



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

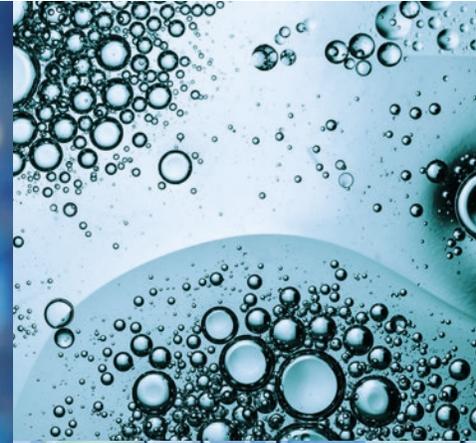
INERIS

maîtriser le risque  
pour un développement durable

# RAPPORT SCIENTIFIQUE

# 2020

# 2021





# 04

Édito

# 05

Les chiffres-clés de la recherche 2021

# 06

Faits marquants de la recherche en 2020

# 08

La dimension science-société dans les travaux de recherche

# 09

Positionnement institutionnel et stratégique, gouvernance et activités de l'institut : bilan du rapport d'évaluation de l'Hcéres



# 10

MAÎTRISER LES RISQUES LIÉS À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE



# 26

COMPRENDRE ET MAÎTRISER LES RISQUES À L'ÉCHELLE D'UN SITE INDUSTRIEL ET D'UN TERRITOIRE

# 44

CARACTÉRISER LES DANGERS DES SUBSTANCES ET LEURS IMPACTS SUR L'HOMME ET LA BIODIVERSITÉ



## ÉDITO



**Raymond COINTE**

Directeur général



**Laurence ROUÏL**

Directrice de la Stratégie, de la politique scientifique et de la communication

La recherche scientifique est une composante essentielle et structurante des activités de l'Institut. Elle est garante de la pertinence et de la qualité de ses productions et est complémentaire de sa mission d'appui aux politiques publiques et de ses travaux d'expertise, de conseil et de certification à destination des entreprises. Les programmes de recherche menés par l'Ineris s'appuient, dans tous les domaines de l'évaluation des risques, sur une forte complémentarité entre expérimentation et simulation, qui bénéficie des installations et moyens numériques exceptionnels dont l'Institut s'est doté au cours des dix dernières années. Ce dynamisme scientifique est stimulé par un réseau de partenaires académiques français et européens, parmi les plus reconnus dans leurs domaines.

Cette capacité de fédérer les disciplines, les équipes, et les moyens pour répondre aux situations d'urgence et anticiper les futurs risques environnementaux et industriels a été saluée par le Comité d'évaluation du Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres) dans son rapport d'évaluation de l'Institut publié fin 2020. L'Institut en a également fait un axe directeur de son nouveau contrat d'objectif et de performance (COP) pour la période 2021-2025, autour de trois grandes thématiques prioritaires :

- la maîtrise des risques liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire ;
- la compréhension et la maîtrise des risques à l'échelle d'un site industriel et d'un territoire ;
- la caractérisation des dangers des substances et de leurs impacts sur l'homme et la biodiversité.

Les travaux présentés dans ce rapport scientifique illustrent les questionnements et les défis que relèvent les équipes de l'Ineris dans ces domaines et les méthodes et moyens qu'elles mettent en œuvre pour les résoudre. Les résultats présentés ont fait l'objet de publications et communications internationales revues par les pairs. Dans cette édition, la parole est également donnée aux chercheurs de l'Ineris qui offrent un témoignage sur les projets dans lesquels ils sont impliqués et les sujets qui les occupent.

Les travaux de recherche de l'Institut s'inscrivent toujours dans la logique d'ouverture et de dialogue avec la société,

afin de les maintenir au plus proche des préoccupations des citoyens, dans la logique de notre mission de service public. Le conseil scientifique, la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (Core), les commissions scientifiques spécialisées et le Comité de suivi de l'application de la charte de déontologie, instances de gouvernance externe de l'Institut sont de précieuses vigies qui aident l'Institut à garder ses travaux d'appui de recherche et d'expertise au meilleur niveau et en résonance avec ses valeurs fondamentales : ouverture, intégrité, sens du collectif et expertise.

*« La recherche scientifique est une composante essentielle et structurante des activités de l'Institut. »*

En dépit de la période exceptionnelle que nous venons de traverser à cause de la pandémie liée à la Covid-19 et qui n'a pas manqué d'impacter les activités scientifiques, avec en particulier la suspension temporaire de certaines activités expérimentales, le bilan scientifique de l'Institut pour les années 2020-2021 reste très positif. Le nombre annuel des publications dans des revues à comité de lecture reste supérieur à 95, et les équipes sont toujours très mobilisées, avec leurs partenaires, dans l'élaboration de nouveaux projets de recherche, avec un taux de succès oscillant entre 20 % (guichet européen Horizon 2020) et 40 % (guichet national ADEME/AQACIA). Ainsi, en 2021, deux projets de recherche dans lesquels l'Ineris est fortement impliqué ont été soumis et acceptés en réponse à l'appel à proposition européen « H2020 Green deal » dans les domaines de la qualité de l'air et de l'évaluation des mécanismes de transfert dans l'environnement des substances perfluoroalkylées (PFAS).

C'est très sincèrement que nous en remercions toutes les équipes de l'Institut.

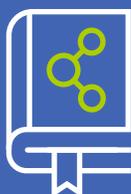
# Les chiffres-clés de la recherche 2021



**21,3 %**  
de l'activité  
de l'Institut  
sont consacrés  
à la recherche



**5** projets européens  
coordonnés par l'Ineris



## Production scientifique

**254** publications  
et communications  
avec la participation d'auteurs Ineris

**95** publications  
dans des revues  
à comité de lecture référencées  
dans la base ISI Web of Science dont :

- **39 %** avec un premier auteur Ineris
- **18 articles de revues ISI** dont le doctorant est premier auteur

**113**  
communications  
présentées dans **45** manifestations  
scientifiques et techniques,  
en France et dans le monde  
(**64 %** de congrès internationaux)

**7** contributions  
dans des ouvrages



## Doctorats et HDR

**32** doctorants  
dont 15 thèses soutenues  
en 2020

**17** titulaires  
d'une habilitation  
à diriger des recherches  
(HDR)



## Collaborations

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

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

# FAITS MARQUANTS DE LA RECHERCHE EN 2020

14 JANVIER 2020

## LANCEMENT D'UNE THÈSE SUR LA SISMICITÉ INDUITE ET LA GÉOTHERMIE PROFONDE

L'Ineris et l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) se sont réunis le 14 janvier 2020 pour le lancement d'une thèse sur la compréhension et la maîtrise des risques de sismicité induite, sur les sites et territoires exploitant la géothermie profonde.



14 AVRIL 2020

## INCENDIE ET ENVIRONNEMENT: L'INERIS CONTRIBUE À UNE FEUILLE DE ROUTE INTERNATIONALE POUR LA RECHERCHE

L'Institut a participé à une étude internationale, initiée par l'association américaine pour la protection contre les incendies, la National Fire Protection Association (NFPA), sur l'impact des incendies sur l'environnement. Ces travaux proposent un état de l'art sur ce sujet scientifique encore peu abordé, ainsi qu'une feuille de route qui identifie les sujets prioritaires sur lesquels faire progresser les connaissances.



16 AU 20 NOVEMBRE 2020

## LE PHÉNOMÈNE « MULTI-EXPOSITIONS » AU PROGRAMME DU CONGRÈS DE LA SOCIÉTÉ FRANCOPHONE DE SANTÉ ET ENVIRONNEMENT (SFSE)

L'Institut a été partenaire du 11<sup>e</sup> congrès annuel de la SFSE « Multi-expositions, conditions de vie et santé: de la connaissance à l'action », qui s'est déroulé du 16 au 20 novembre 2020 en version exclusivement digitale depuis Lille. L'Ineris y a présenté ses travaux en matière d'expologie et de modélisation toxicocinétique.

17 NOVEMBRE 2020

## MICROPLASTIQUES: L'INERIS PILOTE LE PROJET EUROPÉEN MISSOURI

L'Ineris et ses partenaires ont lancé le projet européen Missouri (*Microplastics in Soil and grOUndwa-teR: sources, transfer, metrology and Impacts*), sur les enjeux liés à la présence de microplastiques dans les sols et les eaux souterraines.



18 NOVEMBRE 2020

## IMPACT SUR LA SANTÉ DES PARTICULES FINES: L'INERIS PARTICIPE À UNE ÉTUDE EUROPÉENNE

L'Ineris a contribué à une étude européenne coordonnée par l'Institut Paul Scherrer (PSI, Suisse) sur les sources de particules atmosphériques fines (PM<sub>2,5</sub>) et leur effet nocif sur la santé. Ses résultats, publiés dans la revue *Nature* du 18 novembre 2020, permettent de relier les sources de particules fines à leur potentiel oxydant (PO) comme estimation de la capacité des PM<sub>2,5</sub> à induire un effet délétère (stress oxydant) sur l'organisme humain.



**DU 27 AU 31 JUILLET 2020**

### CONGRÈS INTERNATIONAL ISHPMIE 2020

L'Institut est intervenu au congrès international ISHPMIE 2020 (*13<sup>th</sup> International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*), rendez-vous incontournable des acteurs du risque « explosion ». L'événement était organisé par l'Institut national de métrologie d'Allemagne (PTB), par visioconférence.



**30 SEPTEMBRE 2020**

### SISMICITÉ POST-MINIÈRE : LANCEMENT DU PROJET RFCS POSTMINQUAKE

La réunion de lancement du projet européen RFCS (*Research Funding for Coal and Steel*) PostMinQuake (*Induced earthquake and rock mass movements in coal post mining areas: mechanisms, hazard and risk assessment*) s'est tenue le 30 septembre 2020 en visioconférence. L'objectif de ce projet international est d'approfondir les connaissances sur l'aléa sismique post-minier pour ensuite proposer des actions afin de traiter et d'atténuer cet aléa. L'association de plusieurs pays miniers européens permettra de collecter des données importantes qui, à terme, aboutiront à la réalisation d'un guide transnational sur les méthodes d'évaluation et de surveillance du risque sismique, dans les zones post-minières. Cette réunion de lancement était donc l'occasion pour les partenaires du projet de présenter leurs futurs travaux de recherche. Le volet consacré au risque sismique et à l'évaluation des risques sera dirigé par l'Ineris.

**23 NOVEMBRE 2020**

### LUTTE CONTRE LES MICROPOLLUANTS DANS LES EAUX URBAINES: RESTITUTION DU PROJET LUMIEAU-STRA

La restitution du projet Lumieau-Stra, dont l'Institut est partenaire, a été organisée sous la forme d'un webinaire le 23 novembre 2020. Un bilan des outils et des actions de réduction des micropolluants évalués dans le cadre du projet a été présenté par les experts de l'Ineris.



**3 DÉCEMBRE 2020**

### LE PRIX DE THÈSE CENTRALE INNOVATION 2020 POUR JIE YANG

Jie Yang avait brillamment soutenu sa thèse le 8 juillet 2019, à l'École Centrale de Nantes. Ses travaux ont porté sur les analyses numériques de la problématique multiphysique des fontis au voisinage d'une digue ou d'un ouvrage linéaire. Le prix de la thèse lui a été décerné par Centrale Innovation en décembre 2020.

Strasbourg.eu

WEBINAIRE DE RESTITUTION DU PROJET  
**LUMIEAU-STRA**

# LA DIMENSION SCIENCE-SOCIÉTÉ DANS LES TRAVAUX DE RECHERCHE



Aurélie  
PRÉVOT



Pierre  
BOUCARD



Lucile  
OTTOLINI

Dans la perspective de mettre ses travaux scientifiques davantage en prise avec les préoccupations de la société et des citoyens, l'Ineris déploie une démarche d'ouverture à la société depuis près de 15 ans. Cette démarche ambitieuse de développer les interactions science-société sur toute la chaîne de production de connaissances de l'Institut, avec la conviction que ce dialogue peut nourrir de façon décisive la qualité de la recherche menée à l'Ineris.

Ainsi, l'Ineris s'est doté en 2011 d'une instance de gouvernance pluraliste, la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (Core), au sein de laquelle les parties prenantes de la société civile contribuent aux orientations des activités et programmes de travail de l'Institut.

## EN 2021, UNE RÉFLEXION PARTAGÉE SUR LA THÉMATIQUE DES MICROPLASTIQUES

Depuis l'année dernière, les membres de la Core sont étroitement associés au développement d'une thématique de travail de l'Institut portant sur les dangers, risques et impacts en lien avec la présence des microplastiques dans l'environnement. La Commission a ainsi contribué à la consolidation du positionnement de l'Institut sur le sujet et à la priorisation de ses axes de travail, en s'appuyant sur l'analyse transversale conduite au sein de l'Institut par Pierre Boucard, ingénieur à l'unité Économie et aide à la décision pour l'environnement (EDEN). De plus, dans l'optique de partager ses outils au-delà des cercles académiques, l'Ineris a sollicité la Core sur une réflexion pour mieux valoriser auprès du public le bulletin de veille scientifique qu'il produit régulièrement sur le sujet des microplastiques.

## UN TRAVAIL PIONNIER SUR LES INTERACTIONS SCIENCE-SOCIÉTÉ

Fort de 10 ans d'expérience en matière d'ouverture et conforté par une recommandation du Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres), l'Ineris a entrepris de conduire une réflexion sur la dynamique de sa démarche, pour en évaluer les effets et *in fine* améliorer ses pratiques. Cette réflexion s'est concrétisée dans un travail de thèse en sociologie des sciences, soutenu avec succès en septembre 2020 par Lucile Ottolini.

Ce doctorat, co-encadré par l'Ineris et l'Inrae (Laboratoire interdisciplinaire sciences innovations sociétés), est le tout premier travail qui documente l'évolution, au sein des instituts d'expertise français, des politiques d'ouverture à la société depuis leur émergence dans les années 1990. La thèse explore les politiques d'ouverture dans une perspective socio-historique large, puis au travers d'études de cas. Cette recherche démontre que la transformation des établissements d'expertise par les politiques d'ouverture est un objet scientifique à part entière, dont les sciences sociales doivent pleinement se saisir. Elle constitue aussi, pour l'Ineris, une mise en perspective précieuse, qui va lui permettre d'en tirer des pistes opérationnelles pour les orientations futures de sa démarche.

# Positionnement institutionnel et stratégique, gouvernance et activités de l'Institut : bilan du rapport d'évaluation de l'Hcéres

L'exigence est l'une des valeurs de l'Ineris qui s'applique à toutes ses productions scientifiques et techniques, qu'elles relèvent de ses activités d'appui, de prestation ou de recherche. Ainsi la politique scientifique de l'Institut intègre l'évaluation de ses travaux, comme tout organisme de recherche français, par le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres). La première évaluation de l'Institut remonte à 2015. Une deuxième évaluation a été menée en 2020 pour la période 2016-2020. Cette démarche a accompagné la réflexion menée au sein de l'Institut pour l'élaboration de son nouveau contrat d'objectifs et de performance (COP) pour la période 2021-2025. Le rapport du comité d'évaluation a été publié en décembre 2020. Il salue le modèle et la culture de l'Ineris basés sur le trépied recherche/appui aux politiques publiques/expertise au service des entreprises, et sa capacité à maintenir ses compétences et ses équipements pour concilier les différents volets de la prévention des risques, incluant la réaction en situation d'urgence comme l'anticipation de nouveaux ou futurs sujets. Quatorze recommandations ont été formulées portant sur le positionnement de l'Ineris, son organisation, ses instances de gouvernance, sa politique de communication et ses priorités de recherche. L'un des plus gros défis sous-jacents est le maintien d'une expertise de haut niveau et d'une capacité de mobilisation rapide sur les sujets les plus variés malgré les fortes contraintes pesant sur ses effectifs et son plafond d'emploi. Le nouveau COP vise à y répondre.

Aussi en 2021, l'Institut a adapté son organisation interne pour améliorer le pilotage stratégique de ses activités et la transversalité au sein de ses projets pour tirer le meilleur parti de la pluralité de ses compétences. Dans la même logique, il a également procédé à la

refonte de ses programmes d'appui auprès des pouvoirs publics pour en faciliter la lisibilité selon le COP et prendre en compte les recommandations du Hcéres. Une démarche similaire a été initiée, fin 2021, pour les axes de recherche de l'Institut et sera finalisée en 2022.

Plus largement, l'Ineris a défini un plan d'action en réponse aux recommandations du comité d'évaluation. Il intègre, en particulier, le développement des relations de l'Ineris avec le monde académique, avec une volonté forte de consolider des partenariats pérennes avec les universités et les organismes de recherche, et de devenir un acteur de référence dans les Hauts-de-France et dans les régions où l'Ineris a implanté des relais locaux : Grand Est, PACA, Centre et Auvergne-Rhône-Alpes. De manière plus générale, une stratégie partenariale intégrant les dimensions locale, nationale, européenne et internationale sera finalisée en 2022. Le positionnement et le rayonnement européens de l'Ineris constituent également des axes de travail structurants pour sa politique de recherche dont la performance sera mesurée au travers du nombre de projets dans lesquels l'Institut est impliqué (notamment dans la dynamique Horizon Europe) et du nombre de publications dans les revues à comité de lecture, avec un focus particulier sur les co-publications avec des équipes internationales.

Enfin, en réponse aux recommandations relatives à la communication et la valorisation de ses travaux, l'Ineris, attentif à ses engagements de transparence, renforcera encore ses ambitions, avec plus de documents accessibles sur son site Internet, une stratégie de valorisation des données qu'il produit ou qu'il gère, et une politique d'ouverture à la société réaffirmée.

En savoir plus : <https://bit.ly/3P0Qzy9>





# MAÎTRISER LES RISQUES LIÉS À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET À L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

L'Ineris a mené de nombreux travaux de recherches afin de maîtriser les risques associés au déploiement des nouvelles solutions pour la transition énergétique sur tout le territoire. Il s'est par exemple intéressé au stockage souterrain de l'hydrogène et va continuer à dessiner l'avenir de cette filière. En parallèle de ces études, l'Institut mobilise des compétences techniques dans le domaine de la sécurité des procédés et des stockages massifs ainsi qu'au transport de l'énergie et de la transition vers une économie circulaire.

- 12 Entretien avec Stéphane Lafortune
- 13 Entretien avec Thangavelu Jayabalan
- 14 **Une approche intégrée** pour mieux comprendre la dynamique de déformation et de rupture de la roche en réponse à l'exploitation minière profonde
- 16 **Présentation du JIP SPARCLING** sur l'étude expérimentale d'un jet de GNL sous pression
- 18 **Les leviers d'action pour un mix énergétique propre et sûr** au service de la transition énergétique dans les territoires
- 20 **Étude de sécurité** d'une station de distribution en hydrogène gazeux
- 22 **Comprendre l'emballage thermique** des batteries lithium-ion riches en nickel
- 24 **Les concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les plastiques** : revue de leur présence et de leur gestion

## ENTRETIEN AVEC



**Stéphane LAFORTUNE**

Ingénieur et coordinateur de l'axe de recherche  
Transition énergétique et utilisation des sous-sols (TESS)  
Unité Eaux souterraines et émissions de gaz  
Direction Sites et territoires

*« Pour accompagner le développement d'une filière de stockage d'hydrogène en France, il est important d'identifier les évolutions nécessaires pour qu'il soit maîtrisé sur les plans de la sécurité et de l'environnement. »*

### **Pouvez-vous nous parler de vos récents travaux et de leurs temps forts en 2020 ?**

Dans le cadre d'un doctorat co-encadré avec l'université de Lorraine, l'Ineris a mené une expérience d'injection d'hydrogène (H<sub>2</sub>) en phase dissoute sur son site expérimental à Catenoy (Oise). Le site est équipé pour suivre la migration dans la proche surface, jusqu'à 20 mètres de profondeur. Il a été conçu au départ pour des études sur le monitoring des stockages géologiques de CO<sub>2</sub>. Fin 2019 et début 2020, une expérience simulant une fuite depuis un stockage souterrain d'H<sub>2</sub> (par exemple le long du puits d'une cavité saline) y a été réalisée afin de caractériser les impacts sur la physico-chimie de la nappe et de valider une méthode de monitoring des gaz dissous par spectroscopie Raman. Ces résultats ont alimenté nos travaux sur la maîtrise des risques liés au stockage souterrain d'H<sub>2</sub>.

### **Pourriez-vous rebondir sur l'actualité 2020 de l'Ineris en matière de stockage souterrain de l'hydrogène ? Quels ont été les grands projets de cette année particulière ?**

L'expérience à Catenoy a été réalisée dans le cadre du projet de recherche ROSTOCK H. Pour ce projet qui s'intéresse aux perspectives de stockage d'H<sub>2</sub> en cavités salines, l'Ineris a également dressé un état des lieux de la réglementation existante, en France et en Allemagne, pour les installations de surface et souterraines nécessaires pour opérer un futur stockage. L'Ineris a aussi été impliqué dans la finalisation du projet STOPIL H<sub>2</sub> portant sur l'étude de

faisabilité d'un pilote industriel de stockage en France. Nous avons contribué à la définition de la stratégie de surveillance devant être mise en place, aussi bien pour interpréter les résultats des essais, que pour garantir la sécurité des opérations, ainsi qu'à l'analyse des scénarios accidentels susceptibles de se développer.

### **Quel est l'avenir de la filière Stockage souterrain de l'hydrogène ? Comment l'Ineris peut-il se distinguer encore davantage dans ce secteur ?**

Le stockage d'H<sub>2</sub> est une solution pour la transition énergétique. Pour accompagner le développement d'une filière de stockage en France, il est important de s'assurer que le cadre réglementaire est adapté et, si besoin, d'identifier les évolutions nécessaires pour garantir un développement maîtrisé sur le plan de la sécurité et de l'environnement. L'Ineris va continuer à accompagner l'avenir de la filière en France, en participant au premier démonstrateur de stockage d'H<sub>2</sub> produit grâce à une source d'électricité renouvelable, dans le cadre du nouveau projet HyPSTER. L'Ineris y mènera l'analyse des risques et modélisera le comportement géomécanique de la cavité soumise à des cyclages rapides. Ces travaux pourraient conduire à une évolution du cadre réglementaire ou normatif du stockage d'H<sub>2</sub>.

## ENTRETIEN AVEC



**Thangavelu JAYABALAN**

Responsable études et recherches  
Unité Evaluation et maîtrise des risques d'incendie et d'explosion  
dans les procédés  
Direction Incendie, dispersion et explosion

*« L’Ineris apporte un regard “sécurité” sur l’ensemble de la chaîne de valeur de la biomasse, transformée dans les bioraffineries en pleine mutation technologique. »*

### **De quelle manière l’Ineris s’investit-il sur les sujets liés à la valorisation de la biomasse ?**

La biomasse désigne l’ensemble des matières organiques d’origine végétale et animale qui pourraient être transformées via un grand nombre de procédés, en énergie et en produits biosourcés. La thématique de la biomasse est identifiée dans notre COP (objectifs n° 1 et n° 4). Nous mettons en œuvre nos différentes compétences techniques dans le domaine de la sécurité des procédés et dans la maîtrise des risques industriels au service des trois axes structurant de notre stratégie : transition énergétique & économie circulaire, danger & impacts des substances, risques à l’échelle des sites & territoires. Ainsi, l’Ineris apporte un regard « sécurité » sur l’ensemble de la chaîne de valeur de la biomasse, transformée dans les bioraffineries en pleine mutation technologique.

### **Pouvez-vous nous parler des projets FLEDGED et ZELCOR ?**

Ce sont deux projets de recherche financés par la Commission européenne. Le projet FLEDGED concerne la valorisation énergétique de la biomasse de type lignocellulosique (bois, pailles, pépins de raisins...), déchets municipaux et combustibles solides de récupération, via un procédé thermochimique. Il vise à développer un procédé intensifié pour la production d’un carburant biosourcé proche du diesel en termes de propriétés (le DME), et à améliorer son efficacité énergétique en y intégrant des sources d’énergie renouvelable intermittentes (éolien, solaire) par couplage

avec un électrolyseur. Le projet ZELCOR vise à transformer des résidus de biomasse, tels que les lignines et les humines, vers des produits et matériaux à haute valeur ajoutée (ingrédients cosmétiques, additifs pour les emballages, intermédiaires pour la synthèse chimique). Il combine des procédés chimiques (liquides ioniques, catalyseurs) et biologiques (enzymes, insectes) dans une approche en cascade et un objectif « zéro déchet ». L’approche multicritère d’analyse de durabilité et de risques est communément employée dans l’évaluation des chaînes de valeurs de valorisation de la biomasse développées dans les deux projets. Elle permet d’anticiper et d’intégrer les aspects de sécurité et de durabilité dans la phase de développement des procédés vers un déploiement durable et sûr à l’échelle industrielle.

