines formées par dissolution contrôlée du

sel et 9 cavités dites minées creusées mécaniquement. En France, on stocke actuellement environ 14,5 millions de mètres cubes d'hydrocarbures liquides et 2 milliards de mètres cubes de gaz naturel dans ce type de cavités.

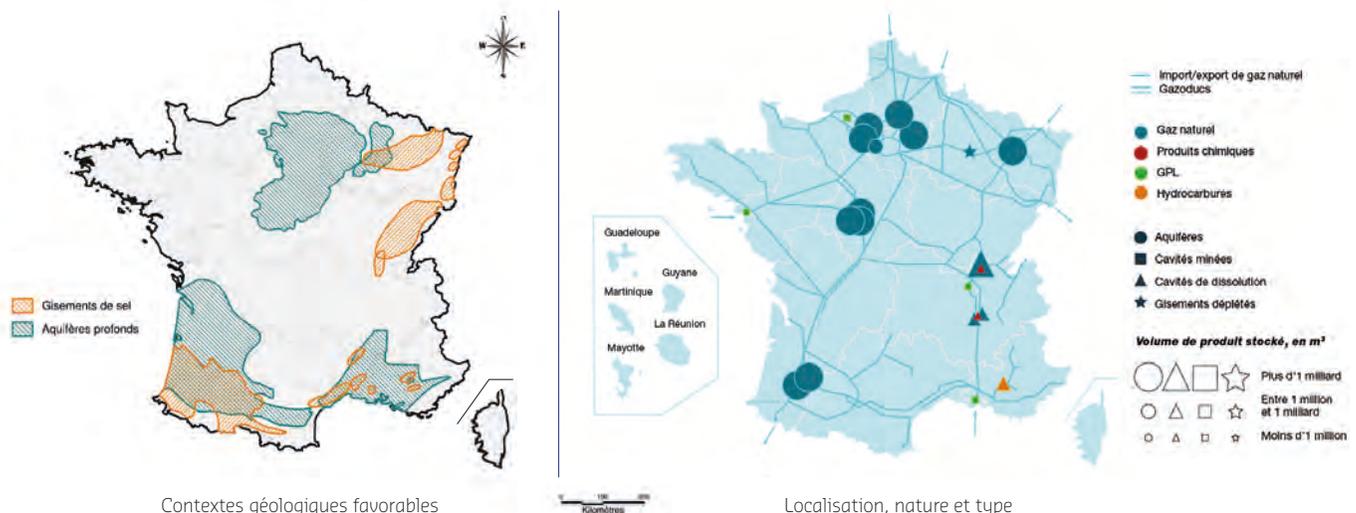
Le stockage en gisement déplété, majoritaire dans le monde, consiste à reconvertir un gisement naturel en fin d'exploitation. Du fait d'un contexte géologique défavorable, la France n'en dispose que d'un seul, d'une capacité de 2 milliards de mètres cubes, inactif pour raisons économiques.

L'avenir des stockages souterrains

Dans un contexte de réduction du recours aux énergies fossiles, les hydrocarbures actuellement stockés seront amenés à être remplacés par d'autres technologies de stockage d'énergie [3]. Il pourra s'agir de stockages sous forme d'énergie chimique (hydrogène, biométhane), potentielle (air comprimé, eau dans le cadre des STEP – stations de transfert d'énergie par pompage) ou thermique (eau chaude/froide).

L'hydrogène a une très forte capacité énergétique, de l'ordre de 360 kWh/m³ dans les conditions d'un stockage très profond à 200 bars de pression. Ainsi théoriquement, une centaine de cavités salines de grand volume (un million de mètres cubes) permettrait, sur la base de 1 à 2 cycles d'injection-soutirage par mois, de stocker la totalité des énergies renouvelables prévues à l'horizon 2020,

Figure 1 / Les stockages souterrains en France.



soit 350 TWh. L'hydrogène pourrait donc avoir un intérêt à l'échelle nationale (stockage stratégique), en substitution aux hydrocarbures, à condition de surmonter les défis liés aux risques technologiques d'un déploiement massif de ce gaz. Le retour d'expérience des stockages souterrains de gaz naturel (et des quelques stockages souterrains d'hydrogène) montre que cette technologie peut être maîtrisée. Le stockage d'énergie électrique sous forme potentielle, s'il présente moins de risques, s'avère en revanche nettement moins performant : de l'ordre de 1 à 3 kWh/m³ à 100 bars de pression pour l'air comprimé ou sous 500 m de hauteur de chute pour une STEP. Une centaine de stockages de 100 000 m³ chacun permettrait, à raison d'un cycle d'injection-soutirage par jour, de stocker environ 4 à 5 TWh par an, soit moins de 2 % des énergies renouvelables prévues à l'horizon 2020. Il ne s'agit donc pas d'une solution de stockage massif de l'énergie à l'échelle nationale mais cela peut toutefois avoir un intérêt à l'échelle locale, par exemple pour réguler la production d'un champ d'éoliennes ou d'une ferme photovoltaïque.

Le stockage souterrain d'énergie thermique, concept différent de la géothermie, permet de stocker temporairement de la chaleur ou du froid dans le sous-sol. Il s'agit de chaleur « fatale », sous-produit non utilisé des cimenteries, usines d'incinération, aciéries, datacenters, pompes à chaleur, etc. On peut stocker cette énergie dans la roche (pieux géothermiques) ou l'eau souterraine (aquifère ou cavité). Comme un mètre cube d'eau emmagasine 1,2 kWh/°C d'énergie thermique, la capacité d'une centaine de stockages de 100 000 m³ peut être estimée à environ 0,4 TWh/an, à raison d'un cycle annuel d'injection-soutirage (été-hiver) pour une eau stockée à 40 °C. Cela ne correspond qu'à 0,1 % des énergies renouvelables à l'horizon 2020, ce qui limite le stockage souterrain d'énergie thermique à une échelle principalement locale (écoquartier).

Risques et opportunités

Les risques liés aux installations de surface des stockages (compresseurs, sécheurs, canalisations...) sont déjà pris en compte par l'industrie. Dans le cadre des stockages souterrains, il faut se focaliser sur les risques liés aux ouvrages d'accès (défaut d'étanchéité) et au réservoir souterrain (perte d'étanchéité, stabilité, mouvements du sol, impact sur les eaux, émissions de gaz).

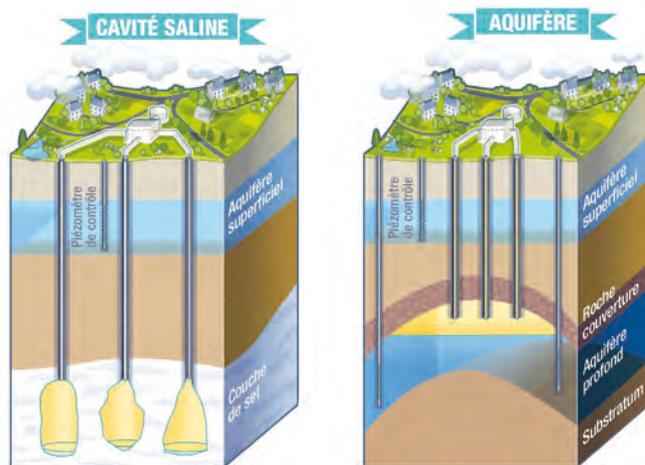
La filière de stockage souterrain de l'énergie peut ainsi être amenée à jouer un rôle majeur dans la transition énergétique mais l'avenir de cette nouvelle technologie dépendra de son aptitude à maîtriser les risques le plus en amont possible [4]. C'est l'objet des recherches en cours dans le domaine.

ABSTRACT /

The French law of 2015 on the energy transition for green growth aims to increase the share of renewable energy to 23% of energy consumption in 2020. Due to the intermittent nature of most of them, the unused energy must be stored for later redistribution. Underground storage allows good isolation from the surface and storage of large volumes under high pressure. We know how to store hydrocarbons underground but it is planned to store other products in the form of chemical energy (hydrogen, biomethane), potential energy (compressed air, water in the context of pumping hydroelectricity energy storage) or thermal (hot / cold water). This will require the creation of cavities and/or the use of deep aquifers or depleted oil fields, depending on the geological characteristics.

Hydrogen has a high energy capacity and its massive underground storage could be of national strategic interest, unlike other types of energy storage that would be more of local interest. However, challenges related to the technological risks of this specific gas will have to be overcome. Although experience feedback gained from the numerous underground hydrocarbon (and some hydrogen) storage facilities is very useful when assessing industrial risks, thorough research and risk assessment is needed to make such a technology safe.

Figure 2 / Représentation schématique des stockages en cavité saline et en aquifère profond.



Références

- [1] Ineris références, 2016. Le stockage souterrain dans le contexte de la transition énergétique. Maîtrise des risques et impacts. <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/ineris-dossierref2015-185x240-10-16bd-1478511473.pdf>
- [2] Gombert P; Ghoreychi M. 2018. Historique et panorama des stockages souterrains actuels en France et dans le monde. *Géologues*, n° 196 : 4-9.
- [3] Gombert P; Ghoreychi M; Lahaie F; Salmon R; Thoraval A. 2018. Les stockages souterrains d'énergie dans le contexte de la transition énergétique. *Géologues*, n° 196 : 30-37.
- [4] Gombert P; Ghoreychi M; Lahaie F; Salmon R; Thoraval A. 2017. Risques et opportunités liés aux stockages souterrains d'énergie en France. *Tunnels et espace souterrain*, 2017 (262) : 47-62.

Une analyse des grandes visions de prospectives internationales sur le devenir de l'environnement

Contributeur

Christophe
DIDIER

/

Collaborateurs

Audrey
BÉTHINGER

(Inra),

Bernard DAVID
(CEA),

Denis LACROIX
(Ifremer),

Louis LAURENT
(Anses),

Nicolas
de MENTHIÈRE
(Irstea),

Bertrand
SCHMITT
(Inra)

Pour contribuer à la programmation scientifique française dans le domaine des sciences de l'environnement, une étude des grandes visions de prospective internationales portant sur les devenirs possibles de l'environnement a été réalisée dans le cadre du groupe transversal prospective de l'Alliance AllEnvi dont l'Ineris est un membre actif. L'analyse a consisté à identifier les principales tendances émergentes de visions prospectives récentes intégrant le paramètre « devenir de l'état de l'environnement » [1]. La démarche prospectiviste est souvent mise à profit pour appuyer la prise de décision stratégique [2] car elle permet de stimuler la capacité des experts à se projeter dans le futur et à élargir le « champ des possibles » en fournissant un cadre méthodologique favorable à l'élaboration de scénarios contrastés, susceptibles de décrire un ensemble de « futurs envisageables » [3].

La première étape a consisté à constituer un corpus bibliographique. L'analyse de plus de 200 références a permis de sélectionner 99 études proposant au global 307 scénarios et impliquant 7 500 experts et représentants de parties prenantes mobilisés dans une quarantaine de pays. Les études et scénarios collectés ont été analysés afin de constituer des fiches de synthèse identifiant les éléments majeurs qui relatent les orientations prises par les acteurs pour aboutir au scénario considéré (« facteurs moteurs ») et les conséquences qui en résultent (« variables de sortie »). Les facteurs moteurs ont été structurés en six catégories prédéfinies suivant le principe de la grille DEGEST, acronyme de six concepts intégrateurs fondamentaux dans les travaux de prospective: Démographie, Environnement, Gouvernance, Économie, Société et Technologies [4].

Une structure plus fine a également été définie à l'intérieur de ces six catégories. On parle alors de « traits ». À titre d'illustration, le facteur « Démographie » regroupe plusieurs traits comme « évolution de la population » ou « vieillissement ». Enfin, chaque trait peut, en fonction du scénario, se voir attribuer une « modalité » spécifique. Ainsi, le trait « évolution de la population » peut prendre différentes modalités (« forte croissance » ou « stagnation » par exemple). Ces trois niveaux d'analyse (facteurs, traits, modalités) permettent une caractérisation fine des différents scénarios au travers d'une structure simple et homogène. L'application de la démarche à l'ensemble des scénarios a permis d'en effectuer un « codage » systématique.

Construction et élaboration des familles de scénarios

Les deux facteurs moteurs jugés prépondérants ont été identifiés pour chaque scénario afin de les répartir au sein d'une matrice « DEGEST x DEGEST ». Chacun est placé dans la case correspondant à l'intersection du facteur moteur principal, en ligne, avec le deuxième plus important, en colonne. Le **tableau 1**, qui montre le nombre de scénarios présents dans chacune des cases de la matrice, illustre l'importance du facteur « Gouvernance » présent dans environ 70 % des scénarios analysés (40 % en premier et 30 % en deuxième). L'économie est le second facteur par ordre de fréquence avec près de 50 % des scénarios (environ 25 % comme premier ou comme deuxième) (**tableau 1**). Les visions prospectives considèrent donc que ce sont avant tout les orientations politiques ainsi que les paramètres économiques qui déterminent le choix des scénarios. En revanche, l'état de l'environnement de même que la technologie

Tableau 1 / Répartition des 307 scénarios selon leurs deux facteurs moteurs principaux.

Facteur 1 \ Facteur 2	Démographie	Environnement	Gouvernance	Économie	Société	Techno & science	Total 1
Démographie			4	6	1	1	12
Environnement		4	18	8	8	2	40
Gouvernance		13	12	48	37	15	125
Économie	3	11	37	3	10	12	76
Société	1	3	24	10		5	43
Techno & science		1	2	2	6		11
Total 2	4	32	97	77	62	35	307

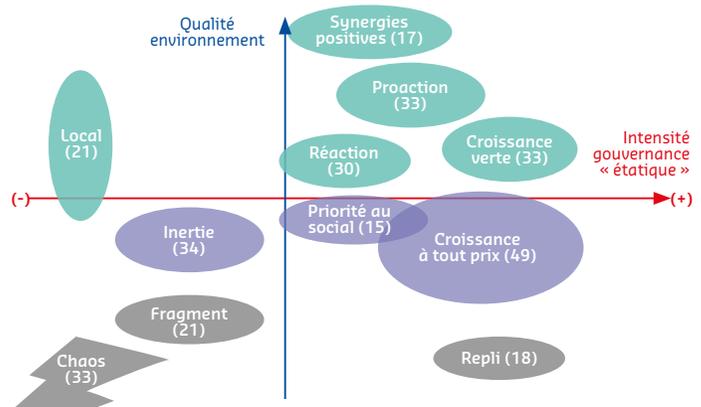
et la science ne suffisent que rarement, à eux seuls, à insuffler des changements de cap prononcés en termes de choix de société.

L'ensemble des scénarios a été analysé afin de discerner les éléments structurants et de faire émerger des « groupes de scénarios » rassemblés du fait de la similarité/ressemblance de leurs traits et modalités respectifs, c'est-à-dire associés à des visions cohérentes du futur. Onze « familles » intégratrices, regroupant chacune entre 15 et 50 scénarios, ont ainsi été identifiées, elles-mêmes se divisant en trois grands types de « trajectoires » : les familles du déclin, sans priorité pour l'environnement et avec priorité pour l'environnement (Figure 1). Au regard des axes retenus, les quadrants de droite de la figure abritent les familles portées par des politiques publiques volontaristes émanant de gouvernements centralisés. À l'inverse, ceux de gauche traduisent une gouvernance étatique fragile, voire absente, potentiellement remplacée par certaines initiatives locales. Les quadrants du haut regroupent les scénarios qui dépeignent plutôt une amélioration globale de l'état de l'environnement alors que ceux du bas traduisent sa dégradation [5]. Les familles du déclin (72 scénarios, soit 24 % du total) conduisent toutes à des futurs sombres marqués par des tensions extrêmes entre pays et/ou blocs de pays, la multiplication de conflits régionaux, voire de conflits généralisés. Elles se situent systématiquement dans les quadrants inférieurs de la Figure 1. Les familles sans priorité pour l'environnement (98 scénarios, soit 32 % du total) se caractérisent par l'absence de prise en compte du long terme dans les choix de société. Quels que soient les modes de gouvernance (autoritaires ou attentistes), les conséquences sur l'environnement sont défavorables même si la poursuite d'autres objectifs (sociaux, économiques) peut parfois contribuer indirectement à des améliorations. Enfin, les familles affichant une priorité pour l'environnement (134 scénarios, soit 44 %) se situent, pour l'essentiel, dans le quadrant supérieur droit de la Figure 1, à l'exception de la famille « Local » qui se trouve isolée vers la gauche car elle incarne une gouvernance étatique minimale. Ces familles rassemblent le plus grand nombre de scénarios sans toutefois en constituer la majorité. Pour répondre aux attentes exprimées par le conseil d'AllEnvi, le rôle particulier des facteurs « Environnement » et « Technologie et science » a été plus particulièrement analysé [6]. On retiendra notamment que l'état de l'environnement, quoique préoccupant pour l'avenir de la planète, souffre d'un déficit d'impact sur les orientations stratégiques. L'exemple réussi de la structuration d'acteurs (scientifiques, politiques, relais d'opinion) dans le domaine du climat mérite d'être considéré afin de l'étendre à d'autres compartiments stratégiques (eau, sols, risques).

ABSTRACT /

Questions regarding our planet future are crucial and foresight studies may play a key role by offering multiple and contrasting scenarios and supporting stakeholders. This may help to understand how societies can (re)define their future evolution. To contribute to the French research planning in the field of environmental sciences, a study of major international foresight visions concerning possible futures of the environment was undertaken in the framework of French National Research Alliance for Environment (AllEnvi), in which Ineris is an active member. Careful analysis of more than 300 scenarios reveals the dominance of governance and economy as driving factors to discriminate scenarios. The study identifies 11 "scenario families" that can themselves be gathered into three major groups: decline, lack of environmental priority and priority to the environment. If the first two groups consider severe degradation to the environment, the third one leads to rather encouraging results, although some orientations prove to be somewhat inefficient (notably if initiated too late). The process and results of the study have been recently published, focusing notably on the "Environment" and "science and technology" components, structuring factors for ALLENI missions.

Figure 1 / Positionnement des onze familles regroupées en trois grands types de trajectoires dans le jeu d'axes « Qualité de l'environnement » et « Intensité de la gouvernance étatique ».



Références

[1] Bezold C. 2010. Lessons from using scenarios for strategic foresight. *Technological Forecasting and Social Change*. 77(9):1513-18.

[2] Cook CN; Inayatullah S; Burgman MA; Sutherland WJ; Wintle BA. 2014. Strategic foresight: how planning for the unpredictable can improve environmental decision-making. *Trends in Ecology & Evolution*. 29(9):531-41

[3] Jouvenel H de. 2004. Invitation à la prospective. Paris: Futuribles.

[4] Cornish E. 2004. *Futuring: The Exploration of the Future*. Bethesda, Md: World Future Society

[5] AllEnvi, 2016. Visions du futur et environnement. Les grandes familles de scénarios. Analyse de perspectives internationales relatives à l'environnement. Volume 1 (rapport final) & Volume 2 (recueil des fiches). <https://www.allenvi.fr/actualites/2017/scenenvi-futurs-pour-la-planete>

[6] Didier C; de Menthère, N.; Lacroix, D; Schmitt, B. et al., 2018. Une analyse des grandes visions prospectives internationales sur le devenir de l'environnement: l'étude Scénenvi. *Responsabilité et Environnement*. Janvier 2018 - N° 89, pp. 71-81. *Annales des Mines*.



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



Une approche de l'analyse des risques des systèmes de contrôle industriels combinant sûreté et sécurité: Le cyber Nœud-Papillon _____ 30

Évaluation expérimentale de la toxicité des fumées issues de feux de véhicules — 32

Développement de méthodes de caractérisation d'incertitudes de l'exposition spatialisée _____ 34

De l'importance des composés organiques nitrés dans l'atmosphère. Caractérisation moléculaire et études de sources en air ambiant _____ 36

Évaluation des coûts et des bénéfices sanitaires de politiques de lutte contre la pollution de l'air: la chaîne de modèles Ineris _____ 38

Avancées sur la modélisation des aérosols dans le modèle CHIMERE _____ 40

Focus/Les services Copernicus Atmosphère: une approche intégrée de surveillance de la qualité de l'air en Europe _____ 42

Focus/Reconstruction de l'évolution de la qualité de l'air en Europe sur la période 1990-2010 dans le projet Eurodelta-Trends ____ 43

Hiérarchisation des déterminants de la composition atmosphérique future en Europe _____ 44

Impact de l'érosion interne sur la stabilité d'une digue: approche innovante par modélisation multiphysique de l'aléa ____ 46

Modélisation numérique explicite de l'initiation et de la propagation de fractures rocheuses _____ 48

Stockage souterrain de gaz naturel: étude du comportement d'une cavité saline en cycles rapides de soutirage ____ 50

Une approche de l'analyse des risques des systèmes de contrôle industriels

combinant sûreté et sécurité : le cyber Nœud-Papillon

Contributeur
François MASSE

Collaborateurs
Houssein ABDO

et
Jean-Marie FLAUS
(laboratoire
G-SCOP, Institut
national
polytechnique
de Grenoble)

La numérisation croissante des systèmes de contrôle, notamment dans l'industrie chimique, crée de nouvelles vulnérabilités qui peuvent être exploitées par des attaquants pour provoquer des phénomènes dangereux pour les personnes ou l'environnement. La prise en compte de ces menaces dans l'analyse des risques est donc un élément important d'une évaluation globale des risques. Cependant, la plupart du temps, la sûreté et la sécurité sont évaluées séparément et les conséquences physiques des cyberattaques sont peu étudiées. Une méthode d'analyse intégrant la cybersécurité dans l'évaluation des scénarios d'accidents industriels a donc été proposée. Au cours de la phase d'analyse détaillée des risques, cette approche combine le modèle de nœud papillon (NP), couramment utilisée pour l'analyse des risques des installations classées, et l'analyse par arbre d'attaque (AT), récemment introduite pour l'analyse de sécurité des systèmes de contrôle informatique. L'utilisation combinée de nœuds papillon et d'arbres d'attaque permet d'effectuer une étude qualitative exhaustive des scénarios de cybersécurité et des scénarios accidentels, ainsi qu'une évaluation de la probabilité de réalisation de ces scénarios.

Formalisme du modèle

L'analyse détaillée des risques fait suite à une première phase d'analyse préliminaire des risques au cours de laquelle les principaux scénarios d'accidents sont identifiés. Lors de l'analyse détaillée des risques, on cherche à décrire ces scénarios de manière complète et à les quantifier en probabilité et gravité. Pour cela, on utilise le plus souvent le formalisme des diagrammes de nœuds papillon. L'approche proposée vise à compléter l'analyse détaillée des risques en y intégrant les événements initiateurs de scénarios et les défaillances de mesures de maîtrise des risques susceptibles d'être provoqués par une cyberattaque.

Pour intégrer les cyberattaques aux nœuds papillon, nous proposons une méthode, dite ATBT (*Attack Tree Bow Tie*) (Figure 1), combinant les nœuds papillon et des arbres d'attaques permettant d'identifier des

causes malveillantes aux scénarios décrits dans les analyses de risques accidentels. Un modèle de nœud papillon décrit le scénario accidentel puis, pour chaque événement élémentaire de ce modèle lié à une défaillance d'un élément du système de contrôle industriel (dérive de capteur, fermeture de vanne...), un arbre d'attaque est développé. Celui-ci représente les différentes séquences d'actions que réaliserait un attaquant (ou agresseur) pour parvenir au déclenchement de l'évènement analysé. Cette représentation permet de lier les risques relatifs à la sécurité (malveillance) et les risques relatifs à la sûreté (accidentels).

Les événements accidentels sont décrits par :

- S_e , le scénario représentant l'évènement indésirable e , ses causes et ses conséquences de nature aléatoire (défaillances d'équipements, agressions de l'environnement, erreurs opératoires...);
- P_e , la probabilité d'occurrence de S_e ;
- X_s , la gravité des conséquences de S_e .

L'ensemble de ces scénarios est intégré dans des nœuds papillon dans le cadre de l'analyse des risques physiques.

Les arbres d'attaques représentent les différentes vulnérabilités potentiellement exploitées par un attaquant/agresseur pour produire l'effet recherché sur le système physique (c'est-à-dire les différents systèmes informatiques à corrompre pour manœuvrer une vanne par exemple). Il n'apparaît pas pertinent de caractériser les attaques par une probabilité d'occurrence, les risques liés à la sécurité sont donc décrits par :

- t_v représentant une menace ou attaque t (threat) exploitant une vulnérabilité v (description du scénario d'attaque);
- P_{t_v} la vraisemblance que la menace t exploite la vulnérabilité v , estimée à partir de la complexité de réalisation de l'attaque;
- X_{t_v} , la gravité des conséquences si t exploite la vulnérabilité v .

Les arbres d'attaques sont ensuite connectés aux nœuds papillon pour les événements initiateurs, les événements intermédiaires ou les barrières pouvant être causés par une action malveillante.

Exploitation du modèle

L'exploitation du modèle ATBT consiste à identifier les combinaisons d'évènements aléatoires et d'actions malveillantes menant à un évènement indésirable, et à évaluer le risque global selon les paramètres suivants :

- $S_{(tv,e)}$, la description du scénario pouvant résulter d'une combinaison d'incidents et d'actes malveillants ;
- $P_{(se,sa)}$ qui est la vraisemblance de l'occurrence du scénario $S_{(tv,e)}$ avec se , la vraisemblance liée à la réalisation des actes malveillants, et sa , la probabilité d'occurrence des évènements aléatoires (défaillances, agressions de l'environnement...);
- $X_{(tv,e)}$, la gravité des conséquences de $S_{(tv,e)}$.

La possibilité d'occurrence des différents scénarios est donc cotée selon un vecteur à deux dimensions : la probabilité (accidents) et la vraisemblance (réalisation d'une attaque). Chaque scénario est évalué indépendamment, trois types de scénarios sont possibles :

- des scénarios purement incidentels caractérisés uniquement par une probabilité ;
- des scénarios purement malveillants caractérisés par une vraisemblance ;
- des scénarios dus à l'occurrence simultanée d'attaques et d'évènements incidentels caractérisés par une probabilité et une vraisemblance : la vraisemblance caractérise l'attaque du système de commande et la probabilité caractérise l'occurrence de conséquences pour les personnes sachant que l'attaque a été réalisée.

Cette approche met en évidence les séquences malveillantes et permet donc d'identifier soit les systèmes de contrôle à sécuriser pour diminuer la vraisemblance soit les barrières de sécurité d'autres technologies, non vulnérables aux cyberattaques (exemple, soupape), permettant de réduire la probabilité de réussite de l'attaque.

Conclusion

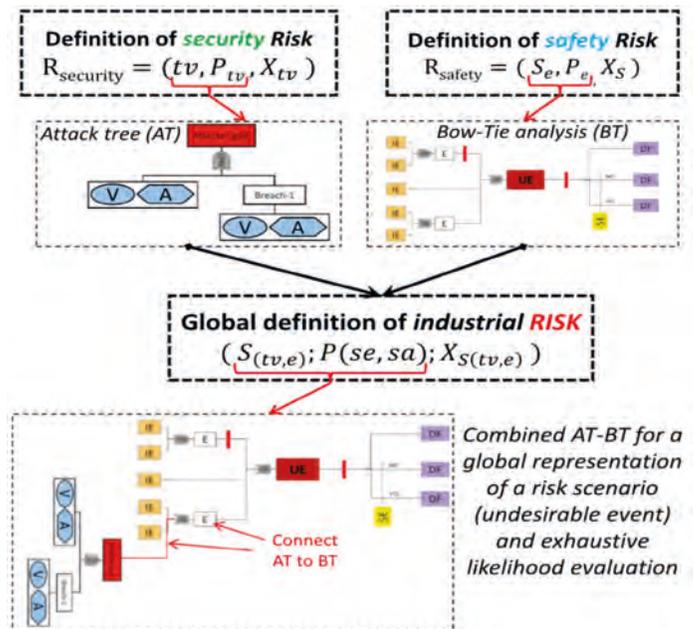
L'approche proposée vise à intégrer les causes malveillantes à l'analyse des scénarios étudiés lors de l'analyse des risques accidentels. Les travaux actuels de l'Ineris portent sur l'évaluation de nouveaux scénarios ou phénomènes dangereux propres aux cyberattaques et qui ne sont donc pas encore pris en compte dans l'analyse des risques accidentels.

ABSTRACT /

The increasing importance of digital technology in chemical process industry creates new vulnerabilities that can be exploited to provoke dangerous phenomenon fore people or environment. However, nowadays, safety and security are assessed separately and possible physical consequences of cyberattacks are not evaluated It is therefore necessary to integrate the consideration of cybersecurity in the global analysis of risks to human health and the environment. In this paper, a new method is proposed by considering safety and security for a probability evaluation during industrial risk analysis. This approach combines Bow-Tie Analysis (BT), commonly used for safety analysis and the Attack Tree Analysis (AT), recently introduced for security analysis of computer control systems.

The combined use of BT and AT provides an exhaustive qualitative investigation of security and safety scenarios, and a qualitative evaluation of the likelihood of these scenarios. The definition of ATBT combined model is presented.

Figure 1 / Présentation générale du modèle ATBT [1].



Référence

[1] Abdo H.; Kaouk M.; Flaus J.-M.; Masse F. A safety / security risk analysis approach of Industrial Control Systems: A cyber bowtie - combining new version of attack tree with bowtie analysis. Computers & Security, 2017, 72: p. 175-195

Évaluation expérimentale de la toxicité des fumées issues de feux de véhicules

Contributeurs

Benjamin
TRUCHOT,

Fabien
FOUILLEN,

Serge COLLET

Le risque associé aux feux de véhicules, notamment dans les espaces confinés, impose de prendre en considération à la fois les aspects thermiques et toxiques. Certaines données relatives à de tels incendies étant aujourd'hui assez anciennes, il est pertinent de les revoir en considérant les évolutions des véhicules et de leurs nouvelles énergies de propulsion.