### **Quels sont les grands enjeux à venir ?**

L’un des grands enjeux à venir est la production de multiproduits et le développement de procédés dans une démarche de bioraffinerie intégrée, suffisamment souple et flexible pour s’accommoder des variables économiques. En produisant plusieurs produits, une bioraffinerie tire parti des divers composants de la biomasse et de leurs intermédiaires, maximisant ainsi la valeur dérivée de la matière première de la biomasse. L’identification et la maîtrise des risques émergents, l’analyse du contexte réglementaire applicable et son adaptation éventuelle pour accompagner ces nouvelles filières en forte croissance, sont également des points d’attention pour l’Ineris.

# Une approche intégrée pour mieux comprendre la dynamique de déformation et de rupture de la roche en réponse à l'exploitation minière profonde

AUTEUR



Francesca DE SANTIS

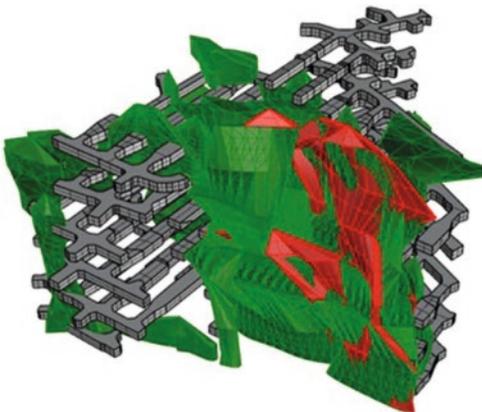
**Collaborateurs:**

Vincent RENAUD  
Jannes KINSCHER  
Emmanuelle KLEIN

**LE CONTEXTE DE L'ÉTUDE**

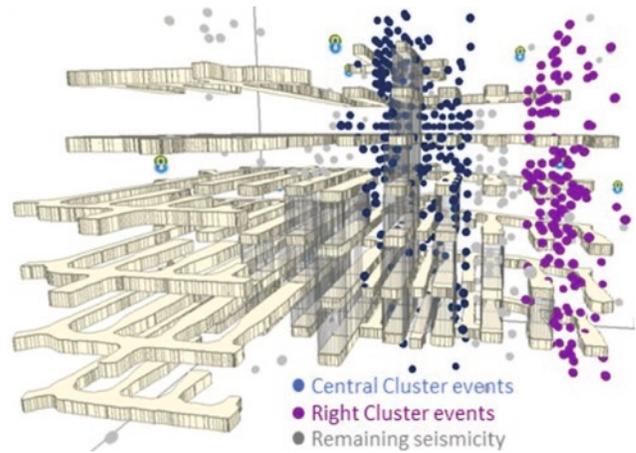
L'exploitation de gisements miniers à grande profondeur conduit à des modifications importantes du champ de contraintes et augmente les risques de coups de terrain, c'est-à-dire de ruptures soudaines et violentes du massif rocheux. Ils sont la cause de nombreux accidents dans le monde et représentent une menace sérieuse pour la sécurité des mineurs et l'intégrité des infrastructures minières. Mieux comprendre les interactions entre l'état de contrainte et la rupture du massif rocheux constitue donc un enjeu majeur dans le domaine minier et plus largement dans le contexte de l'exploitation de géoressources à grande profondeur.

Ce projet de recherche, réalisé en partenariat avec la société minière Boliden, a permis à l'Ineris de tester une approche interdisciplinaire intégrée reposant sur l'expertise du milieu souterrain profond, la modélisation numérique géologique et géomécanique 3D prédictive et comparative ainsi que sur la surveillance microsismique et des contraintes. Il porte en particulier sur un secteur minier,



**Figure 1**

Vue en 3D du modèle géométrique de la zone exploitée à 1 300 m de profondeur. Les galeries minières sont représentées en gris, les zones de roches tendres et très tendres qui intersectent le gisement sont représentées respectivement en vert et en rouge.



**Figure 2**

Vue en 3D du secteur surveillé avec la position des sources microsismiques par rapport à la progression de l'exploitation minière: en bleu les événements induits directement par la production (l'essaim central), en mauve les événements contrôlés par les hétérogénéités géologiques (essaim de droite) et en gris, les événements diffus (sismicité restante).

en Suède, où le minerai est extrait en utilisant une méthode d'exploitation dite par *sublevel stopping* jusqu'à une profondeur d'environ 1 300 mètres. La mine est caractérisée par plusieurs gisements de sulfures polymétalliques, dans une unité calcaire dolomitique présentant localement des lentilles de talc et de schiste de faible tenue mécanique (**Figure 1**). Ces hétérogénéités locales, la profondeur d'excavation croissante et un taux d'extraction très élevé, sont la cause d'instabilités sismo-géotechniques en augmentation.

**LES CONDITIONS DE SURVEILLANCE IN SITU**

Un réseau de surveillance haute résolution, composé de cellules de contraintes et de sondes microsismiques, a été déployé dans un secteur exploité sur plusieurs niveaux à plus de 1 000 mètres de profondeur. Sa configuration a été définie au moyen de simulations numériques de manière à optimiser les performances en termes notamment de détectabilité et de précision de localisation des sources. Il permet ainsi de quantifier et d'analyser de manière fiable et précise, la

sismicité induite dans tout le volume d'intérêt, tandis que les mesures de géotechnique en continu sont réalisées au cœur de la zone de production pour évaluer les contraintes régnant à proximité de l'exploitation. Parallèlement à la surveillance en temps quasi réel, les changements de contraintes sont analysés à plus grande échelle au moyen d'un modèle numérique géomécanique 3D qui tient compte de la séquence d'exploitation.

**LA RÉPONSE COMPLEXE DU MASSIF ROCHEUX À LA PRODUCTION MINIÈRE: L'INFLUENCE DE LA GÉOLOGIE ET DU SÉQUENÇAGE DE L'EXPLOITATION**

La localisation des sources microsismiques permet d'identifier des clusters sismiques actifs qui correspondent aux zones marquées par des redistributions de contraintes autour des travaux miniers. L'analyse spatio-temporelle et la caractérisation des sources sismiques mettent en évidence deux types de réponse du massif rocheux, qui se manifestent par deux essaims de sismicité (**Figure 2**).

L'un, dans la zone de production, est directement induit par les tirs de production et les nouvelles excavations. L'autre, qui se manifeste à distance de la zone de production et s'inscrit dans une temporalité plus longue, est principalement contrôlé par les hétérogénéités géologiques. Dans les deux cas, la sismicité semble être fortement liée à la géologie locale et au séquençage minier mais elle est faiblement corrélée au volume de minerai extrait. Les données géotechniques ainsi que les observations visuelles dans la mine montrent que la production minière induit aussi des déformations aismiques dans le massif rocheux (Figure 3). Elles suggèrent également l'existence de phénomènes de fluage en réponse aux tirs de production. La modélisation géomécanique 3D à grande échelle, par différence finie, à partir d'un maillage dense qui simule l'ensemble des étapes de production, met également en évidence de grandes déformations plastiques dans les roches tendres, ainsi que des transferts de contraintes au-delà de l'environnement immédiat des zones excavées. L'interprétation globale montre clairement que la présence de lentilles de schiste et talc a

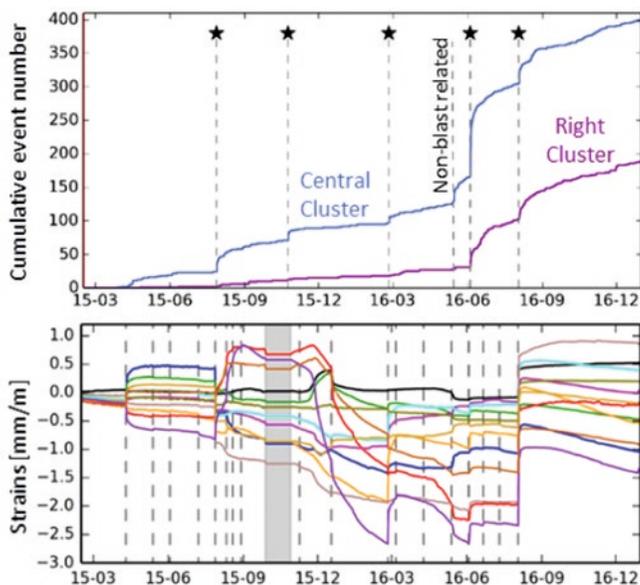
un impact sur la redistribution des contraintes et le déclenchement de la microsismicité à distance de la zone de production.

### LES ENSEIGNEMENTS ET PERSPECTIVES POUR OPTIMISER LE SÉQUENÇAGE DES OPÉRATIONS ET AMÉLIORER LA SÉCURITÉ

Une stratégie de surveillance intégratrice dans les conditions précitées permet non seulement une meilleure discrimination des zones vulnérables, mais fournit également des informations cruciales sur les mécanismes géomécaniques en jeu. Ceux-ci sont difficiles à appréhender autrement puisqu'ils interviennent à des échelles de temps et d'espace très différentes. Cette stratégie ouvre de ce fait des perspectives certaines pour aider à optimiser le séquençage des opérations, et pour développer des outils d'aide à la décision afin d'améliorer la sécurité, par exemple par la mise en place de systèmes de feux de signalisation basée sur l'activité microsismique (type « *traffic light system* »).

## ABSTRACT

Mining of deep orebodies induces considerable stress field changes causing large aseismic deformations and creep effects, high stress concentrations zones, fracturing and also mining-induced seismicity. The latter can result in rock falls or rock ejection phenomena, which represent a serious threat for miners safety and mine infrastructures integrity. To study and assess both aseismic and seismic rock mass response to massive extraction, Ineris has implemented an integrated strategy in a deep hard-rock mine, located in Sweden, where ore is extracted using sublevel stoping method down to about 1300 m depth. It demonstrates how combining high resolution microseismic monitoring with 3D mine-wide geomechanical modelling and in situ stress measurements enables to better quantify mine-induced stress changes and subsequently induced seismicity patterns. Results not only yield better discrimination of responsive hazardous areas but provide a more comprehensive overview of the concurrent geomechanical mechanisms taking place at different scales that are difficult to identify otherwise. They bring new outcomes to improve decision making on the best upcoming mining sequence among several scenarios.



**Figure 3**  
En haut, le nombre cumulé d'événements microsismiques dans chacun des deux essais et temporalités avec les tirs de production (étoiles). En bas : chroniques des déformations enregistrées sur l'une des cellules de contrainte et des tirs de production (lignes pointillées) montrant des changements de contrainte immédiats suivis de déformations aismiques dans l'encaissant rocheux.

## Références

- F. De Santis, I. Contrucci, J.L. Kinscher, P. Bernard, V. Renaud & Y. Gunzburger (2019). Impact of geological heterogeneities on induced-seismicity in a deep sublevel stoping mine. *Pure and Applied Geophysics*, 176(2), 697-717.
- F. De Santis (2019). Rock mass mechanical behavior in deep mines: in situ monitoring and numerical modelling for improving seismic hazard assessment (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- F. De Santis, V. Renaud, Y. Gunzburger, J.L. Kinscher, P. Bernard & I. Contrucci (2020). In situ monitoring and 3D geomechanical numerical modelling to evaluate seismic and aseismic rock deformation in response to deep mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 129, 104273.
- J.L. Kinscher, F. De Santis, N. Pojata, P. Bernard, K. H. Palgunadi & I. Contrucci (2020). Seismic repeaters linked to weak rock-mass creep in deep excavation mining. *Geophysical Journal International*, 222(1), 110-131.

# Présentation du JIP SPARCLING sur l'étude expérimentale d'un jet de GNL sous pression

## AUTEURS



Lauris JOUBERT<sup>1</sup>



Guillaume LEROY<sup>1</sup>

### Collaborateurs :

- Steven BETTERIDGE<sup>2</sup>
- Elena VYAZMINA<sup>3</sup>
- Laurence BERNARD<sup>3</sup>
- Romain JAMBUT<sup>4</sup>
- Jérôme FRINDEL<sup>5</sup>

## INTRODUCTION

Le marché du GNL (gaz naturel liquéfié) à petite échelle (« *small-scale* » GNL) est en pleine expansion. Le développement de cette économie nécessite la mise en place de nombreux points de distributions, qu'ils soient fluviaux, portuaires ou routiers, se situant dans des zones souvent à fort enjeu foncier. Pour assurer un déploiement sûr de ces points de distribution, il est essentiel de disposer d'outils d'évaluation des risques précis et validés, notamment pour quantifier la quantité de liquide pouvant former une flaque au sol par le phénomène dit de *rainout* (condensation).

Les modèles actuels utilisés pour évaluer les conséquences d'un phénomène dangereux impliquant du GNL sont en grande partie empiriques et basés sur d'autres produits tels que le GPL (gaz de pétrole liquéfié). En effet, les données expérimentales spécifiques au GNL restent encore peu disponibles à ce jour. En outre, quand elles sont disponibles, elles reposent sur des essais souvent mal

instrumentés. La production de données expérimentales de haute qualité est donc requise pour améliorer et valider les modèles.

Pour répondre à ce besoin de production de nouvelles données, le JIP SPARCLING a été initié par TOTAL, AIR LIQUIDE, SHELL, GRTgaz & l'Ineris. L'objectif de ce projet collaboratif était de produire des données expérimentales de haute qualité permettant de qualifier le phénomène de *rainout*. Le projet a été piloté par l'Ineris sur son site de Verneuil-en-Halatte.

## DESCRIPTION DU BANC

Le banc expérimental est schématiquement représenté sur la **Figure 1**. Le réservoir utilisé est un réservoir cryogénique de 1 m<sup>3</sup> pouvant fonctionner jusqu'à une pression de 10 bars. Le réservoir a une structure double enveloppe. L'isolation entre les deux enveloppes est réalisée avec de la perlite sous vide. Le réservoir est équipé d'un évaporateur permettant de contrôler la pression à l'intérieur du réservoir, et donc la pression pilotant le rejet. La ligne de rejet a



Figure 2  
PDA en action

une longueur de 9 mètres et un diamètre de 1". Elle est composée de trois éléments principaux : une vanne automatique, un flexible et un système de rejet permettant l'utilisation d'orifices calibrés de différentes tailles. Lors de la conception, une attention particulière a été portée à la limitation des pertes de charge ainsi que des échanges de chaleur avec l'environnement.

## INSTRUMENTATION

Le réservoir est équipé d'un capteur de pression (P<sub>0</sub> sur la figure) et de deux capteurs de température (l'un en phase liquide T<sub>0l</sub> et l'autre en phase gazeuse T<sub>0g</sub>). Il est placé sur des pesons permettant de mesurer la perte en masse pendant le rejet. Un débitmètre de type Coriolis est présent sur la ligne de rejet pour mesurer le débit. Il fournit également une mesure en continu de la masse volumique et de la température du fluide présent dans la ligne. Des capteurs de pression et de température (P<sub>2</sub> et T<sub>2</sub>) sont placés au plus près de l'orifice, et en amont de celui-ci, pour mesurer les conditions du rejet. Un anémomètre à phase Doppler (PDA) est un instrument optique laser utilisant le principe de l'effet Doppler pour mesurer ponctuellement les distributions de taille et de vitesse des gouttelettes. Le PDA est placé sur un système de déplacement contrôlé à distance afin de faire des mesures en plusieurs points sur la durée du rejet. La **Figure 2** présente une photographie du PDA en action.

## Notes

- 1- Ineris- Institut national de l'environnement industriel et des risques - Verneuil-en-Halatte, France
- 2- Shell Global Solutions (UK), Shell Centre, London SE1 7NA
- 3- Air Liquide, Innovation Center Paris, Jouy-en-Josas, France
- 4- GRTgaz, Research and Innovation Center for Energy, Villeneuve-la-Garenne, France
- 5- Total, Tour Coupole, Place Jean Miller, Paris La Défense, France

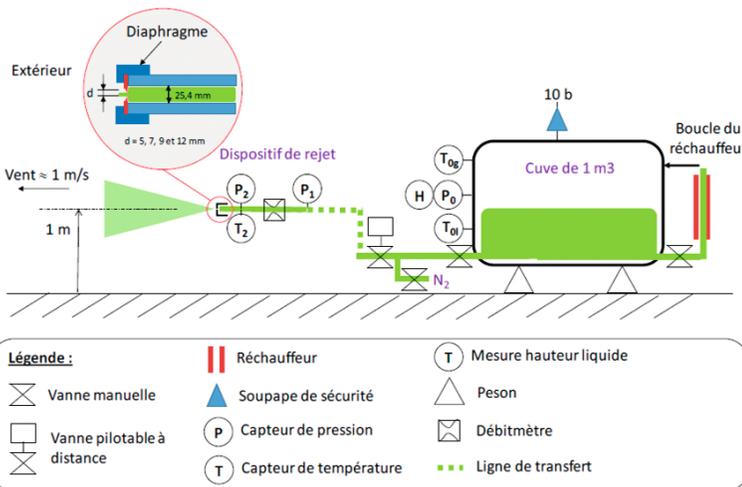


Figure 1  
Schéma du banc expérimental.

PARAMÈTRE	VALEUR
Produit	GNL et LN2
Diamètre de l'orifice	2, 3, 5, 7 et 9 mm
Pression	Atmosphérique à 9 bar absolu
Température	Saturation et sous-refroidi (jusqu'à 8 bar absolu)

Tableau 1

Paramètres étudiés pour les tests.

### MATRICE D'ESSAIS

Au total, 18 tests ont été réalisés dont 16 avec du GNL et 2 avec de l'azote liquide (LN<sub>2</sub>). L'influence du diamètre de l'orifice et des conditions de stockage a été étudiée. Le **Tableau 1** présente la matrice de tests réalisés.

### RÉSULTATS

Le phénomène de *rainout* n'a été observé que pour deux tests, lorsque la pression de rejet était proche de la pression atmosphérique :

- Test 8b (GNL, 7 mm, 1,5 bar abs);
- Test 15 (LN<sub>2</sub>, 7 mm, 1,5 bar abs).

La **Figure 3** présente des photographies réalisées lors du test 8b et met en évidence la présence de *rainout*. Pour des pressions supérieures de rejet, même pour de forts sous-refroidissements, aucun *rainout* n'a été observé.

L'analyse des résultats de taille et de vitesse de gouttelettes montre une bonne cohérence entre les essais malgré une faible variabilité des résultats. Des tendances (notamment sur le diamètre de Sauter) sont dégagées en fonction des paramètres de rejet étudiés (pression, sous-refroidissement et diamètre de fuite). Une corrélation de calcul du diamètre de Sauter en sortie d'orifice a été établie.

### LE MOT DE LA FIN

Ce projet a permis de produire des connaissances essentielles pour appréhender le risque associé à un rejet de GNL sous pression. L'Ineris a également développé une expertise forte pour la réalisation et la maîtrise des conditions de rejets cryogéniques ainsi que pour l'utilisation du PDA dans ce cadre.

## ABSTRACT

The small-scale *Liquefied Natural Gas* (LNG) economy is expected to continue growing over the foreseeable future. Therefore, development of accurate risk assessment models is becoming essential for the safe deployment of this technology.

Current models used to assess the consequences of hazardous phenomena involving pressurised LNG are quite empirical and mostly based on other fluids properties. In addition, when available, experimental data for LNG is not necessarily fully instrumented. Yet high-quality experimental data is required to check the accuracy of the models, especially for small-scale LNG facilities where the site footprint and distance to public is smaller than traditional major hazard sites. One area of particular concern is the potential for rainout and subsequent pool dispersion.

Therefore, the SPARCLING Joint Investment Program (JIP) was set-up by TOTAL, AIR LIQUIDE, SHELL, GRTgaz & Ineris to produce new high-quality experimental data to characterize size distribution and velocities of LNG droplets issued from pressurised releases, using a dual PDA (Phase Doppler Anemometer). The test program was managed and run by Ineris.

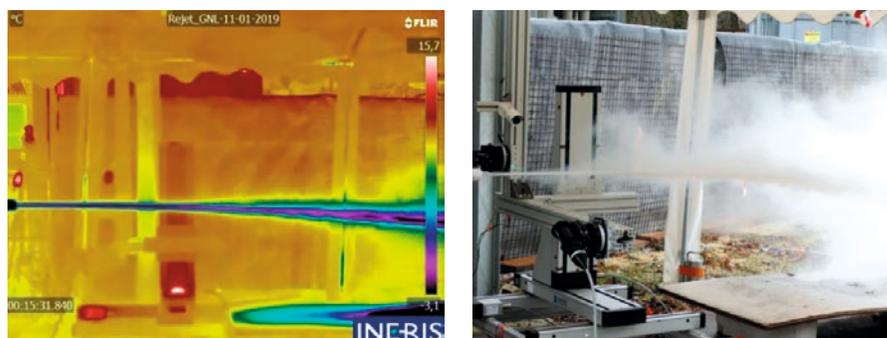


Figure 3

Observation du *rainout*. Caméra IR (à gauche), visible (à droite).

### Références

- L. Joubert, G. Leroy, S. Betteridge, E. Vyazmina, L. Bernard, R. Jambut, J. Frindel, Presentation of the experimental JIP SPARCLING: inside and beyond a pressurised LNG release, Proceedings of the 13th international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE), (2020).
- S. Betteridge, "Experimental studies of LNG dispersion", 55th UKELG One Day Discussion Meeting on Dispersion and Consequences of LNG Releases, 2016
- P. Cliver, M. Johnson, B. Ho, "A summary of some experimental data on LNG safety", Journal of Hazardous Material, 140, pp 429-438, 2007.
- D. W. Johnson and J.L. Woodward, "RELEASE: a model with data to predict aerosol rainout in accidental releases". Center for Chemical Process Safety of the AIChE. March 1998, ISBN 978-0-8169-0745-8.
- A. Luketa Hanlin, "A review of large-scale LNG spills: experiments and modelling", J. Hazard. Mater., 132, pp 119-140, 2006.
- A. J. Prince, "Details and Results of spill experiments of cryogenic liquids onto land and water", Joint HSE and UKAEA, SRD Report, HSE/SRD/PD058/WP4.
- A. M. Thyer, "Review of data on spreading and vaporisation of cryogenic liquid spills", J. Hazard. Mater., 99, pp 31-40, 2003.
- D.M. Webber, S.E. Gant, M.J. Irvings and S.F. Jagger, "LNG source term models for hazard analysis: a review of the state-of-the-art and an approach to model assessment", Health & Safety Laboratory, 2009.
- H. W. M. Witlock, M. Harper, Two-phase jet releases, droplet dispersion and rainout I. Overview and model validation, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 26, Issue 3, 2013, Pages 453-461.

# Les leviers d'action pour un mix énergétique propre et sûr au service de la transition énergétique dans les territoires

## AUTEURS



Florence CARRÉ<sup>1</sup>



Karine ADAM<sup>1</sup>



Olivier GENTILHOMME<sup>1,2</sup>

### Collaborateurs :

- Olivier Guillaume<sup>2</sup>
- Mathieu BRUGIDOU<sup>2</sup>
- Pauline GABILLET<sup>3</sup>
- Corinne GENDRON<sup>4</sup>
- Magali JAKUBOWICZ<sup>5</sup>
- Jean-Yves LEBER<sup>6</sup>
- Stéphane MOCANU<sup>7</sup>
- Isabelle MORETTI<sup>8</sup>
- Éric VIDALENC<sup>9</sup>
- Jacques VILLENEUVE<sup>10</sup>

### UN BESOIN DE COORDONNER LES NOMBREUX ACTEURS

Les acteurs de la transition énergétique sont nombreux : (a) l'État en tant que régulateur, financeur et coordinateur des stratégies régionales, (b) les régions cadrant la transition et développant des partenariats, (c) les municipalités et grandes agglomérations opérant la transition en connectant les acteurs et en investissant dans des démonstrateurs, (d) les entreprises, agences d'État, centres de formation et de recherche apportant des solutions techniques, financières, organisationnelles, (e) les citoyens, accélérateurs (consomm'acteurs) ou freins (réticents ou grands consommateurs d'énergie) à la transition. Ces acteurs ont leur propre cinétique de déploiement contrainte à différents agendas et priorités politiques (Figure 1), une coordination est nécessaire.

### LA NÉCESSITÉ DE DÉVELOPPER UNE CULTURE DU RISQUE

Les solutions techniques de production, de stockage et de distribution des énergies renouvelables peuvent induire des accidents ou impacts environnementaux et sanitaires, tels que des explosions et/ou des rejets de matières toxiques et inflammables, comme en témoignent, par exemple, les nombreux incidents liés aux batteries lithium-ion recensés dans les transports (FAA, 2021). Outre les risques liés aux atmosphères explosives et aux rejets de matière, la gestion des interconnexions entre systèmes de production et d'utilisation de l'énergie, comme les *smart grids*, doit tenir compte de leur vulnérabilité aux cyberattaques (ANSSI, 2012 ; Meraj *et al.*, 2015). Ces risques nouveaux appellent à la formation de l'ensemble des acteurs à leur gestion en contexte d'incertitudes. De plus, l'arrivée de nouveaux acteurs

(e.g. consomm'acteurs) nécessite de les sensibiliser aux risques potentiels des technologies plus classiques et aux mesures de sécurité correspondantes.

### UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE À MIEUX PENSER

La transition énergétique peut également s'inscrire dans une logique de (ré)utilisation de ressources locales pour produire de l'énergie. C'est le cas notamment de la méthanisation qui peut notamment être alimentée par des effluents et résidus agricoles pour produire non seulement du biogaz – source d'énergie renouvelable – mais également du digestat avec une valorisation agronomique (Figure 2). Ainsi, le produit de sortie d'un procédé est utilisé par un autre processus comme matière première. Ce modèle d'économie circulaire, appliqué à un territoire a pour vertu de limiter les flux de ressources et les émissions liées au

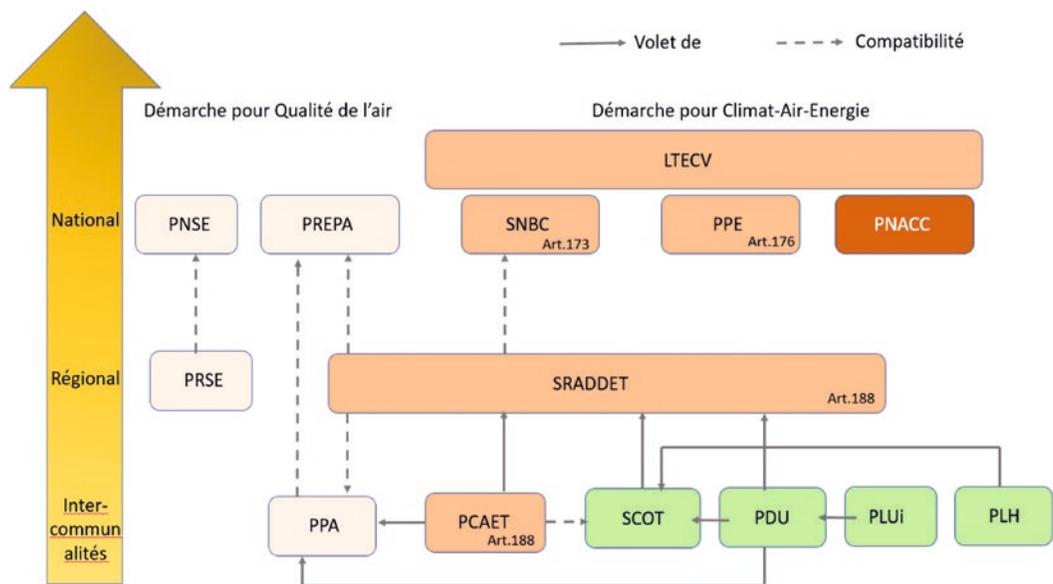


Figure 1 Les différents outils de planification de la transition énergétique (inspiré du schéma ADEME (s.d.)).

### Notes

- 1- Ineris
- 2- EDF
- 3- Métropole de Lyon
- 4- Université Québec à Montréal (UQAM)
- 5- Communauté d'agglomération du Beauvaisis
- 6- Écologie sans Frontière
- 7- INRIA
- 8- Université de Pau et des Pays de l'Adour
- 9- ADEME
- 10- Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)



**Figure 2**  
Circularité des procédés impliqués dans la transition énergétique (cas de la méthanisation).

transport de matières. À l'inverse, la circularité peut favoriser le transfert de polluants d'un processus à un autre. Il convient donc de bien identifier les sources de dangers le plus en amont possible.

Outre les risques à identifier, la rentabilité énergétique liée à l'extraction des matières premières hors du territoire, souvent énergivore du fait de matières de plus en plus rares, doit être intégrée dans le processus décisionnel (ANCRE, 2015). Le recyclage des matériaux est également une priorité pour éviter de nouvelles extractions. Dès lors, l'évaluation des risques doit aussi porter sur le niveau acceptable de pureté des matériaux permettant d'éviter des risques environnementaux, sanitaires, accidentels et sociétaux au niveau du territoire (KEMI, 2012).

**PERSPECTIVES:  
PROMOUVOIR UN CADRE  
COMMUN DE GESTION  
INTÉGRÉE ET INCLUSIVE  
DES RISQUES**

Comme évoqué précédemment, par les acteurs, par l'histoire et la géomorphologie paysagère qui le composent, chaque territoire est spécifique. Il n'existe donc pas de modèle unique d'une bonne transition énergétique, si ce n'est de raisonner la planification, à partir de l'intégration par l'ensemble des parties prenantes (et le plus en amont possible), des risques de plusieurs technologies au sein d'un même territoire et des aléas technologiques et environnementaux qui peuvent les impacter. Cette action serait facilitée par le développement d'un cadre commun de gestion intégrée et inclusive des risques. De plus, il convient de rappeler que la sobriété et l'efficacité énergétique constituent le premier levier d'actions de cette transition.

**ABSTRACT**

The French Law of 17 August 2015 on energy transition for green growth pushes the territories to reduce greenhouse gases and energy consumption and to develop renewable energies. In order to guarantee the security of the development of renewable energies, several levers of action have been identified with stakeholders during a consultation process. The first one represents the necessity to coordinate the numerous actors by taking into account their specific agenda and objectives. The second one is to develop a risk culture, particularly towards the newest consum'actors by raising awareness on potential risks related to renewable energies. The third one is to integrate the concept of circular economy and assess risks, energy performance and recyclability of materials as early as possible in the decision-making process. Because every territory is unique (people, geography, history), the associated risk and energy-efficiency management framework should be developed by including all the territory energy stakeholders. However, whatever the territory, this framework should emphasize the need to reduce energy consumption at the same level as to produce renewable energies.

**Références**

F. Carré, K. Adam, O. Gentilhomme, M. Brugidou, O. Guillaume, P. Gabillet, C. Gendron, M. Jakubowicz, J.Y. Leber, S. Mocanu, I. Moretti, E. Vidalenc, J. Villeneuve, Les leviers d'action pour un mix énergétique propre et sûr au service de la transition énergétique dans les territoires, Responsabilité & Environnement - Annales des mines, (2020) 98 : pp. 92-95.  
ADEME (s.d). Une diversité de démarches pour une diversité de territoires. ADEME, s.d. (consulté le 25 janvier 2020). Disponible sur: <https://www.territoires-climat.ademe.fr/ressource/30-9>  
ANCRE (2015), Ressources minérales et énergie, rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre, 75 p., [http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/ancre\\_rapport\\_2015-ressources\\_minerales\\_et\\_energie\\_0.pdf](http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/ancre_rapport_2015-ressources_minerales_et_energie_0.pdf)  
ANSSI (2012), Maîtriser la SSI pour les systèmes industriels, 40 p., [https://www.ssi.gouv.fr/uploads/IMG/pdf/Guide\\_securite\\_industrielle\\_Version\\_finale.pdf](https://www.ssi.gouv.fr/uploads/IMG/pdf/Guide_securite_industrielle_Version_finale.pdf)  
F.A.A. (2021, 23 septembre). Events with smoke, fire, extreme heat, explosion involving lithium batteries. Consulté à l'adresse: [https://www.faa.gov/hazmat/resources/lithium\\_batteries/media/Battery\\_incident\\_chart.pdf](https://www.faa.gov/hazmat/resources/lithium_batteries/media/Battery_incident_chart.pdf)  
KEMI (2012), Material Recycling without Hazardous Substances. Experiences and future outlook of ten manufacturers of consumer products. An interview study, rapport KEMI, 88 p., <https://www.kemi.se/global/pm/2012/pm-14-12-recycled-materials.pdf>  
T. Meraj, S. Sharmin, & A. Mahmud (2015). Studying the impacts of cyber-attack on smart grid. 2015 2<sup>nd</sup> International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT), 461-466. <https://doi.org/10.1109/EICT.2015.7391997>  
H. W.M. Witlox, M. Harper, Two-phase jet releases, droplet dispersion and rainout I. Overview and model validation, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 26, Issue 3, 2013, Pages 453-461.

# Étude de sécurité d'une station de distribution en hydrogène gazeux

## AUTEURS



Olivier  
GENTILHOMME



Lauris  
JOUBERT



Benno  
WEINBERGER



La France compte actuellement 73 stations pour le ravitaillement en hydrogène de véhicules routiers (voiture, bus, camion...) [1]. Ce dynamisme s'explique essentiellement par un contexte réglementaire devenu favorable à l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique (directive européenne 2014/94/CE sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs, loi de transition énergétique pour la croissance verte en 2015, décret relatif aux obligations d'achat ou d'utilisation de véhicules à faibles émissions de 2017, plan « Hulot » de déploiement de l'hydrogène en 2018...).

Toutefois, du fait de ses propriétés, l'hydrogène présente des risques bien spécifiques (gaz incolore et inodore, propension importante à fuir, large plage d'inflammabilité, faible énergie d'inflammation, flamme quasiment invisible sous certaines conditions, réactivité importante en

cas d'explosion...) et très différents de ceux auxquels est confronté de nos jours l'utilisateur d'une station-service conventionnelle. Compte tenu des nouveaux risques induits, l'Ineris a réalisé l'étude de sécurité d'une station de distribution d'hydrogène gazeux pour des véhicules routiers, dans le cadre d'un programme d'appui ministériel sur les énergies nouvelles.

Une telle station de distribution est constituée de bouteilles de stockage, de réservoirs tampons, de compresseurs, de tuyauteries, d'une ou plusieurs bornes de distribution voire d'électrolyseurs si la production d'hydrogène se fait *in situ*. Une perte d'étanchéité est possible sur chacun de ces équipements, se traduisant par une fuite puis, en cas d'inflammation, un feu torche, un feu de nuage (ou *flash fire*) et/ou une explosion d'hydrogène. L'accident survenu en 2019 sur la station d'Uno-X Hydrogen en Norvège

en est un parfait exemple. De façon intéressante, Sakamoto et al. [2] ont comparé les incidents et accidents survenus dans des stations-service d'hydrogène au Japon (entre 2005 et 2014) et aux États-Unis (entre 2004 et 2014). Au total, 21 événements ont été recensés au Japon et 22 aux États-Unis. Lorsque l'information est disponible, il apparaît que ces fuites surviennent principalement au niveau de la borne de distribution (15 cas), du compresseur d'hydrogène (7 cas) et du stockage d'hydrogène gazeux (6 cas). Concernant les causes de ces fuites, le même article mentionne un joint inadéquat (10 cas), un couple de serrage insuffisant (9 cas), une erreur de conception (9 cas)... Toutes les capacités de stockage de la station (bouteille, réservoir tampon, séparateur de l'électrolyseur...) peuvent aussi être sujettes à un éclatement en cas d'agression mécanique et/ou thermique, voire d'une explosion interne si la formation accidentelle

## ABSTRACT

As more and more gaseous hydrogen refuelling stations are currently being run, built and/or planned in France, and given the specific properties of hydrogen in relation to safety, Ineris decided to carry out safety study of this infrastructure.

These refuelling stations are usually composed of storage cylinders, compressors, pipes, one or several dispenser(s) but also, if hydrogen is produced directly on site, electrolyzers.

A confinement loss can occur on any of this equipment hence resulting in a leak that can generate in turn, if ignited, a jet fire, a flash fire and/or an explosion. Bursting can also occur in case of a mechanical / thermal aggression and/or an internal explosion due to the formation of an explosive atmosphere.

With this safety study, Ineris identified as exhaustively as possible the hazardous situations that can arise in hydrogen refuelling stations and, for each situation, evaluated the consequences and the occurrence probability. This study also listed some good practice rules and safety barriers that may help in mitigating the risks associated with such hazardous situations. This work is useful for any projet holder or any operator of such station who wants to control and prevent risks.

d'un mélange inflammable constitué d'hydrogène et d'air est possible à l'intérieur.

Dans l'étude de sécurité conduite par l'Ineris, les situations accidentelles pouvant survenir sur une station de distribution sont listées de façon la plus exhaustive possible et, pour chacune d'elles, sont évaluées non seulement les conséquences des phénomènes dangereux ainsi générés mais aussi leur fréquence d'occurrence. Il faut préciser que, compte tenu du retour d'expérience relativement pauvre pour ce type d'infrastructure, il est encore difficile d'évaluer de façon pertinente la fréquence d'occurrence d'une fuite ou d'une explosion survenant sur une station de distribution d'hydrogène gazeux. Dès lors, l'Ineris s'est appuyé sur les bases de données génériques du RIVM [3] et de l'OREDA [4] tout en étant conscient que ces sources de données ne sont spécifiques, ni à l'hydrogène, ni aux technologies d'équipements pouvant être présents sur une telle station.

Pour aller plus loin, l'Ineris a aussi identifié les règles de bonnes pratiques et les barrières de sécurité permettant d'atténuer les conséquences d'une situation accidentelle donnée et/ou d'en limiter la fréquence d'occurrence. Cette identification s'est appuyée sur une précédente étude Ineris [5], des publications scientifiques, des textes réglementaires et normatifs en vigueur ([6], [7]...). Pour chaque situation accidentelle, le lecteur dispose donc d'une liste de barrières potentiellement valorisables

et d'une évaluation de leur impact sur la fréquence d'occurrence de la situation considérée. Nul doute que toutes ces informations présentent un réel intérêt pour le porteur d'un projet de station de distribution en hydrogène gazeux et/ou pour son exploitant, afin d'identifier le bon nombre et les « justes » barrières permettant de maîtriser le niveau de risque de son installation.

À noter que l'Ineris continue de travailler dans ce domaine notamment à travers sa participation dans le projet de recherche européen MultHyFuel [8]. Ce projet vient tout juste de démarrer et vise à définir des règles d'implantation de la borne de distribution en hydrogène gazeux au sein d'une station conventionnelle afin d'en limiter les risques.

### Références

- [1] <https://vighy.france-hydrogene.org/cartographie-des-projets-et-stations/>
- [2] J. Sakamoto, R. Sato, J. Nakayama, N. Kasai, T. Shibutani et A. Miyabe, « Leakage-type-based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA », Int. Journal of Hydrogen Energy, pp. 21564 – 21570, 2016.
- [3] RIVM, « Reference Manual Bevi Risk Assessments – version 3.1 », Introduction of Modules A, B et C, 2009.
- [4] OREDA, « Offshore and Onshore Reliability Data », 6<sup>th</sup> Edition, 2015.
- [5] Ineris, « Benchmark Station-service hydrogène », DRA-14-141532-06227C, 2014.
- [6] Verband der TÜV, « Compressed gases 514: requirements for hydrogen fueling station », MB DRGA 514, 2010.
- [7] N. Grasso, N. Cianelli, F. Pilo, M. Carcassi et F. Ceccherini, « Fire Prevention Technical Rule for Gaseous Hydrogen Refuelling Station », International Conference on Hydrogen Safety, 2005.
- [8] <https://multhyfuel.eu/>  
O. Gentilhomme, L. Joubert, B. Weinberger, Étude de sécurité d'une station de distribution d'hydrogène gazeux, Actes du 22ème Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, (2020) pp. 45-50.

# Comprendre l'emballement thermique des batteries lithium-ion riches en nickel

AUTEURS



Amandine LECOQ<sup>2</sup>



Guy MARLAIR<sup>2</sup>

Collaborateurs :

Thi Thu Dieu NGUYEN<sup>1,2,3</sup>

Sara ABADA<sup>1</sup>

Julien BERNARD<sup>1</sup>

Martin PETIT<sup>1</sup>

Sylvie GRUGEON<sup>3,4</sup>

Stéphane LARUELLE<sup>3,4</sup>

INTRODUCTION

Depuis la commercialisation des premières batteries Li-ion par Sony Inc. en 1991, des incidents récurrents d'emballement thermique ont été signalés dans le monde entier, toutes applications et capacités de stockage confondues [1]. Ces incidents rappellent que la sécurité est un prérequis pour ces batteries, quel que soit le niveau d'innovation. Comprendre les causes et le processus d'emballement thermique des batteries Li-ion, en anticipant les évolutions technologiques dictées par le marché, est essentiel pour guider la conception de nouveaux matériaux fonctionnels et améliorer leur sécurité et leur fiabilité. La sécurité des batteries devient encore plus critique avec l'apparition sur le marché de batteries Li-ion enrichies en nickel, commercialisées pour répondre aux nouvelles applications exigeantes, en énergie et en puissance. L'utilisation future, sûre et durable de ces chimies innovantes nécessite, à un stade précoce, une caractérisation complète des propriétés ayant un impact sur leur profil de sécurité.

OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIES

En s'inspirant des travaux d'Abada et al [2-4] et de Panchal et al [5-7], l'Ineris a mené des travaux de recherche visant à approfondir la compréhension du phénomène multiphysique complexe d'emballement thermique à l'échelle de la cellule, en tenant compte notamment de l'interaction entre le niveau charge (SOC) et les propriétés clés des technologies riches en nickel. La méthodologie expérimentale portait à la fois sur une caractérisation électrique et physico-chimique de la cellule et des composants (obtention d'informations sur la structure interne de la cellule et sur la morphologie et la géométrie des électrodes et séparateurs) et sur des tests abusifs thermiques en conditions pseudo-adiabatiques. Le phénomène d'emballement thermique a été réalisé et étudié à l'aide d'un calorimètre (HEL BTC 500) en appliquant un programme de type « Heat-Wait-Search » (HWS). Deux technologies de cellules riches en nickel ont été sélectionnées : LG HG2 et Panasonic GA basés sur des technologies Lithium-Nickel-Manganèse-Cobalt (NMC811) et Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium (NCA), respectivement,

comme matériaux actifs de l'électrode positive, et sur les technologies composites Graphite-SiOx comme matériaux actifs de la négative.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La Figure 1 montre que l'auto-échauffement initial significatif de la cellule LG a été détecté à une température inférieure (T1 ~90°C) à celui de la cellule Panasonic (T1 ~122°C). Cela démontre que la région sûre (phase ①) de Panasonic (NCA) est plus large que celle de LG (NMC811). La température d'auto-échauffement de la cellule continue d'augmenter tout au long de la phase ②. Le processus endothermique de fusion du séparateur a été observé à une plage de température similaire pour les technologies sélectionnées (T2~117°C pour LG et ~122°C pour Panasonic) lié à une composition similaire du séparateur (double couche polymère et céramique). La phase ③ correspond au processus d'accumulation de chaleur et de dégagement de gaz où le taux d'auto-échauffement de ces technologies riches en Ni augmente fortement. L'ouverture de l'événement a été observée à ~165°C pour LG et à ~171°C pour Panasonic. L'emballement thermique final de Panasonic s'est produit à une

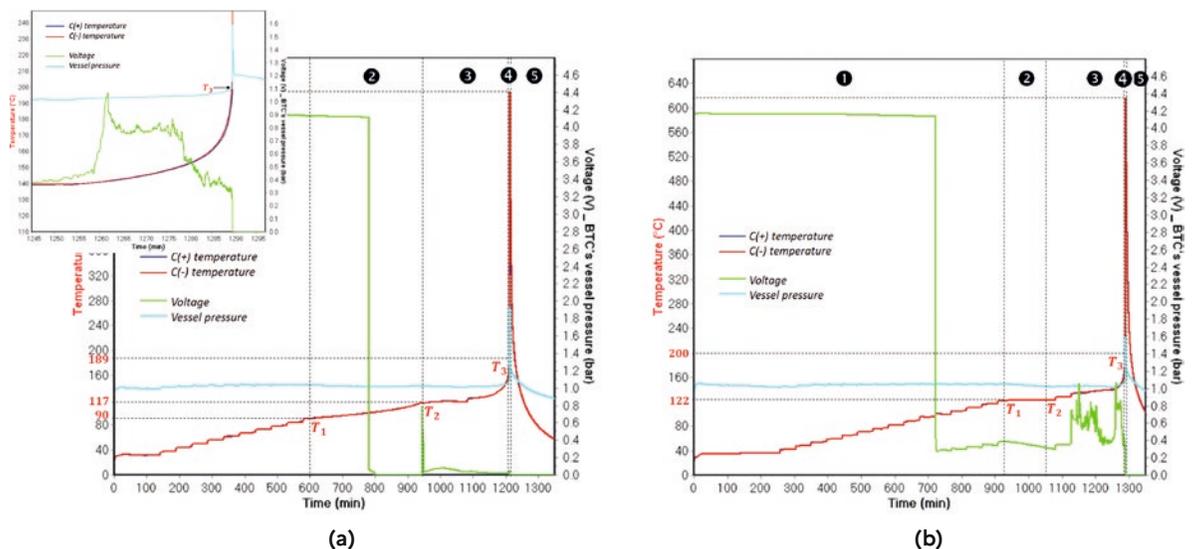


Figure 1 Identification des 5 phases lors des tests d'emballement thermique HWS sur LG HG2 100% SOC (a) et Panasonic NCR GA 100% SOC (b).

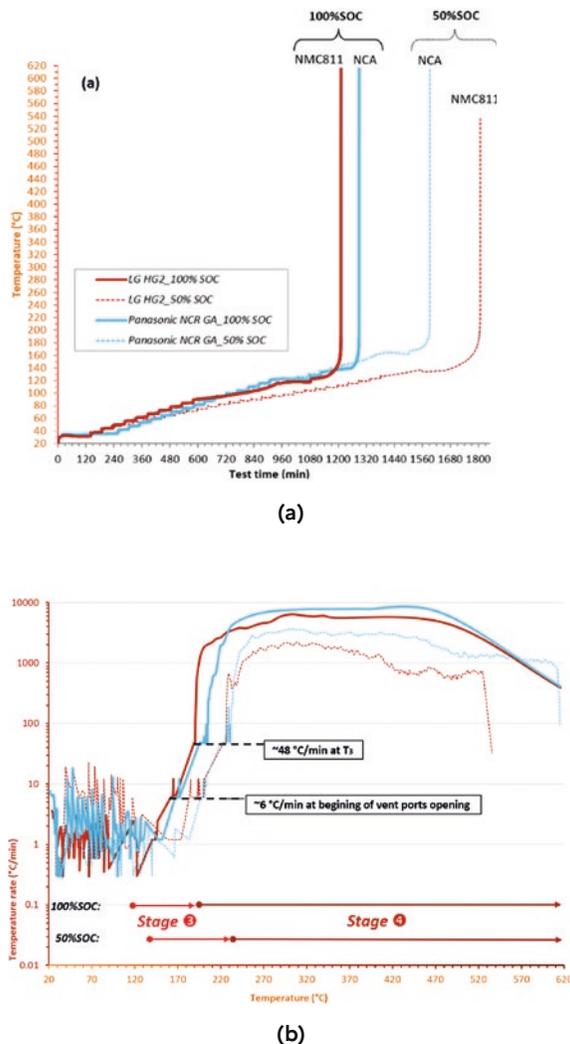
Notes

- 1- IFP Énergies nouvelles
- 2- Ineris
- 3- Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides, CNRS UMR 7314, Université de Picardie Jules Verne
- 4- Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Énergie, CNRS RS2E FR3459

température plus élevée (~205°C) que LG (~190°C). La gravité de l'emballement thermique s'accroît au cours de la phase ④, ce qui conduit à une température supérieure à 600 °C à une émission de fumées et à l'éjection des composants de la cellule. L'impact de l'état de charge (SOC) sur l'emballement thermique est observé de manière significative dans la **Figure 2**. Quelle que soit la technologie (NCA ou NMC811), un niveau de SOC plus faible déplace l'auto-échauffement initial ainsi que l'activation des phases ③ et ④ vers des températures plus élevées. L'emballement thermique final des cellules à 50 % SOC se produit à des températures plus élevées avec une vitesse de montée en température plus faible et sur une durée plus courte. Par conséquent, les cellules à 50 % SOC sont moins réactives. L'impact de la chimie a également été démontré puisque la vitesse de montée en température pendant la phase ④ de la technologie NCA atteint une valeur plus élevée avec une durée plus longue que le SOC soit de 100 % ou de 50 %. La technologie NCA semble ainsi être plus réactive pendant la phase finale de l'emballement thermique que la technologie NMC811.