Objectif des essais

À ce jour, la littérature relative aux courbes de puissances [1] et aux émissions toxiques [2] s'appuie sur des modèles relativement anciens de véhicules, de type fin des années 1980. Le premier objectif des essais réalisés ces dernières années était donc de vérifier que les valeurs mesurées sur les véhicules récents restaient en cohérence avec les

données existantes, tant sur le plan du dégagement d'énergie que de celui des émissions toxiques (nature et concentration) ou encore de l'effet d'un incendie sur la perte de visibilité. De plus, afin de mieux caractériser les émissions toxiques liées aux feux de véhicules, des essais ont été réalisés par l'Ineris à l'échelle des différents éléments combustibles afin d'évaluer leur contribution à la toxicité globale.

Essais de combustion des éléments individuels

Les essais de caractérisation au feu de combustibles élémentaires (pneumatiques, plastiques...) ont été réalisés dans la chambre de 80 m³ de l'Ineris. Les conditions de ventilation pour ces essais ont été choisies afin d'assurer une bonne ventilation du

Figure 1 / Galerie incendie (premier plan) et système de traitement de fumées (arrière-plan).



foyer, les éléments combustibles étaient placés dans un bac au centre de la chambre et enflammés par un brûleur propane appliqué pendant une minute. Différents types de combustibles ont été testés, en particulier des plastiques, pneus et câbles électriques, ces éléments provenant tous de véhicules réels disponibles sur le marché. Les modalités de mise en œuvre et les résultats de ces essais sont détaillés dans la publication [3]. Parmi les principales conclusions, précisons que ces essais permettent de mettre en évidence la spécificité de certains combustibles, les pneumatiques par exemple qui sont sources d'émission de SO₂ ou encore le rôle des câbles électriques dans les émissions d'HCl comme cela est déjà mentionné dans la référence [2].

Essais à l'échelle des véhicules

Les résultats synthétisés ici proviennent de différentes campagnes d'essais sur plusieurs types de véhicules, de la petite citadine à la berline familiale. Ces essais ont été réalisés dans la galerie incendie de l'Ineris (Figures 1 et 2), de 10 m² de section et 50 m de longueur. L'intérêt principal de ces installations est de posséder un système de traitement de fumées permettant de traiter l'ensemble des effluents avant remise à l'atmosphère. Un tel système permet ainsi de capturer aussi bien les polluants présentant une toxicité aiguë que les émissions chroniques (HAP, dioxines...) [4].

Le principal résultat de ces différentes campagnes est le maintien, malgré l'évolution en masse et en équipement des véhicules, d'un pic de puissance similaire à ce qui existe dans la littérature [1]. Le pic de puissance varie ainsi de 4 MW pour un petit véhicule à 8 MW pour un véhicule de type berline familiale. L'énergie totale dégagée par ces feux de véhicule reste également dans une gamme comparable à celle des véhicules plus anciens, entre 6 000 et 10 000 MJ. À noter que les résultats obtenus pour des véhicules électriques équipés de batteries Li-Ion, ne modifient en rien les conclusions relatives aux valeurs de puissance et d'énergie dégagée. Ces résultats obtenus par l'Ineris [5] ont par ailleurs été confirmés par d'autres campagnes d'essais à grande échelle sur des véhicules électriques [6].

Enfin, concernant la toxicité des fumées, les essais ont mis en évidence la présence des mêmes composés toxiques que ceux mesurés sur des véhicules plus anciens avec une quantité totale produite du même ordre de grandeur, à l'exception de l'acide fluorhydrique (HF) qui est produit en quantité plus importante, tant pour les véhicules thermiques de nouvelle génération que pour les véhicules électriques [5]. Les essais relatifs aux véhicules électriques mettent en évidence une contribution négligeable des batteries sur les émissions de HF.

ABSTRACT /

Improving fire modelling is a key issue to design efficient safety measures for a safe people evacuation in case of fire. Such an analysis should consider the different impacts of fire on people as temperature, visibility but also toxicity. Most of the standard curves used in tunnel fire studies are based on quite old fire tests without any detailed toxic gas qualification. Very few fire tests were published in that way. Based on such tests, some standard fire emission factors are available in the literature. The objective of this paper is to review those emission factors considering the different toxic species and dealing with using recent cars. To meet this objective, two series of tests were performed. The first concerns individual combustible materials of cars as plastics and tyres. The second focusses on full car burning tests including a detailed smoke analysis. Those two series of tests lead to an analysis of the smoke toxicity and a comparison between emission factors and standard ones.

Figure 2 / Essai à l'échelle d'un véhicule.



Références

- [1] PIARC Committee on road tunnels. Fire and smoke control in road tunnels (1999).
- [2] Lonnermark A.; Blomqvist P. Emissions from an automobile fire, *Chemosphere* 62(7) (2006).
- [3] Collet S. Amélioration de la connaissance des émissions atmosphériques liées aux brûlages de véhicules contribution de cette source à l'inventaire national d'émission – Synthèse (2013).
- [4] Truchot B. in *Fire Safety Sciences News* n°38 (2015).
- [5] Lecocq A.; et al, Comparisons of fire consequences of an electrical vehicle and an internal combustion engine vehicle. Second International Conference on Fire in Vehicles, September 27-28, 2012, Chicago, USA.
- [6] Lam C.; MacNeil D.; Kroeker R.; Loughheed G. and Lalime G.; Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles, Fourth International Conference on Fire in Vehicles, October 5-6, 2016, Baltimore, USA.

Développement de méthodes de caractérisation d'incertitudes de l'exposition spatialisée

Contributeur
Julien
CAUDEVILLE

La dose journalière d'exposition (DJE) représente la quantité de substances chimiques inhalée ou/et ingérée par un individu à partir de différents milieux avec lesquels l'individu est en contact (eau, air, sol, nourriture). Les populations peuvent être exposées aux substances *via* de multiples sources, soit locales, soit ubiquitaires. Différentes catégories d'individus peuvent être prises en compte, chacune étant caractérisée par des propriétés physiologiques et des comportements, notamment alimentaires, différents.

L'application de l'analyse probabiliste à l'évaluation des risques sanitaires et au traitement de l'incertitude a été introduite dans les années 2000 (EPA, 2001). Elle permet le calcul des probabilités de dépassement d'un niveau de risque préoccupant, compte tenu de la variabilité ou de l'incertitude estimée des paramètres de calcul de la DJE. Cette analyse peut être mise en œuvre pour fournir des informations supplémentaires importantes et utiles pour l'aide à la décision en termes de gestion des risques. Cette démarche, fondée sur le niveau d'exposition, permet d'évaluer des niveaux de risque en propageant l'incertitude *via* l'ensemble des chaînes de modélisation notamment dans le cadre de couplage entre modèle d'exposition et modèle pharmacotoxocinétique (de type PBPK) (Figure 1).

L'incertitude sur les données d'entrée (concentrations environnementales spatialisées) et les paramètres de modélisation (facteurs de transfert et comportement alimentaire) qui déterminent le résultat du modèle peut avoir deux origines. La première source d'incertitude provient du caractère aléatoire de l'information qui est dû à une variabilité naturelle résultant de phénomènes stochastiques. On parle alors d'incertitudes de variabilité ou d'incertitudes stochastiques. La seconde source d'incertitude est liée au caractère imprécis et incomplet de l'information en raison d'un manque de connaissance. On parle alors d'incertitudes épistémiques.

Matériels et méthodes

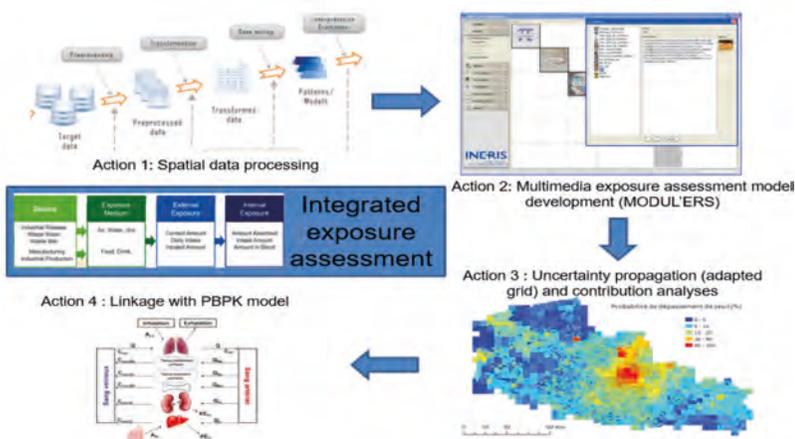
Dans le cadre de l'utilisation de données *via* le couplage d'une représentation spatiale et d'une modélisation de l'exposition, un premier examen consiste en une analyse de la propagation des incertitudes au cours des différents traitements réalisés dans le système d'information géographique couplé à un logiciel statistique (incertitudes sur les données, paramètres et modèles utilisés). Il s'agit d'estimer les distributions sur les paramètres et les données d'entrée sensibles au modèle, puis d'estimer leur cumul.

L'incertitude est appréhendée dans un cadre purement probabiliste. C'est-à-dire que l'information sur les paramètres des modèles est généralement supposée de nature aléatoire. Cette approche consiste à représenter les paramètres incertains par des distributions de probabilités et à transmettre l'incertitude relative à ces paramètres sur celle de l'exposition de la cible.

Par exemple, en l'absence de modèles mécanistiques adéquats et en raison de la difficulté à renseigner les paramètres de ces modèles, le recours à des coefficients de transfert des substances est classiquement utilisé pour modéliser le transfert de la source vers la cible. La modélisation est réalisée à l'aide d'un modèle simple qui fait appel à des rapports de concentrations entre les différents compartiments environnementaux pondérés par des distributions statistiques. Il est également possible d'intégrer des paramètres comportementaux des populations (comme les quantités de sol journalièrement ingérées non intentionnellement) sous forme de distributions statistiques.

Les travaux sur le plomb permettent d'illustrer les différentes techniques adoptées pour traiter

Figure 1 / Différentes étapes d'analyse de l'évaluation de l'exposition intégrée. Source: Ineris



spécifiquement les différentes bases de données environnementales spatialisées.

La sélection d'une méthode de traitement dépend du problème à résoudre et de la qualité des données disponibles, des supports géographiques, de la représentativité spatiale des données et de l'existence de potentielles variables de prédiction supplémentaires permettant une meilleure caractérisation des concentrations environnementales.

Résultats et discussion

L'ensemble des traitements de spatialisation aboutit à la création d'une base de données dans laquelle sont présentes les variables d'entrée du modèle dans les mêmes unités spatiales (grille de référence) et temporelles, ou pour le moins comparables.

Les cartographies des estimations de concentrations dans les sols et dans l'air et des variances de krigeage sont estimées à partir de méthodes géostatistiques. Concernant les concentrations mesurées dans l'eau, des méthodes d'imputations multiples et des méthodes bayésiennes couplées permettent de contourner les problèmes des valeurs inférieures aux limites de quantification en exploitant les corrélations avec des représentations d'autres contaminants mieux connues. Des travaux sur l'exposition au plomb ont permis d'intégrer les variabilités de paramètres environnementaux, comportementaux, et les variances des estimateurs des concentrations de polluants dans les différents milieux environnementaux dans le calcul de l'exposition par des méthodes de simulation de Monte Carlo. Dans le cadre de leur utilisation dans un cadre opérationnel (action de réduction de l'exposition dans les Plans Régionaux Santé Environnement par exemple), la nécessité de construire des variables continues sur l'ensemble de la zone à partir de données non exhaustives génère des incertitudes liées aux différents problèmes de représentativité des données. Selon la densité d'information relative à partir de laquelle la variable est construite, les zones sont plus ou moins bien caractérisées. Il devient alors possible de fournir des éléments permettant d'évaluer la contribution des incertitudes des différents maillons de la chaîne de calcul sur l'incertitude globale.

Ces cartes permettent également d'identifier une stratégie de collecte de données supplémentaires ou de nouvelles campagnes de terrain dans les zones de densité d'information faible ou celles dont une surexposition de la population est suspectée. Par exemple, la **Figure 2** présente l'incertitude (variance de krigeage) des concentrations de plomb dans les sols de surface). Les classes présentant des valeurs élevées correspondent aux zones pour lesquelles l'information disponible est la plus lacunaire. Associée à la localisation des sites potentiellement pollués (base

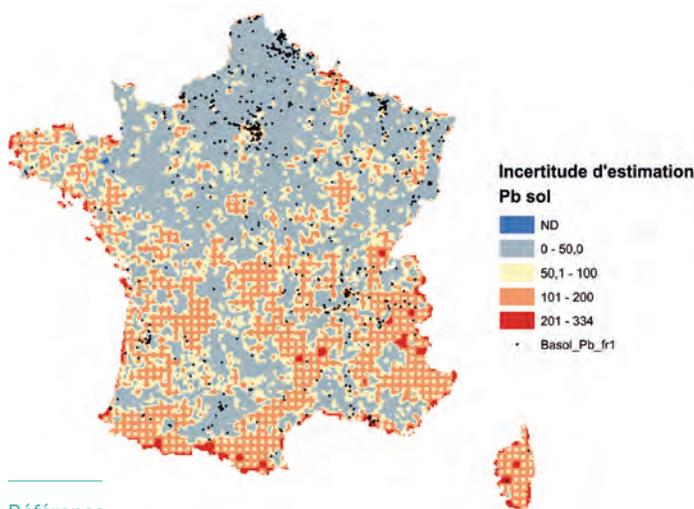
ABSTRACT /

Exposure estimates can be calculated using crisp estimates of the exposure explanatory variables (i.e., contaminant concentration, contact rate, exposure frequency and duration, body weight, and averaging time). However, aggregate and cumulative exposure studies require a better understanding of exposure explanatory variables as well as uncertainty and variability associated with them. Probabilistic risk assessment studies use probability distributions for one or more variables of the risk equation to quantitatively characterize variability and uncertainty.

Monte Carlo Analysis is one of the useful approaches that may be used to conduct probabilistic risk assessment studies. In this analysis, the most sensitive variables of the exposure equation along with the parameters of these variables are described in terms of probability density functions (PDFs). Statistical methods are employed to process input databases (populational behavior, environmental concentrations in water, air and soil) in the objective of characterizing the exposure. A multimedia model interfaced with a GIS, allows the integration of environmental variables in order to yield exposure doses related to ingestion of food, water and soil and inhalation. The methodology was applied to the lead pollutant and permits to illustrate how to propagate uncertainty among the whole modeling chain.

de données BASOL), cette carte permet de prioriser l'acquisition des données les plus importantes pour améliorer la représentativité spatio-temporelle des inégalités environnementales.

Figure 2 / Variance d'estimation des concentrations de plomb en mg/kg dans les sols de surface et localisation des sites potentiellement pollués au plomb de la base BASOL (points noirs sur la carte).



Référence

Ioannidou D.; Malherbe L.; Beauchamp M.; Saby N.; Bonnard R. and Caudeville J. Characterization of environmental health inequalities due to Polyaromatic Hydrocarbons exposure in France. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, 2680; doi:10.3390/ijerph15122680

De l'importance des composés organiques nitrés dans l'atmosphère.

Caractérisation moléculaire et études de sources en air ambiant

Contributeurs

Alexandre
ALBINET,
Olivier FAVEZ,
Deepchandra
SRIVASTAVA,
Sophie TOMAZ

La pollution due aux particules atmosphériques (aérosols, PM) est à l'origine d'importantes problématiques sanitaires et climatiques. La connaissance et l'évaluation de la contribution de leurs sources constituent ainsi un enjeu capital en termes de politiques de gestion de la qualité de l'air. Parmi ces particules, la fraction organique est d'un intérêt majeur notamment car elle contient des composés toxiques tels que les nitro-HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) dont les effets sur la santé sont encore mal connus. De plus, ces composés organiques absorbent une partie du rayonnement solaire et ont un effet sur le bilan radiatif, dont l'importance reste mal évaluée. Les travaux menés par l'Ineris ont permis de réaliser une évaluation approfondie des sources des PM et notamment d'une partie de la fraction organique nitrée. Une meilleure connaissance de l'origine des aérosols organiques (AO), qui représentent une part importante de la masse totale des particules fines dans l'atmosphère (de 20 à 90 % dans la basse troposphère), a pu être obtenue à l'aide de marqueurs organiques moléculaires quantifiés sur des échantillons collectés *in situ* et par couplage avec des données de mesures en temps réel par spectrométrie de masse aérosol.

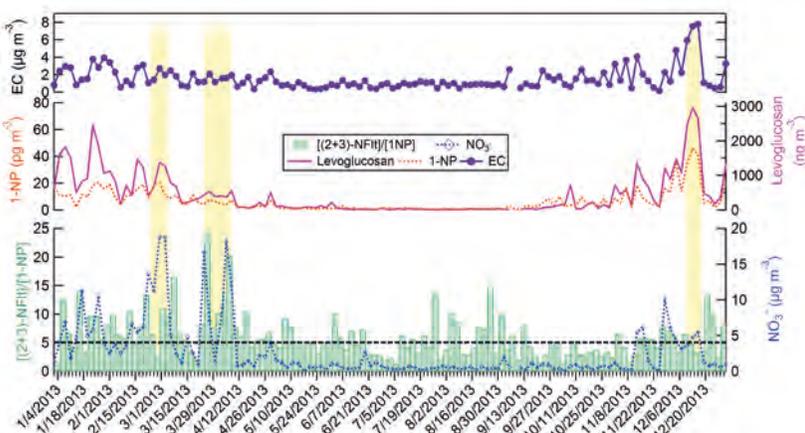
Méthode

Des études de terrain ont été conduites à Grenoble, sur toute l'année 2013 (prélèvements de 24 heures, 1 jour/3) et sur le site du SIRT, (25 km au sud-ouest de Paris, représentatif de la pollution en Ile-de-France) lors d'un épisode de pollution aux particules ($PM_{10} > 50 \mu g \cdot m^{-3}$ sur plusieurs jours consécutifs) en mars 2015 (prélèvements toutes les 4 heures et mesures en temps réel, notamment avec un *Aerosol Chemical Speciation Monitor* - ACSM). Les échantillons de particules PM_{10} collectés en collaboration avec Atmo Auvergne Rhône-Alpes et le LSCE, ont été caractérisés chimiquement de façon détaillée (jusqu'à 200 espèces mesurées, incluant une grande variété de HAP et leurs dérivés nitrés et oxygénés) en partenariat avec les laboratoires IGE, EPOC, LCME, LSCE, IMT-Lille Douai et l'université de Florence. L'étude des sources de PM par modèle source-récepteur (*Positive Matrix Factorization* - PMF) sur la matrice de données unifiée (filtres et ACSM) utilisant un script de synchronisation de celles-ci, a été réalisée pour le site du SIRT.

Résultats

À Grenoble, la détermination des sources de HAP nitrés dans l'atmosphère et notamment de leurs origines primaire et/ou secondaire a été réalisée. La mesure sur une année entière du rapport (2+3)-nitrofluoranthène ((2+3)-NF) / 1-nitropyrene (1-NP), utilisé pour estimer leur origine primaire ((2+3)-NF/1-NP < 5) ou secondaire ((2+3)-NF/1-NP > 5) a permis d'identifier des périodes favorables à la formation de ces composés par des processus de chimie secondaire (Figure 1). Sur l'ensemble de l'année 2013, les valeurs de cet indicateur sont parfois plus importantes qu'attendues, indiquant la présence de processus de formation secondaires en été mais aussi une forte contribution de ces processus en fin d'hiver et début de printemps. Ce dernier résultat peut notamment être expliqué par la concomitance de fortes émissions liées aux activités humaines (transport routier, combustion de biomasse) et le redémarrage de l'activité photochimique. Au SIRT, lors de l'épisode de pollution en mars 2015, l'analyse PMF combinée a conduit à l'obtention

Figure 1 / Évolution temporelle du rapport (2+3)-nitrofluoranthène/1-nitropyrene avec la composition chimique des PM_{10} , le levoglucosan (combustion bois), le nitrate (NO_3^-), le carbone élémentaire (EC) et le 1-nitropyrene (1-NP, nitro-HAP primaire véhiculaire diesel) sur le site de fond urbain de Grenoble - Les Frênes pour l'année 2013. Les zones en jaune montrent les périodes d'épisodes de pollution aux PM.



de 10 facteurs de sources d'AO, dont 3 facteurs primaires et 7 facteurs secondaires (Figure 2). Cette nouvelle méthode a permis de mettre en évidence que 4 facteurs de sources d'AO étaient liés aux émissions de la combustion de biomasse avec 2 sources primaires (AO combustion de biomasse (BBOA) et AO primaires oxydés (OPOA)) et 2 facteurs secondaires (ASOA-3 et ASOA-4, en lien avec l'oxydation d'émissions gazeuses par le chauffage au bois). Environ 12 % de l'aérosol organique total (30-40 % de PM_{10}) était directement lié à l'oxydation des HAP (caractérisé par les nitro-HA, ASOA-4), du toluène (ASOA- 2) et des composés phénoliques (caractérisés par les méthy-nitrocatechols, ASOA-3), avec des variations journalières indiquant un rôle majeur de la chimie nocturne impliquant le radical nitrate (NO_3). Enfin, une part importante (environ 1/3) n'a pu être encore résolue (AOS-5) et est probablement en lien avec des espèces non prises en compte telles que les organonitrates ou organosulfates.

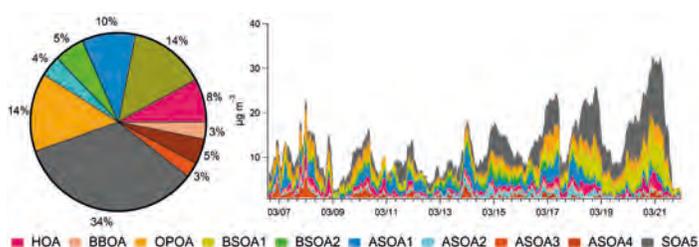
Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus à Grenoble et au SIRTa indiquent l'importance des composés nitrés dans la fraction organique de l'aérosol. La nouvelle approche de combinaison des données temps réel (ACSM) et filtres (marqueurs moléculaires organiques) développée permet d'obtenir une meilleure compréhension des processus chimiques liés aux différentes sources de l'AO. Les processus de formation d'organonitrates seront investigués plus en détail lors de futurs travaux de recherche, notamment lors de la 2^e phase de l'intercomparaison du projet ACTRIS (*European Research Infrastructure for the observation of Aerosol, Clouds, and Trace gases*) des ACSM organisée par l'ACMCC (Aerosol Chemical Monitor Calibration Centre, LSCE/Ineris) de novembre à décembre 2018.

ABSTRACT /

A detailed study of the nitrogen content organic compounds in PM, including source apportionment, has been performed over a one-year period (2013) in Grenoble (France) as well as at the SIRTa station, representing the suburban background air quality conditions of the Paris area, during an intense PM pollution event in March 2015 ($PM_{10} > 50 \mu g m^{-3}$ for several days). For Grenoble, the results obtained indicated that concentrations of nitro-PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) were affected by secondary processes in summer but also in cold period under specific conditions, allowing for significant nitrate chemistry and secondary nitro-PAH formation processes. For the SIRTa dataset, a novel methodology has been developed and applied to refine the sources of organic aerosol (OA) combining dataset from ACSM (aerosol chemical speciation monitor) mass spectra and specific primary and secondary organic molecular markers from PM_{10} filters. The results showed the deconvolution of 10 OA factors including 3 primary OA (POA) and 7 secondary OA (biogenic and anthropogenic SOA) factors. The developed methodology allowed the clear identification of about half of the total SOA mass (75% of OA) observed during the sampling campaign and highlighted that 4 OA factors were linked to biomass burning emission with 2 primary sources (biomass burning OA (BBOA) and oxidized POA (OPOA)) and 2 secondary ones (from the oxidation of phenolic compounds and toluene). Furthermore, nitrated anthropogenic SOA, related to the oxidation of PAHs (characterized by nitro-PAHs), toluene, and phenolic compounds (methoxy-phenols), accounted for about 12% of total OA and exhibited a clear diurnal pattern with high concentrations during the night indicating the prominent role of night-time chemistry (nitrate radical). Future studies will focus on the organonitrate aerosol fraction starting by an intercomparison exercise of ACSM instruments end 2018 led by the ACMCC within the ACTRIS network activities.

Figure 2 / Contributions moyennes (gauche) et évolution temporelle (droite) des différentes sources d'AO identifiées à Paris-SIRTa (mars 2015). HOA : émissions primaires trafic; BBOA : combustion de biomasse OA; OPOA : AO primaire oxydé; BSOA-1 : AOS biogénique 1 (marin enrichi); BSOA-2 : AOS biogénique 2 (oxydation de l'isoprène); ASOA-1 : AOS anthropique 1 (HAP oxygénés); ASOA-2 : AOS anthropique 2 (HAP nitrés); ASOA-3 : AOS anthropique 3 (oxydation des composés phénoliques); ASOA-4 : AOS anthropique 4 (oxydation du toluène) et SOA-5 (AOS 5).



Références

Tomaz S.; Jaffrezou J.-L.; Favez O.; Perraudin E.; Villenave E. and Albinet A.: Sources and atmospheric chemistry of oxy- and nitro-PAHs in the ambient air of Grenoble (France), *Atmospheric Environment*, 161, 144–154, 2017.

Srivastava D. Improving the discrimination of primary and secondary sources of organic aerosol: use of molecular markers and different approaches. Thèse de doctorat, université de Bordeaux/Ineris, 2018.

Évaluation des coûts et des bénéfices sanitaires de politiques de lutte

contre la pollution de l'air : la chaîne de modèles Ineris

Contributeurs

Simone
SCHUCHT,

Augustin
COLETTE,

Jean-Marc
BRIGNON,

Bertrand
BESSAGNET,

Laurence ROUÏL

Une chaîne de modèles intégrés a été développée et mise en œuvre à l'Ineris pour évaluer les politiques de lutte contre la pollution atmosphérique en termes de coûts des actions, de leurs effets sur la qualité de l'air et des bénéfices sanitaires associés. Elle permet de quantifier puis de monétariser les effets sanitaires de politiques publiques caractérisées par des jeux de mesures complexes (scénarios) ou des mesures individuelles de réduction des émissions atmosphériques. Elle permet également de tenir compte de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air pour des scénarios de plus long terme. Cette chaîne de calcul a été utilisée dans différents cadres d'applications, tant dans des études d'appui aux pouvoirs publics au niveau national (notamment le Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques ou PREPA, adopté pour la période 2017-2021, cf. décret et arrêté du 10 mai 2017), que dans des projets de recherche plus prospectifs au niveau national et européen (projets PRIMEQUAL) [1].

Méthode

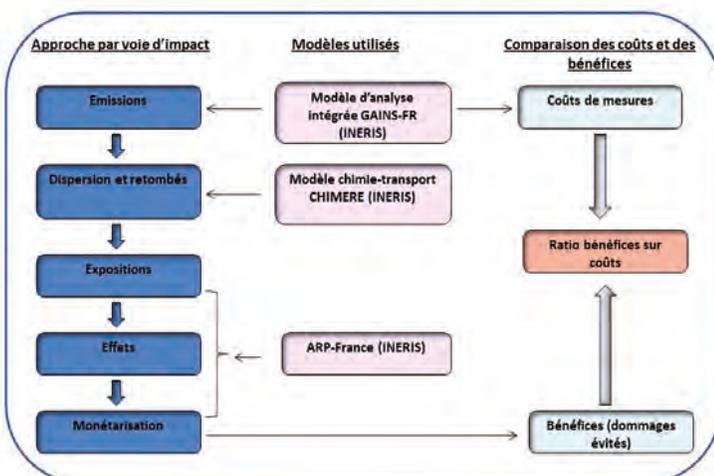
L'analyse des impacts sanitaires de la pollution de l'air se base sur l'approche dite par voie d'impact, illustrée par la **Figure 1 (colonnes 1 et 2)**.

Cette analyse prend comme point de départ les niveaux d'émissions actuels et futurs par secteur d'activité qui peuvent être obtenus dans le modèle GAINS-FR, la version française du modèle GAINS (*Greenhouse Gas - Air Pollution Interactions and Synergies model*, [2]) développé par l'IIASA¹. Les informations sur les émissions peuvent également être fournies par des inventaires ou projections nationales, tels que ceux développés par le CITEPA². Les émissions totales de polluants primaires par secteur sont ensuite spatialisées sur la région étudiée. Pour la France, cette étape se base sur les données de l'Inventaire national spatialisé des émissions atmosphériques dont l'Ineris assure la gestion et la mise à jour à la demande du ministère en charge de l'écologie. La dispersion des polluants gazeux et particulaires et leurs transformations chimiques dans l'atmosphère sont modélisées par le modèle de chimie-transport CHIMERE (codéveloppé par l'Ineris et l'IPSL/CNRS). Ce modèle permet, à partir de données d'émissions primaires, de données météorologiques caractérisant la période d'étude et de la connaissance de la pollution atmosphérique aux limites du domaine d'étude, de calculer les concentrations atmosphériques de dizaines de polluants (gaz et aérosols) sur des domaines d'étendues variées (de quelques dizaines à des milliers de kilomètres).