## CONCLUSION

Les tests abusifs en conditions pseudo-adiabatiques ont permis d'identifier les réactions en chaîne exothermiques d'emballement thermique sur deux technologies de cellules 18650 riches en nickel et d'étudier l'impact de différents facteurs sur la cinétique d'emballement thermique, tels que le matériau de l'électrode positive, la technologie du séparateur et le niveau de SOC [8]. Ces résultats ont également permis de calibrer un modèle 3D consolidé d'emballement thermique afin de prédire les comportements de ces cellules, à l'état neuf et vieilli.



**Figure 2**

(a) Profils de température en fonction du temps et (b) montée en température en fonction de la température des cellules LG (NMC811) et Panasonic (NCA) à 50 et 100 % SOC.

## ABSTRACT

Safety management of Lithium-ion battery (LIB) is essential. The main safety issue pertaining to operating LIBs is relating to its sensitivity to thermal runaway. This research aims to go deeper into the understanding of this complex multiphysics phenomenon at cell scale, taking into account the intertwined impact of state of charge (SOC) and the relating properties of highly reactive Ni-rich technologies such as those combining Lithium nickel manganese cobalt oxide  $\text{Li}_{1-x}(\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1})_{1-x}\text{O}_2$  (NMC811) or Lithium nickel cobalt aluminum oxide  $\text{Li}_{1-x}(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05})_{1-x}\text{O}_2$  (NCA) positive electrodes with Graphite-SiO<sub>x</sub> as composite negative electrode, and further study the thermal propagation of cell core & safety features. The results have confirmed the proposed complete thermal runaway exothermic cascading reactions for high energy Ni-rich LIBs, and showed the different factors impacting the thermal runaway kinetics. It also revealed the relationship between safety features and state of charge (SOC). The experimental results were further used to calibrate & validate the 3D extended Thermal runaway model.

## Références

- [1] FAA Office of Security and Hazardous Materials Safety. *Aviation Cargo and Passenger Baggage Events Involving Smoke, Fire, Extreme Heat or Explosion Involving Lithium Batteries or Unknown Battery Types*, 2017 (accessed on 7 January 2019).
- [2] S. Abada; M. Petit; A. Lecocq; G. Marlair; V. Sauvante-Moynot; F. Huet, Combined experimental and modeling approaches of the thermal runaway of fresh and aged lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 2018, 399, 264–273, doi:10.1016/j.jpowsour.2018.07.094.
- [3] S. Abada; G. Marlair; A. Lecocq; M. Petit; V. Sauvante-Moynot; F. Huet, Safety focused modeling of lithium-ion batteries: a review. *Journal of Power Sources* 2016, 306, 178–192, doi:10.1016/j.jpowsour.2015.11.100.
- [4] Li-Battery Safety. *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications*; Elsevier, 2019.
- [5] S. Panchal; I. Dincer; M. Agelin-Chaab; R. Fraser; M. Fowler, Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions. *Applied Thermal Engineering* 2016, 96, 190–199, doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.11.019.
- [6] S. Panchal; M. Mathew; R. Fraser; M. Fowler, Electrochemical thermal modeling and experimental measurements of 18650 cylindrical lithium-ion battery during discharge cycle for an EV. *Applied Thermal Engineering* 2018, 135, 123–132, doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.02.046.
- [7] S. Panchal; M. Haji Akhondzadeh; K. Raahemifar; M. Fowler; R. Fraser, Heat and mass transfer modeling and investigation of multiple LiFePO<sub>4</sub>/graphite batteries in a pack at low C-rates with water-cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019, 135, 368–377, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.076.
- [8] T.T.D. Nguyen; S. Abada; A. Lecocq; J. Bernard; M. Petit; G. Marlair; S. Grugeon; S. Laruelle, Understanding and modeling the Thermal Runaway of Lithium-ion Batteries. *32<sup>nd</sup> Electric Vehicle Symposium (EVS32)* Lyon, France, May 19 - 22, 2019.

# Les concentrations de retardateurs de flamme bromés dans les plastiques: revue de leur présence et de leur gestion

AUTEUR



Pierre HENNEBERT

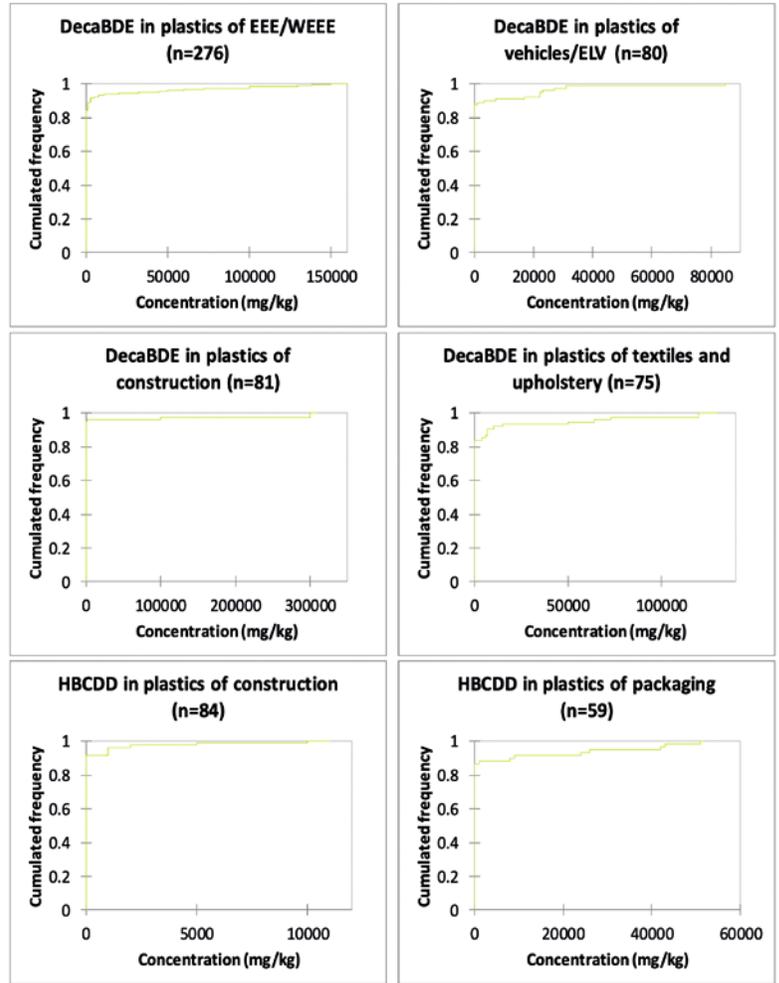
Collaboratrice:

Pauline MOLINA

L'Ineris a mené une synthèse de 4000 données de la littérature sur les retardateurs de flamme bromés (RFB) dans les plastiques non alimentaires. Le tri de tous ces plastiques (20 Mt/an) est nécessaire pour éliminer les polluants organiques persistants (POP) dans les processus de recyclage et d'économie circulaire. L'utilisation de plastiques en Europe (50 millions de tonnes par an) se répartit comme suit: 39,7 % pour les emballages (alimentaires et non alimentaires), 19,8 % pour le bâtiment et la construction, 16,7 % pour les équipements médicaux, les meubles en plastique et les équipements d'ameublement, les pièces techniques utilisées pour la construction mécanique ou la construction de machines, 10,1 % pour l'automobile, 6,2 % pour les équipements électriques et électroniques, 4,1 % pour le ménage, les loisirs et le sport, le reste étant utilisé dans l'agriculture (3,4 %) (PlasticsEurope 2018). Les plastiques et les mousses représentent aujourd'hui environ 150 kg dans les voitures modernes, dont 16 % pourraient être des substances bromées. Ils sont protégés contre le feu avec, entre autres, des retardateurs de flamme bromés (RFB), certains d'entre eux étant désormais classés comme polluants organiques persistants (POP). La stratégie de l'Union européenne sur les plastiques dans une économie circulaire stipule que les plastiques contenant des RFB réglementés doivent être triés et gérés séparément de la fraction non bromée, afin d'éviter la dispersion incontrôlée de substances réglementées dans les matières premières recyclées.

## LES MÉTHODES D'ANALYSE

La revue a porté sur les méthodes d'analyse et montre que les données de la littérature font état d'une extraction manifestement insuffisante de ces substances problématiques. Ainsi, il apparaît que la concentration des RFB dans les particules/parties de plastique a une distribution asymétrique (Figure 1



**Figure 1** Distribution des concentrations de décaBDE dans les plastiques des équipements électriques et électroniques (EEE) des véhicules, de la construction et des textiles, et du HBCDD dans la mousse de polystyrène expansé des emballages non alimentaires à partir des données de la littérature (fréquence des données par classe de concentration de 1000 mg/kg).

pour le décabromodiphényléther, ou décaBDE), avec de nombreuses particules/parties avec une concentration nulle ou faible, et un petit nombre de particules/parties avec des concentrations élevées dispersées. Les concentrations médianes sont très inférieures aux concentrations moyennes et plutôt faibles alors que les concentrations moyennes sont supérieures aux limites réglementaires relatives à la présence de RFB dans les produits et les déchets. Cette

distribution spécifique nécessite un échantillonnage particulier pour disposer de résultats représentatifs.

## LES RÉSULTATS

Les données publiées sont donc hétérogènes et des solutions pour construire une distribution sont proposées. Les concentrations en retardateurs de flammes bromés (RFB) rapportées sont présentées en détail par utilisation, par substance et par

Percentage of data with concentration lower than potential concentration limits (mg/kg)

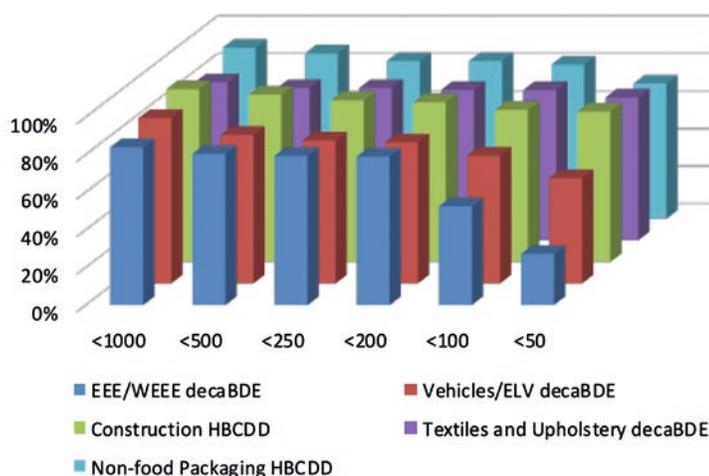


Figure 2

Évaluation d'impact de la révision des limites de concentration pour certains POP (décaBDE et HBCDD) (Vencowski et al. 2020).

référence. L'étude montre qu'environ 16 %, 12 %, 8 %, 16 % et 9 % des concentrations observées dans des plastiques provenant d'EEE/DEEE (équipements électriques et électroniques, et déchets de -), de véhicules/VHU (véhicules hors d'usage), de matériaux de construction, d'équipements textiles et d'emballages non alimentaires pourraient être supérieures à 1000 mg/kg de RFB réglementés. La « mauvaise » nouvelle est donc que, globalement, le tri des teneurs en brome pour ces catégories de plastiques (hors emballages alimentaires) bien que nécessaire, n'est pas complètement appliqué aujourd'hui. La bonne nouvelle est que la littérature montre que ce tri, quand il est appliqué, est efficace : les données sont rares mais les plastiques VHU triés ont une concentration moyenne en décaBDE de 14 mg/kg. L'efficacité du tri a été confirmée en France avec les plastiques DEEE en 2014 et 2015 (Hennebert et Filella 2017). La quantité à trier pourrait atteindre 40 % de la quantité de plastiques utilisés dans l'UE, soit 20 millions de tonnes par an. La quantité qui ne peut pas être

recyclée dans les plastiques est de quelques pourcents de cette masse. Il faut souligner que les échantillons de plastiques de construction et de textiles et d'ameublement d'Europe continentale ont des concentrations faibles à très faibles. Les options de gestion pour le tri et la réutilisation comme combustible solide de récupération ont été investiguées. Ces plastiques bromés ne peuvent pas être mis en décharge. Le recyclage chimique par craquage ou solvolysé est jusqu'à présent entravé par la séparation incomplète des composés bromés des matières premières chimiques utiles non bromées. La recherche en technologie de récupération d'énergie, de brome et d'antimoine est active et prometteuse à l'échelle pilote.

Le travail mené par l'Ineris a contribué à l'élaboration d'un rapport technique pour la direction générale de l'environnement de la Commission européenne sur l'évaluation des concentrations de POP dans les plastiques recyclés (Vencowski et al. 2020). La Figure 2 est extraite de cette synthèse.

## ABSTRACT

Ineris has carried out a synthesis of 4000 published data from 37 references of brominated flame retardants (BFRs) concentrations, in plastics of electrical and electronic equipment, vehicles, construction products, textiles and non-food packaging. Such substances are persistent organic pollutants (POP) which are regulated by limit values. For POP decabromodiphenylether, a median concentration of 50 mg/kg in plastics of electrical and electronic equipment (n=276), is reported, as well as 31 mg/kg in plastics of vehicles (n=80), 0 mg/kg in plastics of construction (n=81), and 0 mg/kg in plastics of textiles equipment and upholstery (n=75). The mean concentrations are 5200, 3100, 8700 and 6500 mg/kg, respectively. In non-food packaging (expanded or extruded polystyrene), hexabromocyclododecane is present in some samples. All these plastics always have at least some samples with one BFR with a mean concentration above the EU regulatory concentration limit for substances, products or hazardous waste. The distribution of all reported concentrations of PBDEs is skewed, with for instance, in plastics of vehicles, 84% of the data lower than 1000 mg decaBDE/kg, and some large values up to 150 000 mg/kg. The sorting and the up-to-date management technologies are for these categories of plastics (estimated to be 40% of the plastic use in the EU, the brominated fraction of them being a few percent) necessary to weed out banned substances in

## Références

- P. Hennebert, Concentrations of brominated flame retardants in plastics of electrical and electronic equipment, vehicles, construction, textiles and non-food packaging : a review of occurrence and management, Detritus, (2020) 12 : pp. 34-50.  
 P. Hennebert, M. Filella (2017). WEEE plastic sorting for bromine essential to enforce EU regulation. Waste Management, 71, January 2018, 390-399.  
 PlasticsEurope 2018. Plastics - the Facts 2018 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. 60 p. [https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/plastics\\_the\\_facts\\_2018\\_afweb](https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/plastics_the_facts_2018_afweb)  
 D. Vencovsky, S. Garrett, J. Vencovska, I. Shapland, M. La Vadrine, F. Ciatti, S. White, Webb S (RPA Ltd), Postle M (RPA Europe), Hennebert P, Bisson M, Biaudet H, F. Lestremereau (Ineris), L. Cavalieri (independent consultant), S. Mudgal (Bio Innovation Service). 2020. Study to support the assessment of impacts associated with the review of limit values in waste for POPs listed in annexes IV and V of Regulation (EU) 2019/1021. Report for the Directorate General Environment of the European Union. December 2020. Final Report. 427 p.





# COMPRENDRE ET MAÎTRISER LES RISQUES À L'ÉCHELLE D'UN SITE INDUSTRIEL ET D'UN TERRITOIRE

Afin de mieux comprendre et maîtriser les risques à l'échelle d'un site industriel ou d'un territoire, l'Ineris réalise des travaux de recherche en appui aux pouvoirs publics et aux industriels. Ces derniers permettent d'apporter des réponses très concrètes sur le terrain pour une compréhension des phénomènes dangereux et une amélioration de la maîtrise des risques. À titre d'exemple, l'Ineris a réalisé en 2020 des expérimentations visant à mieux caractériser les débits d'évaporation des nappes de liquides dangereux. L'objectif est de disposer d'éléments d'évaluation pour un environnement maîtrisé.

- 28 Entretien avec Benjamin Truchot
- 29 Entretien avec Hélène Partaix et Marie Dellise
- 30 Penser les transformations des organisations et leurs implications pour la sécurité
- 32 Évaporation de nappes de liquides dangereux: mieux prédire pour mieux anticiper
- 34 Mesurer la turbulence de fuites massives de gaz
- 36 Modélisation hydromécanique tridimensionnelle de l'érosion interne d'une digue sur fondation
- 38 Quantification de la cinétique de dissolution de gypses naturels: cas de faciès de l'Éocène dans la banlieue nord-est de Paris
- 40 Évaluer l'exposition de la population française à des mélanges de pyréthrinoïdes à partir de données de biosurveillance et son risque associé
- 42 Application du *machine learning* à la surveillance microsismique d'opérations industrielles du sous-sol

## ENTRETIEN AVEC



**Benjamin TRUCHOT**

Chargé de mission : Approche intégrée  
de l'observation à la simulation  
Direction Incendie, dispersion, explosion

*« L'une des forces de l'Ineris est de pouvoir réaliser, de front, des activités de recherche, d'appui aux pouvoirs publics et d'appui aux industriels. »*

**L'Ineris mène une activité se basant sur la modélisation et l'expérimentation. Sur quels outils et quelles compétences s'appuie-t-il ? Pouvez-vous nous parler de votre nouveau poste ?**

Mon poste s'inscrit à la croisée des chemins entre ces deux activités, essais et modélisations, qui sont les piliers des travaux réalisés au sein de la direction Incendie, dispersion, explosion. Nous utilisons de nombreuses approches de modélisation, depuis les corrélations les plus simples jusqu'aux outils de modélisation 3D, et l'articulation avec les expérimentations est un atout important. Cela permet, dans un sens, la validation continue de nos outils numériques et, dans l'autre sens, le dimensionnement des essais, notamment le choix de la métrologie ou le choix de campagnes expérimentales pertinentes pour faire avancer les connaissances scientifiques. L'un des objectifs de mon poste est d'améliorer encore les interconnexions entre ces deux activités et d'accompagner les innovations dans ces deux domaines.

**Comment les incendies de Notre-Dame de Paris puis des sites de Lubrizol et Normandie Logistique à Rouen, en 2019, ont-ils impacté votre activité et de quelle manière les équipes se sont-elles mobilisées face à ces catastrophes ?**

L'année 2019 a effectivement été marquée par ces deux catastrophes majeures pour lesquelles les équipes de l'Ineris ont été fortement mobilisées. Pour chacune d'elles, l'Institut a été rapidement sollicité via la CASU, notre cellule d'appui aux situations d'urgence. Après la phase d'urgence, les équipes ont été sollicitées pour plusieurs

sujets dont, plus particulièrement, l'appui au ministère dans l'évolution des réglementations associées au stockage de produits combustibles. Comme dans beaucoup de nos interventions, nous avons su mobiliser à la fois nos outils de simulation, nos données et installations expérimentales pour répondre aux besoins découlant de ces sinistres. Cela a par exemple conduit au développement d'une méthodologie pour mieux évaluer l'impact environnemental des incendies.

**La recherche appliquée à l'Ineris vise une application sur le terrain. Quels parallèles pouvez-vous faire avec vos propres travaux ?**

L'une des forces de l'Ineris est de pouvoir réaliser, de front, des activités de recherche, d'appui aux pouvoirs publics et d'appui aux industriels. Ces trois types d'activités s'interfont en effet parfaitement et permettent de mettre en œuvre des opérations relevant de la recherche pour des réponses très concrètes sur le terrain. Au cours de l'année passée, nous avons par exemple réalisé, en partenariat avec EDF, une opération de recherche sur l'évaporation des nappes de liquides toxiques (voir pp. 32-33). En s'appuyant sur des expérimentations fines, nous avons développé un outil permettant d'évaluer les conséquences sur le terrain. Cet outil permet en effet une amélioration significative des distances d'effet calculées autour des sites industriels. Ce travail a donné lieu à une publication commune avec EDF.

## ENTRETIEN AVEC



**Hélène PARTAIX**

Ingénieure – Responsable d'affaires  
Unité Technologies propres  
et économie circulaire  
Direction Sites et territoires



**Marie DELLISE**

Chargée de mission Mines, carrières et ICPE  
de première transformation  
Direction générale de la prévention des risques,  
ministère de la Transition écologique  
Ancienne doctorante à l'Ineris

### **Marie, vous avez soutenu une thèse en 2020, à l'Ineris, quel en était le thème et quels furent les résultats de vos recherches ?**

La thèse portait sur la problématique de comparaison des performances d'installations soumises à la Directive sur les émissions industrielles (IED) à celles des Meilleures techniques disponibles (MTD) en cas d'absence de référentiel établi au niveau européen. Pour y répondre, une méthode a été élaborée sur la base des éléments existants à disposition des exploitants, de retours d'expérience et de deux études de cas. Elle se compose de deux grandes phases répondant aux questions de recherche suivantes :

- Pour quels enjeux environnementaux un opérateur doit-il démontrer la mise en œuvre des MTD à l'échelle locale dans les cas où le travail de détermination des MTD n'a pas été réalisé au niveau européen ?
- Comment démontrer que les MTD sont bien mises en œuvre en l'absence d'élément de comparaison ?

### **Hélène, comment peut-on définir le rôle de l'Ineris en ce qui concerne les MTD ? Quels sont les temps forts sur ce sujet ?**

Depuis 2007, l'Ineris assiste le ministère de la Transition écologique pour la mise en œuvre de la directive « IED »<sup>1</sup>. L'axe majeur de l'appui consiste à contribuer activement à des groupes de travail réunissant États membres et industriels, sur lesquels la Commission s'appuie pour élaborer les documents BREF<sup>2</sup> qui contiennent les MTD pour un secteur donné. Dans ce cadre, nous apportons une expertise

technique relative à la connaissance des procédés, du secteur et des émissions (en lien avec diverses entités de l'Ineris) et nous participons à l'élaboration des « positions françaises » qui seront défendues lors des négociations européennes. En 2020, nous avons été concernés, à des degrés d'implication divers, par la révision de 6 BREF et la révision de la Directive IED, attendue en 2022, nous mobilise également.

### **Hélène, comment la thèse s'inscrit-elle dans les travaux d'appui de l'Ineris et Marie, comment vous inspirez-vous de ses résultats au sein de vos missions à la DGPR<sup>3</sup> aujourd'hui ?**

**HP:** L'appui englobe également des réflexions plus globales, notamment sur les nouveaux enjeux qui pourraient entrer dans l'IED lors de sa révision en 2022 tels que la décarbonation et l'amélioration de l'interface avec le règlement européen sur les produits chimiques Reach. Le sujet de thèse de Marie s'inscrit quant à lui en aval de l'adoption des BREF et répond à des besoins transverses de développements méthodologiques pour améliorer leur mise en œuvre auprès des industriels et de l'administration.

**MD:** En marge de la méthode, la thèse a soulevé différents points de vigilance au niveau de la révision des BREF, à laquelle je participe aujourd'hui. L'exhaustivité des enjeux environnementaux investigués, l'efficacité de la collecte de données, la transparence et la coopération entre les acteurs du processus sont essentielles pour aboutir à des conclusions robustes et prévenir l'absence de référentiel.

#### Notes

1- Directive n°2010/75/UE du 24/11/10 relative aux émissions industrielles (IED). 2- Best available techniques reference documents. 3- Direction générale de la Prévention des risques (DGPR)

# Penser les transformations des organisations et leurs implications pour la sécurité

AUTEUR



Jean-Christophe LE COZE

Quand on pense aux risques, la première chose qui vient à l'esprit est la technologie. Nous savons qu'avec les centrales nucléaires, les trains et les avions, il y a des risques d'explosions, de déraillements et de crashes. Cette réflexion est évidemment centrale aujourd'hui dans une société du risque et un monde de transition digitale, écologique et industrielle... Mais au cours des dernières décennies, la recherche et la pratique nous ont également sensibilisés à la possibilité d'accidents dits « organisationnels » ou « sociotechniques », à savoir cette idée importante que la sécurité réside aussi dans la capacité des technologies, des individus, des organisations et des institutions dans leurs interactions à créer les conditions favorables, ou non, à des performances en sécurité [1]. Ce problème s'est accru dans notre monde globalisé et interconnecté. En effet, au-delà de la technologie, un risque est aussi de ne pas décrire, comprendre, anticiper puis gérer les conséquences en matière de pratiques sécurité des nouvelles configurations sociotechniques,

créées par la globalisation. La Covid-19, dans sa dimension planétaire, en est bien entendu l'illustration la plus récente. La vague de globalisation contemporaine que nous connaissons a été entraînée par une combinaison de la libéralisation du commerce et de la finance, de la privatisation et de la dérégulation mais aussi de deux révolutions technologiques, l'une de l'information et de la communication (les TIC), l'autre des transports (maritime, aviation) au cours des années 1990 jusqu'à aujourd'hui [2-4]. Comment étudier, penser et évaluer la sécurité dans ce contexte en adaptant les modèles d'évaluation sociotechniques dont nous disposons jusqu'à aujourd'hui?

## GLOBALISATION : QUELLES IMPLICATIONS POUR LA SÉCURITÉ ?

Une proposition consiste à prendre en compte les tendances qui ont affecté les organisations ces dernières années [5]. Ces tendances sont à la fois des moteurs et des produits de la globalisation, et ont remodelé et continuent à remodeler

actuellement les conditions d'exploitation des systèmes à risque. Celles-ci sont la digitalisation, l'externalisation, la standardisation, la financiarisation et l'autorégulation (Figure 1). Il n'est pas besoin d'entrer dans le détail de ces tendances pour comprendre à partir de ce schéma, d'une part que ces transformations sont reliées dans un mouvement de fond et d'autre part, que leurs effets sur les entreprises nécessitent d'être pris en compte. Comme l'écrit Nick Pidgeon « il semble peu probable que les pratiques de sécurité industrielle puissent rester complètement isolées de ces évolutions globales majeures. Cela définit à son tour un programme de recherche pour comprendre pleinement les manières dont la sécurité est effectivement affectée, et un défi immédiat afin d'y répondre avec de nouvelles approches et méthodes de gouvernance des risques » [6]. Le cas de BP, au début du XXI<sup>e</sup> siècle est emblématique de telles transformations d'une multinationale dont la stratégie financiarisée de fusion-acquisition a poussé à l'excès son modèle décentralisé et externalisé en réseau, au détriment de la

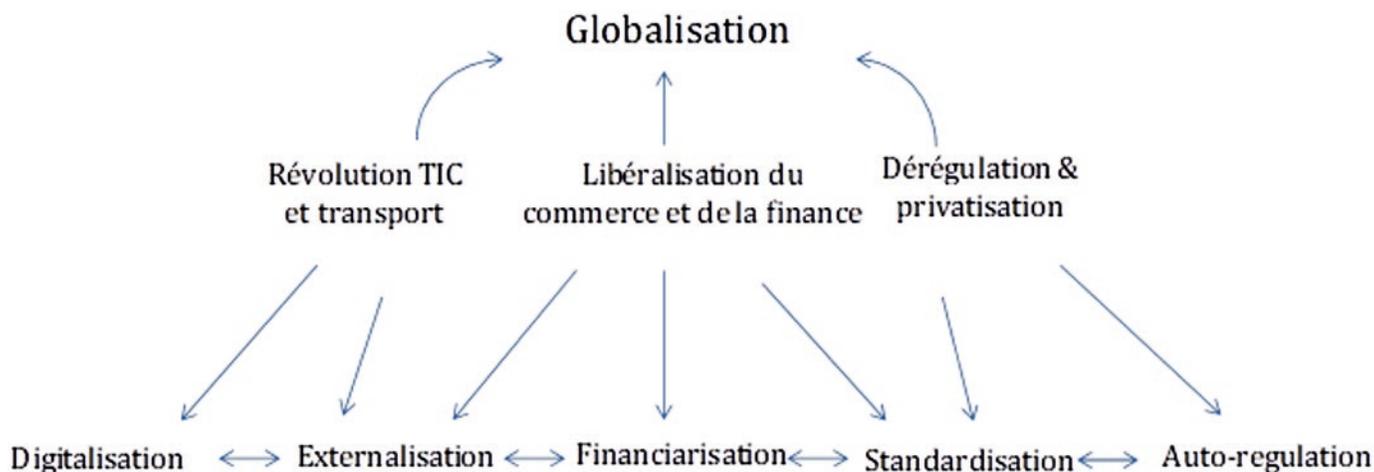


Figure 1 Globalisation et tendances de fond.

sécurité dans un environnement étatique favorisant l'autorégulation (États-Unis) [7]. Peu d'entreprises suivent évidemment une telle trajectoire industrielle et réglementaire même si elles peuvent être affectées par des tendances similaires. Les travaux de recherche de l'Ineris, orientés sur la problématique de l'évaluation sociotechnique, mettent ainsi en évidence la manière dont les tendances affectent les organisations au quotidien, et explorent les implications pour la sécurité.

#### **QUAND LA STANDARDISATION BUREAUCRATISE LA SÉCURITÉ...**

Ainsi, pour illustrer une seule de ces tendances et de ses effets, telles que la standardisation (**Figure 1**), il existe de nombreux cas pour lesquels l'accroissement de son rôle, dans le domaine du management de la sécurité, s'est traduit par une approche bureaucratifiée du quotidien. En mettant l'accent sur une vision bureaucratique de l'organisation, la standardisation en est venue à rendre invisible et à simplifier les activités de nombreux acteurs des entreprises. Un des problèmes associés, et le revers de la médaille de cette standardisation, est le risque accru de ne s'intéresser qu'aux traces écrites au travers des audits, au détriment des pratiques professionnelles et expertes qui sont pourtant au cœur des pratiques de sécurité...

## **ABSTRACT**

**When one thinks of risks, one thing that comes to mind is technology. We know that with nuclear power plants, trains and planes came explosions, derailments and crashes, so any new technology can also convey a potential for catastrophes, depending obviously on its nature. But the past decades also sensitised us to the possibility of organisational or sociotechnical accidents, namely the strong awareness that safety lies also in the ability of artefacts, individuals, organisations and institutions to remain within the boundaries of safe performance. This problem has increased in our current interconnected global world. One emerging risk for the future of safety science is indeed to fail to describe, to understand then to manage new organisational-sociotechnical configurations created by these multiple kinds of interconnections. These new configurations can be triggered by new technologies, but not only, and innovation in organisational and regulatory design can also be a reason to worry. How do we keep up with changes when these changes affect deeply the mode of operating of safety-critical systems?**

### **Références**

- [1] J. Reason, 1997. Managing the risk of organisational accidents. Aldershot, UK: Ashgate.
  - [2] P. Dicken, 2015. Global Shifts. Mapping the changing contours of the world economy. 7th Edition. Los Angeles, California: Sage.
  - [3] R. Baldwin, 2016. The great convergence: information technology and the new globalization. The Belknap Press.
  - [4] P. Veltz, 2017. Le monde hyper industriel. Paris, Le Seuil.
  - [5] J.C. Le Coze, 2020. Post Normal Accident. Revisiting Perrow's classic. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor and Francis Group.
  - [6] N. Pidgeon, 2019, 266. Observing the English weather: a personal journey from safety I to IV. in J.C. Le Coze (ed). Safety Science Research. Evolution, challenges and new directions. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis group.
  - [7] T. Bergin, 2011. Spills and spin. The inside story of BP. Random House.
- J.C. Le Coze, Ideas for the future of safety science, Safety Science, (2020) 132 : art. 104966.

# Évaporation de nappes de liquides dangereux: mieux prédire pour mieux anticiper

AUTEUR



Thibault PÉNELON

Les épandages accidentels de liquides peuvent être à l'origine de phénomènes dangereux tels que la dispersion de vapeurs toxiques ou l'explosion de vapeurs inflammables (VCE). Dans ces deux situations, le débit de production de vapeurs est un facteur prépondérant dans la génération des effets toxiques, thermiques ou de surpression.

Dans le cadre de ses travaux pour l'amélioration des connaissances des phénomènes dangereux et de leurs effets, l'Ineris a réalisé, en partenariat avec des industriels et son ministère de tutelle, des travaux expérimentaux visant à mieux caractériser les débits d'évaporation des nappes. Ces campagnes ont été réalisées pour deux familles de produits: les hydrocarbures liquides, et les solutions aqueuses pouvant générer des gaz toxiques. L'objectif de ces travaux a été d'évaluer le débit d'évaporation dans un environnement maîtrisé, afin d'en déterminer les facteurs influents (composition, volatilité, température, vent...), de confronter ces résultats aux modèles de prédiction existants et de proposer des modèles améliorés.

## DES ESSAIS À PETITE ET MOYENNE ÉCHELLE

Ces travaux expérimentaux ont été effectués sur le site de Verneuil-en-Halatte, en laboratoire et sur la plateforme d'essais incendie.

Une première étude [1] a porté sur les évaporations d'hydrocarbures de type essence, qui peuvent conduire à la formation de nuages de vapeurs inflammables de grande ampleur avec, en cas d'inflammation, des explosions générant des effets thermiques et des effets de surpression significatifs, comme lors de l'accident de Buncefield en 2005 par exemple. Une seconde étude [2] a porté sur les évaporations de solutions aqueuses telles que l'ammoniac ou l'acide chlorhydrique, qui peuvent conduire à la formation de nuages de gaz toxiques.

Le banc d'essais était constitué de bacs remplis des liquides étudiés, positionnés sur balance, et soumis à un balayage d'air contrôlé. Des essais à petite échelle (surface d'évaporation de 0,1 m<sup>2</sup> en laboratoire ou dans la chambre de 10 m<sup>3</sup>, puis à moyenne échelle, 1 à 5 m<sup>2</sup> dans la galerie incendie) ont été réalisés pour plusieurs hydrocarbures purs ou en mélanges, plusieurs concentrations

initiales de solutions aqueuses, soumis à différentes vitesses d'air. Les débits d'évaporation ont été estimés à partir de la perte de masse mesurée au cours du temps. D'autres grandeurs, telles que les concentrations dans les phases liquide et vapeur, les températures et les pressions de vapeur, ont été mesurées avant, pendant et après les essais.

Les essais ont permis de confirmer certains mécanismes comme le refroidissement de la nappe, l'évaporation prioritaire des composés les plus volatils conduisant à une baisse de la pression de vapeur du mélange au cours du temps ou encore l'augmentation du débit d'évaporation avec la vitesse de balayage (Figure 1). Ils ont aussi permis de rechercher des corrélations entre le débit d'évaporation et la température du liquide ou encore la dimension de la nappe. L'un des points saillants de ces études est de mettre en évidence la baisse notable du débit d'évaporation dans les premières minutes. Pour les hydrocarbures, cette observation s'explique par le refroidissement de la nappe et la baisse de la pression de vapeur du mélange. Pour les solutions aqueuses de gaz toxiques, c'est la différence de temps caractéristique entre l'évaporation

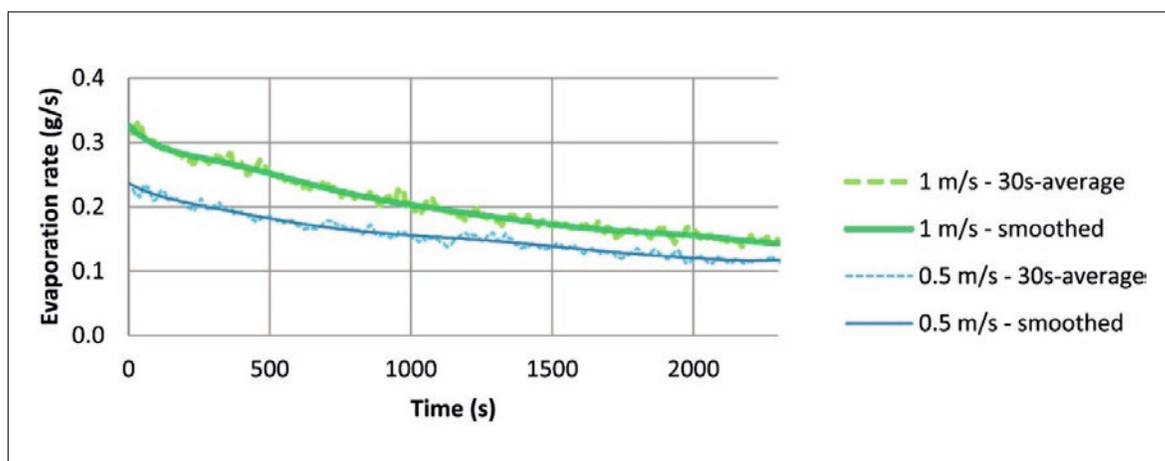
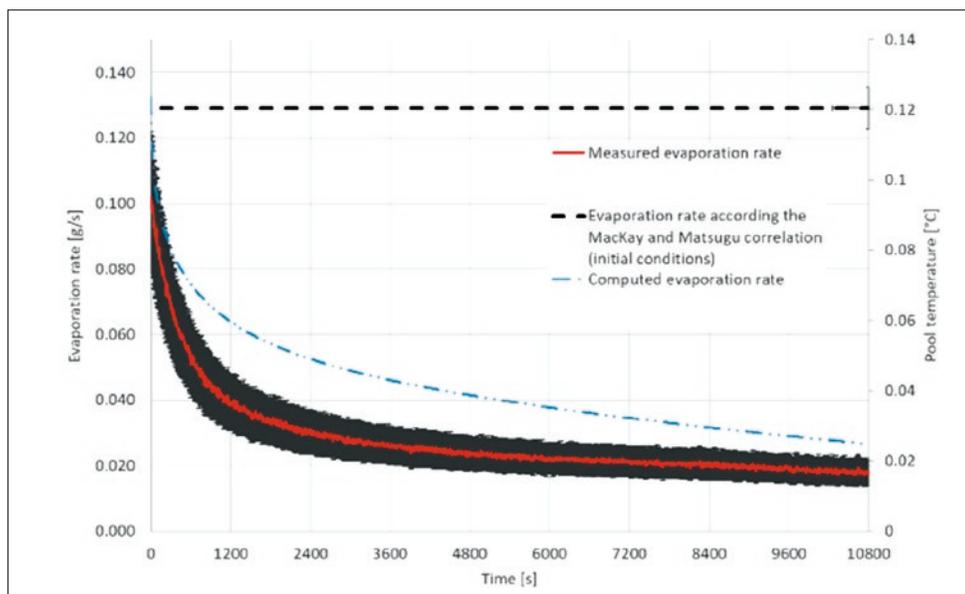


Figure 1

Évolution temporelle sur 40 minutes du débit d'évaporation d'une nappe de 0,1 m<sup>2</sup> d'essence de synthèse – vitesse d'air de 0.5 et 1 m/s.



**Figure 2** Evolution temporelle sur 40 minutes du débit d'évaporation d'une nappe de 0,1 m<sup>2</sup> d'ammoniaque soumise à un flux d'air de 1 m/s –, mesurée (en rouge – le nuage gris autour de la courbe d'évolution du débit d'évaporation représente les incertitudes de mesures) et calculée avec le modèle développé par l'Ineris (en pointillés bleus).

en surface et la diffusion dans le liquide qui conduit à l'appauvrissement en gaz dissous de la couche de surface du liquide. Le gradient vertical de concentration dans le liquide résultant de ce mécanisme a pu être mesuré expérimentalement.

### VERS DES MODÈLES NUMÉRIQUES AMÉLIORÉS

L'étude bibliographique préliminaire a conduit à recenser de nombreux modèles semi-empiriques simples visant à prédire les débits d'évaporation de liquides purs. Certains auteurs ont aussi proposé des modèles adaptés à des mélanges idéaux, dont font partie les mélanges d'hydrocarbures étudiés ici, ou faisant intervenir des coefficients d'activité pour traduire les interactions entre les constituants des mélanges. Les confrontations entre les modèles existants et les résultats expérimentaux de l'étude sur les hydrocarbures ont montré que la plupart des modèles

existants tendent à sous-estimer les débits pour les petites surfaces d'évaporation tandis qu'ils les surestiment pour les plus grandes surfaces [1]. Une adaptation du modèle semi-empirique de Mackay & Matsugu [3] a ainsi été proposée. Les prédictions du modèle modifié sont cohérentes avec les résultats des essais. En outre, un modèle physique spécifique qui permet de prédire l'évolution temporelle du débit d'évaporation d'une flaque d'ammoniaque (Figure 2) a été développé. Le modèle intègre en particulier le mécanisme de frein à l'évaporation par appauvrissement de la surface du liquide en gaz dissous. La prise en compte de l'évolution temporelle de la source d'émission, donc du nuage toxique qu'elle génère, est un facteur important dans la démarche d'évaluation des risques, car les effets toxiques sont liés à la concentration inhalée mais aussi à la durée d'exposition des personnes.

## ABSTRACT

Accidental spills of liquids can cause hazards such as the dispersion of toxic vapors or the explosion of flammable vapors (VCE). In both situations, the rate of vapor production is a major factor in the generation of toxic, thermal or overpressure effects.

As part of its work to improve knowledge of hazardous phenomena and their effects, Ineris, in partnership with interested industrials and the ministry of the ecological transition, carried out experimental work that aimed at better characterizing the evaporation rates of tablecloths. These campaigns were performed for two families of products: liquid hydrocarbons, and aqueous solutions that can generate toxic gases. The objective of this work was to assess the evaporation rate in a controlled environment, in order to determine the influencing factors (composition, volatility, temperature, wind, etc.), to compare these results with existing prediction models and to offer improved models.

### Références

- [1] T. Pénelon; V. Debuy; B. Truchot; C. Wagner; L. Donnat; J.-F. Lechaudel. Pool evaporation: Experimental tests at medium-scale with gasoline. J. Loss Prev. Process. Ind. 2020, 65.
- [2] B. Truchot; A. Carrau; V. Debuy; T. Penelon; J.-P. Bertrand. Experimental and Numerical Evaluation of Toxic Pool Evaporation. Appl. Sci. 2020, 10.
- [3] D. Mackay; R. S. Matsugu. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water. Can. J. Chem. Eng. 1973, 51, 434-439.

# Mesurer la turbulence de fuites massives de gaz

AUTEUR



Didier JAMOIS

Il est bien connu que la violence d'une explosion dépend de la vitesse de la flamme dans le mélange air-combustible. Or, si cette vitesse dépend de la physico-chimie du mélange (énergie de combustion par exemple), elle dépend aussi largement de l'agitation interne du mélange qu'on appelle « turbulence ». On peut voir la turbulence comme les tourbillons qui naissent dans les zones de cisaillement de l'écoulement, et se brisent en structures de plus en plus petites. Ces tourbillons augmentent la surface de la réaction de combustion. Il a été montré que la turbulence d'un écoulement peut être caractérisée par la vitesse et la taille des plus gros tourbillons, respectivement l'intensité et l'échelle intégrale de la turbulence.

Leur mesure sur des fuites réelles est très délicate et les moyens « traditionnels » (laser, fils chauds) sont bien trop fragiles pour être employés hors laboratoire.

Une technique de sonde de Pitot très robuste, la sonde de Mc Caffrey (ou sonde « bidirectionnelle ») [1-2], a été mise au point à l'Ineris et améliorée au cours des 20 dernières années. Le profilage de la sonde actuelle et les caractéristiques du capteur de pression permettent non seulement

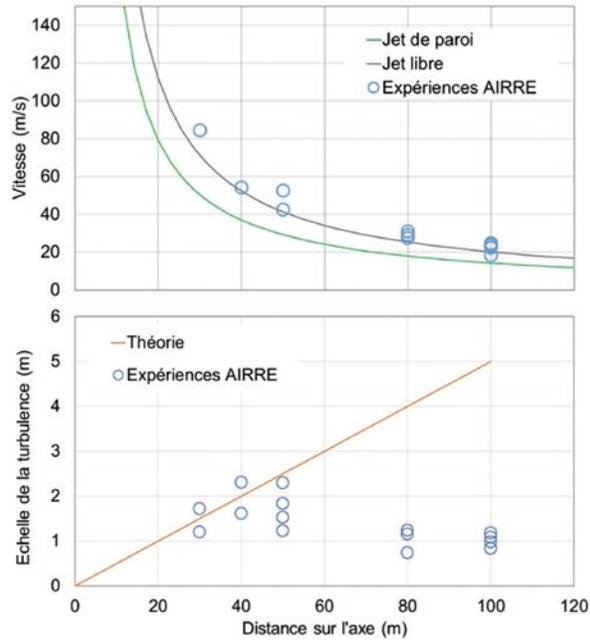


Figure 2 Champ de vitesse et échelle intégrale de la turbulence mesurés sur l'axe du jet AIRRE.

d'obtenir les deux paramètres de la turbulence mais également d'accéder au « spectre » de la turbulence, par exemple celui du jet libre (Figure 1). Des industriels de l'énergie ont constitué, en 2016, un *Joint Industry Project* (JIP) pour étudier expérimentalement à grande échelle les

conséquences d'une fuite massive de méthane sous pression à l'air libre (JIP AIRRE pour *Assessing the Influence of Real Releases on Explosions*) [3]. Les connaissances actuelles ne permettent pas encore d'en prédire les effets en raison des conditions aérodynamiques très particulières (présence du sol, très gros débits). À la demande du consortium, 20 sondes bidirectionnelles ont été conçues et étalonnées par l'Ineris pour la réalisation de mesures de turbulence en situation réelle [4]. Les essais ont été réalisés sur le site de DNV GL à Spadeadam (UK). Le dispositif expérimental permet de produire un jet horizontal à 1,5 m du sol avec un débit moyen de 100 kg/s à travers un orifice de 100 mm de diamètre. L'inflammation est déclenchée après 50 secondes de fuite.

## LES RÉSULTATS

Ces conditions d'essais sont très difficiles pour l'instrumentation : soulèvement de terre, de graviers, effets de l'explosion. Beaucoup d'informations ont été perdues mais des résultats exploitables ont été obtenus. Les connaissances acquises à petite échelle sur ce type de rejet suggèrent

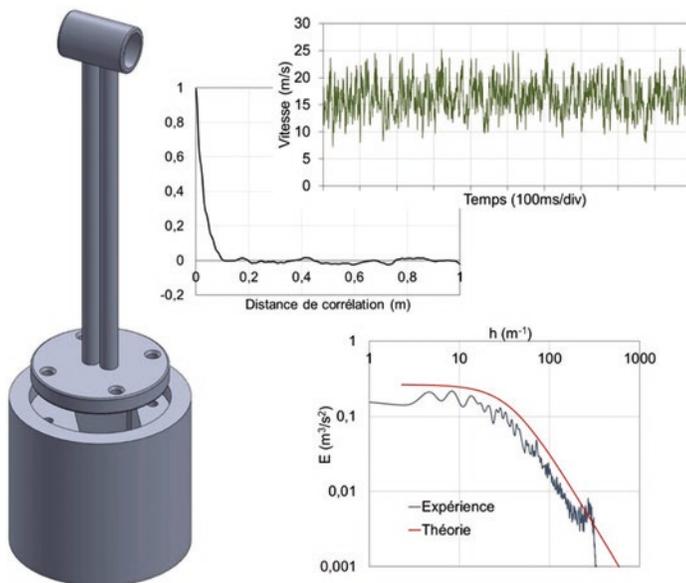
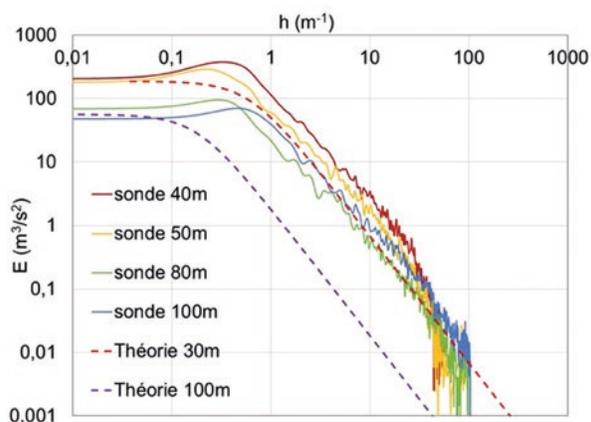


Figure 1 La version actuelle de la sonde « bidirectionnelle ». Enregistrement vitesse-temps, courbe d'autocorrélation et spectre de turbulence (jet libre).



**Figure 3**  
Spectres de la turbulence sur l'axe du jet (JIP AIRRE: 100 kg/s méthane).

que la dispersion latérale devrait être plus grande que la dispersion verticale. Mais, pour les essais du JIP, nos mesures indiquent clairement que le panache symétrique avec des caractéristiques du champ de vitesse proches de celles du jet libre, au moins jusqu'à 80 m. On remarque également qu'au-delà de 40 m, l'échelle intégrale reste constante alors qu'elle devrait augmenter linéairement avec la distance dans une configuration de jet libre (Figure 2). Cela pourrait être dû à l'effet du frottement sur le sol, la turbulence de paroi prenant progressivement le pas sur le cisaillement du jet. La mesure des spectres de la turbulence révèle (Figure 3) que, par rapport au spectre classique de la turbulence dans les jets libres, ceux-ci présentent une « bosse » aux grandes longueurs d'onde ( $0,3 \text{ m}^{-1}$  soit une longueur d'onde de 20 m). Un phénomène périodique de grande taille semble se superposer au champ de turbulence du jet. Cela pourrait correspondre au battement observé (par vidéo) sur les bords du jet à partir d'une distance de 30 m du point de rejet.