Ces champs de concentrations de polluants sont croisés avec les densités d'habitants pour en déduire des expositions moyennes de la population aux PM_{2,5}, à l'ozone et au NO₂. Ce sont les données d'entrée du modèle de quantification et monétarisation des impacts sanitaires Alpha-RiskPoll-France (ARP-FR) licence française d'un outil développé par M. Holland et J. Spadaro (EMRC) pour la Commission européenne [3, 4].

Les effets de la pollution de l'air sur la santé – en termes de mortalité et de différents indicateurs de morbidité (bronchite, admissions à l'hôpital pour causes respiratoires et cardiovasculaires, journées d'activité restreinte, journées de travail perdues...) – sont calculés à l'aide de fonctions concentration-réponse liant des niveaux d'exposition aux polluants à des impacts sanitaires spécifiques. La quantification des effets sanitaires est spécifique aux classes

Figure 1 / Approche utilisée pour la quantification puis la monétarisation des effets sanitaires de la pollution atmosphérique et pour des analyses coûts/bénéfices.



d'âges pour lesquelles les fonctions concentration-réponse ont été développées sur la base d'études épidémiologiques. Le modèle ARP-FR contient des bases de données avec des projections démographiques pour les pays européens, déclinées en fonction des classes d'âges des différents indicateurs sanitaires. Le modèle intègre des valeurs unitaires monétaires pour les différents effets sanitaires, ce qui permet d'attribuer une valeur monétaire globale aux effets sanitaires modélisés. La comparaison entre deux scénarios permet de calculer les effets sanitaires évités par la mise en place de mesures de réduction de la pollution atmosphérique et ainsi de quantifier les bénéfices sanitaires de ces mesures. Lorsque les résultats du modèle ARP-FR sont utilisés à des fins d'analyses coûts-bénéfices, les résultats monétaires sont comparés aux informations sur les coûts de mesures ou de scénarios de réduction des émissions, venant par exemple du modèle GAINS-FR ou estimés par des experts (Figure 1, colonne 3).

Résultats

Cette chaîne de modèles a été mise en œuvre dans des projets récents de recherche et d'appui auprès du ministère qui ont permis d'établir, entre autres, que :

- les coûts de politiques ambitieuses de lutte contre le changement climatique peuvent être compensés par les co-bénéfices qu'elles génèrent en termes d'amélioration de la qualité de l'air et donc de coûts sanitaires évités, et en termes d'économies réalisées sur les politiques de lutte contre la pollution atmosphérique [5, 6];
- il y a des bénéfices pour la France d'une coopération européenne dans la lutte contre la pollution atmosphérique. En effet, la France gagne presque autant en termes de coûts sanitaires évités par la mise en œuvre de la nouvelle directive sur les plafonds nationaux d'émissions³ par les autres pays de l'UE28 que par la mise en œuvre de cette directive en France. Par ailleurs, les seuls bénéfices sanitaires calculés pour la France excèdent les coûts des mesures de réduction des émissions de notre pays [7].

La chaîne a par ailleurs été utilisée pour établir la performance coûts/bénéfices en France d'une cinquantaine de mesures de réduction des émissions dans le cadre du projet « Aide à la décision pour l'élaboration du PREPA », le Programme national de réduction des émissions de polluants atmosphériques qui a fait l'objet d'un nouvel arrêté dans la réglementation française publié le 10 mai 2017.

ABSTRACT /

An integrated modelling chain capable of evaluating air pollution policies with respect to their costs, their impacts on air quality and associated health effects was developed and implemented at Ineris. It allows quantifying and monetising health effects of both complex sets of emission reduction measures (policy scenarios) and individual measures, and also taking into account the air quality impact of climate change.

The modelling chain is based on the Impact Pathway Approach which follows a logical progression from emission, through dispersion and exposure to quantification of impacts and their valuation. Three models form the core of the modelling chain: the integrated assessment model GAINS-FR, the chemistry-transport model CHIMERE and the health impact analysis tool ARP-FR. GAINS provides information on emission reductions and costs of air pollution mitigation strategies. CHIMERE allows calculating these strategies' effect on air quality, and ARP-FR serves to assess benefits in the form of avoided health effects. In cost-benefit analyses, the health benefits are put into perspective with information on the costs of emission reduction measures and/or scenarios. The modelling chain has been used in studies providing support to decision makers as well as in research projects [1].

Références

- [1] Schucht S.; Colette A.; Brignon J.-M.; et al. 2017, Aide aux décideurs - Évaluation des coûts et des bénéfices sanitaires de politiques de lutte contre la pollution de l'air, *Pollution atmosphérique* [En ligne], N°235 Juillet - Septembre 2017.
- [2] Amann M.; Bertok I.; Borken-Kleefeld J. et al., 2011, Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications. *Environmental Modelling and Software*, 26, 1489-1501.
- [3] Holland M.; 2014: Cost-benefit Analysis of Final Policy Scenarios for the EU Clean Air Package, version 2, Corresponding to IASA TSAP Report n° 11, Version 1, EMRC.
- [4] Amann M.; Holland M.; Maas R. et al., 2017, Costs, benefits and economic impacts of the EU Clean Air Strategy and their implications on innovation and competitiveness. IASA report. (<http://gains.iiasa.ac.at>)
- [5] Colette A.; Schucht S.; Bessagnet B. et al., 2015 : Évaluation des Stratégies de LUTte contre la pollution de l'AIR à longue distance dans le contexte du changement climatique, Assessing Long Term Air Quality Mitigation Strategies in the Face of Long Range Transport and Climate Change, Programme PRIMEQUAL 2, Rapport de fin de contrat (révisé).
- [6] Schucht S.; Colette A.; Rao S. et al., 2015: Moving towards ambitious climate policies: monetized health benefits from improved air quality could offset mitigation costs in Europe, *Environmental Science and Policy*, 50, 252-269.
- [7] Schucht S.; & Colette A.; 2014 : Les bénéfices sanitaires pour la France de la mise en œuvre de la nouvelle directive NEC en France et en Europe excèdent les coûts de réduction des émissions atmosphériques, note Ineris n° DRC-14-141718-09919A.

¹ International Institute for Applied Systems Analysis

² Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (<https://www.citepa.org/fr/>).

³ Directive (EU) 2016/2284 du Parlement européen et du Conseil du 14 décembre 2016 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques, modifiant la directive 2003/35/CE et abrogeant la directive 2001/81/CE.

Avancées sur la modélisation des aérosols dans le modèle CHIMERE

Contributeurs

Florian
COUVIDAT,

Bertrand
BESSAGNET,

Elsa REAL,

Augustin
COLETTE

L'unité de modélisation atmosphérique et cartographie environnementale de l'Ineris développe et met en œuvre le modèle de chimie-transport CHIMERE pour ses missions d'appui aux politiques publiques, de recherche et ses activités d'expertise. La partie la plus visible de la modélisation de la qualité de l'air concerne la plateforme nationale de prévision de la qualité de l'air PREV'AIR coordonnée par l'Institut en collaboration avec Météo France, le CNRS et le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air. PREV'AIR met à disposition des prévisions à courte échéance (de l'ordre de quelques jours), mais les modélisations CHIMERE servent aussi à évaluer l'efficacité des politiques de gestion de la qualité de l'air que ce soit en rétrospectif (pour des analyses de tendances) ou en projection pour évaluer l'amélioration de qualité de l'air qui est attendue en termes de baisses d'émissions programmées, comme cela avait été fait pour le Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques - PREPA adopté pour la période 2017-2021 (décret et arrêté du 10 mai 2017). CHIMERE est un modèle déterministe qui résout les équations régissant le transport et l'évolution physico-chimique des particules en utilisant en entrée les données de flux d'émissions induits principalement par les activités humaines et les champs météorologiques qui influent sur l'accumulation et la dispersion des polluants.

Les particules dans l'atmosphère

Les particules sont de la matière condensée (solide ou liquide) en suspension dans l'atmosphère. Elles sont constituées par un mélange complexe de

composés organiques ou inorganiques pouvant avoir des sources anthropiques (industries, chauffage au bois, trafic routier ou non routier, agriculture) ou naturelles (sels marins, poussières désertiques) et peuvent être à la fois primaires (directement émises sous forme de particules) ou secondaires (formées par réaction chimique dans l'atmosphère).

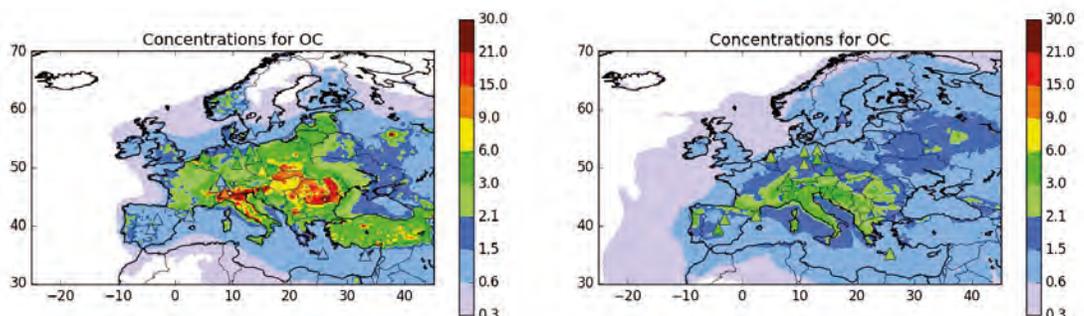
Les particules sont séparées en fonction de leur diamètre aérodynamique: les PM_{10} (particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à $10 \mu m$) et les $PM_{2,5}$ (particules dont le diamètre est inférieur à $2,5 \mu m$). On distingue aussi les nanoparticules de diamètre inférieur à 100 nm . Les particules grossières (diamètre entre $2,5$ et $10 \mu m$) ont des durées de vie faibles dans l'atmosphère car elles se déposent rapidement. Au contraire, les $PM_{2,5}$ se déposent lentement et peuvent rester en suspension dans l'atmosphère pendant plusieurs jours et se transformer.

La multitude des phénomènes microphysiques et chimiques intervenant dans la formation des particules (nucléation, coagulation, condensation/évaporation, oxydation en phase gazeuse et dans la phase aqueuse des nuages) rend la modélisation des particules particulièrement complexe.

Développement d'un nouveau module d'aérosol

Depuis une quinzaine d'années, l'Ineris participe activement au développement du module d'aérosol de CHIMERE en collaboration avec le Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS et de l'École polytechnique. Récemment, une mise à jour du module d'aérosol a été réalisée pour prendre en compte les avancées scientifiques les plus récentes.

Figure 1 / Concentrations de carbone organique ($\mu g/m^3$) simulé par le modèle CHIMERE sur les mois de janvier et juillet 2013. Les triangles correspondent aux valeurs mesurées sur site.



Ce module d'aérosol est développé en partenariat avec le laboratoire CEREAs, centre de recherche commun de l'école des Ponts Paritech et d'EDF.

Parmi les principaux développements, la modélisation des aérosols organiques secondaires (AOS) intègre désormais un mécanisme chimique prenant en compte les propriétés hydrophiles et hydrophobes des particules formées par oxydation des précurseurs biogéniques (venant des émissions de la végétation : isoprène, monoterpènes, sesquiterpènes) et anthropiques (composés aromatiques). L'oxydation de ces composés mène à la formation de composés semi-volatils dont le partage gaz/particules est simulé par un module gérant la non-idéalité de l'aérosol (influence des interactions entre composés organiques sur la formation d'aérosols). La **Figure 1** illustre les concentrations d'aérosol organique simulées par le nouveau module d'aérosols de CHIMERE.

En ce qui concerne la formation d'aérosols inorganiques secondaires (sulfates, nitrates et ammonium), le modèle prend mieux en compte les conditions météorologiques dans les équilibres thermodynamiques ainsi que la condensation de l'acide nitrique sur les sels marins et les poussières désertiques.

Les résultats du nouveau module ont été comparés aux mesures de PM_{2,5}, PM₁₀ et de composition d'aérosols, effectuées en Europe. Cette analyse montre de bonnes performances de CHIMERE pour simuler de manière générale les particules (**Figure 1**). Cependant, le modèle a encore tendance à sous-estimer les teneurs en aérosols organiques en été et à surestimer les concentrations de nitrate d'ammonium en hiver en Europe de l'Est (probablement à cause d'une surestimation des émissions d'ammoniac).

ABSTRACT /

Ineris operates and develops the CHIMERE chemistry transport model which is now widely used throughout Europe and beyond for air quality forecasting and assessment. To maintain the model at the state of the art and improve its performances, CHIMERE needs to be regularly updated to take into account the last findings on air quality modeling. In this spirit, a new aerosol module was developed and implemented into CHIMERE. Developments include the revision the algorithms of condensation/evaporation and coagulation processes and the implementation of a new secondary organic aerosol mechanism.

Concentrations of particles over Europe were simulated for the year 2013 and were compared to available PM concentrations and speciation measured at several stations in Europe. The model gives satisfactory performance in general but overestimates ammonium nitrate concentrations during late autumn (possibly due to problems in the temporal evolution of emissions) and underestimates summer organic aerosol concentrations over most of the stations (especially in northern Europe).

Référence

Couvidat F.; Bessagnet B.; Garcia-Vivanco M.; Real E.; Menut L. and Colette A.: Development of an inorganic and organic aerosol model (CHIMERE 2017B v1.0): seasonal and spatial evaluation over Europe, Geosci. Model Dev., 11, 165-194, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-165-2018>, 2018.

Focus / Les services Copernicus Atmosphère : une approche intégrée de surveillance de la qualité de l'air en Europe

Contributeur
Laurence ROUÏL

À l'issue de près de dix ans de travaux de recherche préparatoires financés par la Commission européenne, les services européens Copernicus de surveillance de l'atmosphère sont entrés dans une phase opérationnelle à la fin de l'année 2015 (<https://atmosphere.copernicus.eu/>) sous le pilotage du Centre européen de prévision ECMWF¹.

Ces services, regroupés sous la bannière CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Services*), proposent tous les jours des prévisions, cartographies et autres données valorisées relatives à la composition chimique de l'atmosphère à l'échelle globale, à l'ozone stratosphérique, au rayonnement ultraviolet (UV) et à la qualité de l'air en Europe.

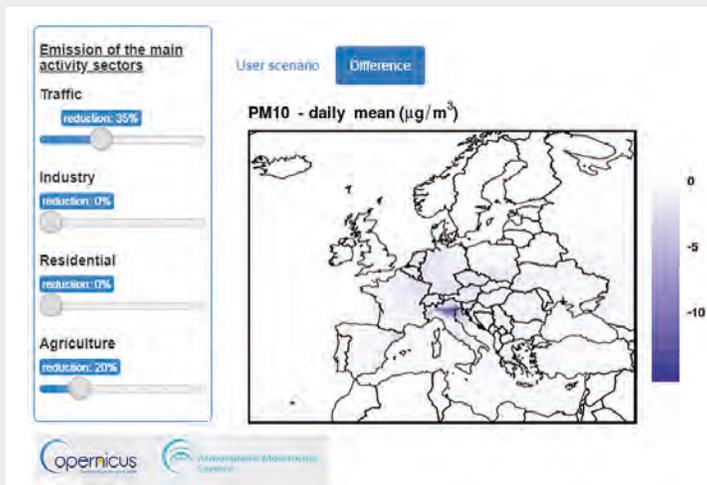
Ils mobilisent une cinquantaine d'équipes européennes exploitant différents types d'outils (modèles numériques) et de données (*in situ* et satellite) pour élaborer des diagnostics et des prévisions à différentes échelles d'espace et de temps.

L'Ineris est impliqué dans le développement et la mise en œuvre des services sur le segment qualité de l'air depuis leur genèse. L'Institut produit quotidiennement des prévisions, analyses et réanalyses pour les jours et années passés à l'aide du modèle CHIMERE en prenant en compte les observations des réseaux de mesure *in situ* mis en œuvre dans tous les pays européens en application des directives qualité de l'air. Des travaux de recherches sont engagés pour intégrer à terme des observations spatiales, et notamment celles du futur satellite géostationnaire dédié à la qualité de l'air, Sentinel 4. L'Ineris pilote également un certain nombre de services dédiés à l'aide à la décision, qui mettent en œuvre des méthodes innovantes, par exemple pour simuler, *via* un outil disponible en ligne et avec un coût de calcul minimal, l'impact de n'importe quelle combinaison de réduction d'émissions sectorielle (trafic, industrie, chauffage résidentiel, agriculture) sur la qualité de l'air pour les jours à venir. Un tel outil a vocation à aider les décideurs à mieux comprendre les facteurs déterminants des épisodes de pollution (<http://policy.atmosphere.copernicus.eu/index.html>).

Figure 1 / Vision synthétique des services Copernicus Atmosphère (CAMS, source : ECMWF)



Figure 2 / Exemple d'un service d'aide à la décision sur la gestion de la pollution atmosphérique proposé par CAMS et développé par l'Ineris : simulation en ligne d'impacts de scénarios de réduction sectorielle des émissions



¹ ECMWF : European Centre for medium-Range Weather

Focus / Reconstruction de l'évolution de la qualité de l'air en Europe sur la période 1990-2010 dans le projet Eurodelta-Trends

Contributeur

Augustin
COLETTE

La gestion de la qualité de l'air a nécessité dès la deuxième moitié du XX^e siècle de définir des stratégies de réduction d'émissions et de se doter d'outils de surveillance de l'atmosphère pour évaluer leur efficacité. En 1979, la Convention sur le transport de la pollution atmosphérique à longue distance fut instaurée sous l'égide de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies

(CLRTAP¹). Des protocoles visant la réduction de certains polluants y sont adoptés (notamment le protocole de Göteborg sur l'acidification, l'eutrophisation et l'ozone de surface - 2012). Des outils scientifiques d'observation et de modélisation de la qualité de l'air ont été développés pour évaluer leurs effets. Ils ont été et demeurent mis en œuvre dans le cadre du programme EMEP (*European Monitoring and Evaluation Programme*) de la convention.

Dans le cadre de l'EMEP, l'Ineris, qui assure la présidence française de la « Task Force » sur la mesure et la modélisation, a initié une série de travaux sur l'évaluation rétrospective de la qualité de l'air sur la période 1990-2010. L'une des approches a consisté à travailler à l'aide de modèles numériques pour reproduire les tendances passées. Le projet Eurodelta-Trends [1] a pour ce faire impliqué huit des principales équipes de modélisation européennes. Cet exercice d'une ambition sans précédent avait un objectif triple: (i) évaluer

les capacités des modèles à reproduire l'évolution récente de la qualité de l'air en Europe, (ii) quantifier la contribution respective des principaux facteurs (météorologie, émissions européennes et non européennes), (iii) quantifier l'évolution à long terme des impacts de la pollution atmosphérique en termes de retombées eutrophisantes et acidifiantes, d'impacts sanitaires, et de rendements agricoles.

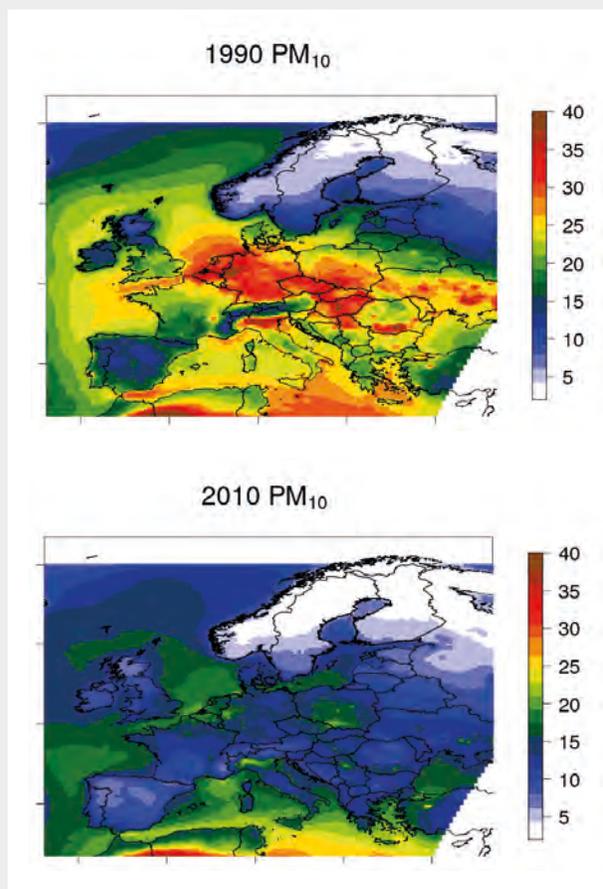
La maturité des modèles actuels, dont le modèle CHIMERE, codéveloppé par l'Ineris et le CNRS, pour reproduire les tendances passées a été mise en évidence. Les études d'attribution ont permis de montrer que les réductions d'émissions européennes constituent bien le levier principal pour l'amélioration de la qualité de l'air sur le continent et que les effets positifs de ces mesures ont pu être démontrés et quantifiés. Ainsi, les tendances modélisées indiquent que la mortalité prématurée déduite des relations dose effet sur la pollution aurait presque été divisée par deux en Europe entre 1990 et 2010.

¹ <https://www.unece.org/env/lrtap/welcome.html>

Références

- [1] Colette A. *et al.* EURODELTA-Trends, A multi-model experiment of air quality hindcast in Europe over 1990–2010, *Geosci. Model Dev.*, 10, 3255–3276, 10.5194/gmd-10-3255-2017, 2017.
- Colette A. *et al.* Long-term air quality trends in Europe, *Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Health Impacts*, Bilthoven, 2017.
- Colette A. *et al.* Long term air quality trends in Europe: Contribution of meteorological variability, natural factors and emissions, *ETC/ACM*, Bilthoven, 2017.
- Otero N. *et al.* A multi-model comparison of meteorological drivers of surface ozone over Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 12269–12288, 10.5194/acp-18-12269-2018, 2018.
- Theobald M. R. *et al.* 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. Discuss.*, 2018, 1–42, 10.5194/acp-2018-713, 2018

Figure 1 / Concentrations médiane en PM₁₀ (µg/m³) dans l'ensemble des modèles ayant participé à l'exercice Eurodelta-Trends pour 1990 et 2010. L'ampleur de la réduction représentée sur la même échelle de couleur illustre l'amélioration de la qualité de l'air sur cette période, source (Colette *et al.*, 2017).



Hiérarchisation des déterminants de la composition atmosphérique future en Europe

Contributeurs
Vincent LEMAIRE,
Augustin
COLETTE

La composition chimique atmosphérique dépend principalement des émissions de polluants et leur transformation dans l'atmosphère, notamment sous l'effet de facteurs météorologiques. Les stratégies de gestion de la qualité de l'air ambitionnent des réductions substantielles d'émissions à long terme. Mais on peut se demander si l'impact du changement climatique est susceptible d'interférer avec ces efforts.

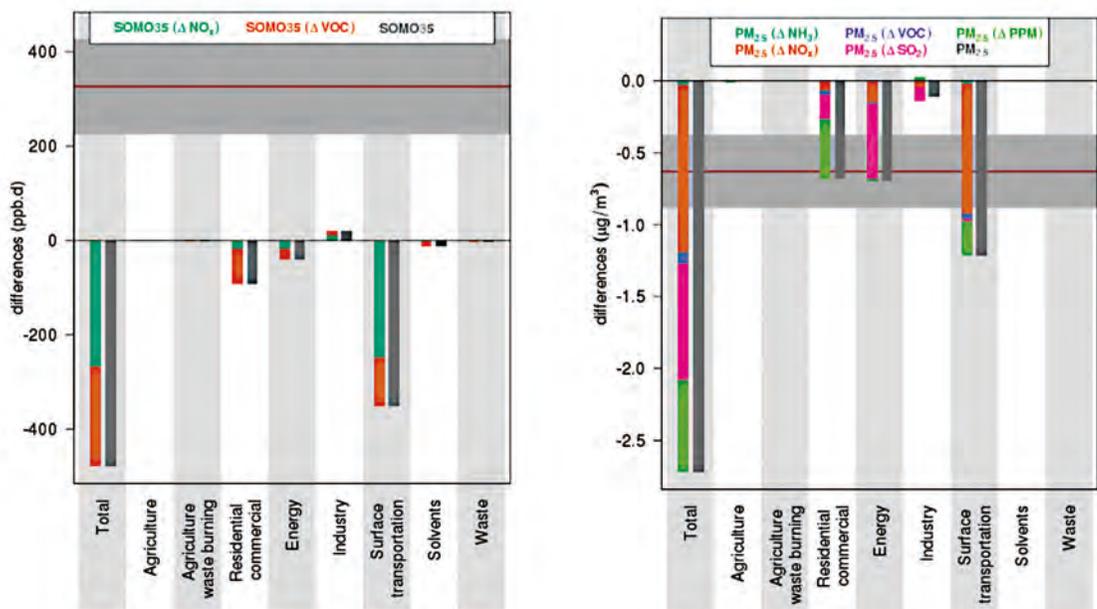
Afin de répondre à cette problématique, la modélisation permet de faire des projections à long terme en tenant compte de différents scénarios de sensibilité pour isoler les principaux facteurs d'influence. Se pose alors le problème des incertitudes dans la modélisation. L'approche privilégiée pour les études d'impact du climat est la modélisation ensembliste qui consiste à utiliser de multiples modèles de climat et non une seule source de données. Cependant, du fait de l'important coût de calcul, on constate qu'aucune étude réalisée par le passé sur l'impact du climat sur la qualité de l'air ne repose sur un ensemble large de projections climatiques.

Travaux

L'Ineris a donc tiré parti de ses travaux précédents sur le sujet (qui reposaient sur un seul modèle), pour développer un métamodèle statistique de type Modèle Additif Généralisé capable de reproduire la sensibilité climatique du modèle de chimie-transport CHIMERE. Ce métamodèle peut, par la suite, être appliqué à un ensemble plus large de projections climatiques (l'ensemble des modèles du GIEC¹, raffinés spatialement dans le programme EuroCordex). L'exploration d'un tel ensemble de modèles permet alors de quantifier, pour la première fois, les incertitudes relatives à l'impact du climat sur la qualité de l'air.

Enfin, le métamodèle statistique a été utilisé pour confronter l'impact du changement climatique aux réductions d'émissions anthropiques attendues à l'avenir sous l'effet des politiques d'amélioration de la qualité de l'air. L'impact des réductions d'émissions était lui-même évalué avec un autre métamodèle provenant des matrices source-récepteur EMEP à l'horizon 2050 pour l'ensemble de l'Europe.

Figure 1 / Comparaison des évolutions (Différence : Futur - Historique) des concentrations de $PM_{2.5}$ (en $\mu g/m^3$) et des niveaux de SOMO35 (indicateur d'impact de l'ozone pour la santé humaine, exprimé en ppb-jours : ppb.d) liées à l'impact du changement climatique et à l'évolution des émissions en France (l'ensemble de l'Europe étant présenté dans la thèse : V. Lemaire, 2017).



Résultats

Les résultats ont permis de mettre en évidence un « bénéfice climatique » qui s'explique par le fait que l'augmentation des températures favorise la volatilisation des particules semi-volatiles de la phase particulaire vers la phase gazeuse. La comparaison de l'effet du changement climatique et de l'effet des réductions d'émissions de particules et de précurseurs a démontré que les deux facteurs pouvaient atteindre des ordres de grandeur comparables en fonction des pays et des secteurs d'activité considérés.

Au contraire, pour l'ozone, la « pénalité climatique » (augmentation de la pollution à l'ozone sous l'effet de l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur) va contrebalancer les efforts de réduction d'émissions tels que planifiés entre 2010 et 2050. On peut donc estimer, pour chaque pays européen, la notion « d'émergence » dans le domaine de l'impact du changement climatique, c'est-à-dire la date à partir de laquelle l'impact du changement climatique excédera l'impact induit par la réduction des émissions attendue dans la législation actuelle.

L'impact du changement climatique est calculé avec le métamodèle développé dans le cadre de la thèse de doctorat de Vincent Lemaire, co-encadrée et financée par l'Ineris, et appliqué à l'ensemble Euro-Cordex sur une période de 20 ans centrée en 2050 (2041-2060). L'impact moyen du climat est représenté par une ligne rouge, l'enveloppe grise correspond à l'incertitude des projections climatiques : la quantification de cette incertitude constitue un des résultats innovants de cette thèse. Ce calcul est fait pour un scénario majorant de l'impact du changement climatique.

L'évolution des concentrations liées aux changements d'émissions de polluants est calculée avec les matrices source-récepteur EMEP et représentée par secteur sous forme de diagramme en bâton avec la contribution de chaque précurseur et l'évolution totale (somme des contributions des précurseurs) en gris foncé. Les réductions sont estimées à partir de la situation actuelle avec les stratégies d'ores et déjà prévues à l'horizon 2050 (législation en vigueur), d'où le zéro sur la **Figure 1**.

La comparaison des deux facteurs (climat et émissions de polluants) permet d'identifier si les mesures de gestion peuvent être contrecarrées ou au contraire renforcées par le changement climatique. On note ainsi qu'en France, le changement climatique contribuera à diminuer la pollution particulaire. Cette contribution n'est pas anodine car elle est du même ordre que celle que l'on peut attendre des réductions d'émissions prévues dans le secteur résidentiel, ou dans le

ABSTRACT /

There are two main factors to be considered to understand the long-term evolution of air quality over the course of the 21st century: (i) the strategies to reduce the anthropogenic emission of air pollutant and precursors, and (ii) the impact of climate change. Thanks to important developments in modelling capacities, it is now possible to implement the air quality models generally used for a few days forecast over the scale of decades while taking into account the impact of climate change.

The PhD work presented here goes an extra mile, by developing surrogate air quality and climate models to explore the uncertainties of such long-term projections, for instance by investigating a large set of climate models (such as those used in IPCC assessments) instead of a single source. It becomes possible to take into account modelling uncertainties in comparing the relative importance of mitigation strategies and climate change to ensure that current strategies will remain efficient over the long run, in the context of a changing climate.

secteur de l'énergie. L'impact des réductions liées au secteur des transports est toutefois plus important que l'effet du climat. Pour l'ozone, on constate l'ampleur de ce que l'on appelle la pénalité climatique. Une nette augmentation de l'indicateur SOMO35 est anticipée sous l'effet du changement climatique. Des stratégies ambitieuses de réduction de polluants sont envisagées d'ici 2050, principalement sur le secteur routier. Mais l'intégralité de ces efforts sur le transport routier pourrait être annihilée par l'effet du changement climatique en termes de pollution à l'ozone.

¹ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Référence

Lemaire V. 2017, Hiérarchisation des déterminants de la composition atmosphérique future en Europe. Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay préparée à l'École polytechnique.

Impact de l'érosion interne sur la stabilité d'une digue:

approche innovante par modélisation multiphysique de l'aléa

Contributeurs

Farid LAOUAFA

Jie YANG

/

Collaborateurs

Prof. Zhen-Yu YIN

et

Prof. Pierre-Yves

HICHER

(Ecole centrale
de Nantes)

L'érosion interne est un processus hydrodynamique responsable de l'arrachement de particules et de leur transport dans les ouvrages hydrauliques tels que les barrages, les digues et leur fondation. Les ruptures par érosion interne et par renard hydraulique représentent un peu plus de la moitié des ruptures des ouvrages hydrauliques. Elles peuvent toucher aussi bien la fondation que le remblai, y compris le noyau étanche. Ce phénomène a fait l'objet par le passé de nombreux essais de laboratoire et de modélisations numériques. Cependant, la plupart des modèles numériques mis en œuvre sont trop simplifiés d'un point de vue du comportement mécanique des sols et des ouvrages car ils sont fondés sur l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du sol et ne prennent pas en compte un comportement réel plus réaliste qui peut être mieux approximé en élastoplasticité. De ce fait, les travaux menés ont

conduit à développer et mettre en œuvre un modèle hydromécanique couplé pour l'érosion interne en assimilant le sol à un milieu poreux continu. Dans cette approche, le squelette du sol saturé par un fluide (eau) est traité comme la superposition de quatre constituants (Figure 1) qui interagissent. L'érosion interne du squelette du sol et le transport des fines (particules de petite taille, érodables et transportables par l'eau interstitielle) sont modélisés par un transfert de masse entre les phases solide et fluide. La relation contrainte-déformation (i.e. le modèle de comportement de la matrice de sol) pour le squelette solide est calculée à l'aide d'un modèle constitutif basé sur l'état critique qui peut prendre en compte la dégradation progressive des propriétés mécaniques du sol induite par l'érosion interne. Les développements théoriques et numériques ont été implémentés dans un code de modélisation numérique par éléments finis. On dispose ainsi d'un outil intéressant qui permet *in fine* d'évaluer l'influence de l'érosion interne sur la stabilité d'un ouvrage hydraulique en calculant le facteur de sécurité compte tenu de la réduction de la résistance des matériaux (Figure 2).

Figure 1 / Distribution spatiale des particules et conceptualisation à quatre constituants représentés dans le modèle.

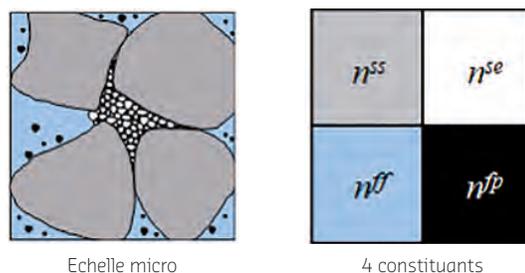
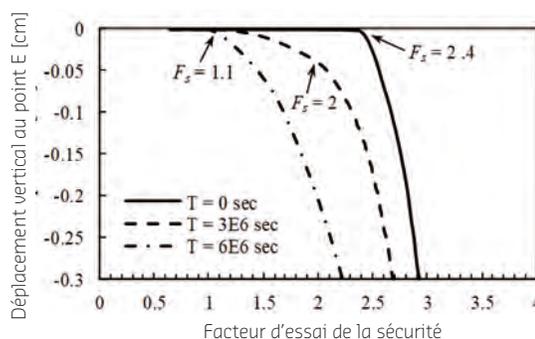


Figure 2 / Déplacement vertical pour différentes périodes d'érosion T et différents facteurs de sécurité F_s .



Effet du couplage hydromécanique

Dans le modèle développé, l'effet de couplage hydromécanique est divisé en deux parties :

- 1- l'érosion interne qui entraîne une évolution de la porosité du matériau et conduit, de ce fait, au changement de sa perméabilité. En conséquence, la pression interstitielle et les contraintes effectives sont redistribuées au sein de différents matériaux ;
- 2- la perte de particules fines due à l'écoulement d'infiltration, phénomène qui affecte le comportement mécanique du sol par une modification de la porosité (l'indice des vides).

Exemple de simulation de l'impact d'une érosion interne sur une digue

Pour illustrer le modèle développé, la stabilité de la pente de la digue de Val d'Orléans a été analysée (Figure 3). Dans cet exemple, le phénomène d'effondrement karstique (formation de cavités par dissolution de la roche) sous

la fondation a conduit à une cavité à travers laquelle l'eau souterraine s'écoule. L'érosion est activée du fait de gradients hydrauliques locaux au voisinage de la cavité. La modélisation vise à évaluer l'impact de l'érosion interne sur la stabilité de la pente de la digue. La géométrie et les dimensions du cas d'exemple étudié sont représentées schématiquement sur la **Figure 3** selon la coupe transversale typique de la digue. Le niveau de l'eau se situe au sommet des alluvions et est complètement saturé, alors que la digue est supposée entièrement sèche. Le problème est analysé en deux dimensions (hypothèse de condition de déformations planes). Les propriétés physiques des matériaux sont issues de données *in situ*.

La **Figure 2** montre la diminution de la réserve de stabilité de la digue en fonction du temps.

La **Figure 4** montre un exemple d'évolution temporelle et spatiale de la porosité induite par l'érosion interne.

Conclusion

Un modèle numérique représentatif du phénomène d'érosion interne des sols a été développé et mis en œuvre. Les équations différentielles régissant le problème physique ont été formulées sur la base du bilan massique des quatre constituants puis implémentées dans un code de calculs par éléments finis. L'érosion interne du squelette du sol et le transport des particules fines dans le fluide ont été modélisés par le transfert de masse entre le squelette solide et l'eau interstitielle. Un modèle de comportement élastoplastique basé sur l'état critique des sols a été utilisé pour prendre en compte l'effet de couplage hydromécanique induit par l'érosion interne. Au travers l'exemple d'une digue, les possibilités du modèle pour simuler l'évolution de l'érosion interne avec le temps ont pu être illustrées. En particulier, cet exemple a montré comment les effets de l'érosion interne pouvaient conduire à une augmentation de la porosité du sol et à la dégradation des propriétés mécaniques des fondations de digues dans le temps et dans l'espace. La méthode de réduction de la résistance au cisaillement a été adoptée pour évaluer la stabilité de la pente de la digue. Les résultats montrent une réduction du facteur de sécurité sous l'effet de l'érosion interne, augmentant le risque d'instabilité mécanique de la digue. Ces travaux peuvent être étendus à la prévention des risques liés aux ouvrages linéaires du type canalisations enfouies transportant un fluide (gaz, liquide) et présentant des fuites.

ABSTRACT /

A numerical model has been developed for internal erosion. It is based on the approach of continuous porous media. The soil skeleton saturated by a pore fluid (water) is treated as the superposition of four constituents in interaction: solid skeleton, erodible fines, fluidized particles and fluid. The detachment and transport or advection of fine particles are modeled by the mass exchange between solid and fluid phases. In order to take into account the influence of the change in void ratio induced by internal erosion on the soil skeleton, a critical state based constitutive model is used to calculate the effective stress-strain response of the soil skeleton. This coupled hydro-mechanical analysis is applied to study the impact of erosion on a dyke. The numerical simulations show the progressive development of internal erosion within the foundation of the dyke. The effect of the mechanical degradation due to internal erosion is demonstrated by evaluating the factor of safety of the dyke slope by means of the shear strength reduction method.

Figure 3 / Modèle géométrique de la digue.

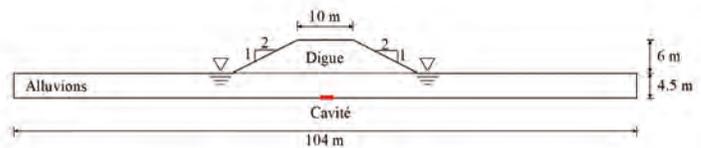
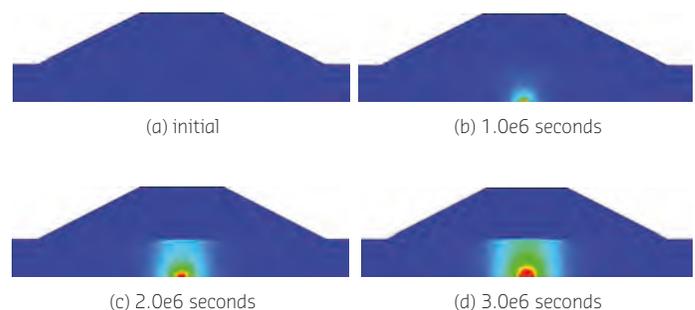
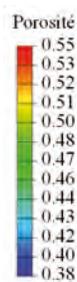


Figure 4 / Distribution spatiale de la porosité à différents instants 10, 20 et 30 jours environ (1.e6 = 10⁶ secondes soit environ 10 jours).



Références

Yang J.; Yin Z-Y.; Laouafa F.; Hicher P.-Y. Internal erosion in dike-on-foundation modeled by a coupled hydro-mechanical approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (à paraître)
 Yang J.; Yin Z-Y.; Hicher P.-Y.; Laouafa F. A Finite Element Modeling of the Impact of Internal Erosion on the Stability of a Dike. *Poromechanics VI2017*. p. 354-361.
 Yang J.; Yin Z-Y.; Hicher P.-Y.; Laouafa F. How Spatial Variability of Initial Porosity and Fines Content Affects Internal Erosion in Soils. *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering: Springer, 2018*. p. 439-443.

Modélisation numérique explicite

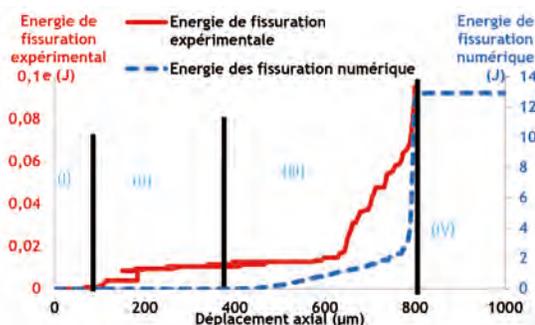
de l'initiation et de la propagation de fractures rocheuses

Contributeur
Jabrane HAMDJ

La fracturation des milieux rocheux soulève la question de performance et de sécurité dans le contexte d'exploitation du sous-sol : mines, stockages souterrains d'hydrocarbures ou de déchets, géothermie profonde, etc. Le développement d'outils de modélisation numériques permettant d'étudier, d'une manière satisfaisante, l'initiation et la propagation des fractures dans les roches est nécessaire pour connaître les phénomènes susceptibles d'intervenir et d'évaluer leurs conséquences.

L'étude de l'initiation et de la propagation des fractures fait appel à la mécanique linéaire de la rupture. Les méthodes numériques dédiées à la simulation de la fracturation sont basées sur la comparaison de l'évolution de certains paramètres, tels que le taux de restitution de l'énergie et/ou le facteur d'intensité des contraintes avec des valeurs seuils de ces paramètres (taux de restitution critique, facteur d'intensité critique aussi appelé ténacité), qui sont des valeurs intrinsèques au matériau rocheux. Sur la base de ces critères, des méthodes numériques ont été développées pour étudier la fracturation induite par les ouvrages souterrains et leur exploitation et/ou son interaction avec la fracturation naturelle préexistante. La méthode de modélisation numérique aux éléments finis étendus et la méthode des éléments discrets sont aujourd'hui les plus à même de traiter cette problématique.

Figure 1 / Évolution des énergies dissipées par les émissions acoustiques (EA) au cours d'un essai de compression uniaxiale réalisé sur la couche brune du bassin ferrifère lorrain (dédites des EA enregistrées par Wassermann en 2006 et d'une valeur d'impédance de 10 k Ω) et les microfissures numériques.



Objectif et méthodologie

Une thèse de doctorat menée à l'Ineris a permis de modéliser explicitement l'initiation et la propagation de fractures en intégrant les dimensions mécaniques et énergétiques du phénomène.

En fonction des sollicitations, on distingue habituellement trois modes élémentaires de rupture des roches : le mode I est le mode d'ouverture de la fracture ou d'extension, le mode II est associé à la rupture en cisaillement plan et le mode III à un cisaillement anti-plan (Figure 1). Le travail de thèse s'est intéressé plus particulièrement à la rupture en mode I, la plus développée dans les roches. D'un point de vue expérimental, elle peut être étudiée à travers différents types d'essais de laboratoire (traction directe, flexion en trois points ou double torsion). À l'échelle de l'ouvrage souterrain, ce mode de rupture se traduit par des fractures d'extension ou de l'écaillage en paroi et en champ proche de l'ouvrage.

En collaboration avec l'équipe « GeoRessources » de l'université de Lorraine, il a été décidé d'adopter le code de calcul aux éléments discrets Yade Open DEM, qui a déjà démontré sa capacité à reproduire le comportement mécanique des roches fragiles ainsi que la propagation des fractures dans le milieu rocheux. Des développements spécifiques ont été apportés à ce code de calcul afin de tenir compte des différentes formes d'énergie intervenant dans le comportement des roches [1;2] : le travail externe, l'énergie potentielle, l'énergie élastique, l'énergie de frottement, l'énergie de rupture, l'énergie cinétique et l'énergie d'amortissement. La validation de la formulation énergétique a été réalisée grâce à la comparaison entre les résultats de la simulation numérique et ceux d'essais de laboratoire.

Travaux et résultats

La première partie de ce travail a concerné l'étude de la fracturation en mode I à l'échelle du laboratoire. Les différentes composantes de l'énergie (énergies de frottement, de fissuration, etc.) ainsi que le bilan d'énergie ont été intégrés dans le code de calcul Yade. La formulation énergétique a été validée en simulant des essais de laboratoire avec différents chemins de chargement : compression, traction et cisaillement. L'erreur commise sur le

bilan énergétique apparaît faible ; elle varie de 0,1 % à 3 % ce qui est tout à fait satisfaisant.

Un premier cas d'étude traité concerne une expérimentation de « *mine-by test* » réalisée dans un laboratoire souterrain dans le massif de granite du Bonnet au Canada. La simulation numérique reproduit bien l'état de contraintes fortement anisotrope du site (contrainte principale majeure quasi-horizontale d'amplitude 60 MPa, contrainte principale mineure quasi-verticale de 11 MPa et contrainte principale intermédiaire horizontale et parallèle à l'axe du tunnel d'amplitude 45 MPa). Dans la direction subverticale de la contrainte initiale mineure (σ_3), le modèle proposé prédit une extension de la zone endommagée autour de l'ouvrage de 50 cm, en bonne cohérence avec la fracturation observée *in situ* ou celle prédite par des études numériques antérieures [3]. Les valeurs des ratios de bilan des énergies rapportées au travail des forces externes calculées pour les différentes discrétisations sont quasiment identiques et proches de 2 %. Ce qui constitue un élément de validation des formulations énergétiques implantées dans le code Yade et mises en œuvre à une plus grande échelle.

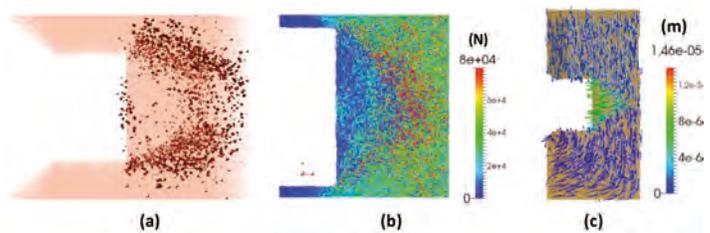
La seconde application à l'échelle d'une structure réelle a été la modélisation d'un pilier d'une mine de fer dans le bassin ferrifère lorrain. La fracturation du pilier a été simulée en conditions de compression uniaxiale (hypothèse souvent admise pour un pilier) jusqu'à atteindre la contrainte verticale prévalant dans le pilier avant l'excavation (estimée sur la base du poids des terrains sus-jacents). Les résultats ont été comparés aux résultats obtenus par Fougeron [4] basés sur une modélisation hybride combinant deux codes de calcul FLAC/PFC2D. Des similitudes qualitatives et quantitatives ont été constatées en termes de champ de déplacement dans le pilier. En revanche, les contraintes (ou efforts) dans le pilier ainsi que le mécanisme de fissuration au cœur du pilier restent différents. Plus précisément, le modèle numérique développé avec le code Yade montre deux modes de fissuration dans le pilier (Figure 2) : (a) écaillage en peau de pilier, (b) deux bandes de rupture s'initiant au niveau des coins du mur et du toit du pilier pour se propager vers le cœur du pilier [1]. La force de contact maximale est 12 fois moins importante dans le cas de la simulation avec Yade.

Ces travaux ouvrent des perspectives pour mieux étudier les conditions de rupture et de propagation de la fracturation autour d'ouvrages souterrains pouvant présenter des risques en termes de sécurité et d'impacts environnementaux.

ABSTRACT /

Studying the performance of rocks subjected to industrial operations (mines, underground storages, geothermal, etc.) requires a good understanding of their response to varying stress fields up to their failure. Fracturing of rock is one form of energy dissipation that allows to restore the energy balance in the rock material. The aim of this research is to enhance the numerical modeling of the initiation and propagation of cracks or fractures in rocks in order to enhance the capabilities to predict the performance of deep underground structures. A critical review of the approaches developed to tackle this issue has led us to choose the discrete approach and more particularly the numerical code "Yade". Developments have been made to evaluate the different forms of energy dissipation involved in rock behavior. Validation of the energy approach was carried out by simulating laboratory tests. The evolution of the different energy components permitted to verify that the energy balance was correctly evaluated. The energy balance approach was also verified at mesoscopic scale by simulating the underground excavation of a real mine-by-test experiment conducted in the past. Another application was the modelling of an iron ore mine pillar in Lorraine. These applications yield good prospects for better modelling ruptures of the host rock and enhance significantly the security and performance assessment of underground operations.

Figure 2 / Simulation numérique d'un pilier des mines de fer lorraine :
(a) distribution de microfissures prédites dans le pilier ;
(b) forces aux contacts entre les particules ;
(c) vecteurs déplacement.



Références

- [1] Hamdi J. Modélisation explicite de l'initiation et de la propagation de fractures. Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, soutenue le 18 décembre 2017.
- [2] Hamdi J.; Souley M.; Scholtès L.; Al Heib M.; Gunzburger Y. 2017b: Assessment of the energy balance of rock masses through discrete element modelling, Eurock 2017, Procedia Engineering 191, pp 442-450.
- [3] Hamdi J.; Scholtès L.; Souley M.; Al Heib M. 2017a: Effect of discretization at laboratory and large scales during discrete element modelling of brittle failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 100 (2017) 48-61.
- [4] Fougeron J. (2007). Affaissement et effondrement des mines de fer de Lorraine apport de la modélisation numérique. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine.

Stockage souterrain de gaz naturel : étude du comportement d'une cavité saline en cycles rapides de soutirage

Contributeur
Cyrille BALLAND

Collaborateurs

Joël BILLIOTTE et
Bruno TESSIER
(Mines ParisTech,
Centre de
géosciences,
Fontainebleau),

Grégoire HÉVIN
(Storengy),

Emmanuel
HERTZ
(Salins du Midi)

Le stockage du gaz naturel dans les cavités salines nécessite des cycles de remplissage-soutirage de gaz de plus en plus rapides sur le marché de l'énergie. Ces cycles s'accompagnent de variations rapides de la pression interne du gaz stocké avec des variations importantes de la température qui peuvent endommager le massif de sel à la paroi de la cavité de stockage. Plusieurs études théoriques ont été conduites pour estimer ce type d'endommagement qui peut en résulter dans le sel [1; 2]. Pour vérifier expérimentalement cet endommagement, une étude a été conduite afin de refroidir un massif de sel et reproduire les sollicitations du parement d'un stockage de gaz. L'objectif principal était d'initier et de caractériser l'endommagement par des contraintes d'origine purement thermique induites par refroidissement à la surface du massif. Il s'agissait de connaître le type de mécanisme de rupture de la roche, la nature et l'extension des fissures; et de mettre en évidence ou non des éventuels phénomènes de fatigue du massif avec la répétition des cycles de refroidissement. Le sel a l'avantage d'être très émetteur d'émissions sismo-acoustiques (sismogène) et de présenter une atténuation très faible des ondes sismiques. C'est pour cela que l'écoute acoustique a été choisie pour suivre la fracturation du massif de sel.

Expérimentation

Le site expérimental est situé dans la mine de sel de Varangéville (Meurthe-et-Moselle), au sein

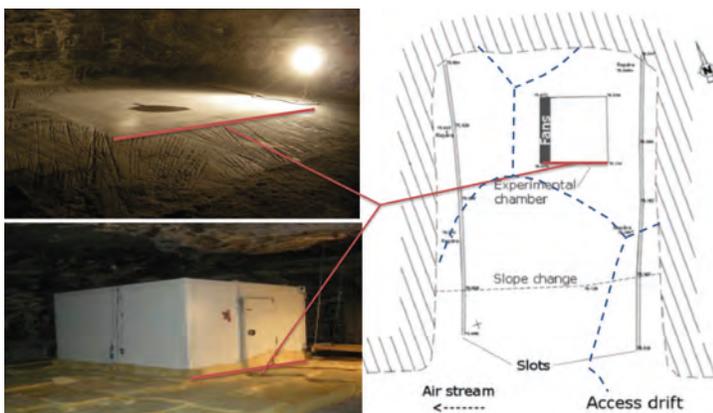
d'une galerie borgne excavée pour l'occasion par l'exploitant de la mine, la Compagnie des salins du Midi et des salines de l'Est (CSME) (Figure 1). La surface d'étude proprement dite s'étend sur 10 m² du massif de sel dans un secteur où le massif rocheux présentait le moins d'hétérogénéités. Il fallait en particulier s'éloigner des parements de la galerie et éviter, autant que faire ce peut, la fissuration naturelle d'ordre géologique. La surface de la roche a été découpée par havage (technique d'exploitation par découpage) puis lissée par l'exploitant CSME pour faciliter l'observation et la pose des différents capteurs. C'est sur cette surface apprêtée que la chambre frigorifique a été installée.

Le dispositif d'auscultation ultrasonique est composé de seize capteurs piézoélectriques qui sont disposés soit en surface, collés au massif de sel, soit dans les cinq sondages scellés aux parois avec du phényle salicylate. Onze capteurs fonctionnent en réception d'ondes et cinq autres capteurs en émission. Le dispositif ultrasonique est centré dans la chambre frigorifique afin de surveiller la partie la plus homogène. Le massif de sel a été soumis à quatre cycles de refroidissement avec une consigne de température dans la chambre frigorifique de -9 °C sur une période minimale de 28 jours pour les 3 premiers cycles. L'objectif principal était de comparer l'évolution de l'endommagement au fur et à mesure des cycles de refroidissements. Le temps de réchauffement du massif après chaque refroidissement est variable car non contrôlé et accompagné d'une condensation importante de l'air introduit dans la mine qui nécessitait systématiquement un reconditionnement de la surface et des capteurs. Le dernier refroidissement a été réalisé suivant deux paliers, l'un durant 14 jours à -9 °C et l'autre pendant 22 jours à -27 °C. L'objectif de ce dernier cycle était de suivre l'endommagement avec un niveau de sollicitation plus important.

Résultats

Le dispositif de surveillance acoustique a permis d'enregistrer et de localiser un grand nombre (58426) d'émissions acoustiques (EA) avec une marge d'incertitude sur la localisation spatiale relativement faible ($\pm 2,5$ cm). Aux principales questions posées sur la nature, l'extension de l'endommagement et la fatigue du massif, la surveillance acoustique a apporté des éléments de réponse importants pour être

Figure 1 / Localisation du massif et positionnement de la chambre frigorifique (Mines ParisTech /ARMINES) dans la galerie de la mine de Varangéville (Compagnie des salins du Midi et des salines de l'Est).



appliqués au contexte d'exploitation des stockages souterrains soumis à un refroidissement induit par des cycles rapides d'injection-soutirage de gaz :

- l'activité acoustique s'avère très importante dès les premières minutes de chaque refroidissement puis diminue avec le temps pour atteindre un niveau très faible (de fond) après environ 15 jours ;
- avec la température imposée en surface de $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, (alors que la température naturelle de la roche est de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ au niveau de la mine), la profondeur moyenne atteinte par les EA est d'environ 90 cm lors du premier refroidissement. Pour les cycles suivants, la profondeur se limite à 74 cm, c'est probablement la plus grande énergie mise en jeu et la taille plus importante des fissures générées (15 cm) lors du premier cycle qui ont permis d'atteindre une profondeur plus importante ;
- la plupart des EA ont une magnitude avoisinant -5 , ce qui correspond à des rayons caractéristiques de fracture de 2 à 3 cm équivalant à la taille moyenne des cristaux de sel du massif. Cette observation montre donc que la fracturation du massif est principalement diffuse le long du front de propagation du froid en accord avec le faciès observé sur la surface du sel.

L'ensemble de ces résultats montre que le premier refroidissement joue un rôle important puisqu'il regroupe les EA les plus fortes et les plus profondes. Un premier cycle avec une amplitude de température plus faible aurait pu diminuer à la fois l'amplitude et la profondeur des EA qu'a subies le massif. Cette approche *crescendo* serait intéressante pour un exploitant. Le palier à $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ du dernier cycle tend à aller dans ce sens bien qu'il fût de courte durée. Il serait intéressant par la suite de confronter les variations de gradient thermique avec les modélisations thermo-mécaniques pour expliquer plus précisément la position de l'essaim d'EA par rapport au front de refroidissement et l'état de contrainte induit.

Enfin, la **Figure 2** montre des alignements d'EA qui témoignent des grandes fractures observées visuellement sur le massif. Une comparaison dynamique entre les EA et les observations visuelles pourrait donc affiner notre connaissance du schéma général de fracturation du massif et ainsi contribuer à estimer le niveau d'endommagement et de sécurité des stockages de gaz en cavités salines.

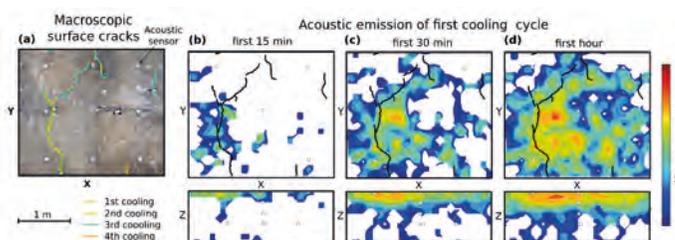
Références

- [1] Brouard B.; Frangi A.; Bérest P. Mechanical stability of a cavern submitted to high-frequency cycles. SMRI Spring Meeting. Galveston; 2011. p. 99-116.
- [2] Sicsic P.; Bérest P. Thermal cracking following a blowout in a gas storage cavern. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2014; 71: 320-329.
- Balland C.; Raingeard A.; Billiotte J.; Tessier B.; Hertz E.; Tribout D.; Thelier N.; Hévin G. Acoustic monitoring of thermo-mechanical tests in a salt mine, SMRI Spring 2016 Technical Conference, Galveston, Texas, USA.
- Blanco-Martín L.; Rouabhi A.; Billiotte J.; Hadj-Hassen F.; Tessier B.; Hévin G.; Balland C.; Hertz E. Experimental and numerical investigation into rapid cooling of rock salt related to high frequency cycling of storage caverns. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2018; 102: 120-130.
- Ohno K.; Ohtsu M. Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*. 2010; 24: 2339-2346.