### CONCLUSION

La technique de mesure de la turbulence et de l'aérodynamique des nuages explosifs mise au point par l'Ineris a démontré sa robustesse lors de cette campagne d'essais à l'échelle réelle. Pour la première fois à notre connaissance, il a été possible de mesurer l'aérodynamique d'une fuite de gaz de très grande taille en apportant une expertise très spécifique dans un projet international. Cela a permis de mettre en évidence l'effet du sol et l'effet de la taille du jet sur la structure du panache et pourrait contribuer à mieux connaître la physique de ces grands panaches. Cette technique a aussi été utilisée avec succès dans des nuages lourdement empoussiérés (jusqu'à  $1 \text{ kg/m}^3$  de poussières) et dans des flammes.

### ABSTRACT

Most laboratory flow measurement techniques cannot be implemented in field experiments especially in fire and explosion configurations. During the last 2 decades, a special type of Mc Caffrey gauges was developed at Ineris to achieve measuring flow and turbulence in such situations (Figure 1). They were used successfully (Figure 2) in the framework of the JIP AIRRE project targeting the understanding of the consequences of massive leakages of methane in open atmosphere. For the first time, an insight into such jets was obtained showing surprising bulk pulsation behavior (bump at  $0,3 \text{ m}^{-1}$  on Figure 3) absent from the reference free jets configurations used as a reference.

### Références

- [1] B. Mc Caffrey, G. Heskestad, Combustion and Flame, vol. 26 (1976), 125-127.
- [2] C. Proust, D. Jamois, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 80 (2021).
- [3] T. Skjold et al, Assessing the influence of real releases on explosions: motivation and previous work, 12<sup>th</sup> ISHPMIE, Kansas City (2018).
- [4] H. Hisken et al, Assessing the influence of real releases on explosions: selected results from large-scale experiments, 13<sup>th</sup> ISHPMIE Braunschweig, Germany (2020).
- D. Jamois et al., Turbulence in real flammable gas releases, Proceedings of the 13th international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE), (2020).

# Modélisation hydromécanique tridimensionnelle de l'érosion interne d'une digue sur fondation

AUTEUR



Farid LAOUAFA

Collaborateurs:

Prof. Zhen-Yu YIN<sup>1</sup>

Prof. Pierre-Yves HICHER<sup>2</sup>

Docteur Jie YANG<sup>3</sup>

L'érosion interne au sein des sols se produit lorsque des particules fines sont arrachées par des forces hydrauliques et transportées à travers une matrice poreuse. Les principales causes de l'érosion interne sont soit une concentration d'érosion par fuite, une érosion rétrograde, une érosion par contact avec le sol ou une suffusion. Dans le cadre d'un travail de recherche, nous nous sommes concentrés sur la suffusion, qui correspond au détachement et à la migration de particules fines dans les vides (pores) en présence de grosses particules au moyen d'un écoulement d'infiltration. Du fait de la perte (transport) d'une partie de la phase solide, les propriétés mécaniques du sol sont progressivement modifiées et dégradées, et avec le temps, les ouvrages en terre (naturels ou anthropiques) peuvent être soumis à des risques de rupture. Des chercheurs ont montré que près de 46 % des dommages de 128 barrages en remblai pouvaient être attribués à l'érosion interne. De plus, des dolines et des cavités déclenchées par l'érosion interne sont fréquemment observées dans les barrages et digues. L'érosion interne peut également induire et favoriser des ruptures

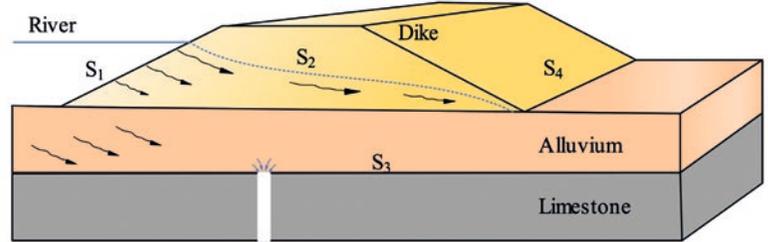


Figure 1

Schéma de la digue sur fondation près d'Orléans (France) avec une cavité située au fond.

de pente et générer des glissements de terrain importants pouvant impacter ouvrages et structures. Des essais expérimentaux en laboratoire et des modélisations numériques à l'échelle du volume élémentaire représentatif (échantillon de laboratoire) ont joué un rôle important dans la compréhension des mécanismes physiques à l'origine des phénomènes d'érosion interne. Cependant, ces études n'ont pas permis de comprendre clairement où et quand le flux d'infiltration pouvait déclencher une instabilité interne dans un mélange de sol granulaire à des échelles spatiales plus grandes pour de vrais problèmes aux limites. Plusieurs essais physiques ont été réalisés à cet

effet. Cependant, peu d'études numériques à l'échelle d'un ouvrage d'art sont disponibles dans la littérature, et dans celles qui sont rapportées les réponses d'un sol érodé ont souvent été contournées ou simplifiées en utilisant un modèle élastique avec des paramètres de dommages induits.

## DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE

Nous avons proposé une approche hydromécanique couplée basée sur la théorie des milieux poreux continus pour évaluer l'impact de l'érosion interne sur la sécurité des structures en terre. À cette fin, nous avons développé un modèle constitutif élastoplastique pour les mélanges sable-limon afin de décrire l'effet de l'évolution de la porosité et de la teneur en fines, induites par l'érosion interne, sur le comportement du squelette du sol. Ce modèle a ensuite été appliqué pour analyser l'érosion interne dans une digue entièrement saturée dans des conditions de déformation plane. Cependant, une condition tridimensionnelle (3D) est considérée comme un facteur important dans le processus d'érosion interne, d'où l'importance de la modéliser également. Dans des conditions 3D, la contrainte du sol environnant peut limiter ou retarder le développement de la déformation du sol, qui peut à son tour induire un mode de rupture-effondrement plus local (type fontis par exemple) au lieu d'une instabilité de type glissement de terrain. On montre également que l'érosion interne est un facteur aggravant car il change non seulement le mode de rupture mais également les conditions de perte de stabilité. Ces travaux

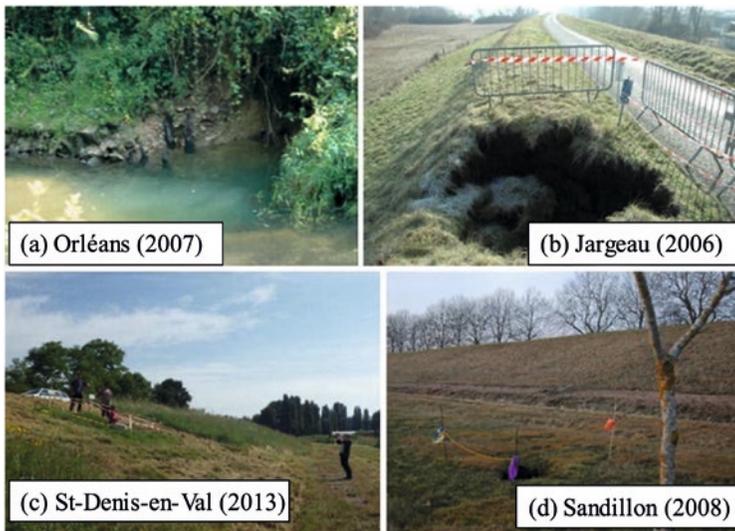
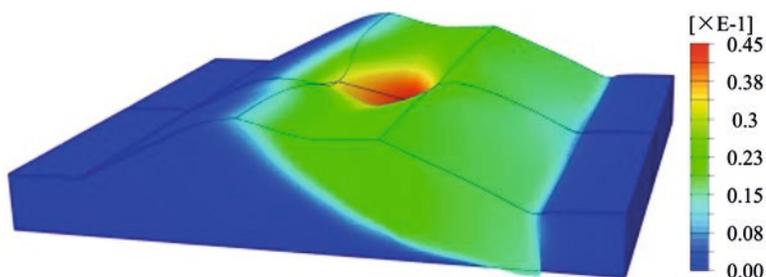


Figure 2

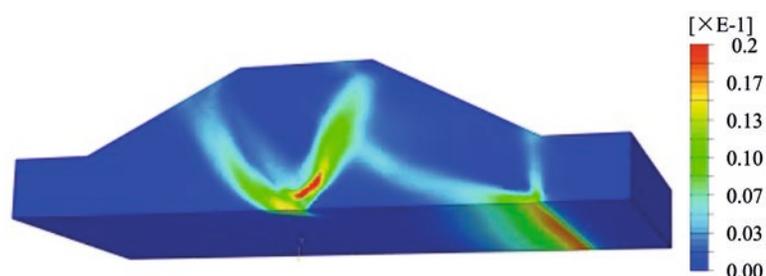
Exemple de fontis au sein de la digue du Val d'Orléans (France), (a) au pied, (b) en tête, (c) sur le versant et (d) derrière la digue.

### Notes

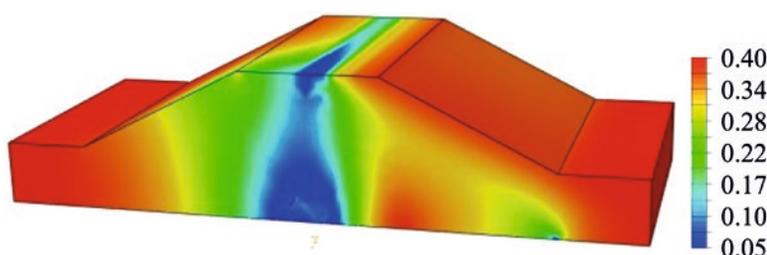
- 1- Department of Civil and Environmental Engineering, Hong-Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong-Kong, Chine
- 2- Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR CNRS 6183, École Centrale de Nantes, France
- 3- Doctorant Ineris, Post-doctorant à Hong-Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong-Kong, Chine



**Figure 3**  
Champ de la norme du déplacement après érosion pour le cas (m).



Champ de déformation plastique déviatorique après érosion (Vue d'un 1/2 modèle).



Distribution spatiale de la teneur en fines après érosion (Vue d'un 1/2 modèle).

de recherche peuvent s'appliquer dans la problématique des fuites de canalisations enterrées, l'affaiblissement de failles ou de joints rocheux remplis de matériaux pulvérulents.

### EXEMPLE

On montre les conséquences mécaniques en 3D de l'érosion interne au sein d'une digue dans des conditions générales et relativement réalistes pour cet exercice. La condition d'écoulement en milieu non saturé a été implémentée afin de décrire plus précisément les infiltrations à l'intérieur de la digue et de la fondation en raison de la différence de pression entre l'amont et aval de la digue. Les caractéristiques de la configuration étudiée sont présentées sur la **Figure 1** selon le cas d'étude de la digue du Val d'Orléans. La digue a été construite avec des alluvions sablo-limoneuses sur calcaire (**Figure 2**).

La saturation associée à des valeurs spécifiques de la pression capillaire pour l'absorption du fluide par le milieu poreux est une propriété physique du matériau et a été définie en utilisant le modèle de Van Genuchten. Les calculs visent à montrer comment l'érosion interne peut affaiblir la fondation et la digue dans différentes conditions aux limites. Les différentes vues (**Figure 3**) montrent la déformation du massif après plusieurs jours d'écoulement, la distribution de la plasticité dans le massif et enfin la teneur en particules fines.

Les principales conclusions de cette étude sont que sans prise en compte de l'érosion interne, le fontis ne peut se former (dans cet exemple). Le champ de cisaillement plastique est différent des champs classiquement décrits dans l'analyse de la stabilité des pentes, etc.

## ABSTRACT

Numerical studies at the real scale of an entire engineering structure considering internal erosion are still rare. This study presents a 3D numerical simulation of the effects of internal erosion within a linear dike. A 3D model is developed in order to analyze the impact of internal erosion under more realistic hydromechanical conditions. The saturated soil has been considered as a mixture of four interacting constituents: soil skeleton, erodible fines, fluidized fine particles, and fluid. The detachment and transport of the fine particles have been modeled with a mass exchange model between the solid and the fluid phases. An elastoplastic constitutive model for sand-silt mixtures has been developed to monitor the effect of the evolution of both the porosity and the fines content. Unsaturated condition has been implemented to describe more accurately the seepage within the dike. This numerical tool is applied to a specific dike case subjected to erosion induced by a leakage located at the bottom of the dike. Failure modes were observed for different boundary conditions, including the significant influence of the leakage cavity size and the elevation of the water.

### Références

F. Laouafa, J. Yang, J.Y. Yin, P.Y. Hicher, (2020), Three-dimensional hydromechanical modeling of internal erosion in dike-on-foundation, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 44(8): 1200-1218.

# Quantification de la cinétique de dissolution de gypses naturels: cas de faciès de l'Éocène dans la banlieue nord-est de Paris

AUTEUR



Imen ZAIER<sup>1,2</sup>

**Collaborateurs:**

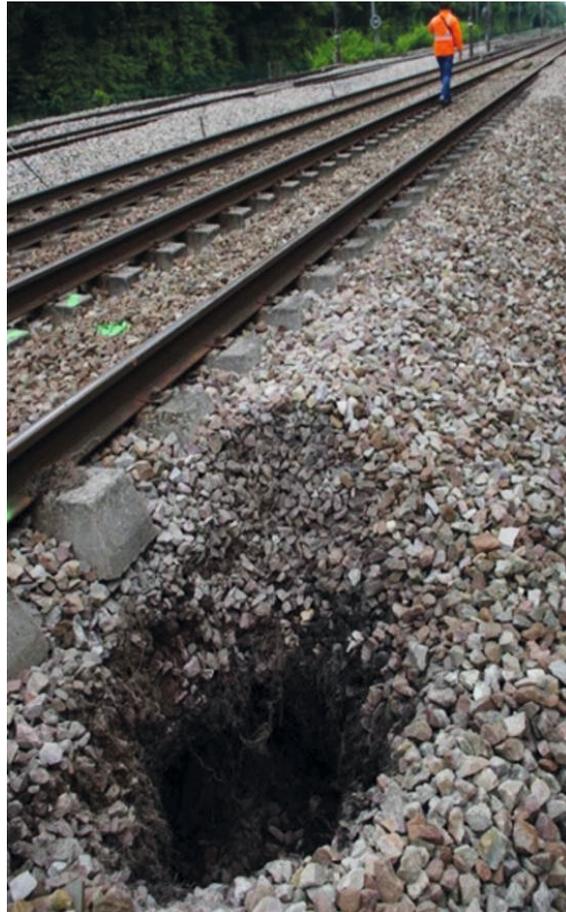
- Arnaud CHARMOILLE<sup>1</sup>
- Farid LAOUAFA<sup>1</sup>
- Joël BILLIOTTE<sup>2</sup>

**PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIF DE L'ÉTUDE**

Le sous-sol de Paris et de sa banlieue contient des zones riches en gypse. En milieu naturel, le gypse peut présenter des textures, des formes de cristallisations et des faciès aux couleurs très variables, selon les conditions de précipitation du minéral et les impuretés qu'il contient. La dissolution naturelle du gypse, en contact avec l'écoulement des eaux souterraines, induit une perte de matière solide créant des vides souterrains de formes et de tailles différentes qui peuvent provoquer des désordres importants à la surface du sous-sol (**Figure 1**).

Jusqu'à présent, les relations entre les caractéristiques pétrographiques et texturales d'un gypse naturel, les mécanismes de dissolution du minéral, ainsi que les conditions hydrodynamiques, chimiques et mécaniques impliquées dans le processus d'instabilité qui en résulte sont abordés de manière très simplifiée. Depuis 2016, des recherches à l'Ineris en partenariat avec le centre Géosciences Mines-ParisTech ont été entreprises afin d'améliorer la connaissance de ces mécanismes de dissolution et de déstabilisation des vides. Cette collaboration scientifique s'inscrit dans le cadre de travaux de recherche et développement réalisés pour le compte de la Société du Grand Paris (SGP).

Ce travail vise principalement à évaluer la variabilité du taux de dissolution du gypse en fonction de sa texture, de sa rugosité et son degré d'hétérogénéité. En fonction de celles-ci, ces processus peuvent se différencier de ceux du minéral gypse, supposé sans impuretés. Des échantillons représentatifs des formations gypseuses du Priabonien (Ludien) et du Lutétien du périmètre de reconnaissance du projet du Grand Express ont été utilisés. La zone d'intérêt est située au niveau de la ligne 16 du futur Grand Paris Express dans le département de la



© Ineris

**Figure 1**  
Un effondrement lié à la dissolution du gypse observé sur les voies SNCF de la commune de Villepinte en 2013.

Seine-Saint-Denis, au nord-est de Paris. À partir des carottes fournies par la SGP, une collection de gypses naturels est constituée. Elle contient trois faciès différents: saccharoïde, albaströïde et matriciel.

**MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS**

L'évaluation des paramètres de la loi cinétique de dissolution pour chaque faciès de gypse s'appuie sur le calcul du flux massique d'un disque tournant dans l'eau pure à une température uniforme, dont l'axe de rotation est perpendiculaire

à la surface plane et qui tourne à une vitesse constante angulaire jusqu'à ce que la concentration à saturation soit atteinte. Le dispositif expérimental est schématiquement représenté sur la **Figure 2**.

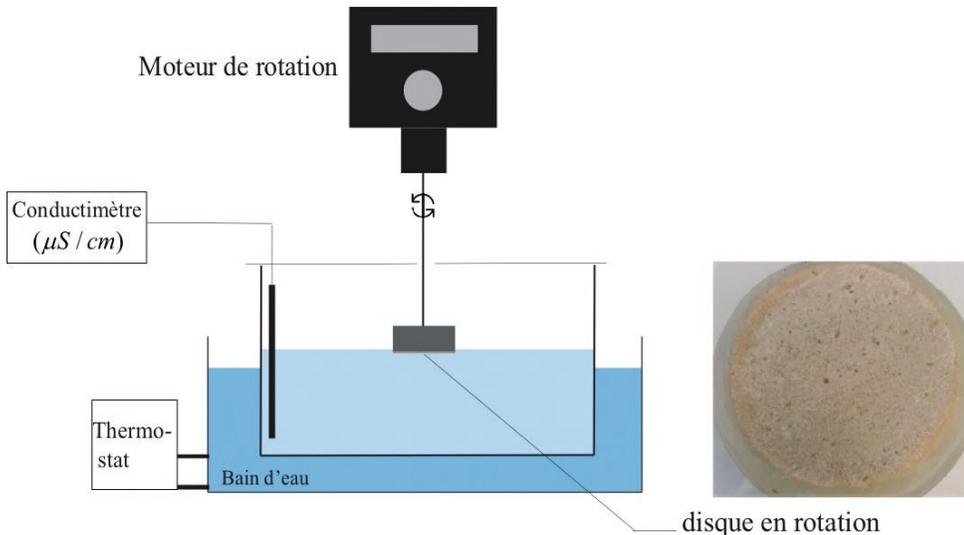
Les résultats ont été analysés en fonction de la température ainsi que de la texture du faciès et de la rugosité développée lors de la dissolution. Du fait de cette rugosité, la dissolution est dominée par le transport diffusif dans la couche limite. Les valeurs du taux de dissolution effectif sont comprises entre 0,01 et 0,08 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, soit

**Notes**

- 1- Ineris– Institut national de l'environnement industriel et des risques – Verneuil-en-Halatte, France
- 2- MINES ParisTech, PSL Université, Centre de Géosciences – Fontainebleau, France

## ABSTRACT

The north-eastern suburbs of Paris are most prone to the development of sinkholes due to gypsum dissolution. Gypsum samples with different porosity and content of insoluble impurities were used to qualify and quantify experimentally the dissolution kinetics under unsaturated conditions. The main goal is to verify whether and how the petrophysical and petrographic nature of gypsum influence its dissolution rate. Rotating disc experiments allowed us to determine the kinetic rate model parameters of each sample. The results were analyzed according to the temperature, the texture of the facies and the roughness developed during dissolution. The dissolution rate values varied according to the insoluble content and their distribution. The lowest values refer to the matrix textured gypsum with insoluble content that serves as coating for the gypsum grains. Batch experiments were also performed to evaluate the extremely low dissolution rates when the solution is close to equilibrium. The results revealed a double kinetics. Close to the equilibrium, the dissolution rates showed a greater slope depending on the texture of the mineral and the value of the concentration at equilibrium used in the evaluation.



**Figure 2**  
Schéma de principe du dispositif expérimental de disque tournant.

environ 2 à 14 mg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, et donc plus faibles que celles du taux de dissociation du gypse minéral pur généralement trouvées dans la littérature. Ces valeurs varient avec la teneur en insolubles et leur répartition sur la surface du gypse exposée à la dissolution. Les valeurs du taux de dissolution les plus faibles correspondent à des gypses matriciels avec un recouvrement des grains de gypse par les insolubles. Ces résultats ont été utilisés pour pondérer les valeurs de taux de dissolution évaluées *in situ*, on obtient ainsi des valeurs plus représentatives des conditions *in situ*.

Des essais en batch ont également été réalisés afin d'évaluer le taux de dissolution lorsque la solution est proche de l'équilibre. Les résultats révèlent une double cinétique. Pour les concentrations proches de la concentration à saturation,

les taux de dissolution se caractérisent par une forte augmentation de la valeur de l'ordre de la loi cinétique qui dépend de la texture du gypse et de la cristallinité du minéral. Cependant, les paramètres de la seconde cinétique sont très sensibles à l'incertitude de valeur de la concentration à l'équilibre utilisée pour l'interprétation.

Ces travaux ont apporté une compréhension sur l'influence de la minéralogie de gypses naturels sur leur cinétique de dissolution. Ceci a permis à l'Ineris d'évaluer l'impact de l'hétérogénéité naturelle des roches gypseuses sur les cinétiques de dissolution et de préciser la sensibilité de certains faciès aux conditions hydrodynamiques et chimiques intervenant dans le développement des cavités souterraines qui peuvent être à l'origine des désordres en surface.

## Références

- I. Zaier, J. Billiote, A. Charmoilles, F. Laouafa, (2021), The dissolution kinetics of natural gypsum: a case study of Eocene facies in the north-eastern suburbs of Paris, *Environmental Earth Sciences*, 80 : art. 8
- A. A. Jeschke, K. Vosbeck, and W. Dreybrodt (2001). Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(1): 27-34.
- A. Charmoille, A. Lecomte, C. Kreziak (2018). Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol. Technical report, Ineris & Cerema. 38p.

# Évaluer l'exposition de la population française à des mélanges de pyréthri-noïdes à partir de données de biosurveillance et son risque associé

AUTEURS



Collaboratrice: Amélie CRÉPET<sup>1</sup>

Les données de biosurveillance humaine permettent de caractériser l'exposition des populations aux composés chimiques présents dans l'environnement mais ne constituent pas, en tant que telles, des mesures directes de l'exposition. Pour intégrer ces données dans un contexte d'évaluation des risques, la modélisation pharmacocinétique à base physiologique (PBPK) permet de transposer les concentrations mesurées dans des matrices biologiques (par exemple, le sang ou l'urine) en des expositions externes qui pourront ensuite être comparées à des valeurs de référence. En France, l'Étude nationale nutrition santé (ENNS) est une cohorte qui a mis en évidence la large exposition de la population générale aux pyréthri-noïdes [1]. Dans ce contexte, et dans l'optique d'investiguer le potentiel des approches de biosurveillance, l'objectif était de développer une méthodologie basée sur la modélisation PBPK pour estimer l'exposition de la cohorte ENNS à un mélange de 4 pyréthri-noïdes (perméthrine, cyperméthrine, cyfluthrine et deltaméthrine) à partir de mesures de concentrations urinaires de cinq métabolites et de calculer le risque neurotoxique associé à cette exposition cumulée (Figure 1).

ESTIMATIONS DES EXPOSITIONS AU MÉLANGE DE PYRÉTHRINOÏDES

L'Ineris a développé un modèle toxicocinétique global (PBPK) utilisé dans ces travaux pour relier l'exposition externe à quatre pyréthri-noïdes et leurs isomères aux concentrations urinaires de leurs métabolites [2]. La première étape a consisté à transposer les concentrations urinaires de métabolites mesurées chez chaque individu (139 hommes et 257 femmes) en dose d'exposition orale de cyperméthrine, perméthrine, cyfluthrine et deltaméthrine avec ce modèle PBPK global. L'alimentation était la seule source d'exposition considérée en accord avec les résultats de plusieurs études en France [3]. La médiane des doses journalières d'exposition pour la cohorte ENNS a été estimée à 8,1 ng/kg/jour pour la perméthrine (IC95 % [0,5 ; 294,9]), 17,7 ng/kg/jour pour la cyperméthrine (IC 95 % [1,1 ; 656,0]), 20,4 ng/kg/jour pour la cyfluthrine (IC95 % [9,6 ; 306,7]) et 34,3 ng/kg/jour pour la deltaméthrine (IC95 % [4,3 ; 374,7]). Les doses journalières étaient similaires entre les hommes et les femmes pour la perméthrine, la cyperméthrine et la deltaméthrine, et significativement différentes pour la cyfluthrine.