ABSTRACT /

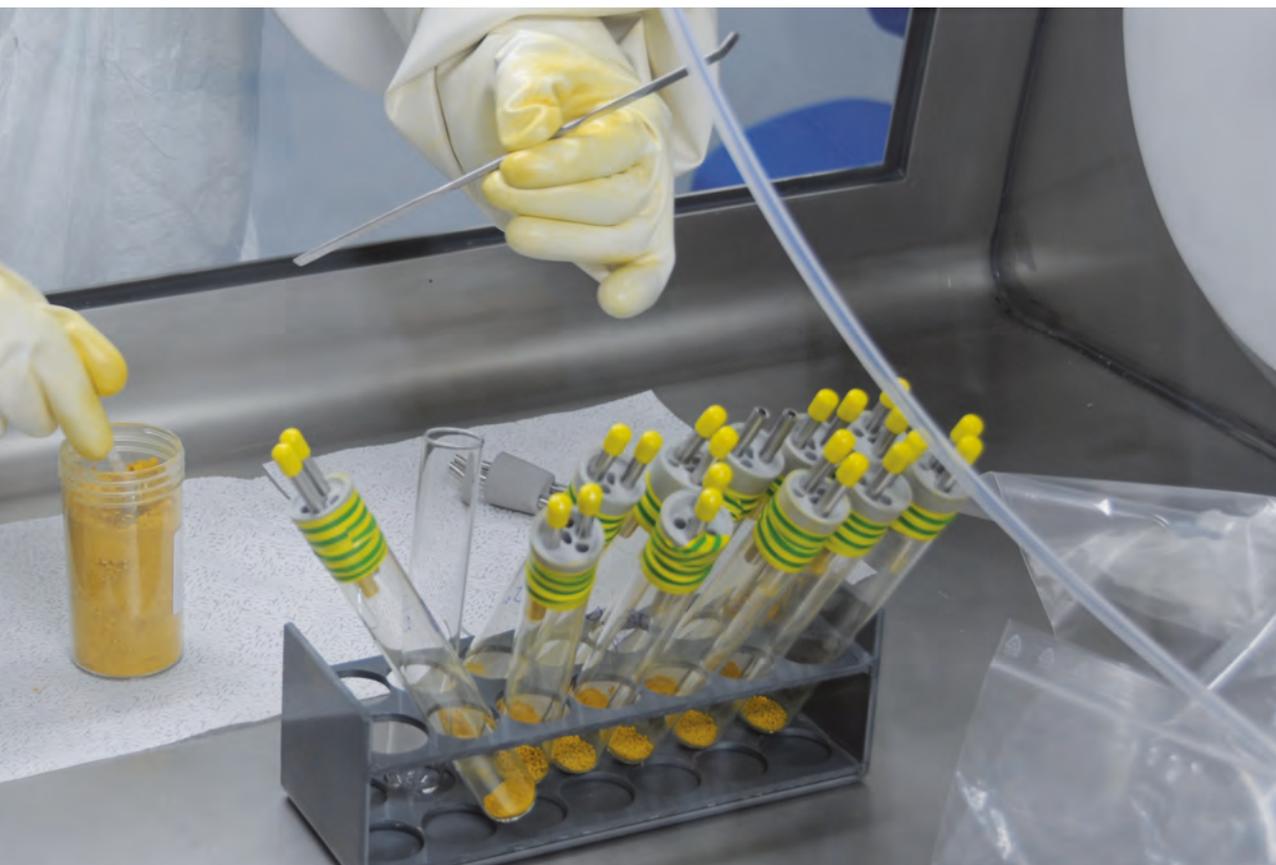
The natural gas storage in salt caverns requires fast injection/ withdrawal cycles due to the increasing dynamics of the energy market. High rates induce rapid changes in the internal pressure of the stored gas causing important temperature changes inducing rocksalt damage. To experimentally observe this phenomenon, the Starfish project led to initiate and characterize the damage caused by purely thermal stresses (cooling-induced) at the surface of a large bloc of rock in the salt Mine of Varangéville (France, near Nancy). The objective was to determine the type of failure mechanism involved with repeated cooling stages. Since the salt generates Acoustic Emissions (AE) with low attenuation of the stress waves, acoustic monitoring has been chosen as one of the methods to follow the impact of the salt cooling. In addition to thermal and mechanical sensors, an acoustic monitoring device consisting of 16 ultrasonic sensors has been installed on the free surface and in boreholes. It enabled to record and locate a large number of AE (58,426) located with good accuracy (2.5 cm). Those AE can be correlated to the evolution of salt fracturing. Acoustic activity is very intense at the start of each cooling cycle, then it decreases with time to reach a very low level (background) after about 15 days. The average localisation depth reached by the AE is about 90 cm during the first cooling period. For subsequent cooling cycles, this depth is limited to 74 cm. All these results show that the first cooling period is decisive, as it contains the strongest and deepest acoustic emissions. It would have been useful to know whether a first cycle with a lower temperature amplitude could have decreased the maximum amplitude and final depth of the AE. This crescendo approach would be useful for operators.

Figure 2 / Localisation de l'énergie des EA lors du 1^{er} refroidissement pendant la première heure.





**Caractériser les dangers
des substances et produits**
et leurs impacts sur l'air, l'eau,
les sols et les organismes vivants



Approches intégrant bioessais
et analyses chimiques pour évaluer
la qualité des milieux aquatiques _____ 54

Intérêt des réponses immunitaires
dans le cadre des études
de biosurveillance _____ 56

Prédictions de l'effet de mélanges
perturbateurs endocriniens
sur le cycle ovarien chez la femme _____ 58

Focus/Y a-t-il des marqueurs biologiques
pour l'électrosensibilité ? _____ 60

Focus/Toxicité pulmonaire aiguë
des nanoparticules :
les tests *in vitro* sont-ils prédictifs
des effets observés *in vivo* ? _____ 61

Approches intégrant bioessais et analyses chimiques pour évaluer la qualité des milieux aquatiques

Contributeurs

Selim AÏT-AÏSSA,
François BRION

Les milieux aquatiques contiennent des milliers de molécules chimiques, de classes et d'origines très diverses, qui peuvent générer des métabolites et produits de dégradation parfois plus toxiques que les composés parents. La surveillance de la qualité chimique des milieux aquatiques est actuellement basée sur l'analyse chimique d'un nombre fini de polluants prioritaires, sélectionnés sur la base de leur impact environnemental. Elle ne rend de fait que partiellement compte de la complexité des contaminations. Le développement de méthodologies permettant de caractériser de manière plus intégrative la contamination chimique constitue donc un enjeu important pour la surveillance dans l'avenir.

Dans le cadre de ses programmes de recherche, l'Ineris met en œuvre des bioessais *in vitro* et *in vivo* qui détectent la présence de polluants sur la base de leur mode d'action toxique, comme les perturbateurs endocriniens (PE) à activité hormono-mimétique. L'utilisation de ces outils, en combinaison avec des approches analytiques, au sein d'une démarche intégrée vise à [1] dresser un diagnostic

de la contamination sur la base de profil de toxicité *in vitro*, [2] renseigner sur la pertinence des mécanismes identifiés à l'échelle *in vivo* et [3] identifier les polluants responsables par une approche dite EDA (Effect Directed Analysis) combinant analyses chimiques et bioessais (Figure 1).

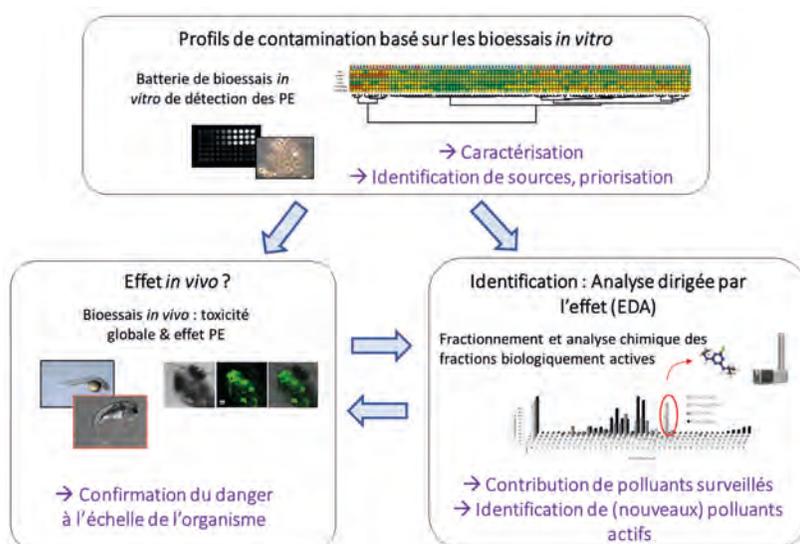
Travaux

L'utilisation combinée de bioessais *in vitro* et *in vivo* a été mise en œuvre dans différents contextes environnementaux [1;2]. Dans le cas présent, elle a été appliquée pour caractériser la contamination d'un rejet urbain et évaluer son impact sur la rivière [3]. Menée en collaboration avec l'Eawag (Suisse) dans le cadre du projet européen FP7-EDA-EMERGE, cette étude a mis en évidence des activités *in vitro* de type estrogénique et glucocorticoïde dans les eaux usées de cette station mais également dans le milieu récepteur en aval du rejet, lequel constitue une source importante de substances de type PE pour les milieux aquatiques. Leurs effets PE ont été mesurés à l'échelle de l'organisme chez le poisson zèbre, le modèle *in vivo* révélant également un effet global de l'effluent sur le développement embryonnaire.

Résultats

L'application d'une démarche de type EDA (*effect-directed analysis*) a permis d'identifier certains composés responsables des effets observés. Dans son principe, l'EDA consiste à fractionner (e.g. par méthode HPLC) l'échantillon initial qui contient le mélange complexe, à tester l'activité biologique des différentes fractions et à identifier et isoler celles qui contiennent les activités biologiques. Cette approche permet une simplification de la complexité du mélange, ce qui facilite l'identification des molécules qui y sont présentes par analyses chimiques non ciblées [4]. Cette approche a ainsi permis d'isoler différentes fractions estrogéniques et glucocorticoïdes dans l'effluent et d'identifier de nouveaux polluants, comme le propionate de clobétasol et le propionate de fluticasone activateurs du récepteur des glucocorticoïdes [3]. Ces résultats corroborent d'autres études récentes qui montrent la présence de cette famille de substances dans les eaux et soulèvent la question de leurs effets, aujourd'hui mal connus, sur la physiologie des poissons. Cette étude démontre la pertinence d'une telle démarche intégrée

Figure 1 / Démarche globale intégrant approches biologiques (bioessais *in vitro* et *in vivo*) et analytique (approche EDA) pour caractériser la contamination des milieux aquatiques par des composés de type perturbateurs endocriniens.



pour caractériser la contamination de rejets et identifier les polluants responsables des effets observés. La pertinence du diagnostic chimique basé sur les bioessais a également été montrée dans le cadre d'autres études menées à plus large échelle. L'établissement de profils de toxicité permet d'identifier des sites très actifs ou avec des profils de toxicité particuliers et de les prioriser. Cette approche s'est avérée utile pour cartographier et identifier des points sources de pollution dans le cadre de réseaux urbains d'eaux usées (projets MICROPOLIS et REGARD) [3; 5] ou de programmes de surveillance d'eaux de rivières [1; 6].

L'intérêt d'une approche holistique intégrant outils biologiques et analytiques pour une évaluation plus pertinente de la contamination des masses d'eaux et des rejets est aujourd'hui démontré. Des préconisations ont été faites au niveau européen à l'issue du projet SOLUTIONS [7; 8; 9], qui vont dans le sens des études menées au niveau national [1], travaux en cours dans le cadre d'AQUAREF). La stratégie d'utilisation de ces outils dans un cadre réglementaire fait actuellement l'objet de travaux dans des groupes d'experts au niveau national¹ et européen², en particulier sur les valeurs guides environnementales pour les bioessais et les critères d'application en surveillance réglementaire. L'ensemble de ces travaux devrait permettre d'introduire à terme ces outils biologiques dans la surveillance de la qualité chimique des milieux aquatiques.

ABSTRACT /

Effect-based methods (EBM) are recognized as relevant tools to diagnose and monitor chemical contamination in aquatic systems, considering both known and unknown biologically active contaminants. Integrated strategies combining EBM and analytical tools are needed for holistic assessment of aquatic micropollutants and identification of causes of degraded water quality. Such an integrative approach has been developed at Ineris to assess environmental endocrine disruptive compounds (EDCs). By using a smart battery of in vitro (cellular assays) and in vivo (fish embryo) bioassays, we established contamination profiles of environmental matrices based on complementary bioassays that cover different modes of action of EDCs, while informing on their impact and general toxicity at the organism level in zebrafish embryos. Combining bioassays with analytical methods allows effect-directed identification of those compounds responsible for observed effects. Such an approach has been successfully applied in local case-studies, such as EDC hazard assessment and identification of glucocorticoid compounds in urban effluent [3], as well as in national and European demonstration studies [1; 6].

¹ Groupe français « Bioessais » piloté par l'Ineris et l'Agence française pour la biodiversité.
² Groupe de travail « Chemicals », sous-groupe « Bioessais », de la direction générale de l'Environnement de la Commission européenne.

Références

- [1] Ait-Aïssa S.; Brion F.; Creusot N.; Sanchez W.; 2014. Étude prospective 2012 sur les contaminants émergents : Apport des outils biologiques (bioessais et biomarqueurs) pour le diagnostic de la contamination des milieux aquatiques. Rapport Ineris-ONEMA, DRC-14-127339-06620A.
- [2] Ait-Aïssa S.; Maillot-Marechal E.; Creusot N.; Gardia-Parèze C.; Budzinski H.; 2017. Détection de composés perturbateurs endocriniens et dioxin-like à l'aide de bioessais *in vitro* dans les eaux usées, pluviales et naturelles. Projet REGARD - Réduction et gestion des Micropolluants sur la métropole bordelaise. Rapport tâche 1.3.3.
- [3] Sonavane M.; Schollee J.E.; Hidasi A.O.; Creusot N.; Brion F.; Suter M.J.F.; Hollender J.; Ait-Aïssa S.; 2018. An integrative approach combining passive sampling, bioassays, and effect-directed analysis to assess the impact of wastewater effluent. *Environ. Toxicol. Chem.* 37, 2079-2088.
- [4] Creusot N.; Budzinski H.; Balaguer P.; Kinani S.; Porcher J.M.; Ait-Aïssa S.; 2013. Effect-directed analysis of endocrine-disrupting compounds in multi-contaminated sediment: identification of novel ligands of estrogen and pregnane X receptors. *Anal. Bioanal. Chem.* 405, 2553-2566.
- [5] Penru Y.; Guillon A.; Ait-Aïssa S.; Couteau J.; 2017. Caractérisation de la toxicité des eaux usées à Sophia Antipolis. Projet MICROPOLIS Indicateurs, Livrable 1.
- [6] Tousova Z.; Oswald P.; Slobodnik J.; Blaha L.; Muz M.; Hu M.; Brack W.; Krauss M.; Di Paolo C.; Tarcai Z.; Seiler T.B.; Hollert H.; Koprivica S.; Ahel M.; Schollee J.E.; Hollender J.; Suter M.J.F.; Hidasi A.O.; Schirmer K.; Sonavane M.; Ait-Aïssa S.; Creusot N.; Brion F.; Froment J.; Almeida A.C.; Thomas K.; Tollefsen K.E.; Tufi S.; Ouyang X.Y.; Leonards P.; Lamoree M.; Torrens V.O.; Kolkman A.; Schriks M.; Spirhanzlova P.; Tindall A.; Schulze T.; 2017. European demonstration program on the effect-based and chemical identification and monitoring of organic pollutants in European surface waters. *Sci. Total Environ.* 601, 1849-1868.
- [7] Neale P.A.; Altenburger R.; Ait-Aïssa S.; Brion F.; Busch W.; Umbuzeiro G.D.; Denison M.S.; Du Pasquier D.; Hilscherova K.; Hollert H.; Morales D.A.; Novak J.; Schlichting R.; Seiler T.B.; Serra H.; Shao Y.; Tindall A.J.; Tollefsen K.E.; Williams T.D.; Escher B.I.; 2017a. Development of a bioanalytical test battery for water quality monitoring: Fingerprinting identified micropollutants and their Contribution to effects in surface water. *Water Research* 123, 734-750.
- [8] Neale P.A.; Munz N.A.; Ait-Aïssa S.; Altenburger R.; Brion F.; Busch W.; Escher B.I.; Hilscherova K.; Kienle C.; Novak J.; Seiler T.B.; Shao Y.; Stamm C.; Hollender J.; 2017b. Integrating chemical analysis and bioanalysis to evaluate the contribution of wastewater effluent on the micropollutant burden in small streams. *Sci. Total Environ.* 576, 785-795.
- [9] Escher B.I.; Ait-Aïssa S.; Behnisch P.A.; Brack W.; Brion F.; Brouwer A.; Buchinger S.; Crawford S.E.; Du Pasquier D.; Hamers T.; Hettwer K.; Hilscherova K.; Hollert H.; Kase R.; Kienle C.; Tindall A.J.; Tuerk J.; van der Oost R.; Vermeirssen E.; Neale P.A.; 2018. Effect-based trigger values for *in vitro* and *in vivo* bioassays performed on surface water extracts supporting the environmental quality standards (EQS) of the European Water Framework Directive. *Sci. Total Environ.* 628-629, 748-765.

Intérêt des réponses immunitaires dans le cadre des études de biosurveillance

Contributeurs

Anne
BADO-NILLES,

Jean-Marc
PORCHER,

Adrien
MARCHAND,

Cyril TURIÈS,

Edith CHADILI

Les écosystèmes sont dépendants des conditions de vie qui leur sont fournies : toute pollution y engendre des effets néfastes. De ce fait, il est primordial de pouvoir statuer sur l'état chimique et écologique des masses d'eau afin de caractériser le risque environnemental induit et de prendre des décisions en conséquence sur sa gestion. Néanmoins, la réglementation actuelle, ne s'appuyant que sur le caractère *a posteriori* d'une dégradation, s'avère insuffisamment prédictive de l'effet à long terme des modifications d'un écosystème.

En complément des méthodes conventionnelles de détermination de la qualité des masses d'eau (état chimique et écologique), d'autres approches basées sur les mécanismes d'action des polluants permettent une évaluation plus précoce et plus explicative de l'impact de la contamination sur les organismes. En effet, les contaminants sont susceptibles de causer, directement ou indirectement, des effets nuisibles sur les principaux systèmes physiologiques comprenant les systèmes endocriniens, reproducteurs, nerveux et immunitaires [1;2]. De tels effets peuvent remettre en cause la croissance, la reproduction, voire la survie des organismes sur lesquels ils s'appliquent. Ainsi, une approche biologique basée sur l'étude des biomarqueurs, permet de rendre compte des effets potentiels sur les individus. Même si les biomarqueurs ne permettent pas une identification formelle des substances responsables, de par leur prédictivité, ils présentent une place importante en complément des approches « substances » et « écologiques ».

Travaux

Parmi l'ensemble des biomarqueurs existants, l'étude du système immunitaire non spécifique apparaît comme de plus en plus pertinente dans l'analyse du risque environnemental. Il a notamment été démontré qu'une altération des fonctions immunitaires par des polluants, même à faible dose, peut conduire à une augmentation de la sensibilité aux maladies virales, bactériennes et parasitaires ainsi qu'aux tumeurs [3;4;5;6;7] pouvant expliquer la présence de déclin piscicole sur certaines rivières [3]. Bien que des changements majeurs dans les réponses immunitaires induisent rapidement une morbidité pouvant aller jusqu'à la mortalité, ces modifications

sont souvent précédées de changements subtils de certains des composants du système immunitaire pouvant alors être utilisés comme des biomarqueurs précoces d'immunotoxicité [8;2]. Ainsi, la mesure d'indicateurs d'immunotoxicité apparaît comme un outil attractif dans un contexte d'évaluation des risques environnementaux. Cependant, la mise en œuvre de ces immunomarqueurs dans le cadre de la surveillance réglementaire des masses d'eau doit correspondre aux attentes des gestionnaires de l'environnement.

Pour y répondre, afin d'éviter des erreurs de diagnostic lors de l'évaluation de l'état de santé des espèces du milieu aquatique, une bonne connaissance de l'effet des facteurs confondants sur les paramètres immunitaires est requise. Elle permet de définir les plages de variations naturelles des immunomarqueurs (valeur de référence, Figure 1). Même si le système immunitaire s'avère particulièrement sensible à l'exposition aux contaminants, de nombreux paramètres environnementaux, saisonniers et individuels influencent les réponses immunitaires [9;10;11;12;13;14], induisant par là-même des fluctuations parfois conséquentes. La méconnaissance de ces fluctuations peut mener à des erreurs de diagnostic lors d'études de terrain.

Perspectives

En présence d'un stress chimique, les immunomarqueurs peuvent évoluer en dehors de ces valeurs de référence, nécessitant chez les individus une adaptation à leur environnement *via* des modulations réversibles de leurs réponses physiologiques (Figure 1). Cependant, en cas de stress trop important ou trop prolongé, cette capacité d'adaptation peut être dépassée [15] induisant à terme une réduction des capacités de résistance des animaux face aux maladies. Les futurs projets de recherche de l'Ineris vont chercher à mieux concevoir la limite d'adaptabilité des organismes aux stress chimiques en définissant des valeurs seuils au-delà desquelles un phénomène physique, chimique ou biologique est susceptible de provoquer un effet irréversible (Figure 1).

La mise en œuvre de ces valeurs seuils d'effet biologique devrait contribuer à mieux comprendre, voire anticiper, les déclins piscicoles dans certaines rivières françaises. Par exemple, l'Ineris a pu montrer

que des poissons exposés à de fortes concentrations en métaux dissous ne sont plus capables de mettre en œuvre leur réponse immunitaire en présence d'une stimulation pathogénique aux endotoxines bactériennes contrairement aux poissons exposés à de faibles concentrations [16]. De même, il a été démontré [17] une incapacité des poissons à répondre positivement à un stress biologique (endotoxine bactérienne) lorsqu'ils sont préalablement exposés à une forte concentration en chlorpyrifos (1,75 µg/L) alors qu'une faible dose (0,88 µg/L) n'induirait pas de dommages irréversibles sur la capacité de réponse.

Références

[1] Fournier M.; Cyr D.; Blakley B.; Boermans H. and Brousseau P. 2000. Phagocytosis as a biomarker of immunotoxicity in wildlife species exposed to environmental xenobiotics. *American Zoologist* 40:412-420.

[2] Van der Oost R.; Beyer J. and Vermeulen N. P. E. 2003. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 13:57-149

[3] Arkoosh M. R.; Casillas E.; Clemons E.; Kagley A. N.; Olson R.; Reno P. and Stein J. E. 1998. Effect of Pollution on Fish Diseases: Potential Impacts on Salmonid Populations. *Journal of Aquatic Animal Health* 10:182-190.

[4] Carlson E. A.; Li Y. and Zelikoff J. T. 2002. Exposure of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) to benzo[a]pyrene suppresses immune function and host resistance against bacterial challenge. *Aquatic Toxicology* 56:289-301.

[5] Nacci D.; Huber M.; Champlin D.; Jayaraman S.; Cohen S.; Gauger E.; Fong A. and Gomez-Chiarri M. 2009. Evolution of tolerance to PCBs and susceptibility to a bacterial pathogen (*Vibrio harveyi*) in Atlantic killifish (*Fundulus heteroclitus*) from New Bedford (MA, USA) harbor. *Environmental Pollution* 157:857-864.

[6] Kreutz, L. C.; L. J. Gil Barcellos, A. Marteninghe, E. Davi dos Santos, and R. Zanatta. 2010. Exposure to sublethal concentration of glyphosate or atrazine-based herbicides alters the phagocytic function and increases the susceptibility of silver catfish fingerlings (*Rhamdia quelen*) to *Aeromonas hydrophila* challenge. *Fish & Shellfish Immunology* 29:694-697.

[7] Danion M.; Le Floch S.; Castric J.; Lamour F.; Cabon J. and Quentel C. 2012. Effect of chronic exposure to pendimethalin on the susceptibility of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* L. to viral hemorrhagic septicemia virus (VHSV). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 79:28-34.

[8] Galloway T. S.; and Depledge M. H. 2001. Immunotoxicity in invertebrates: measurement and ecotoxicological relevance. *Ecotoxicology* 10:5-23.

[9] Harris J.; and Bird D. J. 2000. Modulation of the fish immune system by hormones. *Veterinary Immunology and Immunopathology* 77:163-176.

[10] Saha N. R.; Usami T.; and Suzuki Y. 2002. Seasonal changes in the immune activities of common carp (*Cyprinus carpio*). *Fish Physiology and Biochemistry* 26:379-387.

[11] Bowden T. J.; Thompson K. D.; Morgan A. L.; Gratacap R. M. L.; and Nikoskelainen S. 2007. Seasonal variation and the immune response: A fish perspective. *Fish & Shellfish Immunology* 22:695-706.

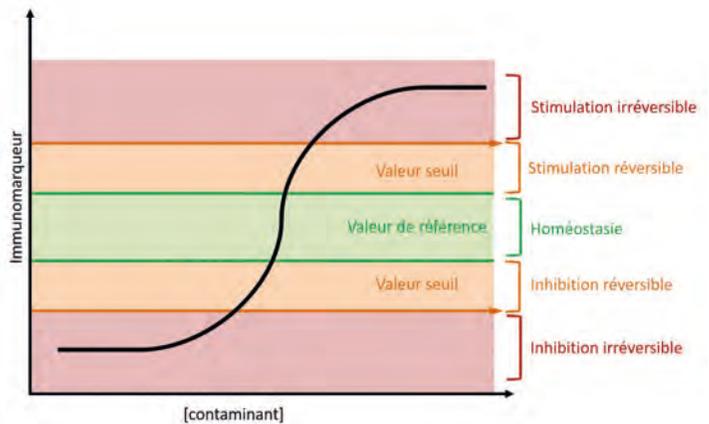
[12] Duchemin M. B.; Fournier M.; and Auffret M. 2007. Seasonal variations of immune parameters in diploid and triploid Pacific oysters, *Crassostrea gigas* (Thunberg). *Aquaculture* 264:73-81.

[13] Buchtíková S.; Šimková A.; Rohlenová K.; Flajšhansc M.; Lojek A.; Lilius E.-M.; and Hyršla P. 2011. The seasonal changes in innate immunity of the common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture* 318:169-175.

ABSTRACT /

Immune parameters are interesting in biomonitoring studies as they reflect environmental contamination and fish health status. Nevertheless, fish immunomarkers could be influenced by many environmental and interindividual parameters. All these confounding factors limit the interpretation of variation between sites and may disturb the routine environmental risk assessment. Characterizing the remaining natural sources of biomarker variability could allow discriminating responses induced by pollutant exposure and background noise. In this way, establishment of reference values, that consider the major sources of variation, may be of great interest for environmental monitoring studies. Moreover, connection has been established between the destabilization of the fish immune system caused by sub-lethal doses of contaminants and a defect in fish pathogen resistance. In this way, we proposed to develop a stress on stress responses by using some bacterial endotoxin, which mimic pathogen effect, and chemical exposure. This method can be a promising approach for the assessment of pollutant effects in aquatic ecosystems by determining biological threshold values. This biological threshold values could indicate the real capacity of fish to respond during pathogenic condition.

Figure 1 / Représentation schématisée des valeurs d'intérêt pour la biosurveillance environnementale



[14] Milla S.; Depiereux S.; and Kestemont P. 2011. The effects of estrogenic and androgenic endocrine disruptors on the immune system of fish: a review. *Ecotoxicology* 20:305-319.

[15] Depledge M. H.; and Fossi M. C. 1994. The role of biomarkers in environmental assessment (2). *Invertebrates. Ecotoxicology* 3:161-172.

[16] Le Guernic A.; Sanchez W.; Palluel O.; Bado-Nilles A.; Floriani M.; Turies C.; Chadili E.; Vedova C. D.; Cavalié I.; Adam-Guillermin C.; Porcher J.-M.; Geffard A.; Betouille S.; and Gagnaire B. 2016. Acclimation capacity of the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*, L.) to a sudden biological stress following a polymetallic exposure. *Ecotoxicology* 25:1478-1499.

[17] Marchand A.; Porcher J.-M.; Turies C.; Chadili E.; Palluel O.; Baudoin P.; Betouille S.; and Bado-Nilles A. 2017. Evaluation of chlorpyrifos effects, alone and combined with lipopolysaccharide stress, on DNA integrity and immune responses of the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 145:333-339.

Prédictions de l'effet de mélanges perturbateurs endocriniens

sur le cycle ovarien chez la femme

Contributeur
Frédéric BOIS

La sécurité des produits chimiques est en général évaluée produit par produit, sans tenir compte de la somme des expositions possibles ni des synergies ou antagonismes potentiels des co-expositions. L'hypothèse faite par défaut est que le contrôle des expositions à chaque produit est suffisant pour nous protéger des expositions multiples. Il y a peu de justification à cette hypothèse, pourtant l'effet potentiel des co-expositions est rarement évalué. La constitution récente de larges bases de données sur les expositions et les effets des produits chimiques, et les avancées dans la puissance de calcul permettent maintenant une exploration de ce problème. Dans cette optique, nous avons récemment évalué à l'aide de modèles mathématiques la magnitude des effets potentiels de l'exposition à des mélanges d'inhibiteurs de l'aromatase sur la dynamique du cycle menstruel chez la femme. L'aromatase est une enzyme clef de la synthèse de l'œstradiol, hormone sexuelle fondamentale pour la reproduction des mammifères.

Travaux

Pour évaluer l'incertitude associée à nos prédictions, des millions d'expositions à des mélanges potentiels de 86 inhibiteurs de l'aromatase ont été simulées (Figure 1). Le profil temporel d'exposition, durant

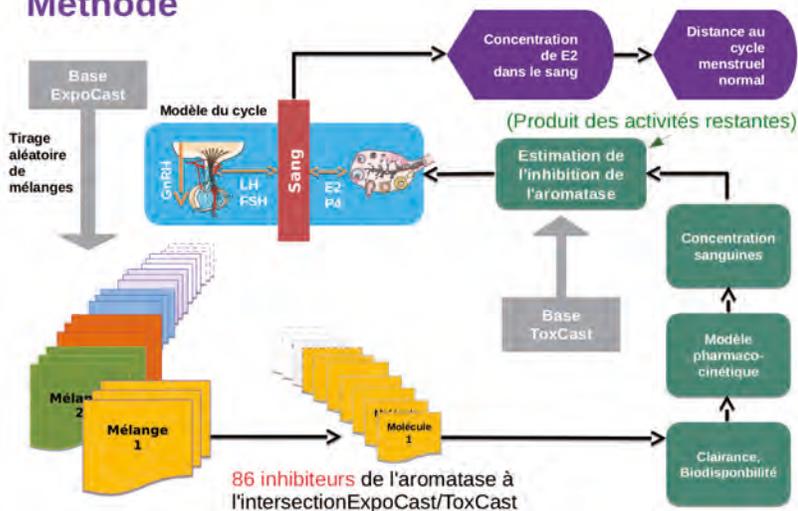
deux ans, de chaque produit d'un mélange a été tiré aléatoirement de distributions fournies par la base de données et les modèles du programme ExpoCast¹. Un modèle pharmacocinétique de distribution des produits dans le corps a été utilisé pour prédire la concentration interne des substances étudiées en fonction du temps durant cette période de deux ans (Figure 2). Un test *in vitro* d'inhibition de l'aromatase du projet ToxCast² a fourni la relation entre concentration de la substance au niveau de l'ovaire et pourcentage d'inhibition de l'aromatase pour chaque substance. L'inhibition de l'aromatase résultant de l'exposition aux mélanges a été introduite dans un modèle mathématique du contrôle hormonal de l'ovulation chez la femme (Figure 3).

Résultats

Les résultats indiquent qu'au-delà de 10 % de réduction de la synthèse de l'œstradiol par inhibition de l'aromatase, des effets notables (mais éventuellement réversibles selon le modèle) sur l'ovulation sont prédits. L'exposition aux substances seules ne conduit jamais à de tels effets, par contre ils sont probables lorsque l'on tient compte des co-expositions. Toujours selon l'estimation de l'Ineris, environ 10 % des expositions combinées simulées ont des effets allant de légers à catastrophiques sur l'ovulation (Figure 4). Une borne inférieure sur ce chiffre, obtenue à l'aide un scénario d'exposition très optimiste, est de 0,3 %.

Figure 1 / Schéma des étapes suivies pour la prédiction des effets de mélanges de perturbateurs endocriniens sur le cycle ovarien chez la femme (E2 : œstradiol).

Méthode



Ces résultats [1] démontrent la possibilité de prédire les effets toxiques de mélanges complexes pour les perturbateurs endocriniens. L'approche prédictive est adaptée à l'évaluation rapide des risques, sur la base de données haut-débit. La magnitude des effets prédits suite aux expositions quotidiennes à notre environnement chimique *via* l'alimentation, le lieu de travail, la prise de médicaments, etc., est compatible avec un risque accru de stérilité chez les femmes. Il serait utile de chercher à confirmer ces prédictions par des recherches toxicologiques ou épidémiologiques et d'adopter une attitude de précaution vis-à-vis des d'inhibiteurs de l'aromatase les plus toxiques et les plus prévalents.

¹ <https://www.epa.gov/chemical-research/rapid-chemical-exposure-and-dose-research>

² <https://www.epa.gov/chemical-research/toxicity-forecasting>

Figure 2 / Profil typique de concentration prédite dans le corps humain pour un produit chimique (ici le lindane) durant deux ans d'expositions aléatoires. Les concentrations internes sont très faibles (de l'ordre du femto-molaire (10⁻¹⁵)). Les expositions externes correspondent aux estimations fournies par la base de données ExpoCast de l'US EPA.

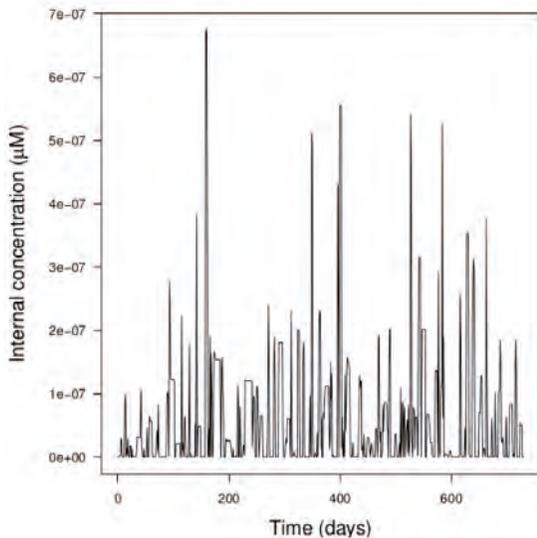
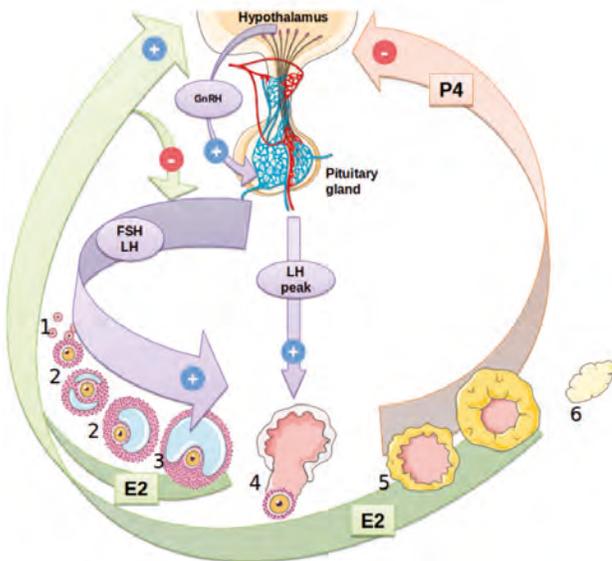


Figure 3 / Schéma de mécanisme du cycle ovarien chez la femme. La maturation d'un follicule (étapes 1 à 6) est initiée par les hormones pituitaires FSH et LH. L'ovulation (étape 4) est déclenchée par un pic de LH. Durant tout son cycle, le follicule produit de l'œstradiol (E2), stimule la production de l'hormone GnRH par l'hypothalamus du cerveau, mais contrôle aussi la production de FSH et LH. Après l'ovulation, le follicule dégénère et produit aussi de la progestérone (P4) qui inhibe la production de GnRH (Gonadotropin-Releasing Hormone).



Référence

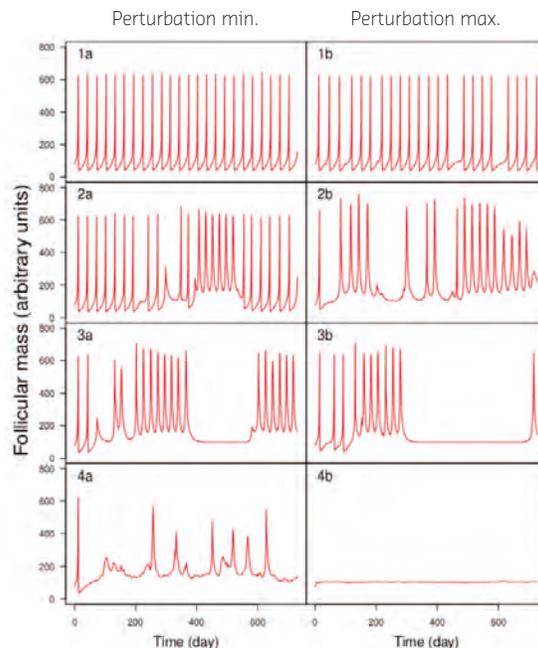
[1] Bois F.; Golbamaki-Bakhtyari N.; Kovarich S.; Tebby C.; Gabb H.A.; Lemazurier E.; 2017, A high-throughput analysis of ovarian cycle disruption by mixtures of aromatase inhibitors, *Environmental Health Perspectives*, 077012-1, doi:10.1289/EHP742.

ABSTRACT /

Combining modeling with databases of exposures and toxicity can predict human health risks from exposures to chemical mixtures. To assess the potential effects of random mixtures of aromatase inhibitors on the dynamics of women's menstrual cycles, we simulated millions of exposures scenarios to mixtures of 86 aromatase inhibitors. A pharmacokinetic model was used to predict the internal concentration of each chemical for up to two years.

A ToxCast aromatase assay provided concentration-inhibition relationships for each chemical. The resulting total aromatase inhibition was input to a mathematical model of the hormonal hypothalamus-pituitary-ovarian control of ovulation in women. Above 10 % inhibition of estradiol synthesis, noticeable (eventually reversible) effects on ovulation were predicted. About 10 % of the combined exposures simulated had mild to catastrophic impacts on ovulation. A lower bound on that figure, obtained using an optimistic exposure scenario, was 0.3 %. These results demonstrate the possibility to predict large-scale mixture effects for endocrine disruptors with a predictive toxicology approach, suitable for high-throughput ranking and risk assessment.

Figure 4 / Simulations de l'évolution de la masse folliculaire lors de deux ans de co-exposition à 86 inhibiteurs de l'aromatase chez la femme. De la gauche vers la droite et du haut vers le bas, les panneaux sont dans l'ordre croissant de perturbation. Le panneau 1a correspond à un cycle normal et le panneau 4b à une absence totale de cycle. Des cycles pratiquement normaux (rangée 1) sont observés dans 17 % des cas, des cycles légèrement perturbés (rangée 2) dans 73 % des cas, et des cycles très perturbés (3 et 4) dans les 10 % restants.



Focus / Y a-t-il des marqueurs biologiques pour l'électrosensibilité ?

Contributeur
Brahim
SELMAOUI

L'exposition de l'être humain aux champs électromagnétiques (CEM) ne cesse d'augmenter. Ceci est dû en partie à l'évolution fulgurante et constante des technologies de la communication. Certains individus déclarent présenter des troubles atypiques (maux de tête, troubles du sommeil, de la concentration...) qu'ils attribuent aux CEM. Ce syndrome a été classé en 2004 par l'Organisation mondiale de la santé dans la famille des intolérances environnementales idiopathiques (IEI). De nombreuses études de provocation ont été réalisées afin de déterminer l'association éventuelle entre champs électromagnétiques et le développement des symptômes. À ce jour, aucun lien scientifique n'a été établi et des questionnements persistent quant aux mécanismes d'action sous-jacents et aux éventuels marqueurs biologiques. Malgré quelques hypothèses, il n'existe pas de mécanisme largement accepté par la communauté scientifique. Ces symptômes sont réels, et posent un problème de diagnostic objectif des électrohypersensibles (EHS). Ce trouble, constituant parfois un handicap pour les personnes touchées, nécessite des recherches approfondies en termes de mécanisme étiopathogénique mais également de biomarqueurs.

Travaux

L'Ineris a lancé le programme de recherche Sensi-RF pour rechercher chez des personnes se déclarant électrosensibles des marqueurs et indices physiologiques¹ objectifs. Ce programme est articulé en trois étapes: 1) questionnaires pour caractériser la population des électrosensibles recrutés dans l'étude; 2) étude clinique des profils biologiques en l'absence d'exposition aux CEM; 3) étude clinique des profils biologiques lors d'une exposition en double aveugle. Comme à ce jour, il n'y a pas de marqueurs de ce syndrome, l'étude explore les grandes fonctions physiologiques susceptibles d'être affectées, par des mesures électrophysiologiques et la mesure de marqueurs endocriniens, circadiens et immunitaires au niveau salivaire et urinaire.

Résultats

Les résultats ont montré que si la majorité des indices et des marqueurs ne sont pas perturbés chez les sujets électrosensibles en l'absence d'exposition intentionnelle en laboratoire, l'activité de l' α amylase salivaire, représentative du système sympathique est plus élevée chez les électrosensibles par rapport aux contrôles (non EHS). De plus, l'analyse de la réponse électrodermale

(représentative du système nerveux autonome) montre une tendance à une différence dans les réponses aux stimuli sonores pour le groupe EHS (nombre plus élevé de réponses aux stimulations). Ces résultats suggèrent une différence au niveau du système nerveux autonome. Cependant une exposition intentionnelle au laboratoire à quatre différents signaux de radiofréquences (GSM900, GSM1800, Wi-Fi, DECT) ne montre aucune modification significative des indices physiologiques ni des paramètres biochimiques étudiés chez les EHS.

En conclusion, les données actuelles suggèrent une éventuelle modification de l'état d'équilibre du système nerveux autonome en condition de base chez les EHS. Cette piste mérite d'être approfondie par une analyse d'autres composantes biologiques afin d'infirmier ou de confirmer un éventuel déséquilibre du système nerveux autonome.

¹ Les indices physiologiques mesurés sont la variabilité du rythme cardiaque et la réponse électrodermale. Les analyses biochimiques salivaires comportaient les paramètres suivants: néoptérine urinaire, alpha-amylase salivaire, cortisol salivaire, mélatonine salivaire et urinaire, C-reactive Protein salivaire.

Référence

Andrianome Soafara. Intolérance environnementale idiopathique avec attribution aux champs électromagnétiques (IEI-CEM): Étude des systèmes nerveux sympathique, endocrinien et immunitaire. Thèse de doctorat (physiologie humaine). Université d'Amiens, 12/01/2017, 257 p.

Focus / Toxicité pulmonaire aiguë des nanoparticules : les tests *in vitro* sont-ils prédictifs des effets observés *in vivo* ?

Contributeur
Ghislaine
LACROIX

Les modèles animaux restent actuellement des outils de référence pour prédire la toxicité des substances chez l'être humain. Néanmoins, pour des raisons éthiques, il est nécessaire de rechercher des alternatives fiables. Les modèles *in vitro* utilisant des cellules pulmonaires peuvent contribuer à évaluer la toxicité potentielle des nanoparticules (NPs) inhalées mais leur capacité à prédire les effets observés chez l'animal de laboratoire doit en premier lieu être étudiée.

Travaux

Les méthodes *in vitro* utilisent classiquement des cultures constituées d'un seul type de cellules, exposées par contact avec la substance d'intérêt *via* le milieu de culture (exposition en mode submergé). Des modèles

plus élaborés font appel à des co-cultures (comprenant deux types cellulaires ou plus), cultivées à l'interface air-liquide (ALI) pour recréer les conditions physiologiques observées au niveau des poumons. Ces cultures sont par la suite exposées directement à des aérosols de NPs pour mimer au mieux une exposition par inhalation.

L'hypothèse testée dans le cadre de ce travail est que les modèles cultivés en ALI et exposés à des aérosols de NPs permettent de prédire, de manière plus fiable que les modèles exposés en submergé, les réponses biologiques observées *in vivo*.

Résultats

Des co-cultures de cellules pulmonaires (cellules épithéliales A549 et macrophages THP-1) ont été exposées à l'ALI ou en

submergé à des NPs peu solubles (TiO_2 et CeO_2), respectivement sous forme d'aérosols ou de suspensions [1] et les réponses biologiques observées 24 h après le début de l'exposition ont été comparées à celles obtenues chez des rats exposés 24 h par voie pulmonaire aux mêmes NPs [2]. En utilisant des référentiels de doses et des marqueurs d'effets similaires entre *in vitro* et *in vivo*, il a été observé que les modèles *in vitro* exposés en submergé et ceux cultivés en ALI et exposés à des aérosols de NPs fournissent des réponses biologiques similaires mais que les cultures exposées en ALI répondent à des doses plus réalistes et plus proches de celles induisant des effets *in vivo* au niveau pulmonaire.

En conclusion, l'utilisation de modèles cellulaires *in vitro*, plus représentatifs de l'organisation cellulaire au niveau des poumons et de méthodes d'exposition *in vitro*, plus réalistes, permet d'obtenir des informations plus fiables et pertinentes sur la toxicité à court terme des NPs de TiO_2 et CeO_2 (en termes de doses d'effet).

Figure 1 / Nanoparticules d'oxydes métalliques déposées sur les cellules cultivées à l'ALI.

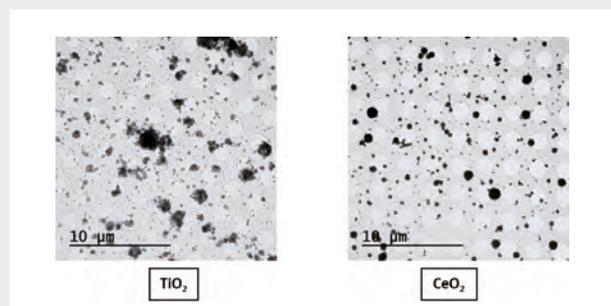
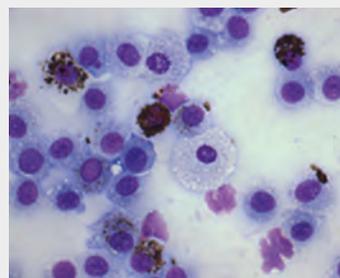


Figure 2 / Nanoparticules d'oxydes métalliques (TiO_2) au contact des cellules pulmonaires de rat.



Références

[1] Loret T.; Peyret E.; Dubreuil M.; *et al.* Air-liquid interface exposure to aerosols of poorly soluble nanomaterials induces different biological activation levels compared to exposure to suspensions. *Part Fibre Toxicol.* 2016;13(1):58.

[2] Loret T.; Rogerieux F.; Trouiller B.; *et al.* Predicting the *in vivo* pulmonary toxicity induced by acute exposure to poorly soluble nanomaterials by using advanced *in vitro* methods. *Part Fibre Toxicol.* 2018;15(1):25.

Programmes de recherche en cours

Au 1^{er} octobre 2018

Programmes européens /

EEA - European environment agency	
ETC/ACM 2014-2018	European topic centre, calibration centre on air quality
EMPIR - European Metrology Programme for Innovation and Research	
BIOMETHANE	Metrology for biomethane
IMPRESS 2	Enforcement of the industrial emissions, medium combustion plant and eco-design directives, and the EU's emissions trading scheme
Horizon 2020	
ACTRIS-PPP	Aerosols, clouds and trace gases research infrastructure-preparatory phase 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
DEMOBASE	Design and modelling for improved battery safety and efficiency
EC4SAFENANO	European centre for risk management and safe innovation in nanomaterials & nanotechnologies
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 21 st century
FLEDGED	Flexible dimethyl ether (DME) production from biomass gasification with sorption-enhanced processes
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
HUGS	Humins as green and sustainable precursors of eco-friendly building blocks and materials
NanoFASE	Nanomaterial fate and speciation in the environment
NanoReg II	Support for regulation needs in nanotechnologies
OBERON	Metabolism disorders and battery of tests for ED identification
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
SECREETS	Secure european critical rare earth elements
ZELCOR	Zero waste ligno-cellulosic biorefineries by integrated lignin valorisation

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
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

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

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
STAMS	Long-term stability assessment and monitoring of flooded shafts

Programmes nationaux /

Agence nationale de la recherche (ANR)

PHYTOCHEM	Développement de procédés chimiques éco-innovants pour valoriser les biomasses issues de phytotechnologies
PREGO	Préfiguration géothermique des ouvrages profonds
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)

AMI HYDROGENE GRHYD	Gestion des réseaux par l'injection d'hydrogène pour décarboner les énergies
APOLLO	Analyse économique des impacts de la pollution atmosphérique de l'ozone sur la productivité agricole et sylvicole
CARPE	Caractérisation et réduction des émissions des procédés poudres métalliques - Hautes énergies
CARVE	Campagne de mesure de particules à l'émission des foyers domestiques alimentés au bois dans la vallée de l'Arve

Programmes nationaux / suite

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)	
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
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
NANO-IDENT	Nanoparticules en milieu industriel
NANOWET	Incinération haute température de déchets halogénés/soufrés et nanodéchets – Caractérisation des émissions et évaluation du procédé de lavage des fumées
PhytEO	Phytostabilisation 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	Emissions 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
REGIC	Renforcement par géosynthétique intelligent pour risque cavités
SODEMASS	Déconvolution des sources de combustion de biomasse
Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (Anses)	
AIDEZ	Amélioration des essais <i>in vivo</i> pour l'identification des perturbateurs endocriniens à l'aide de poissons zèbres génétiquement modifiés
ERICC	Évaluation économique des risques chimiques complexes
NeuroPrem-RF	Impact de l'exposition chronique aux champs électromagnétiques de types radiofréquences sur le développement physiologique du nouveau-né prématuré
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 et solidaire	
ANIMATION PRIMEQUAL EIAI	Environnements intérieurs et approches innovantes
Conseil régional des Hauts de France	
DEMOSTHENE	Démonstrateur de stockage saisonnier d'énergie thermique en carrière souterraine partiellement ennoyée
PHYTOEXCO	Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur <i>Arabidopsis halleri</i> en co-culture avec la saule

Gouvernance scientifique

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

Conseil scientifique /

Le conseil scientifique examine les orientations stratégiques de l'Institut et procède à l'analyse de ses activités scientifiques et techniques. Il est composé de personnalités françaises et étrangères appartenant au milieu académique, à des organismes pairs ainsi qu'au monde industriel.

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



Membre

Michel De LARA

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

Membre

Isabelle MOMAS

Université Paris
Descartes, Faculté
de pharmacie

Membre

Michel SARDIN

Professeur
ENSIC Université
de Lorraine

Membre

Valérie CABUIL

Rectrice
Académie d'Amiens

Membre

Nadine GABAS

Qualité Sécurité-
Environnement
ENSIACET

Commissions scientifiques spécialisées /

Les commissions scientifiques spécialisées donnent leur avis sur l'ensemble des activités de recherche de l'Institut dans ses divers domaines d'intervention. Elles sont composées de personnalités françaises ou étrangères appartenant au milieu académique, à des organismes pairs ainsi qu'au monde industriel.

Commission scientifique «Risques accidentels»

Président :

Eric CLIMENT

Institut de mécanique
des fluides de Toulouse

/

Vice-président :

Murès ZAREA - GDF Suez

/

Hervé BREULET

Institut scientifique
de service public

/

André CARREAU - EDF

/

Nabiha CHAUMEIX - CNRS

/

Eric CHOJNACKI - IRSN

/

Lionel ESTEL

Institut national des sciences
appliquées de Rouen

/

Olivier GUILLAUME - EDF R&D

/

Laurent JOUBERT

Université de Rouen

/

Marc-Xavier JOUBERT - Suez

/

Thierry MEYER

École polytechnique fédérale
de Lausanne (EPFL)

/

Guy MIGAULT - Solvay

/

Isabelle PEZRON

Université technologique
de Compiègne

/

Laure SAUVAGE - Total

/

Claude VALOT - Dedale

Commission scientifique «Risques chroniques»

Présidente :

Jeanne GARRIC - Irstea

/

Vice-président :

Jean-François DOUSSIN

Université de Créteil

/

Armelle BAEZA

Université Paris VII - Diderot

/

Nils Axel BRAATHEN - OCDE

/

Séverine DEGUEN

École de hautes études
en santé publique

/

Cécile DELATTRE - EDF

/

George FAVRE - LNE

/

Sophie GODIN-BEEKMANN

IPSL

/

Isabelle LAMY - Inra

/

Agnès LEFRANC - INVS

/

Laurent MENUT

Laboratoire de métrologie
dynamique

/

Patricia MERDY

Université de Toulon

/

Luc MOSQUERON - Veolia

/

Alexandre PERY

ABIES, Agroparis tech

/

Jean PRYGIEL

Agence Eau Artois Picardie

/

Emmanuelle VULLIET

Institut des sciences
analytiques

Commission scientifique «Risques sol et sous-sol»

Président :

Patrick DE BUHAN

ENPC, CGEDD

/

Vice-présidente :

Véronique MERRIEN

SOUKATCHOFF - CNAM

/

Serge BROUYERE

Université de Liège

/

Christophe CHEVALIER

Ifsttar

/

Hervé CUCHE - Solvay

/

Philippe DE DONATO

Université de Lorraine

/

Guilhem DEVEZ - EDF

/

Anne-Marie DUVAL - Cerema

/

Evelyne FORESTIER - CEA

/

Albert GENTER - ES Géothermie

/

Catherine JACQUARD

Fondasol

/

Vincent LAGNEAU

Mines ParisTech

/

Frédéric PLAS - Andra

/

Amel REJEB

OCP international

/

Jean SCHMITTBUHL

École et observatoire
des sciences de la terre

Commission 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. Elle a pour mission d'assister l'Institut dans sa réflexion sur les enjeux et sur les orientations en matière de recherche et d'expertise. 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'Etat.

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 conférence
en science de l'information
et de la participation
Université de technologie de
Compiègne (UTC)

Collège Industriels

Jean-François 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

/

Marie ZIMMER

Expert technique
réglementations produits
France Chimie

Collège Associations

Solène DEMONET

Coordnatrice réseau risques
industriels

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)
CFDT

Collège Élus

Michel GUILLOUX

Adjoint au maire
Mairie de Feyzin

/

René DROUIN

Maire
Mairie de Moyeuve Grande

/

Irène FELIX

Conseillère départementale,
conseillère municipale de
Bourges, secrétaire générale
FNESR

Collège État

Cédric BOURILLET

Directeur général
de la prévention des risques
Ministère de la Transition
écologique et solidaire

/

Laurent BERGEOT

Chef du service de la recherche
(représenté par Lionel
MOULIN, chef de la mission
environnement, risques et santé)
Ministère de la Transition
écologique et solidaire

38 thèses de doctorat

en cours au 20 novembre 2018 à l'Ineris

Risques chroniques

Paul QUINDROIT

Estimating the cumulative human exposures to pyrethroids by combined multi-routes PBPK models: application to the French population
2015/2018
/

Yunjiang ZHANG

Multi-year source apportionment of organic aerosols and their optical properties at the SIRTA ACTRIS station
2016/2019
/

Viviane DAVID

Compréhension et prédiction des effets de substances chimiques sur la dynamique de population de l'épinoche à trois épines en mésocosmes
2016/2019
/

Grazia-Maria LANZAFAME

Measurement and modeling of SOA markers
2016/2019
/

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
/

Marc CODACCIONI

Development of a pregnancy-Physiologically Based Toxicokinetic (p-PBTK) model for high-throughput screening of chemicals
2016/2019
/

Audrey CATTEAU

Optimisation d'une approche d'évaluation des impacts environnementaux basée sur la mesure de biomarqueurs chez l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*)
2016/2019
/

Wang GAO

Réseaux bayésiens : méthodologie et application à l'inférence sur la structure des schémas de mode d'action en toxicologie prédictive
2017/2020
/

Maiqi XIANG

Technique de prélèvement d'aérosol sur grille met poreuse
2017/2020
/

Thi Cuc MAI

Dysfonctionnement de la régulation thermique après exposition chronique chez les rongeurs
2017/2020
/

Arnaud GRIGNET

Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur *Arabidopsis halleri* en co-culture avec le saule (PHYTOEXCO)
2017/2020
/

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
/

Ségoène SIMEON

Modélisation mathématique systémique de la toxicité envers la reproduction et le développement du poisson zèbre
2017/2020
/

Ibtihel BEN DHIAB

Étude de la biodistribution quantitative et qualitative de nanoparticules d'oxyde de titane (TiO₂) après inhalation chez le rat
2017/2020

Corentin REGRAIN

Optimisation des outils d'évaluation de l'exposition spatialisée et intégrée
2017/2020
/

Marie DELLISE

Évaluation multicritère et multi-objectif à l'échelle locale des performances des entreprises en regard des meilleures techniques disponibles
2017/2020
/

Camille NOBLET

Caractérisation chimique de l'aérosol organique atmosphérique en utilisant des approches d'analyses non ciblées
2018/2021
/

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
/

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
/

Andrea RIVERO ARZE

Interaction et accumulation des nanoparticules chez les organismes aquatiques
2018/2021
/

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

Clément BARATANGE

Effets combinés des métaux toxiques et des médicaments sur la reproduction de la moule zébrée *Dreissena polymorpha*
2018/2021

Risques du sol et du sous-sol

Francesca DE SANTIS

Amélioration des outils de prévision du risque sismique dans les exploitations minières profondes
2015/2018

Mouhamad HASSOUN

Limitation par renforcements géosynthétiques des risques liés aux effondrements des cavités souterraines
2015/2018

Jie YANG

Analyses expérimentale et numérique de la problématique multi-physique des fontis au voisinage d'une digue ou ouvrage linéaire
2016/2019

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

Imen ZAIER

Rôle du transport particulaire lié à la destructuration de gypses poreux dans le développement de cavités de dissolution
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

Risques accidentels

Anitha MURALIDHARA

Physico-chemical safety issues pertaining to biosourced furanics valorization with a focus on humins as biomass resource
2016/2019

Eleonora MENICACCI

Compréhension et prédiction des mécanismes d'incompatibilités chimiques à l'aide de la DFT
2016/2019

Audrey SANTANDREA

Compréhension des spécificités des particules nanométriques

pour une meilleure prédiction des conséquences des explosions de poussières
2017/2020

Thi Thu Dieu NGUYEN

Understanding and modeling the Thermal Runaway of Li-ion batteries
2017/2020

Hamza EL YAMANI

Caractérisation du comportement de matériaux dissipatifs isolants sous chocs
2018/2021

Cléante LANGREE

Vers la modélisation de la propagation de vitesse de flamme pour des déflagrations consécutives à des rejets industriels accidentels.
2018/2021

Tamara OUEIDAT

Maîtrise des risques cyber-physiques dans les installations classées
2018/2021

Ouverture à 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

Les indicateurs de recherche du contrat d'objectifs et de performance 2016-2020

Indicateur	2016		2017	
	Cible	Réalisé	Cible	Réalisé
Part de l'activité de l'Institut consacrée à la recherche	> 20 %	19,30 %	> 20 %	19 %
Taux de succès à l'Europe	25 %	20 %	25 %	43 %
Nombre de publications dans des revues à comité de lecture référencées ISI	100	105	100	100
Nombre de coordinations de projets européens par l'Ineris	Sans cible	3	Sans cible	3
Nombre de doctorants	Sans cible	39	Sans cible	36
Nombre de titulaires d'une HDR	Sans cible	17	Sans cible	18
Nombre d'unités mixtes de recherche	Sans cible	2	Sans cible	2

Publications

Risques chroniques 2017

TOMAZ Sophie; JAFFREZO Jean-Luc; FAVEZ Olivier; PERRAUDIN Émilie; VILLENAVE Éric; ALBINET Alexandre.