L'exposition cumulée aux pyréthri-noïdes a été calculée pour chaque individu. La Figure 2 montre la contribution moyenne des quatre substances à la dose journalière cumulée avec des poids similaires pour le couple perméthrine-cyperméthrine (36 %), la cyfluthrine (31 %) et la deltaméthrine (33 %). Les contributions peuvent varier considérablement au sein de la population. En effet, la contribution de la cyfluthrine et de la deltaméthrine va de 0 à 100 % signifiant que soit l'individu n'est pas exposé au composé, soit l'individu n'est exposé qu'à ce composé. La variation est un peu moins large pour la perméthrine (entre 0 et 60 %) et la cyperméthrine (entre 0 et 70 %).

RISQUE CUMULÉ AUX MÉLANGES DE PYRÉTHRINOÏDES

La seconde étape consistait à utiliser les estimations d'exposition aux mélanges des quatre pyréthri-noïdes pour calculer les risques cumulés d'altérations fonctionnelles de la division motrice, de la division sensorielle et de la division autonome. La méthode était basée sur le calcul des marges d'exposition<sup>2</sup> (ou Margin of exposure - MOE) pour chaque individu en utilisant les doses sans

Notes

- 1- French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety (ANSES).
- 2- La MOE est le rapport entre un point défini sur la courbe dose-réponse pour l'effet indésirable (point de référence ou PR) et l'exposition estimée. On estime généralement qu'une MOE supérieure à 100 indique qu'il n'y a pas de risques appréciables pour la santé.

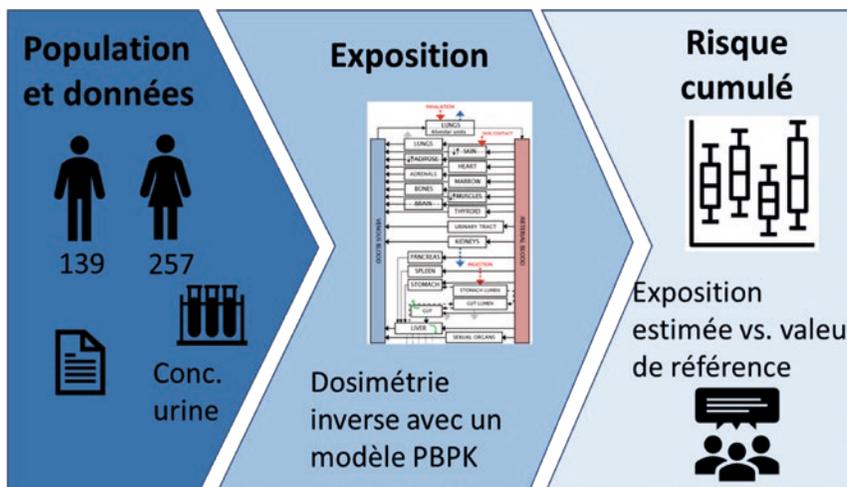


Figure 1 Workflow de l'approche pour estimer l'exposition et le risque cumulé aux pyréthri-noïdes pour la cohorte ENNS.

### Contribution moyenne à l'exposition cumulée

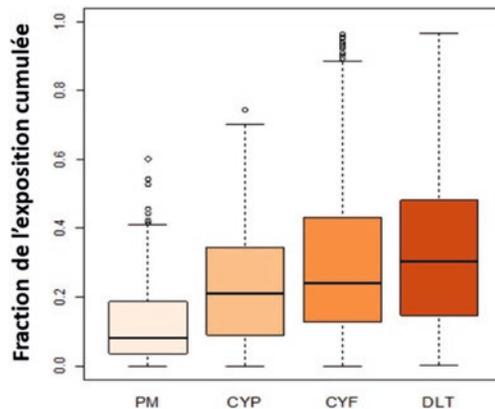
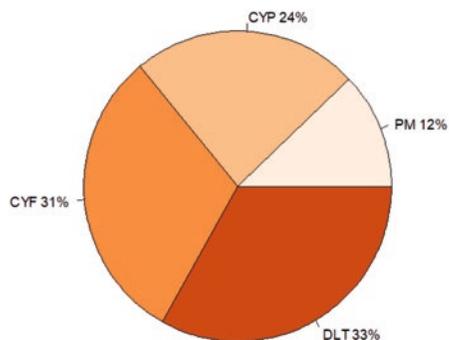


Figure 2

Contribution moyenne (à gauche) et distributions des contributions (à droite) de chaque composé parent à l'exposition cumulée aux pyréthroïdes dans la cohorte ENNS.

effet indésirable observé (NOAEL) des trois effets spécifiques établies par l'EFSA [4]. Toutes les MOE individuelles étaient supérieures à 100, n'identifiant ainsi pas de risque du mélange des 4 substances étudiées pour ces effets sur le système nerveux dans la cohorte française ENNS (Figure 3).

### CONCLUSION

À notre connaissance, cette étude est la première à estimer l'exposition externe à des mélanges de pyréthroïdes à l'aide de données de biosurveillance [5]. Nous avons développé une approche de modélisation pour interpréter les biomarqueurs d'exposition aux pyréthroïdes considérant que certains d'entre eux reflètent une exposition cumulée à plusieurs composés parents. Les apports journaliers de 4 pyréthroïdes de la cohorte française ENNS ont été estimés à partir des concentrations urinaires de 5 métabolites à l'aide d'un modèle PBPK. L'exposition cumulée à 4 pyréthroïdes a été quantifiée pour chaque individu ainsi que le risque cumulé. Les résultats obtenus ont indiqué qu'aucun risque pour 3 paramètres de neurotoxicité associés aux mélanges estimés de pyréthroïdes n'était attendu pour la cohorte ENNS.

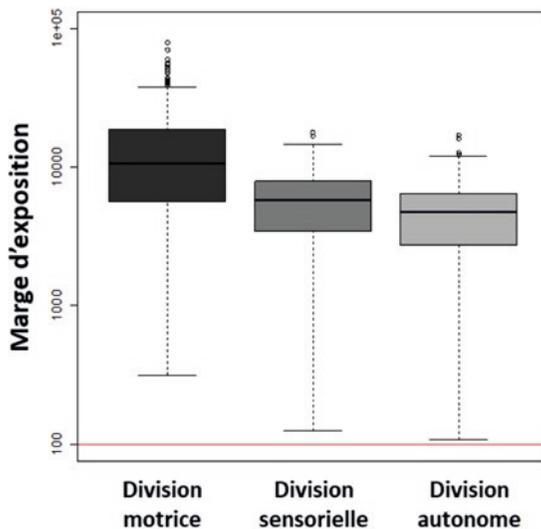


Figure 3

Distribution du 5<sup>e</sup> centile de la distribution individuelle des marges d'exposition pour les trois effets neurotoxiques étudiés.

### ABSTRACT

In France, high levels of pyrethroids have been measured in humans according to several biomonitoring studies. Our work aims at estimating the exposure of the French ENNS cohort to mixtures of four pyrethroids (deltamethrin, permethrin, cypermethrin, and cyfluthrin) from the urinary concentrations of five metabolites. We developed a modelling approach based on a toxicokinetic (PBPK) model that accounts for the cumulative exposure to pyrethroids as some of the metabolites can be shared by several parent compounds and for human inter-individual variability in metabolism. The median of the individual daily intakes was estimated to 8.1 ng/kg/day for permethrin, 17.7 ng/kg/day for cypermethrin, 20.4 ng/kg/day for cyfluthrin and 34.3 ng/kg bw/day for deltamethrin. The cumulative exposure was then weighted by their toxicities towards three neurotoxic effects to calculate margins of exposure. No risks associated with reconstructed mixtures of pyrethroids were expected for the ENNS cohort. Our approach is an asset to analyse the biomarkers of exposure to pyrethroids simultaneously and could be easily adapted to any local or national specificities in pyrethroids' exposure or populations.

### Références

- [1] N. Fréry, A. Saoudi, R. Garnier, A. Zeghnoun, G. Falq, 2011. Exposition de la population française aux substances chimiques de l'environnement. Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice, p. 151.
- [2] P. Quindroit, R. Beaudouin, C. Brochot, 2019. Estimating the cumulative human exposures to pyrethroids by combined multi-route PBPK models: Application to the French population. *Toxicology Letters*. Volume 312, Pages 125-138.
- [3] M. Vanacker, P. Quindroit, K. Angeli, C. Mandin, P. Glorennec, C. Brochot, A. Crépet, 2020. Aggregate and cumulative chronic risk assessment for pyrethroids in the French adult population. *Food Chem. Toxicol.* 143, 111519.
- [4] EFSA, 2019a. Establishment of cumulative assessment groups of pesticides for their effects on the nervous system. *EFSA J.* 17, e05800.
- [5] P. Quindroit, A. Crépet and C. Brochot, 2020. Estimating human exposure to pyrethroids' mixtures from biomonitoring data using physiologically based pharmacokinetic modeling. *Environmental Research* 192: 110281.

# Application du *machine learning* à la surveillance microsismique d'opérations industrielles du sous-sol

## AUTEURS



Jean-Bernard  
KAZMIERCZAK



Isabelle  
CONTRUCCI



Armand  
LIZEUR



Pascal  
BIGARRÉ

La surveillance microsismique trouve de nombreuses applications dans le domaine de la prévention des risques naturels et industriels. Elle s'est particulièrement développée dans le contrôle de l'exploitation des mines ou des réservoirs d'hydrocarbures ou encore les activités extractives génératrices de redistributions importantes de contraintes [1]. Elle repose sur l'enregistrement et l'analyse de signaux provenant de stations de surface ou en forages, réparties autour de la zone d'intérêt à surveiller.

Dans le cas de la gestion du risque de mouvements de terrains lié à d'anciennes mines souterraines, elle a pour objectif de détecter des signes précurseurs d'instabilité au niveau des ouvrages souterrains, mais s'agissant d'une méthode passive, elle est également sensible aux artefacts et bruits anthropiques: endommagement et/ou rupture d'une partie des ouvrages souterrains (Figure 1) [2-3], activités de surface (travaux, bruits parasites divers, tirs de carrières)

ou origine naturelle (séismes naturels, orages et surtensions). La classification des formes d'ondes issues de ces différents phénomènes est un enjeu majeur dans un contexte où la quantité des données à analyser est souvent telle qu'une analyse manuelle n'est pas possible dans des délais compatibles avec l'alarme et l'alerte. Elle reste néanmoins peu développée car les outils de classification automatique existants dans d'autres domaines ne peuvent pas être directement appliqués aux données sismiques en raison de similarités des formes d'ondes (Figure 2). L'automatisation de la phase de classification des données en quasi temps réel et de manière fiable pour permettre à l'expert de concentrer son analyse sur les données réellement d'intérêt est donc un enjeu important.

Les méthodes d'apprentissage (*Machine Learning*) associées à l'Intelligence artificielle sont bien adaptées pour réaliser de la classification automatique d'informations [4]. Aussi, nous avons sélectionné et testé, sur la base des travaux de Jorge et al [5], trois types de réseaux neuronaux pour évaluer leur capacité à prédire, sans intervention humaine, 24h/24, l'origine des signaux microsismiques issus de travaux souterrains. Le cas d'application de l'ancien bassin minier de Gardanne, objet d'une microsismicité résiduelle de long terme, est utilisé car représentatif de la surveillance d'opérations industrielles sismogéniques en milieu souterrain.

Le jeu de données utilisé pour les opérations d'apprentissage et de validation du réseau neuronal contient 1200 « signaux » enregistrés à des dates diverses. Chaque signal est constitué d'un échantillonnage de 2048 valeurs (temporelles) sur 5 voies d'enregistrement.

Les signaux sont répartis selon 7 types différents (voir des exemples en Figure 2): 309 correspondent à des événements réels, 298 à des autotests, 303 à des bruits de surface, 52 à des bruits de forage, 46 à

des parasites, 38 à des tirs de carrière et 154 à des séismes naturels.

Les différents types de réseaux neuronaux testés ici sont les suivants:

- Réseau de neurones CNN à convolution 1D avec plusieurs couches (1 à 10 couches testées);
- Réseau de type Inception (CNN multiples et profonds);
- Réseau de type LSTM (*Long Short Term Memory Networks*).

Ces réseaux utilisent des assemblages de « modules » mathématiques de base (ex: Réseau convolutif 1D, Maxpool, ReLU, etc.) [6]. L'enjeu principal est de déterminer le meilleur assemblage de modules pour le problème à traiter. Il faut également retenir que chaque réseau s'appuie sur un certain nombre d'hyperparamètres qu'il convient d'optimiser afin d'obtenir le meilleur résultat possible.

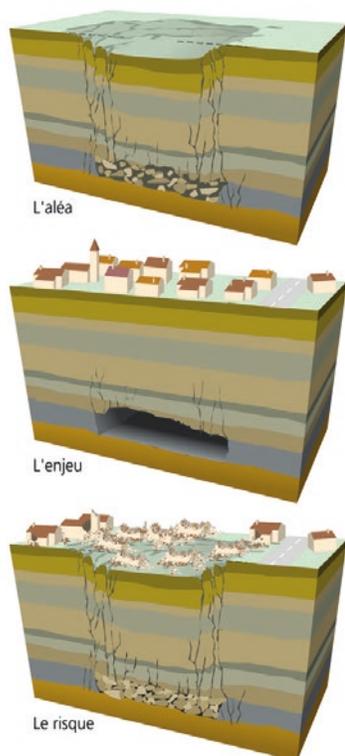
## PERFORMANCE DES DIFFÉRENTS RÉSEAUX

La Figure 3 illustre l'ensemble des résultats obtenus pour les différents réseaux neuronaux testés. Les trois principaux résultats à retenir des différents tests réalisés sont que:

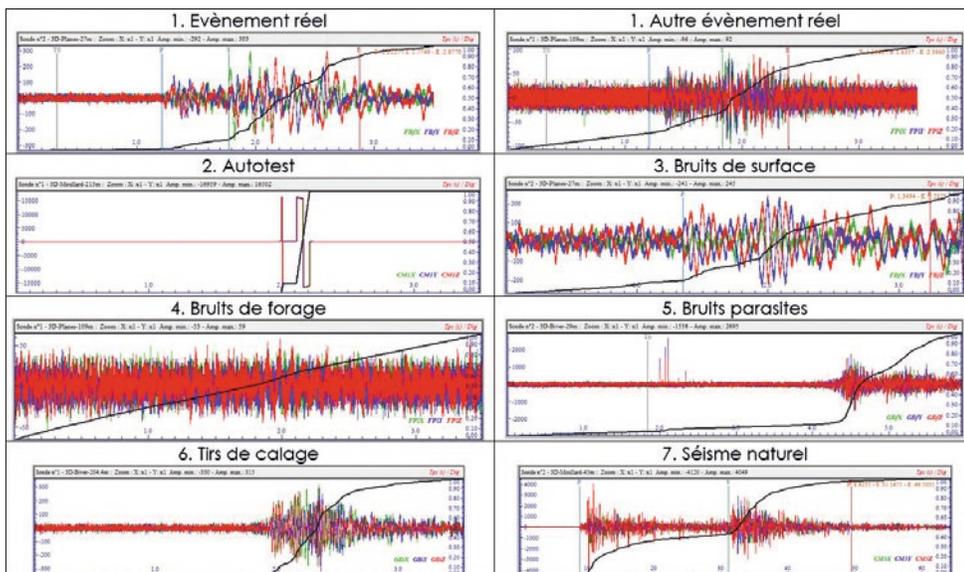
1. Le réseau de type CNN à 3 couches présente la meilleure précision moyenne (95 %) pour la classification mais sa valeur maximale n'est que de 97 %.
2. Les réseaux CNN à 6 et 8 couches peuvent atteindre en crête des précisions de 98 et 99 % mais leurs précisions sont « en moyenne » assez mauvaises (respectivement 71 et 65 %)!
3. Les résultats obtenus par les réseaux les plus performants sont assez encourageants (> 95 %) mais il faut retenir que chaque pourcentage compte car passer de 95 % à 97 % améliore de 40 % le résultat !

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux montrent que le *Machine Learning* est en mesure de prédire et classifier correctement la nature



**Figure 1**  
Effets potentiels d'une instabilité sur les enjeux de surface à surveiller à l'aide d'un dispositif de surveillance microsismique.

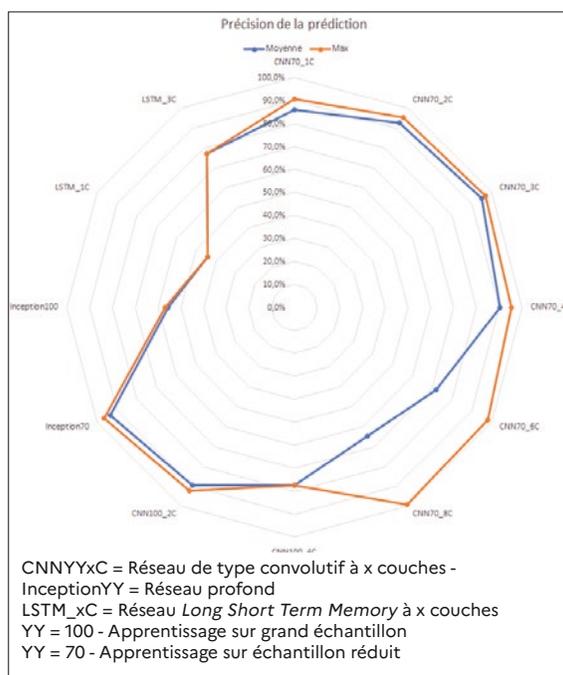


**Figure 2**  
Exemple d'illustration des 7 types de signaux à classer.

d'un signal microsismique avec pour certains réseaux près de 99 % de chance de succès.

Certes, la phase d'apprentissage du réseau neuronal doit être réitérée pour chaque nouveau site de surveillance, et réoptimisée périodiquement à la lueur des nouveaux signaux enregistrés; mais celle-ci ne nécessite que des moyens humains et matériels limités, dès lors que le meilleur modèle a été identifié et que ses hyperparamètres sont optimisés.

Cet outil pourrait ainsi être considéré à l'avenir comme une aide précieuse à la surveillance opérationnelle du centre Cenaris opéré par l'Ineris. D'autres applications sont également en cours d'évaluation, telles que la géolocalisation 3D automatique de la source des signaux ou l'anticipation des événements (temporellement et en positionnement relatif).



**Figure 3**  
Synthèse des performances des différents types de réseaux neuronaux testés.

## ABSTRACT

Nowadays microseismic monitoring is often used to monitor deep underground industrial operations (mines, reservoirs, geological storage, deep geothermal energy, among others) in order to detect precursors of seismic hazards and major geotechnical disorders. It is usually carried out by recording and analyzing seismic waveforms from surface or borehole stations covering the exploited area. Signals of interest are those related to seismic ruptures in the vicinity of the underground operations, but the stations also record mechanical vibrations from anthropic underground or surface activities and natural seismic events. All these signals need to be classified in a short time to enable the expert to quantify and analyze the relevant induced seismicity parameters. When seismic detection rate is high, automation of the data classification and qualification phase in near-real time becomes therefore an important issue. Ineris investigated the potential of Machine Learning methods in this domain: three types of neural networks (CNN, Inception and LSTM) were tested to evaluate their capacity to classify accurately, without human intervention, data from a microseismic network lying in an urbanized territory.

## Références

- [1] I. Contrucci et E Klein. (2017), État des connaissances concernant les aléas et les risques liés à la sismicité anthropique, rapport INERIS DRS-17-149681-07390D.
  - [2] I. Contrucci, E. Klein, P. Bigarré, A. Lizeur, A. Lomax, and M. Bennani (2010). Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems, *Pure and Applied Geophysics*, 167(1-2), 43-62.
  - [3] P. Bigarré, M. Bennani, I. Contrucci, E. Klein, H. Baroudi, R. Hadadou, I. Vuidart, and J. P. Josien (2011). Microseismic monitoring strategy as a key component of post-mining risk management: review and feedback experience on the past decade, paper presented at 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, « Harmonizing Rock Mechanics and the Environment », Beijing, China, 18 - 21 October 2011.
  - [4] A. Géron (2017). *Machine Learning avec TensorFlow/ avec Scikit-Learn – Mise en œuvre et cas concrets* Edition Dunod.
  - [5] J. L. Reyes-Ortiz, A. Ghio, L. Oneto, D. Anguita and X. Parra (2013). Human Activity Recognition on Smartphones Using a Multiclass Hardware-Friendly Support Vector Machine. *International Workshop on Ambient Assisted Living Tensorflow*. <https://www.tensorflow.org/>
  - [6] Burakhimmetoglu (2017). Time series classification with Tensorflow, on <https://burakhimmetoglu.com/2017/08/22/time-series-classification-with-tensorflow/>
- J. B. Kazmierczak, I. Contrucci, A. Lizeur, P. Bigarré, Application du Machine Learning à la surveillance microsismique en quasi temps réel d'opérations industrielles du sous-sol, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (2020), à Lyon.





# CARACTÉRISER LES DANGERS DES SUBSTANCES ET LEURS IMPACTS SUR L'HOMME ET LA BIODIVERSITÉ

L'Ineris organise des campagnes de mesure pour répondre aux questions encore ouvertes sur les risques associés aux substances chimiques d'intérêt émergent et leur impact sur la santé humaine et la biodiversité. Il évalue et met en œuvre notamment de nouveaux moyens de surveillance tels que des (micro)capteurs et des drones, des moyens déployables sur le terrain en situation de crise.

- 46** Entretien avec Valéria Dulio
- 47** Entretien avec Brice Berthelot
- 48** La **chémoinformatique** pour la sécurité des matériaux énergétiques et des matières réactives à l'Ineris
- 50** Effets du téléphone portable sur l'activité cardiaque : étude de la variabilité du rythme cardiaque chez de jeunes adultes en bonne santé
- 52** **SSH-aerosol** : un modèle open source pour simuler la chimie et l'évolution des aérosols
- 54** Présentation du programme **CARA** du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air
- 56** **Brown Carbon** : l'autre composante absorbante des particules de combustion de biomasse
- 58** Fusion de données de capteurs et de modélisation pour la cartographie de la qualité de l'air : faisabilité et valeur ajoutée
- 60** Évaluer l'exposition interne fœtale par modélisation pharmacocinétique physiologique (PBPK)
- 62** Pratiques et éthique autour des alternatives en expérimentation animale
- 64** Améliorer les tests de criblage des perturbateurs endocriniens à l'aide de poissons-zèbres (*Danio rerio*) génétiquement modifiés
- 66** Étude des effets directs et indirects du diclofénac en mésocosme lotique : vers une valorisation des données dans un cadre réglementaire
- 68** Entretien avec Cléo Tebby

## ENTRETIEN AVEC



**Valéria DULIO**

Chargée de mission Substances émergentes  
Direction Milieux et impacts sur le vivant

« Apporter davantage de visibilité à l’Ineris parmi les grands instituts européens, moteurs du développement de nouvelles stratégies pour l’amélioration de la qualité de notre environnement en matière de substances chimiques. »

**Pouvez-vous nous parler du réseau NORMAN et de l’initiative PARC ?  
Leurs objectifs sont-ils complémentaires ?**

NORMAN est un réseau indépendant qui repose sur la démarche volontaire de plus de 80 centres de recherche, agences et laboratoires experts dans le monde, engagés dans l’amélioration des connaissances en matière de risques émergents associés aux substances chimiques. PARC est un partenariat institutionnel liant les États membres et les agences sanitaires et environnementales de l’Union européenne. Son rôle est de renforcer la capacité européenne en matière d’évaluation des risques des substances chimiques. Les deux initiatives sont complémentaires. Des activités PARC comme le développement de nouvelles stratégies de surveillance et l’amélioration de la qualité des données évoluent de pair avec les projets NORMAN. Le réseau est en quelque sorte précurseur de l’initiative PARC sur le volet environnemental. Sur le volet humain, PARC s’inscrit dans la continuité du projet européen HBM4EU dont nous sommes également partenaires, avec un rôle majeur sur les outils d’interprétation des données issues de la biosurveillance.

**Vous êtes devenue *task leader* en 2020 de l’initiative PARC, en quoi cela consiste-t-il et quelle en est la plus-value pour l’Ineris ?**

La tâche dont je suis *leader* porte sur tous les projets PARC à venir, liés à la surveillance des substances chimiques dans l’environnement et aux produits de consommation.