Sources and atmospheric chemistry of oxy- and nitro-PAHs in the ambient air of Grenoble (France). *Atmospheric Environment*, 2017, 161: p. 144-154

DRINOVEC Luka; GREGORIC Asta; ZOTTER Peter; WOLF Robert; BRUNS Emily Anne; PREVOT André S.H.; PETIT Jean-Eudes; FAVEZ Olivier; SCIARE Jean; ARNOLD Ian J.; CHAKRABARTY Rajan K.; MOOSMULLER Hans; FILEP Agnes; MOCNIK Grisa.

The filter-loading effect by ambient aerosols in filter absorption photometers depends on the coating of the sampled particles. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10: p. 1043-1059

TOUSOVA Zuzana; OSWALD Peter; SLOBODNIK Jaroslav; BLAHA Ludek; MUZ Melis; HU Meng; BRACK Werner; KRAUSS Martin; DI PAOLO Carolina; TARCAI Zsolt; SEILER Thomas B.; HOLLERT Henner; KOPRIVICA Sanja; AHEL Marijan; SCHOLLEE Jennifer; HOLLENDER Juliane; SUTER Marc J.F.; HIDASI Anita; SCHIRMER Kristin; SONAVANE Manoj; AIT-AISSA Selim; CREUSOT Nicolas; BRION François; FROMENT Jean; ALMEIDA Ana catarina; THOMAS Kevin; TOLLEFSEN Knut Erik; TUFI Sara; OUYANG Xiyu; LEONARDS Pim; LAMOREE Marja; OSORIO TORRENS Victoria; KOLKMAN Annemieke; SCHRIKS Merijn; SPIRHZANLOVA Petra; TINDALL Andrew J.; SCHULZE Tobias.

European demonstration program on the effect-based and chemical identification and monitoring of organic pollutants in European

surface waters. *Science of the Total Environment*, 2017, 601-602: p. 1849-1868

PERY Alexandre; DEVILLERS James; BEAUDOUIN Rémy.

Modélisation mécanistique au niveau individuel.

PERY Alexandre; GARRIC Jeanne.

Les effets écotoxicologiques: De la molécule à la population. NC: ISTE éditions, 2017, p. 121-148

BEAUDOUIN Rémy; COULAUD Romain; DEVILLERS James; DUR Gaël; PELOSI Céline; PERY Alexandre; SOUISSI Yasmine.

Le changement d'échelle de l'individu à la population.

PERY Alexandre; GARRIC Jeanne.

Les effets écotoxicologiques: De la molécule à la population. NC: ISTE éditions, 2017, p. 149-212

BERT Valérie; DOUAY Francis; FAURE Olivier.

Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués: Nouveaux résultats de recherche et démonstration. Angers: ADEME, 2017

LORET Thomas; PEYRET Emmanuel; DUBREUIL Marielle; AGUERRE-CHARIOL Olivier; BRESSOT Christophe; LE BIHAN Olivier; AMODEO Tanguy; TROUILLER Bénédicte; BRAUN Anne; EGLES Christophe; LACROIX Ghislaine.

Air-liquid interface exposure to aerosols of poorly soluble nanomaterials induces different biological activation levels compared to exposure to suspensions. *Particle and Fibre Toxicology*, 2016, 13: p. art. 58

RELIER Charlène; DUBREUIL Marielle; LOZANO GARCIA Omar; CORDELLI Eugenia; MEJIA Jorge; ELEUTERI Patrizia; ROBIDEL Franck; LORET Thomas; PACCHIEROTTI Francesca;

LUCAS Stéphane; LACROIX Ghislaine; TROUILLER Bénédicte.

Study of TiO₂ P₂₅ Nanoparticles Genotoxicity on Lung, Blood, and Liver Cells in Lung Overload and Non-Overload Conditions After Repeated Respiratory Exposure in Rats. *Toxicological Sciences*, 2017, 152 (2): p. 527-537

ARRHENIUS Karine; YAGHOOBY Haleh; ROSELL Lars; BUKER Olivier; CULLETON Lucy; BARTLETT Sam; MURUGAN Arul; BREWER Paul; LI Jianrong; VAN DER VEEN Adriaan M.H.; KROM Iris; LESTREMAU François; BERANEK Jan.

Suitability of vessels and adsorbents for the short-term storage of biogas/biomethane for the determination of impurities - Siloxanes, sulfur compounds, halogenated hydrocarbons, BTEX. *Biomass and Bioenergy*, 2017, 105: p. 127-135

MAILLER Sylvain; MENUT Laurent; KHVOROSTYANOV Dmitry; VALARI Myrto; COUVIDAT Florian; SIOUR Guillaume; TURQUETY Solène; BRIANT Régis; TUCCELLA Paolo; BESSAGNET Bertrand; COLETTE Augustin; LETINOIS Laurent; MARKAKIS Konstantinos; MELEUX Frédéric.

CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10: p. 2397-2423

DANIELE Gaëlle; FIEU Maëva; JOACHIM Sandrine; BADO-NILLES Anne; BEAUDOUIN Rémy; BAUDOIN Patrick; JAMES CASAS Alice; ANDRES Sandrine; BONNARD Marc; BONNARD Isabelle; GEFFARD Alain; VULLIET Emmanuelle.

Determination of carbamazepine and 12 degradation products in various compartments of an outdoor aquatic mesocosm by reliable analytical methods based

on liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (20): p. 16893-16904

NEALE Peta A. ; ALTENBURGER Rolf; AIT-AISSA Selim; BRION François; BUSCH Wibke; DE ARAGAO UMBUZEIRO Gisela; HOLLERT Henner; MORALES Daniel A. ; NOVAK Jiri; SCHLICHTING Rita; SEILER Thomas B. ; SERRA Hélène; SHAO Ying; TINDALL Andrew J. ; TOLLEFSEN Knut Erik; WILLIAMS Timothy D. ; ESCHER Beate I.

Development of a bioanalytical test battery for water quality monitoring: Fingerprinting identified micropollutants and their contribution to effects in surface water. *Water Research*, 2017, 123: p. 734-750

MENUT Laurent; MAILLER Sylvain; BESSAGNET Bertrand; SIOUR Guillaume; COLETTE Augustin; COUVIDAT Florian; MELEUX Frédéric.

An alternative way to evaluate chemistry-transport model variability. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10: p. 1199-1208

PERE Hélène; RASCANU Aida; LEGOFF Jérôme; MATTA Mathieu; BOIS Frédéric Y. ; LORTHOLARY Olivier; LEROY Valériane; LAUNAY Odile; BELEC Laurent.

Herpes simplex virus type 2 (HSV-2) genital shedding in HSV-2-/HIV-1-co-infected women receiving effective combination antiretroviral therapy. *International Journal of STD & AIDS*, 2016, 27 (3): p. 178-185

ANDRIANOME Soafara; HUGUEVILLE Laurent; DE SEZE René; SELMAOUI Brahim.

Increasing levels of saliva alpha amylase in electrohypersensitive (EHS) patients.

International Journal of Radiation Biology, 2017, 93 (8): p. 841-848

ANDRIANOME Soafara; GOBERT Jonathan; HUGUEVILLE Laurent; STEPHAN-BLANCHARD Erwan; TELLIEZ Frédéric; SELMAOUI Brahim.

An assessment of the autonomic nervous system in the electrohypersensitive population: a heart rate variability and skin conductance study. *Journal of Applied Physiology*, 2017, 123 (5): 1055-1062

JOACHIM Sandrine; ROUSSEL Hélène; BONZOM Jean-Marc; THYBAUD Eric; MEBANE Christopher A. ; VAN DEN BRINK Paul J. ; GAUTHIER Laury.

A long-term copper exposure in a freshwater ecosystem using lotic mesocosms: Invertebrate community responses.

Environmental Toxicology and Chemistry, 2017, 36 (10): 2698-2714

BERT Valérie; NEU Silke; ZDANEVITCH Isabelle; FRIESL-HANL Wolfgang; COLLET Serge; GAUCHER Rodolphe; PUSCHENREITER Markus; MULLER Ingo; KUMPIENE Jurate.

How to manage plant biomass originated from phytotechnologies ? Gathering perceptions from end-users. *International Journal of Phytoremediation*, 2017, 19 (10): 947-954

MUNOZ Gabriel; LABADIE Pierre; BOTTA Fabrizio; LESTREMAU François; LOPEZ Benjamin; GENESTE Emmanuel; PARDON Patrick; DEVIER Marie-Hélène; BUDZINSKI Hélène.

Occurrence survey and spatial distribution of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl surfactants in groundwater, surface water, and sediments from tropical environments. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: p. 243-252

LE BIHAN Olivier; OUNOUGHENE Ghania; MEUNIER Laurent; DEBRAY Bruno; AGUERRE-CHARIOL Olivier.

Incineration of a Commercial Coating with Nano CeO₂. *Journal of Physics - Conference Series*, 2017, 838: p. art 012023

OUNOUGHENE Ghania; LE BIHAN Olivier; DEBRAY Bruno; CHIVAS-JOLY Carine; LONGUET Claire; JOUBERT A. ; LOPEZ-CUESTA José-Marie; LE COQ Laurence.

Thermal disposal of waste containing nanomaterials: first investigations on a methodology for risk management. *Journal of Physics - Conference Series*, 2017, 838: p. art 012024

LAKE Iain R. ; JONES Natalia R. ; AGNEW Maureen; GOODESS Clare M. ; GIORGI Filippo; HAMAOU-LAGUEL Lynda; SEMENOV Mikhail A. ; SOLOMON Fabien; STORKEY Jonathan; VAUTARD Robert; EPSTEIN Michelle M.

Climate change and future pollen allergy in Europe. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125 (3): p. 385-391

CHAKRAVARTY Somik; LE BIHAN Olivier; FISCHER Marc; MORGENEYER Martin.

Dust generation in powders: Effect of particle and bulk properties. 8. International Conference on Micromechanics of Granular Media (POWDERS & GRAINS), 03/07/2017 - 07/07/2017, Montpellier, FRANCE

MICHOUD Vincent; SCIARE Jean; SAUVAGE Stéphane; DUSANTER Sébastien; LEONARDIS Thierry; GROS Valérie; KALOGRIDIS Cerise; ZANNONI Nora; FERON Anais; PETIT Jean-Eudes; CRENN Vincent; BAISNEE Dominique; SARDA-ESTEVE Roland; BONNAIRE Nicolas; MARCHAND Nicolas; DEWITT H. Langley; PEY Jorge; COLOMB Aurélie;

GHEUSI François; SZIDAT Sonke; STAVROULAS Iasonas; BORBON Agnès; LOCOGE Nadine.

Organic carbon at a remote site of the western Mediterranean Basin: sources and chemistry during the ChArMEx SOP2 field experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: p. 8837-8865

ANDRIANOME Soafara.

Intolérance environnementale idiopathique avec attribution aux champs électromagnétiques (IEI-CEM): Étude des systèmes nerveux sympathique, endocrinien et immunitaire. Thèse de doctorat (physiologie humaine). Université d'Amiens, 12/01/2017, 257 p.

BOUDHIB Mohamed.

Analyse d'aérosols par méthodes LIBS sans étalonnage et LIBS couplée à une cellule radio-fréquence utilisée comme piège à particules. Thèse de doctorat (physique des plasmas et optique). Université d'Orléans, 31/03/2017

BOULANGE Marine.

Mobilisation et transfert des composés aromatiques polycycliques (HAP et CAP polaires) dans les sols historiquement contaminés par des goudrons de houille. Expérimentations au laboratoire et *in situ*. Thèse de doctorat (géosciences). Université de Lorraine, 19/05/2017

OLIVEIRA Diogo.

Identification of the main sources and geographical origins of PM₁₀ in the northern part of France. Thèse de doctorat (optique et lasers, physico-chimie, atmosphère). École nationale supérieure des mines de Douai, 27/01/2017

LORET Thomas.

Capacité de modèles *in vitro* de complexité différente à prédire les réponses toxiques pulmonaires observées *in vivo* après exposition aiguë à des nanoparticules de TiO₂ et de CeO₂. Thèse de doctorat.

Université de technologie de Compiègne, 20/03/2017, 224 p.

BEAUCHAMP Maxime; DE FOUQUET Chantal; MALHERBE Laure.

Dealing with non-stationarity through explanatory variables in kriging-based air quality maps. *Spatial Statistics*, 2017, 22: p. 18-46

MARCHAND Adrien; PORCHER Jean-Marc; TURIÉS Cyril; CHADILI Edith; PALLUEL Olivier; BAUDOIN Patrick; BETOULLE Stéphane; BADO-NILLES Anne.

Evaluation of chlorpyrifos effects, alone and combined with lipopolysaccharide stress, on DNA integrity and immune responses of the three-spined stickleback, *Gasterosteus aculeatus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145: p. 333-339

BROCHOT Céline; QUINDROIT Paul.

Modelling the fate of chemicals in humans using a lifetime physiologically based pharmacokinetic (PBPK) model in MERLIN-expo.

CIFFROY Philippe; TEDIOSI Alice; CAPRI Ettore.

Modelling the Fate of Chemicals in the Environment and the Human Body. Cham: Springer, 2018, p. 215-257 (*The Handbook of Environmental Chemistry*, 57)

DE WILDE Tineke; VERDONCK Frederik; TEDIOSI Alice; TANAKA Taku; BONNARD Roseline; BANJAC Zoran; ISIGONIS Panagiotis; GIUBILATO Elisa; CRITTO Andrea; ZABEO Alex; SUCIU Nicoleta; GARRATT James; CIFFROY Philippe.

SWOT analysis of the MERLIN-Expo tool and its relevance in legislative frameworks.

CIFFROY Philippe; TEDIOSI Alice; CAPRI Ettore.

Modelling the Fate of Chemicals in the Environment and the Human Body. Cham: Springer,

2018, p. 23-57 (*The Handbook of Environmental Chemistry*, 57)

HINFRAY Nathalie; SOHM Frédéric; CAULIER Morgane; CHADILI Edith; PICCINI Benjamin; TORCHY Camille; PORCHER Jean-Marc; GUIGUEN Yann; BRION François.

Dynamic and differential expression of the gonadal aromatase during the process of sexual differentiation in a novel transgenic cyp19a1a-eGFP zebrafish line. *General and Comparative Endocrinology*, 2018, 261: 179-189

CHAKRAVARTY Somik; FISCHER Marc; GARCIA-TRINANES Pablo; PARKER David; LE BIHAN Olivier; MORGENEYER Martin.

Study of the particle motion induced by a vortex shaker. *Powder Technology*, 2017, 322: p. 54-64

FORTEMS-CHEINEY Audrey; FORET Gilles; SIOUR Guillaume; VAUTARD Robert; SZOPA Sophie; DUFOUR Gaele; COLETTE Augustin; LACRESSONNIERE Gwendoline; BEEKMANN Matthias.

A 3 degrees C global RCP8.5 emission trajectory cancels benefits of European emission reductions on air quality. *Nature Communications*, 2017, 8: p. art. 89

COLETTE Augustin; ANDERSSON Camilla; MANDERS Astrid; MAR Kathleen; MIRCEA Mihaela; PAY Maria-Teresa; RAFFORT Valentin; TSYRO Svetlana; CUVELIER Cornelius; ADANI Mario; BESSAGNET Bertrand; BERGSTROM Robert; BRIGANTI Gino; BUTLER Tim; CAPPELLETTI Andrea; COUIDAT Florian; D'ISIDORO Massimo; DOUMBIA Thierno; FAGERLI Hilde; GRANIER Claire; HEYES Chris; KLIMONT Zig; OJHA Narendra; OTERO Noelia; SCHAAP Martijn; SINDELAROVA Katarina; STEGEHUIS Annemiek I.; ROUSTAN Yelva; VAUTARD

Robert; VAN MEIJGAARD Erik; VIVANCO Marta G.; WIND Peter. EURODELTA-Trends, a multi-model experiment of air quality hindcast in Europe over 1990–2010. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10: p. 3255–3276

SOLAZZO Efisio; HOGREFE Christian; COLETTE Augustin; VIVANCO Marta G.; GALMARINI Stefano.

Advanced error diagnostics of the CMAQ and Chimere modelling systems within the AQMEII3 model evaluation framework. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17 (17): p. 10435–10465

MAGNIEZ Gabrielle; FRANCO Alban; GEFFARD Alain; RIOULT Damien; BONNARD Isabelle; DELAHAUT Laurence; JOACHIM Sandrine; DANIELE Gaëlle; VULLIET Emmanuelle; PORCHER Jean-Marc; BONNARD Marc.

Determination of a new index of sexual maturity (ISM) in zebra mussel using flow cytometry: interest in ecotoxicology. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017: p. Accepté

YASSINE Montaha; FUSTER Laura; DEVIER Marie-Hélène; GENESTE Emmanuel; PARDON Patrick; GRELARD Axelle; DUFOURC Erick; AL ISKANDARANI Mohamad; AIT-AISSA Selim; GARRIC Jeanne; BUDZINSKI Hélène; MAZELLIER Patrick; TRIVELLA Aurélien S.

Photodegradation of novel oral anticoagulants under sunlight irradiation in aqueous matrices. *Chemosphere*, 2018, 193: p. 329–336

BERGGREN Elisabet; WHITE Andrew; OUEDRAOGO Gladys; PAINI Alicia; RICHAZ Andrea-Nicole; BOIS Frédéric Y.; EXNER Thomas; LEITE Sofia Batista; VAN GRUNSVEN L.; WORTH Andrew P.; MAHONY Catherine. *Ab initio* chemical safety

assessment: A workflow based on exposure considerations and non-animal methods. *Computational Toxicology*, 2017, 4: p. 31–44

BOIS Frédéric Y.; DIAZ OCHOA Juan G.; GAJEWSKA Monika; KOVARICH Simona; MAUCH Klaus; PAINI Alicia; PERY Alexandre; SALA BENITO Jose Vicente; TENG Sophie; WORTH Andrew P.

Multiscale modelling approaches for assessing cosmetic ingredients safety. *Toxicology*, 2017, 392: p. 130–139

LEIST Marcel; GHALLAB Ahmed; GRAEPEL Rabea; MARCHAM Rosemarie; HASSAN Reham; HOUGAARD BENNEKOU Susanne; LIMONCIEL Alice; VINKEN Mathieu; SCHILDKNECHT Stefan; WALDMANN Tanja; DANEN Erik; VAN RAVENZWAAY Bennard; KAMP Hennieke; GARDNER Iain; GODOY Patricio; BOIS Frédéric Y.; BRAEUNING Albert; REIF Raymond; OESCH Franz; DRASDO Dirk; HOHME Stefan; SCHWARZ Michael; HARTUNG Thomas; BRAUNBECK Thomas; BELTMAN Joost; VRIELING Harry; SANZ Ferran; FORSBY Anna; GADALETA Domenico; FISHER Ciaran; KELM Jens; FLURI David; ECKER Gerhard; ZDRAZIL Barbara; TERRON Andrea; JENNINGS Paul; VAN DER BURG Bart; DOOLEY Steven; MEIJER Annemarie H.; WILLIGHAGEN Egon; MARTENS Marvin; EVELO Chris; MOMBELLI Enrico; TABOUREAU Olivier; MANTOVANI Alberto; HARDY Barry; KOCH Bjorn; ESCHER Sylvia; VAN THRIEL Christoph; CADENAS Cristina; KROESE D.; VAN DE WATER Bob; HENGSTLER Jan.

Adverse outcome pathways: opportunities, limitations and open questions. *Archives of Toxicology*, 2017, 91 (11): p. 3477–3505

DUTILLEUL Morgan; REALE Denis; GOUSSEN Benoît; LECOMTE Catherine; GALAS Simon; BONZOM Jean-Marc.

Adaptation costs to constant and alternating polluted environments. *Evolutionary Applications*, 2017, 10 (8): p. 839–851

HENNEBERT Pierre; FILELLA Monteserrat.

WEEE plastic sorting for bromine essential to enforce EU regulation. *Waste Management*, 2018, 71: 390–399

GAERTNER Miguel Angel; GONZALEZ-ALEMAN Juan Jesus; ROMERA Raquel; DOMINGUEZ Marta; GIL Victoria; SANCHEZ Enrique; GALLARDO Clemente; MIGLIETTA Mario Marcelo; WALSH Kevin; SEIN Dmitri; SOMOT Samuel; DELL'AQUILA Alessandro; TEICHMANN Claas; AHRENS Bodo; BUONOMO Erasmo; COLETTE Augustin; BASTIN Sophie; VAN MEIJGAARD Erik; NIKULIN Grigory.

Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean–atmosphere coupling and increased resolution. *Climate Dynamics*, 2017: p. Accepté

LELOUTRE Charlène; PERY Alexandre; PORCHER Jean-Marc; BEAUDOUIN Rémy.

A bioenergetics model of the entire life cycle of the three-spined stickleback, *gasterosteus aculeatus*. *Ecology of Freshwater Fish*, 2018, 27(1): 116–127

SCHUCHT Simone; COLETTE Augustin; BRIGNON Jean-Marc; BESSAGNET Bertrand; ROUIL Laurence.

Aide aux décideurs - Évaluation des coûts et des bénéfices sanitaires de politiques de lutte contre la pollution de l'air. *Pollution Atmosphérique*, 2017 (235)

ZHANG Yunjiang; TANG Lili; CROTEAU Philip; FAVEZ Olivier; SUN Yele; CANAGARATNA Manjula; WANG Zhuang; COUVIDAT Florian; ALBINET Alexandre; ZHANG Hongliang; SCIARE Jean; PREVOT André S.H.; JAYNE John; WORSNOP Douglas.

Field characterization of the PM_{2.5} Aerosol Chemical Speciation Monitor: insights into the composition, sources, and processes of fine particles in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: p. 14501-14517

TROMBETTI Marco; THUNIS Philippe; BESSAGNET Bertrand; CLAPPIER Alain; COUVIDAT Florian; GUEVARA Marc; KUENEN Jeroen; LOPEZ-APARICIO Susana.

Spatial inter-comparison of Top-down emission inventories in European urban areas. *Atmospheric Environment*, 2018, 173: p. 142-156

PHANTHAVONGSA Phonethip; CHALOT Michel; PAPIN Arnaud; LACERCAT-DIDIER Laurence; ROY Sébastien; BLAUDEZ Damien; BERT Valérie.

Effect of mycorrhizal inoculation on metal accumulation by poplar leaves at phytomanaged sites. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 143: p. 72-81

BERTIN Delphine; FERRARI Benoît J.D.; LABADIE Pierre; SAPIN Alexandre; DA SILVA AVELAR Débora; BEAUDOUIN Rémy; PERY Alexandre; GARRIC Jeanne; BUDZINSKI Hélène; BABUT Marc.

Refining uptake and depuration constants for fluoroalkyl chemicals in *Chironomus riparius* larvae on the basis of experimental results and modelling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 149: p. 284-290

CHRIT Mounir; SARTELET Karine; SCIARE Jean; PEY Jorge; MARCHAND Nicolas; COUVIDAT Florian; SELLEGRI Karine;

BEEKMANN Matthias.

Modelling organic aerosol concentrations and properties during ChArMEx summer campaigns of 2012 and 2013 in the western Mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17: p. 12509-12531

BESSAGNET Bertrand; MENUT Laurent; COLETTE Augustin; COUVIDAT Florian; DAN Mo; MAILLER Sylvain; LETINOIS Laurent; PONT Véronique; ROUIL Laurence.

An evaluation of the CHIMERE chemistry transport model to simulate dust outbreaks across the Northern hemisphere in march 2014. *Atmosphere*, 2017, 8 (12): p. art. 251

BOIS Frédéric Y.; GOLBAMAKI Nazanin; KOVARICH Simona; TEBBY Cléo; GABB Henry A.; LEMAZURIER Emmanuel.

High-throughput analysis of ovarian cycle disruption by mixtures of aromatase inhibitors. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125 (7): p. art. 077012

WALKER Emilie; LECLERC Melen; REY Jean-François; BEAUDOUIN Rémy; SOUBEYRAND Samuel; MESSEAN Antoine.

A spatio-temporal exposure-hazard model for assessing biological risk and impact. *Risk Analysis*, 2017: p. Accepté

LOUIZ Ibtissem; BEN HASSINE Oum Kalthoum; PALLUEL Olivier; BEN-ATTIA Mossadok; GADDACHA Wafa; AIT-AISSA Selim.

Seasonal rhythm of physiological indexes, liver protein level, and biotransformation biomarkers in *Zosterisessor ophiocephalus* and *Gobius niger* from a low contaminated lagoon (Ghar El Melh lagoon, Tunisia). *Biological Rhythm Research*, 2017, 48 (6): p. 963-977

EVARD Damien; VILLOT Jonathan; ARMIYAOU Chadad; GAUCHER Rodolphe; BOUHRIZI Sofia; LAFOREST Valérie.

Best Available Techniques: An integrated method for multicriteria assessment of reference installations. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 176: 1034-1044

HENNEBERT Pierre.

Proposal of concentration limits for determining the hazard property HP 14 for waste using ecotoxicological tests. *Waste Management*, 2017: p. Accepté

COUVIDAT Florian; BESSAGNET Bertrand; GARCIA-VIVANCO Marta; REAL Elsa; MENUT Laurent; COLETTE Augustin.

Development of an inorganic and organic aerosol model (Chimere2017β v1.0): seasonal and spatial evaluation over Europe. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11: 165-194

OUIDIR Marion; LEPEULE Johanna; SIROUX Valérie; MALHERBE Laure; MELEUX Frédéric; RIVIERE Emmanuel; LAUNAY Ludivine; ZAROS Cécile; CHEMINAT Marie; CHARLES Marie-Aline; SLAMA Rémy.

Is atmospheric pollution exposure during pregnancy associated with individual and contextual characteristics? A nationwide study in France. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2017, 71 (10)

SOLAZZO Efisio; BIANCONI Roberto; HOGREFE Christian; CURCI Gabriele; TUCCELLA Paolo; ALYUZ Ummugulsum; BALZARINI Alessandra; BARO Rocio; BELLASIO Roberto; BIESER Johannes; BRANDT Jorgen; CHRISTENSEN Jesper H.; COLETTE Augustin; FRANCIS Xavier V.; FRASER Andrea; VIVANCO Marta G.; JIMENEZ-GUERRERO Pedro; IM Ulas;

MANDERS Astrid; NOPMONGCOL Uarporn; KITWIROON Nutthida; PIROVANO Guido; POZOLLI Luca; PRANK Marje; SOKHI Ranjeet S.; UNAL Alper; YARWOOD Greg; GALMARINI Stefano.

Evaluation and error apportionment of an ensemble of atmospheric chemistry transport modeling systems: multivariable temporal and spatial breakdown.

Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17: p. 3001-3054

BOUR Olivier; ZDANEVITCH Isabelle.

Completion criteria for MWS landfill aftercare. SARDINIA 2017 : Proceedings of the 16th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2017

HENNEBERT Pierre; MERDY Patricia.

Mineral colloids and nanoparticles in municipal solid waste incinerator bottom ashes and sunscreens leachates. SARDINIA 2017 : Proceedings of the 16th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2017

HENNEBERT Pierre.

WEEE plastic sorting for bromine content is essential to enforce EU regulation. SARDINIA 2017 : Proceedings of the 16th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2017

HENNEBERT Pierre; HUMEZ Nicolas.

Waste data on line: a part of the collaborative future big data in waste and resources ?. SARDINIA 2017 : Proceedings of the 16th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2017

ZGHEIB Elias; BECHAUX Camille; CREPET Amélie; MOMBELLI Enrico; BOIS Frédéric Y.

High-throughput methods

for toxicology and health risk assessment. *Environnement Risques & Santé*, 2017, 16 (1): p. 44-58

MIGAULT Lucile; PIEL Clément; CARLES C.; DELVA F.; LACOURT Aude; CARDIS Elisabeth; ZAROS Cécile; DE SEZE René; BALDI Isabelle; BOUVIER Ghislaine.

Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and pregnancy outcomes in the Elfe cohort. *Environment International*, 2018, 112: p. 165-173

COLETTE Augustin; ROUIL Laurence.

Déterminants lointains et proches de la pollution atmosphérique. *Environnement Risques & Santé*, 2017, 16 (4): p. 359-364

CLINCKE Anne-Sophie; GUILLOT Jean-Michel.

Le défi du prélèvement des émissions surfaciques odorantes. *Pollution Atmosphérique*, 2017 (234)

ROUIL Laurence.

Les services Copernicus Atmosphère (CAMS): une révolution numérique au service de l'environnement. *Responsabilité & Environnement - Annales des mines*, 2017 (87): p. 83-86

SERRA Hélène.

Évaluation *in vitro* et *in vivo* des perturbateurs endocriniens chez le poisson zèbre: cas de substances seules et en mélanges. Thèse de doctorat (chimie analytique et environnementale). Université de Bordeaux, 21/11/2017

GAROCHE Clémentine.

Modes d'action et effets biologiques de ligands environnementaux du récepteur de la progestérone chez le poisson zèbre. Thèse de doctorat. Université de Rennes 1, 04/10/2017

LEONCO Daniel.

Développement méthodologique

pour l'analyse d'une large gamme de composés dans le milieu aquatiques. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 04/12/2017

LEMAIRE Vincent.

Hiérarchisation des déterminants de la composition atmosphérique future en Europe. Thèse de doctorat. École polytechnique, 19/12/2017

OSTAPCHUK Maria.

Étude des déterminants de l'adoption d'une innovation par les marchés en situation d'incertitude sur les risques santé/environnement: le cas des nanotechnologies. Thèse de doctorat. Université de Paris IX, 28/11/2017

LANNUQUE Victor.

L'aérosol organique secondaire dans les modèles de qualité de l'air: développement et évaluation d'une paramétrisation optimisée sur des simulations déterministes. Thèse de doctorat. Université de Paris 12, 12/12/2017

ALLARD Denis; BEAUCHAMP Maxime; BEL Liliane; DESSASIS Nicolas; GABRIEL Edith; GENIAUX Ghislain; MALHERBE Laure; MARTINETTI D.; OPITZ Thomas; PARENT Eric; ROMARY Thomas; SABA Nicolas;

RESSTE Network. Analyzing spatio-temporal data with R: Everything you always wanted to know - but were afraid to ask. *Journal de la société française de statistique*, 2017, 158 (3)

ZDANEVITCH Isabelle; REMOND Gaetan; THONIER Grégoire; PONCELET Elisabeth.

Solid recovered fuels: determination of the renewable content.

KUEHLE-WEIDEMEIER Matthias; BUESCHER Katrin.

Proceedings of the VII International Symposium MBT and MRF. Resources "Resources and energy from municipal waste" (*Waste-to-Resources 2017*). Göttingen: Cuvier Verlag, 2017, p. 47-59

Risques chroniques 2018

SAMAI Hakim Chouki; RIOULT Damien; BADO-NILLES Anne; DELAHAUT Laurence; JUBREAUX Justine; GEFFARD Alain; PORCHER Jean-Marc; BETOULLE Stéphane.

Procedures for leukocytes isolation from lymphoid tissues and consequences on immune endpoints used to evaluate fish immune status: A case study on roach (*Rutilus rutilus*). *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 74: p. 643-657

RIEBELING Christian; PIRET Jean-Pascal; TROUILLER Bénédicte; NELISSEN Inge; SAOUT Christelle; TOUSSAINT Olivier; HAASE Andrea.

A guide to nanosafety testing: Considerations on cytotoxicity testing in different cell models. *NanoImpact*, 2018, 10: p. 1-10

SARTELET Karine; ZHU S.; MOUKHTAR Sophie; ANDRE M.; ANDRE J.M.; GROS Valérie; FAVEZ Olivier; BRASSEUR A.; REDAELLI Mattéo.

Emission of intermediate, semi and low volatile organic compounds from traffic and their impact on secondary organic aerosol concentrations over Greater Paris. *Atmospheric Environment*, 2018, 180: p. 126-137

AMINZADEH Reza; THIELENS Arno; AGNEESSENS Sam; VAN TORRE Patrick; VAN DEN BOSSCHE Matthias; DONGUS Stefan; EEFTENS Marloes; HUSS Anke; VERMEULEN Roel; DE SEZE René; MAZET Paul; CARDIS Elisabeth; ROGIER Hendrik; ROOSLI Martin; MARTENS Luc; JOSEPH Wout.

A multi-band body-worn distributed radio-frequency exposure meter: design, on-body calibration and study of body morphology. *Sensors*, 2018, 18 (1): p. art. 272

ESCHER Beate I.; AIT-AISSA Selim; BEHNISCH Peter A.; BRACK Werner; BRION François; BROUWER Abraham; BUCHINGER Sebastian; CRAWFORD Sarah E.; DU PASQUIER David; HAMERS Timo; HETTWER Karina; HILSCHEROVA Klara; HOLLERT Henner; KASE Robert; KIENLE Cornelia; TINDALL Andrew J.; TUERK Jochen; VAN DER OOST Ron; VERMEIRSEN Etienne; NEALE Peta A.

Effect-based trigger values for *in vitro* and *in vivo* bioassays performed on surface water extracts supporting the environmental quality standards (EQS) of the European Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: p. 748-765

LOUIZ Ibtissem; PALLUEL Olivier; BEN-ATTIA Mossadok; AIT-AISSA Selim; BEN HASSINE Oum Kalthoum.

Liver histopathology and biochemical biomarkers in *Gobius niger* and *Zosterisessor ophiocephalus* from polluted and non-polluted Tunisian lagoons (Southern Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: p. 248-258

SRIVASTAVA Deepchandra; TOMAZ Sophie; FAVEZ Olivier; LANZAFAME Grazia-Maria; GOLLY Benjamin; BESOMBES Jean-Luc; ALLEMAN Laurent; JAFFREZO Jean-Luc; JACOB Véronique; PERRAUDIN Emilie; VILLENAVE Eric; ALBINET Alexandre.

Speciation of organic fraction does matter for source apportionment. Part 1: A one-year campaign in Grenoble (France). *Science of the Total Environment*, 2018, 624: p. 1598-1611

ALTENBURGER Rolf; SCHOLZE Martin; BUSCH Wibke;

ESCHER Beate I.; JAKOBS Gianina; KRAUSS Martin; KRUGER Janet; NEALE Peta A.; AIT-AISSA Selim; ALMEIDA Ana catarina; SEILER Thomas B.; BRION François; HILSCHEROVA Klara; HOLLERT Henner; NOVAK Jiri; SCHLICHTING Rita; SERRA Hélène; SHAO Ying; TINDALL Andrew J.; TOLEFSEN Knut-Erik; UMBUZEIRO Gisela; WILLIAMS Tim; KORTENKAMP Andrea.

Mixture effects in samples of multiple contaminants - An inter-laboratory study with manifold bioassays. *Environment International*, 2018, 114: p. 95-106

CHAKRAVARTY Somik; FISCHER Marc; GARCIA-TRINANES Pablo; DALLE Morgane; MEUNIER Laurent; AGUERRE-CHARIOL Olivier; LE-BIHAN Olivier; MORGENEYER Martin.

Long-term dust generation from silicon carbide powders. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 116: p. 115-125

LAPORTE Bérengère; GAY-QUEHEILLARD Jérôme; BACH Véronique; VILLEGIER Anne-Sophie.

Developmental neurotoxicity in the progeny after maternal gavage with chlorpyrifos. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 113: p. 66-72

DULIO Valeria; VAN BAVEL Bert; BRORSTROM-LUNDEN Eva; HARMSEN Joop; HOLLENDER Juliane; SCHLABACH Martin; SLOBODNIK Jaroslav; THOMAS Kevin; KOSCHORRECK Jan.

Emerging pollutants in the EU: 10 years of NORMAN in support of environmental policies and regulations. *Environmental Science Europe*, 2018, 30: p. art. 5

FLEMING Zoe Louise; **DOHERTY** Ruth; **VON SCHNEIDEMESSER** Erika; **MALLEY** Christopher; **COOPER** Owen R.; **PINTO** Joseph P.; **COLETTE** Augustin; **XU** Xiaobin; **SIMPSON** David; **SCHULTZ** Martin G.; **LEFOHN** Allen S.; **HAMAD** Samera; **MOOLLA** Raeesa; **SOLBERG** Sverre; **FENG** Zhaozhong.

Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day ozone distribution and trends relevant to human health. *Elementa Science of the Anthropocene*, 2018, 6: p. art. 12

HINFRAY Nathalie; **TEBBY** Cléo; **PICCINI** Benjamin; **BOURGINE** Gaëlle; **AIT-AISSA** Selim; **PORCHER** Jean-Marc; **PAKDEL** Farzad; **BRION** François.

Mixture concentration-response modeling reveals antagonistic effects of estradiol and genistein in combination on brain aromatase gene (cyp19a1b) in zebrafish. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19: p. art. 1047

MARQUES Catarina R.; **EL-AZHARI** Najoi; **MARTIN-LAURENT** Fabrice; **PANDARD** Pascal; **MELINE** Camille; **PETRE** Alice L.; **ECKERT** Suzanne; **ZIPPERLE** Jurgen; **VANA** Martin; **MALY** Stanislav; **SINDELAROVA** Lucie; **SLAVIKOVA** AMEMORI Anna; **HOFMAN** Jakub; **KUMAR** Anu; **DOAN** Hai; **MCLAUGHLIN**

Mike; **RICHTER** Elizabeth; **RÖMBKE** Jörg.

A bacterium-based contact assay for evaluating the quality of solid samples. Results from an international ring-test. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 352: p. 139-147

KASE Robert; **JAVURKOVA** Barbora; **SIMON** Eszter; **SWART** Kees; **BUCHINGER** Sebastian; **KONEMANN** Sarah; **ESCHER** Beate I.; **CARERE** Mario; **DULIO** Valeria; **AIT-AISSA** Selim; **HOLLERT** Henner; **VALSECCHI** Sara; **POLESELLO** Stefano; **BEHNISCH** Peter A.; **DI PAOLO** Carolina; **OLBRICH** Daniel; **SYCHROVA** Eliska; **GUNDLACH** Michael; **SCHLICHTING** Rita; **LEBORGNE** Lomig; **CLARA** Manfred; **SCHEFFKNECHT** Christoph; **MARNEFFE** Yves; **CHALON** Carole; **TUSIL** Petr; **SOLDAN** Premysl; **VON DANWITZ** Brigitte; **SCHWAIGER** Julia; **MORAN PALAO** Antonio; **BERSANI** Francesca; **PERCEVAL** Olivier; **KIENLE** Cornelia; **VERMEIRSEN** Etienne; **HILSCHEROVA** Klara; **REIFFERSCHIED** Georg; **WERNER** Inge.

Screening and risk management solutions for steroidal estrogens in surface and wastewater. *TRAC-Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 102: p. 343-358

SRIVASTAVA Deepchandra; **FAVEZ** Olivier; **BONNAIRE** Nicolas; **LUCARELLI** Franco; **HAEFFELIN** Martial; **PERRAUDIN** Emilie; **GROS** Valérie; **VILLENAVE** Eric; **ALBINET** Alexandre.

Speciation of organic fractions does matter for aerosol source apportionment. Part 2: Intensive short-term campaign in the Paris area (France). *Science of the Total Environment*, 2018, 634: p. 267-278

PART Florian; **BERGE** Nicole; **BARAN** Pawal; **STRINGFELLOW** Anne; **SUN** Wenjie; **BARTELT-HUNT** Shannon; **MITRANO** Denise; **LI** Liang; **HENNEBERT** Pierre; **QUICKER** Peter; **BOLYARD** Stéphanie C.; **HUBER-HUMER** Marion.

A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. *Waste Management*, 2018, 75: p. 427-449

BEAUCHAMP Maxime; **MALHERBE** Laure; **DE FOUQUET** Chantal; **LETINOIS** Laurent; **TOGNETTI** Vincent.

A polynomial approximation of the traffic contributions for kriging-based interpolation of urban air quality model. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 105: p. 132-152

Risques accidentels 2017**LE COZE Jean-Christophe.**

Globalization and high-risk systems. *Policy and Practice in Health and Safety*, 2017, 15 (1)

/

JOHN Astrid C. ; KUPPER Miriam; MANDERS-GROOT Astrid M.M.; DEBRAY Bruno; LACOME Jean-Marc; KUHLBUSCH Thomas A.J.

Emissions and possible environmental implication of engineered nanomaterials (ENMs) in the atmosphere. *Atmosphere*, 2017, 8 (5): p. art. 84

/

ABDO Houssein; FLAUS Jean-Marie; MASSE François.

Fuzzy semi-quantitative approach for probability evaluation using Bow-Tie analysis.

CEPIN Marko; BRIS Radim.

Safety and Reliability - Theory and Applications: Proceedings of ESREL 2017. *CRC Press*, 2017, p. 2597-2605

/

ABDO Houssein; KAOUK M. ; FLAUS Jean-Marie; MASSE François.

Towards a better industrial risk analysis: A new approach that combines cyber security within safety.

CEPIN Marko; BRIS Radim.

Safety and Reliability - Theory and Applications: Proceedings of ESREL 2017. *CRC Press*, 2017, p. 1215-1222

/

VALLEE Agnès; DEBRAY Bruno; DE DIANOUS Valérie; BOLVIN Christophe.

The methodologies used in France for demonstrating risk control of a major accident: A heritage of the ARAMIS project ?

BERNATIK Ales; HUANG Chongfu; SALVI Olivier.

Risk Analysis and Management - Trends, Challenges and Emerging Issues: Proceedings of the 6th International Conference on Risk Analysis and Crisis Response (RACR 2017). *CRC Press*, 2017, p. 293-300

/

ZHENG Wentian; MAHGERFTEH Haroun; JAMOIS Didier; HEBRARD Jérôme; PROUST Christophe.

Modeling of depressurization-induced superheating for compressed liquefied gases. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56 (18): p. 5432-5442

/

PRANA Vinca; ROTUREAU Patricia; ANDRE David; FAYET Guillaume; ADAMO Carlo.

Development of simple QSPR models for the prediction of the heat of decomposition of organic peroxides. *Molecular Informatics*, 2017, 36 (10): art. 1700024

/

MAZRI Chabane.

(Re) Defining Emerging Risks. *Risk Analysis*, 2017, 37(11): 2053-2065

/

FORESTIER Coralie.

Influence de l'électrolyte sur la sécurité des batteries li-ion: rôle des additifs et du sel de lithium. Thèse de doctorat. Université d'Amiens, 11/01/2017

/

DENAT Tom.

Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: A multi-criteria sorting approach. Thèse de doctorat (Informatique). Université de Paris IX, 05/07/2017

/

ESHETU Gebrekidan G.; JEONG Sangsik; PANDARD Pascal; LECOCQ Amandine; MARLAIR Guy; PASSERINI Stefano.

Comprehensive insights into the thermal stability, biodegradability, and combustion chemistry of pyrrolidinium-based ionic liquids. *ChemSusChem*, 2017, 10 (15): p. 3146-3159

/

HALM Damien; FOUILLEN Fabien; LAINE Eric; GUEGUEN Mikael; BERTHEAU Denis; VAN EEKELEN Tom.

Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions: Fire tests and burst simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (31): p. 20056-20070

/

PROUST Christophe; BEN MOUSSA Rim; GUESSASMA Mohamed; SALEH Khashayar; FORTIN Jérôme.

Augmentation du risque d'explosion de poussières sous l'effet du rayonnement thermique.

16. Congrès de la Société française de génie des procédés (SFGP 2017), 11/07/2017 - 13/07/2017, Nancy, FRANCE

/

DUCLOS Audrey; PROUST Christophe; DAUBECH Jérôme; VERBECKE Franck.

Ingénierie de la sécurité appliquée à des applications hydrogène-énergie. 16. Congrès de la Société française de génie des procédés (SFGP 2017), 11/07/2017 - 13/07/2017, Nancy, FRANCE

/

LACOME Jean-Marc; VIGNES Alexis; DEBRAY Bruno; TRUCHOT Benjamin; FEDE Pascal; CLIMENT Eric; LE Hong Duc.

Modelling of nanoparticle jet from leakage of conveying pipe - breakage of nanoparticle aggregate. 16. Congrès de la Société française de génie des procédés (SFGP 2017), 11/07/2017 - 13/07/2017, Nancy, FRANCE

/

GREGOIRE Yann; LEPRETTE Emmanuel; PROUST Christophe.

Safety systems engineering in chemical engineering. 16. Congrès de la Société française de génie des procédés (SFGP 2017), 11/07/2017 - 13/07/2017, Nancy, FRANCE

/

PROUST Christophe; BEN MOUSSA Rim; GUESSASMA Mohamed; KHASHAYAR Saleh; FORTIN Jérôme.

Potential accelerating effect of thermal radiation in dust flame

propagation: some experimental evidence. 26. International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), 30/07/2017 - 04/08/2017, Boston, ETATS-UNIS

/ **GREGOIRE Yann; PROUST Christophe; LEPRETTE Emmanuel; JAMOIS Didier.**

Monitoring of a dust explosion in a 10 m³ vessel. 26. International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), 30/07/2017 - 04/08/2017, Boston, ETATS-UNIS

/ **HEUDIER Laure; LECOQ Guillaume; GREGOIRE Yann; PROUST Christophe.**

Investigation on the diffraction of a medium scale gaseous deflagration pressure wave behind a protective wall. 26. International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), 30/07/2017 - 04/08/2017, Boston, ETATS-UNIS

/ **DAUBECH Jérôme; PROUST Christophe; LECOQ Guillaume.**

Propagation of a confined explosion to an external cloud. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: p. 805-813

/ **PROUST Christophe.**

Turbulent flame propagation in large dust clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: p. 859-869

/ **PROUST Christophe; BEN MOUSSA Rim; GUESSASMA Mohamed; SALEH Khashayar; FORTIN Jérôme.**

Thermal radiation in dust flame propagation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: p. 896-904

/ **ABDO Houssein; FLAUS Jean-Marie; MASSE François.**

Uncertainty quantification in risk assessment - Representation,

propagation and treatment approaches: Application to atmospheric dispersion modeling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: p. 551-571

/ **ANEZIRIS O.N.; NIVOLIANITOU Z.; KONSTANDINIDOU M.; MAVRIDIS G.; PLOT Emmanuel.**

A Total Safety Management framework in case of a major hazards plant producing pesticides. *Safety Science*, 2017, 100: p. 183-194

/ **DAUDIN Kevin; BEAUCHAMP F.; PROUST Christophe.**

Phenomenological study of the pre-mixing step of sodium-water explosive interaction. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 91: p. 1-8

/ **ABDO Houssein; KAOUK M.; FLAUS Jean-Marie; MASSE François.**

A safety / security risk analysis approach of Industrial Control Systems: A cyber bowtie - combining new version of attack tree with bowtie analysis. *Computers & Security*, 2017, 72: p. 175-195

/ **TRAN Dinh-Trinh; JOUBERT Aurélie; VENDITTI Danielle; DURECU Sylvain; MEUNIER Thierry; LE BIHAN Olivier; FIANI Emmanuel; LE COQ Laurence.**

Characterization of Polymer Waste Containing Nano-fillers Prior its End-of-Life Treatment. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8 (7): p. 2463-2471

/ **LE COZE Jean-Christophe.**

An essay: Societal safety and the global 1, 2, 3. *Safety Science*, 2017: p. Accepted

/ **FAYET Guillaume; ROTUREAU Patricia.**

How to use QSPR models to help the design and the safety of energetic materials.

SHUKLA M.; BODDU V.M.; STEEVENS J.; REDDY D.; LESZCZYNSKI J.

Energetic Materials. From cradle to grave. *Cham: Springer*, 2017, p. 67-90

/ **JANES Agnès; LESAGE Jérôme; WEINBERGER Benno; CARSON Douglas; DEBRAY Bruno.**

Experimental determination of minimum ignition current (mic) for hydrogen /methane mixtures for the determination of the explosion group corresponding to iec 60079-20-1 standard.

CARCASSI Marco; JORDAN Thomas.

Proceedings of the 7th International conference on hydrogen safety (ICHS 2017). 2017, p. 54-64

/ **DUCLOS Audrey; PROUST Christophe; DAUBECH Jérôme; VERBECKE Franck.**

Development of a realistic hydrogen flammable atmosphere inside a 4-m³ enclosure.

CARCASSI Marco; JORDAN Thomas.

Proceedings of the 7th International conference on hydrogen safety (ICHS 2017). 2017, p. 727-738

/ **VYAZMINA Elena; JALLAIS Simon; DAUBECH Jérôme; HEBRARD Jérôme; DUCLOS Audrey; GASTALDO L.; DAUDEY N.**

Delayed explosion of hydrogen high pressure jets in a highly obstructed geometry.

CARCASSI Marco; JORDAN Thomas.

Proceedings of the 7th International conference on hydrogen safety (ICHS 2017). 2017, p. 107-116

/ **SKJOLD T.; HISKEN H.; LAKSHMIPATHY S.; ATANGA G.; CARCASSI M.N.; SCHIAVETTI, M.; STEWART J.R.; NEWTON A.; HOYES J.R.; TOLIAS I.C.; VENETSANOS Alexander; HANSEN O.R.; GENG J.; HUSER A.; HELLAND S.; JAMBUT R.; REN K.; KOTCHOURKO Alexei;**

JORDAN Thomas; DAUBECH Jérôme; LECOCQ Guillaume; HANSEN A.G.; KUMAR C.; KRUMENACKER L.; JALLAIS Simon; MILLER D.; BAUWENS C.R.

Blind-prediction: estimating the consequences of vented hydrogen deflagrations for homogeneous mixtures in 20-foot iso containers.

CARCASSI Marco; JORDAN Thomas.

Proceedings of the 7th International conference on hydrogen safety (ICHS 2017). 2017, p. 639-652

BLANC-VANNET Pierre; JALLAIS Simon; FUSTER B.; FOUILLEN Fabien; HALM Damien; VAN EEKELEN Tom; WELCH S.; BREUER P.; HAWKSWORTH Stuart.

Fire tests carried out in FCH JU FIRECOMP project, recommendations and application to safety of gas storage systems.

CARCASSI Marco; JORDAN Thomas.

Proceedings of the 7th International conference on hydrogen safety (ICHS 2017). 2017, p. 496-508

KONE H.O.; DUCLOS Audrey; PROUST Christophe; VERBECKE Franck.

Some issues concerning the CFD modelling of confined hydrogen releases.

CARCASSI Marco; JORDAN Thomas.

Proceedings of the 7th International conference on hydrogen safety (ICHS 2017). 2017, p. 739-750

PLOT Emmanuel; NIVOLIANITOU Zoe; LEVA Chiara; RAMANY Vassishtasai; COLL Christophe; BAUDEQUIN Frédéric.

From ARAMIS methodology to a "dynamic risk" monitoring system. 6. International Conference on Risk Analysis and Crisis Response (RACR 2017), 05/06/2017 - 09/06/2017, Ostrava, RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

BERDOUZI fatine; VILLEMUR Claire; OLIVIER-MAGET Nelly; GABAS Nadine.

Dynamic Simulation for Risk Analysis: Application to an Exothermic Reaction. Process

Safety and Environmental Protection, 2018, 113: 149-163

DUVAL Christophe; WILLOT Adrien; HYVERNAGE Olivier.

Maîtrise des accidents NaTech dans les installations industrielles. Techniques de l'ingénieur. Paris: Éditions Techniques de l'ingénieur, 2017, p. SE7002

ABDO Houssein.

Développement d'une approche intégrée d'analyse des risques permettant de quantifier le degré de confiance. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 12/12/2017

BEN MOUSSA Rim.

Étude de la contribution des échanges thermiques radiatifs aux processus de propagation des flammes dans les suspensions gaz-particules. Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne, 20/12/2017

Risques accidentels 2018

LU Huiling; PEZRON Isabelle; GAUDIN Théophile; DRELICH Audrey.

Non-equilibrium micelles formed by sugar-based surfactants under their Krafft temperature. Colloids and Surfaces A, 2018, 540: p. 167-176

GAUDIN Théophile; ROTUREAU Patricia; PEZRON Isabelle; FAYET Guillaume.

Investigating the impact of sugar-based surfactants structure on surface tension at critical micelle concentration with structure-property relationships. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 516: p. 162-171

JANES Agnès; VIGNES Alexis.

Incendie, explosion: attention au phénomène d'auto-échauffement des solides divisés. Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 2018 (250): p. 64-70

TRUCHOT Benjamin; FOUILLEN Fabien; COLLET Serge.

An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires. *Fire Safety Journal*, 2018, 97: p. 111-118

Risques du sol et du sous-sol 2017

**YANG Jie; YIN Zhen-Yu;
HICHER Pierre-Yves; LAOUAFA
Farid.**

A finite element modeling of the impact of internal erosion on the stability of a dike.

**VANDAMME Matthieu; DANGLA
Patrick; PEREIRA Jean-Michel;
GHABEZLOO Siavash.**

Proceedings of the 6th Biot Conference on Poromechanics. Reston: ASCE, 2017, 354-361

/

**BASMAJI Bakri; DECK Olivier;
AL HEIB Marwan.**

Analytical model to predict building deflections induced by ground movements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2017 : p. Accepté

/

**AHMED Samar S.; AL HEIB
Marwan; GUNZBURGER Yann;
RENAUD Vincent.**

3D numerical simulation of the goaf due to large-scale longwall mining.

**SHEHATA Hany; RASHED
Youssef.**

Numerical Analysis of Nonlinear Coupled Problems: Proceedings of the 1st GeoMEast International Congress and Exhibition Egypt 2017 on Sustainable Civil Infrastructures. NC: Springer, 2017, p. 121-131

/

**HAMDI Jabrane; SCHOLTES Luc;
SOULEY Mountaka;
AL HEIB Marwan.**

Effect of discretization at laboratory and large scales during discrete element modelling of brittle failure.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: p. 48-61

/

**DE SANTIS Francesca;
CONTRUCCI Isabelle; LIZEUR
Armand; TONNELIER Alice;
MATRULLO Emanuela; BERNARD
Pascal; NYSTROM Anders;
MOZAFFARI Shahram.**

Evaluation of microseismic array performances: case study of a deep metal mine monitoring network.

VALLEJOS Javier A.

Proceedings of the 9th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSIM 9). 2017, p. 50-57

/

**KINSCHER Jannes; COCCIA
Stella; DAUPLEY Xavier;
BIGARRE Pascal.**

Microseismic monitoring of caving and collapsing events in solution mines.

VALLEJOS Javier A.

Proceedings of the 9th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSIM 9). 2017, p. 117-122

/

**HEVIN Grégoire; BALLAND
Cyrille; BILLIOTTE Joël; TESSIER
F.; HADJ HASSEN F.; ROUABHI
A.; BLANCO-MARTIN L.;
STAUDTMEISTER Kurt; LEUGER
Bastian; ZAPF Dirk; HERTZ
Emmanuel; TRIBOUT Daniel;
THELIER Nicolas.**

Expérience de fissuration thermique dans une mine de sel.

**GASC-BARBIER Muriel; MERRIEN-
SOUKATCHOFF Véronique;
BEREST Pierre.**

Manuel de mécanique des roches. Tome V - Thermomécanique des roches. Paris: Presses de mines, 2017, p. 433-450

/

**KAZMIERCZAK Jean-Bernard;
BECHADE Franck; BURLON
Sébastien; JACQUARD
Catherine; LABAT Catherine;
MAGNAN Jean-Pierre.**

Retrait et gonflement des argiles - Analyse et traitement des désordres créés par la sécheresse, guide 3. Marne-la-Vallée: IFSTTAR, 2017 (Techniques et méthodes)

/

HAMDI Jabrane.

Modélisation explicite de l'initiation et la propagation de fractures. Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 18/12/2017

Risques du sol et du sous-sol 2018

**BLANCO-MARTIN Laura;
ROUABHI Ahmed; BILLIOTTE
Joël; HADJ-HASSEN Faouzi;
TESSIER Bruno; HEVIN Grégoire;
BALLAND Cyrille; HERTZ
Emmanuel.**

Experimental and numerical investigation into rapid cooling of rock salt related to high frequency cycling of storage caverns. *International Journal of Rock*

Mechanics and Mining Sciences, 2018, 102: p. 120-130

/

**GOMBERT Philippe; GHOREYCHI
Mehdi; LAHAIE Franz; SALMON
Romuald; THORAVAL Alain.**

Risques et opportunités liés aux stockages souterrains d'énergie en France. *Tunnels et espace souterrain*, 2017 (262): p. 47-62

/

**SOULEY Mountaka; RENAUD
Vincent; AL HEIB Marwan;
BOUFFIER Christian; LAHAIE
Franz; NYSTROM Anders.**

Numerical investigation of the development of the excavation damaged zone around a deep polymetallic ore mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 106: p. 165-175

Direction scientifique 2017

MORGAN Cristine L.S.; MCBRATNEY Alex B.; FIELD Damien J.; KOCH Andrea; BOUMA Johan; CARRE Florence.

Synthesis: Goals to Achieve Soil Security.

FIELD Damien J.; MORGAN Cristine L.S.; MCBRATNEY Alex B.

Global Soil Security. NC: Springer, 2017, p. 457-462 (Progress in soil science)

/

GHOUREYCHI Mehdi; RENAUD Vincent; POKRYSZKA Zbigniew.

Effets thermo-hydrromécaniques de l'aérage des ouvrages souterrains.

GASC-BARBIER Muriel; MERRIEN-SOUKATCHOFF Véronique; BEREST Pierre.

Manuel de mécanique des roches. Tome V - Thermomécanique des roches. Paris: Presses de mines, 2017, p. 281-304

/

GHOUREYCHI Mehdi; LAOUAFA Farid; POULARD Frédéric.

L'après-mine et la mécanique des roches.

PELLET Frédéric L.

Mécanique des roches: défis et enjeux. Actes du Jubilé du Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR). Paris: Presses des Mines, 2017, 245-261 (Sciences de la terre et de l'environnement)

Direction scientifique 2018

DIDIER Christophe; DE MENTHIERE Nicolas; LACROIX Denis; SCHMITT Bertrand; BETHINGER Audrey; LAURENT Louis; DAVID Bernard; PARENT DU CHATELET Jacques; PELEGRIN Flora; HENAUT Pascale; LE GALL Morgane; PEPIN Marie-Hélène; PRADAUD Isabelle.

Une analyse des grandes visions prospectives internationales sur le devenir de l'environnement: l'étude ScénEnvi. *Responsabilité & Environnement - Annales des mines*, 2018 (89): p. 71-81

Direction des services**aux entreprises et de la certification 2017**

PRATS Alain.

Mise en place d'un système de management environnemental ISO 14001 v. 2015. *Techniques de l'ingénieur*. Paris: Éditions Techniques de l'ingénieur, 2017, p. G 5000v3

Direction des services**aux entreprises et de la certification 2018**

DECK Olivier; BAROUDI Hafid; HOSNI A.; GUENIFFEY Yves.

A time dependency prediction of the number of mining subsidence events over a large mining field with uncertainties considerations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 105: p. 62-72

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