Je coordonnerai un groupe de plusieurs instituts en collaboration avec Katrin Vorkamp de l’université d’Aarhus au Danemark. Être *task leader* apportera davantage de visibilité à l’Ineris parmi les grands instituts européens, moteurs du développement de nouvelles stratégies pour l’amélioration de la qualité de notre environnement en matière de substances chimiques. Mon rôle au sein de PARC est étroitement lié aux activités du réseau NORMAN dont les résultats sont pleinement reconnus par PARC.

**Quels seront les résultats de ces projets d’envergure ?**

On prévoit l’organisation de campagnes de mesures pour répondre aux questions encore ouvertes sur les risques des substances chimiques d’intérêt émergent et leur impact sur la santé humaine et la biodiversité. Cela sera possible grâce à l’application des techniques analytiques avec les approches « *non-target screening* », l’intelligence artificielle et le croisement avec les outils biologiques. Une attention particulière sera accordée à l’investigation des perturbateurs endocriniens, avec d’importantes synergies prévues en lien avec les actions de l’Ineris dans le cadre du deuxième volet de la stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens (SNPE2). Nous contribuerons aussi à de nombreuses autres activités de PARC telles que l’évaluation des expositions au cours de la vie par le moyen de modèles toxicocinétiques PBPK.

## ENTRETIEN AVEC



**Brice BERTHELOT**

Ingénieur étude et recherche en qualité de l'air  
Unité Caractérisation du milieu air  
en proximité de source (PROX)  
Direction Milieux et impacts sur le vivant

*« Renforcer notre leadership dans le domaine de la qualité de l'air et être en mesure d'offrir un appui technique et opérationnel aux pouvoirs publics en situation de crise. »*

### **Pouvez-vous nous parler du projet ANR-DESIHR sur lequel vous travaillez ?**

Le projet DESIHR vise à développer une méthode innovante permettant, lors d'un incendie, d'identifier et de caractériser les polluants industriels atmosphériques afin de développer des cartographies prédictives de propagation des substances dangereuses qui pourraient contaminer les milieux. À travers ce projet, l'idée est d'utiliser une flotte de drones capables, sur la base de données issues de capteurs de qualité de l'air embarqués, d'adapter leurs plans de vols selon les informations acquises par chacun d'eux afin, d'une part, de réaliser des prélèvements qui seront analysés *a posteriori* en laboratoire et, d'autre part, d'acquérir depuis l'extérieur du panache des prises de vues qui permettront de déterminer différents paramètres utiles à la modélisation de ce dernier.

### **De quelle manière vous et votre équipe à l'Ineris utilisez-vous ces nouveaux dispositifs ? Et dans quel but ?**

L'intégration dans DESIHR de nouveaux moyens de surveillance tels que les (micro)capteurs et les drones vise à fournir en situation réelle de crise des moyens d'intervention déployables sur le terrain. Si l'analyse des prélèvements peut permettre d'améliorer les connaissances sur les émissions, les données temps réel pourront également servir à des fins de cartographie prédictive de propagation des substances dangereuses. Cette action s'inscrit ainsi dans la lignée des nombreuses initiatives du contrat d'objectifs

et de performance de l'Institut, aussi bien pour renforcer son leadership dans le domaine de la qualité de l'air que pour être en mesure d'offrir un appui technique et opérationnel aux pouvoirs publics en situation de crise.

### **Quels sont les résultats du projet ?**

Les partenaires peuvent déjà se prévaloir d'avoir mené en 2020 trois expérimentations portant sur (a) le vol en totale autonomie (sans pilote) de drones, (b) les prélèvements (gazeux et particulaires) par un drone dans un environnement complexe avec caractérisations des substances en laboratoire, (c) l'intégration de microcapteurs temps réel de la qualité de l'air. En aidant à identifier les verrous technologiques du projet, ces expérimentations ont permis d'initier des travaux qui, à court terme, serviront à améliorer la gestion des situations post-accidentelles. Les solutions développées pourront être proposées à des exploitants de sites Seveso ou d'entrepôts pour répondre à leurs obligations réglementaires, ou à des acteurs de la crise (SDIS, CASU).

# La chémoinformatique pour la sécurité des matériaux énergétiques et des matières réactives à l'Ineris

## AUTEURS



Patricia  
ROTUREAU



Guillaume  
FAYET

Avec des décennies d'expérience, l'Ineris est reconnu comme expert international dans la caractérisation expérimentale des dangers des matériaux énergétiques et des matières réactives, et des risques associés à leur mise en œuvre, de l'échelle du laboratoire jusqu'à échelle réelle.

Profitant de l'amélioration des capacités informatiques et des méthodes théoriques et encouragées par le contexte réglementaire de REACH, de nouvelles recherches ont été engagées à l'Ineris depuis 2007 pour le développement et l'utilisation de méthodes prédictives chémoinformatiques et de chimie théorique [1] afin de compléter l'approche expérimentale concernant: 1) la prédiction des dangers physiques des substances et des mélanges et 2) l'étude théorique des réactions chimiques dangereuses.

### RELATIONS QUANTITATIVES STRUCTURE-ACTIVITÉ/ PROPRIÉTÉ (QSAR/QSPR)

Parmi ces méthodes prédictives, l'Ineris s'intéresse aux modèles QSPR très peu développés pour les dangers physiques en comparaison des modèles QSAR utilisés pour l'(éco)toxicologie. Cette approche consiste à corréler une propriété expérimentale avec des descripteurs moléculaires, sur l'hypothèse que des composés ayant des structures moléculaires similaires présentent des propriétés similaires.

Le développement d'un tel modèle nécessite une base de données expérimentales aussi large, précise et homogène que possible. Face au nombre limité de bases de données existantes, des campagnes expérimentales dédiées ont été spécifiquement menées.

### DES COMPOSÉS NITROS AUX MÉLANGES INFLAMMABLES

L'Ineris a développé des modèles QSPR pour les dangers physiques de différentes substances chimiques telles que les composés nitrés,

$$-\Delta H/C = -663 n_{OO} - 699 n_{OOH} - 4.79 OB + 11 n_{single} - 2036$$

avec C la concentration en peroxyde organique,  $n_{OO}$  et  $n_{OOH}$  les nombres de liaisons peroxyde et hydroperoxyde, OB la balance en oxygène et  $n_{single}$  le nombre de liaisons simples.

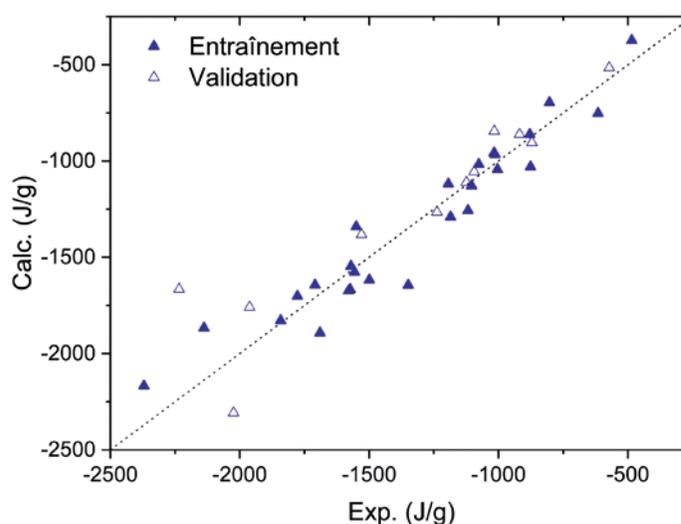


Figure 1  
Modèle QSPR pour la prédiction de la chaleur de décomposition de peroxydes organiques.

les peroxydes organiques ou les matières autoréactives.

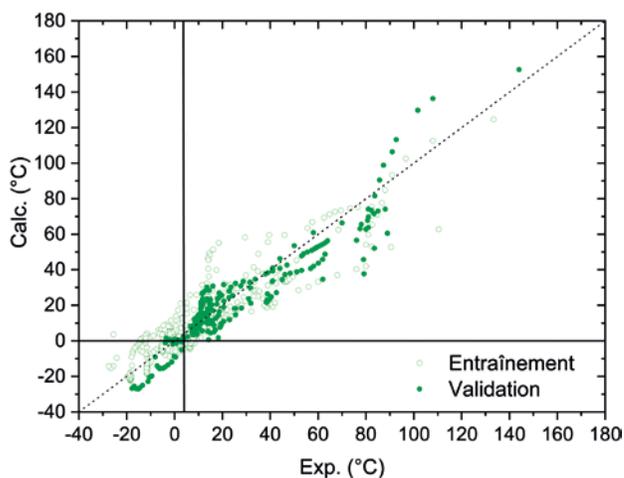
Dans le cadre du projet cofinancé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) PREDIMOL, des campagnes expérimentales ont été réalisées pour constituer une base de données permettant de développer différents modèles prédictifs pour la stabilité thermique des peroxydes organiques (comme la chaleur de décomposition  $-\Delta H$  [2] en Figure 1). Ce modèle est satisfaisant d'un point de vue statistique et pratique car utilisable à partir de descripteurs constitutionnels simples. Il est de plus interprétable avec des descripteurs chimiquement pertinents, car liés aux liaisons peroxy, dont la rupture homolytique est critique dans la décomposition des peroxydes organiques.

Récemment, des modèles dédiés aux mélanges inflammables ont même été obtenus [3] (voir Figure 2) alors que les modèles existants restent encore majoritairement limités aux produits purs.

### FAVORISER L'UTILISATION ROBUSTE DES MODÈLES QSPR POUR LA SÉCURITÉ DES SUBSTANCES

Dans la perspective de l'utilisation des prédictions QSPR dans un contexte réglementaire, ces modèles ont été développés selon les cinq principes de validation de l'OCDE [4]. Mais ces principes ne garantissent pas que toutes les prédictions issues des modèles sont fiables puisque la pertinence d'une prédiction dépend du contexte dans lequel elle est utilisée. Ainsi, d'autres recommandations sont à considérer pour une utilisation robuste des modèles QSPR, comme montré en Figure 3.

Pour encourager ces bonnes pratiques, des modèles développés par l'Ineris ont été implémentés dans des plateformes publiques de prédiction reconnues (QSAR Toolbox de l'OCDE/ECHA et base QsarDB) jusque-là davantage focalisées sur les propriétés relatives à l'(éco)toxicologie. L'Ineris s'est également engagé



**Figure 2**  
Prédiction du point d'éclair de mélanges par modèle QSPR.

dans la diffusion des bonnes pratiques de développement et d'utilisation des modèles QSPR via des formations à destination des industriels et des régulateurs.

Au-delà de l'utilisation réglementaire, ces méthodes prédictives permettent d'anticiper les dangers physiques au plus tôt dans le développement de nouvelles substances dans une logique *safer-by-design*, grâce à de premières estimations des dangers physiques permettant d'éliminer au plus tôt des molécules candidates présentant des potentiels de danger trop importants.

### PERSPECTIVES

Si ces méthodes prédictives représentent maintenant des outils complémentaires aux tests expérimentaux pour la maîtrise des risques industriels, des challenges demeurent :

- peu de modèles ont été développés pour les dangers physiques (aucun pour les

propriétés comburantes ou la corrosivité des métaux), avec des modèles existants restant limités aux familles de composés les plus courantes et ne couvrant pas la diversité des composés explorés dans les recherches actuelles (matériaux énergétiques à haute teneur en azote ou sels énergétiques);

- le développement de modèles pour les mélanges n'en est qu'à ses débuts avec des questions sur l'adéquation des méthodes de validation pour les mélanges et, pour les matériaux énergétiques, la difficulté de prise en compte de mélanges solides (non homogènes en comparaison des liquides ou gaz inflammables).

Dans cette perspective, la consolidation de bases de données étendues et fiables représente un enjeu clé et un véritable moteur pour l'amélioration des modèles et l'extension de leurs champs d'application.

## ABSTRACT

The characterization of physical hazards is a key information to manage the risks associated to their use, storage and transport. With decades of work in this field, Ineris develops and implements cutting-edge experimental facilities allowing such characterizations at different scales and under various conditions.

More recently, efforts were engaged in the field of chemoinformatics to develop and use new complementary predictive methods and models to anticipate and manage industrial risks associated to energetic and reactive materials. Quantitative Structure-Property Relationships (QSPR) were built for different physical hazards, from the explosivity of nitro compounds to the flammability of organic mixtures.

Despite remaining challenges and perspectives to extend their application in the field of safety of energetic and reactive substances, chemoinformatic methods already present a great potential in terms of *in silico design* and for the development of new intrinsically safer molecules. Ineris engaged also efforts in the promotion of good practices for robust use of QSPR models, notably for regulatory purpose through dissemination and training activities.

#### Principes de validation de l'OCDE

1. Une propriété définie
2. Un algorithme non-ambigu
3. Un domaine d'applicabilité défini
4. Des mesures appropriées de la corrélation, de la robustesse et du pouvoir prédictif du modèle
5. Une interprétation des mécanismes sous-jacents, si possible

#### Application robuste d'un modèle validé

1. Choix du modèle
2. Application correcte du modèle
3. Vérification du domaine d'applicabilité
4. Analyse des analogues structuraux
5. Analyse de l'adéquation de la prédiction

**Figure 3**

De la validation d'un modèle QSPR à son utilisation robuste.

#### Références

- [1] G. Fayet, P. Rotureau, Chemoinformatics for the Safety of Energetic and Reactive Materials at Ineris, Molecular informatics, 2020, 39, 2000190.
- [2] V. Prana, P. Rotureau, D. André, G. Fayet, C. Adamo, Development of Simple QSPR Models for the Prediction of the Heat of Decomposition of Organic Peroxides, Molecular Informatics, 2017, 36, 1700024.
- [3] G. Fayet, P. Rotureau, New QSPR Models to Predict the Flammability of Binary Liquid Mixtures, Molecular Informatics, 2019, 38, 1800122.
- [4] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Guidance Document on the validation of (quantitative) structure-activity relationships [(Q)SAR] models, 2007.

# Effets du téléphone portable sur l'activité cardiaque: étude de la variabilité du rythme cardiaque chez de jeunes adultes en bonne santé

**AUTEUR**



Brahim SELMAOUI<sup>1,2</sup>

**Collaborateurs:**

- Jasmina WALLACE<sup>1,2</sup>
- Soafara ANDRIANOME<sup>1,2</sup>
- Rania GHOSN<sup>1,2</sup>
- Erwan Stephan BLANCHARD<sup>2</sup>
- Frederic TELLIEZ<sup>2</sup>

Les téléphones mobiles représentent maintenant près de 7 milliards d'abonnements actifs dans le monde, selon l'Organisation internationale des télécommunications [1]. Compte tenu de ce grand nombre d'utilisateurs, la question de savoir si une exposition de faible niveau au champ électromagnétique (CEM) de radiofréquence (RF) provenant des téléphones mobiles affecte la santé humaine a naturellement émergé. Dans ce cadre, les connaissances sont encore limitées sur les effets des RF liées aux téléphones portables sur le système nerveux autonome (SNA) qui contribue de façon significative au maintien de l'homéostasie du corps. L'action régulatrice du SNA sur les fonctions respiratoires, cardiovasculaires, digestives, endocriniennes et bien d'autres systèmes est contrôlée par un certain nombre de structures localisées dans le système nerveux central [2]. En effet, certains des plus importants centres d'intégration pour le fonctionnement du SNA sont situés dans le tronc cérébral et le réseau autonome central, dans les régions cérébrales et cérébelleuses (Figure 1).

L'objectif de la présente étude était d'analyser dans des conditions d'utilisation réelles, l'influence chez des sujets sains, au repos en position détendue, d'une exposition à court terme à un téléphone mobile GSM 900 MHz sur les paramètres de la variabilité du rythme cardiaque (VRC), évalués dans le domaine temporel et le domaine fréquentiel<sup>3</sup>.

Plusieurs paramètres ont été étudiés:

**Domaine temporel**

- RR moyen: la moyenne des intervalles entre les pics R successifs de deux battements;
- SDNN: l'écart-type des différences entre les intervalles NN consécutifs normaux à normaux;
- RMSSD: la moyenne quadratique<sup>4</sup> d'intervalles RR successifs;
- pNN50: le pourcentage d'intervalles NN adjacents qui diffèrent entre eux de plus de 50 ms.

**Domaine fréquentiel**

- Total Power: puissance totale;
- LF ou LF Power: la puissance spectrale absolue de la bande de basse fréquence;
- HF ou HF Power: la puissance spectrale absolue de la bande de haute fréquence;
- LF/HF: le rapport LF/HF.

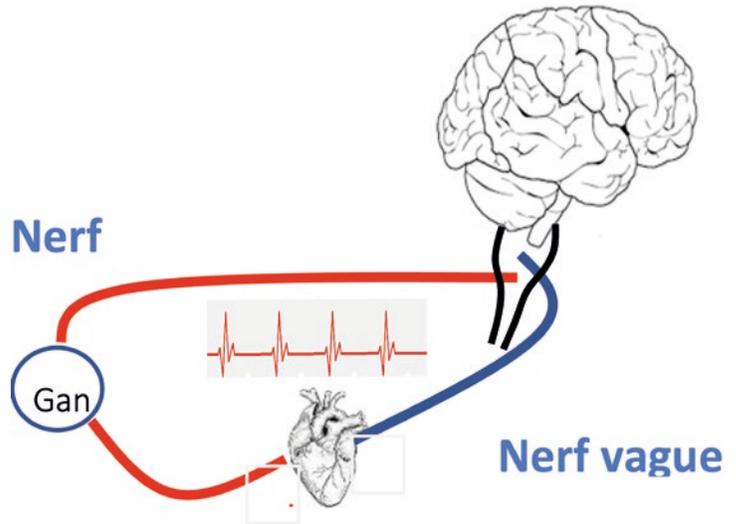


Figure 1  
Contrôle du rythme cardiaque par le système.

**Notes**

- 1- Unité de toxicologie expérimentale et modélisation, Ineris.
- 2- Laboratoire PeriTox, UMR-I 01 INERIS, université de Picardie Jules-Verne.
- 3- La variabilité de la fréquence cardiaque est étudiée par deux méthodes d'analyse, basées sur le temps ou la fréquence. L'analyse basée sur le temps utilise une méthode géométrique ou statistique pour étudier la fluctuation cyclique des intervalles R-R et la déviation standard des intervalles R-R normalisés successifs (SDNN). L'analyse basée sur la fréquence mesure la fluctuation cyclique des intervalles R-R en effectuant une analyse spectrale par transformée de Fourier.
- 4- Racine carrée de la moyenne du carré des différences.
- 5- Exposition Fictive ou « Sham »: exposition dans les mêmes conditions que l'exposition réelle (environnement, présence de matériel d'exposition...) mais sans présence de champs électromagnétiques.

## PARTICIPANTS ET MÉTHODES

Cette étude a été réalisée sur des volontaires sains et jeunes. Les critères d'inclusion comprenaient des habitudes de sommeil régulières, l'absence de prise de médicaments, de maladie chronique ou de maladie aiguë récente, de tabagisme, et de maladie neurologique ou psychiatrique. Nous avons également exclu les participants ayant des antécédents de maladies cardiovasculaires ou neurologiques. Les volontaires ont participé à deux sessions d'enregistrement de l'électrocardiogramme (l'ECG) dans le cadre d'une étude croisée randomisée, en double aveugle et contrebalancée. La fréquence cardiaque (FC) a été enregistrée avec un BIOPAC MP150. L'enregistrement de l'ECG a été réalisé en six blocs de 3 minutes chacun, les yeux fermés ou ouverts, afin de tenir compte d'une éventuelle interaction avec l'activité corticale. L'exposition aux RF a été effectuée par un téléphone mobile GSM bi-bande commercial (Nokia 6650) utilisé dans nos études précédentes [3-4].

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

En comparant l'exposition réelle et l'exposition fictive<sup>5</sup> aux RF, l'analyse statistique des données a révélé que

la plupart des paramètres de la VRC n'ont pas été modifiés. Cependant, le SDNN, la puissance spectrale totale (Total Power) et la puissance spectrale absolue de la basse fréquence (LF) étaient significativement plus élevés pendant l'exposition aux RF.

L'augmentation du SDNN que nous avons constatée après une exposition aux RF pourrait suggérer une activité parasympathique plus élevée sur la FC. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'autre modification statistiquement significative des paramètres du domaine temporel, tels que RMSSD et pNN50, qui sont tous les deux plus étroitement corrélés à l'action vagale sur la FC.

De même, en considérant les résultats de la VRC, analysés dans le domaine fréquentiel, nous avons également constaté que la puissance totale et la puissance LF absolue étaient significativement augmentées pendant l'exposition.

Dans l'ensemble, ce résultat du SDNN dans le domaine temporel<sup>3</sup>, et des puissances absolues totales et LF dans le domaine fréquentiel, pourrait suggérer des changements dans l'équilibre autonome, avec une augmentation de l'activité vagale pendant l'exposition aux RF, liés aux téléphones mobiles. D'autres études sont nécessaires pour affirmer ou infirmer nos résultats.

## ABSTRACT

The objective of this work was to investigate whether cell phone radio frequencies (RF) affect cardiac activity and specifically heart rate variability (HRV). Assessment of time-domain HRV parameters revealed a statistically significant increase in the standard deviation of beat-to-beat intervals (SDNN) during actual exposure. Other time-domain parameters were not affected. The frequency domain analysis showed that the total spectral power and the absolute power of the low frequency (LF) band were significantly increased during exposure ( $p = 0.046$  and  $p = 0.043$ , respectively). However, the other parameters were not affected. In conclusion, most HRV parameters were not affected by exposure to the GSM signal according to the study carried out by Ineris. However, further studies are needed to confirm or refute the observed effects on the frequency domain of HRV.

	SHAM RF-EMF EXPOSURE		REAL RF-EMF EXPOSURE		EXPOSURE EFFECT	EYES CONDITION EFFECT
	Open eyes	Closed eyes	Open eyes	Closed eyes		
SDNN (ms)	53 ± 18	64 ± 25	59 ± 25	71 ± 32	$F_{1,30} = 5.6;$ $p = 0.024$	$F_{1,30} = 23.7;$ $p < 0.001$
Total power (ms2)	2887 ± 2214	3948 ± 3189	3762 ± 4333	5126 ± 5015	$F_{1,30} = 4.3;$ $p = 0.046$	$F_{1,30} = 7.4;$ $p < 0.011$
LF (ms2)	1264 ± 1213	1561 ± 1589	1689 ± 2562	2526 ± 3425	$F_{1,30} = 4.5;$ $p = 0.043$	NS

Tableau 1

Résultats extraits des tableaux de valeurs de l'article : Heart rate variability in healthy young adults exposed to global system for mobile communication (GSM) 900-MHz radiofrequency signal from mobile phones: Wallace et al., 2020, Environment Research.

## Références

- [1] ITU International Telecommunication Union. Fixed- and Mobile-Telephone Subscriptions, vol. 2019, International Telecommunication Union (2019).
  - [2] W. Jänig. Integrative Action of the Autonomic Nervous System: Neurobiology of Homeostasis. Cambridge University Press, Cambridge, UK (2008).
  - [3] R. Ghosn, G. Thuroczy, N. Loos, V. Brenet-Dufour, S. Liabeuf, R. de Seze, B. Selmaoui. Effects of GSM 900 MHz on middle cerebral artery blood flow assessed by transcranial Doppler sonography. Radiat. Res., 178 (2012), pp. 543-550.
  - [4] R. Ghosn, L. Yahia-Cherif, L. Hugueville, A. Ducorps, J.D. Lemarechal, G. Thuroczy, R. de Seze, B. Selmaoui. Radiofrequency signal affects alpha band in resting electroencephalogram. J. Neurophysiol., 113 (2015), pp. 2753-2759.
- B. Selmaoui, J. Wallace, S. Andrianome, R. Ghosn, E. S. Blanchard, F. Telliez, Heart rate variability in healthy young adults exposed to global system for mobile communication (GSM) 900-MHz radiofrequency signal from mobile phones, Environmental Research, (2020) 191 : art. 110097.

# SSH-aerosol: un modèle open source pour simuler la chimie et l'évolution des aérosols

## AUTEUR



Florian  
COUVIDAT

## Collaborateurs:

Karine SARTELET [1]  
Youngseob KIM [1]

Les aérosols sont des particules liquides ou solides en suspension dans l'air. De nombreuses études ont démontré leurs impacts sur l'environnement (par exemple sur le changement climatique) et sur la santé. En 2020, l'Agence européenne de l'environnement (AEE) a estimé que l'exposition aux PM<sub>2,5</sub> (particules ayant un diamètre inférieur à 2,5 µm) est responsable de 417 000 décès prématurés en Europe.

On distingue les particules primaires (émises directement dans l'atmosphère) des particules secondaires formées à partir de composés gazeux. Pour comprendre la formation des aérosols atmosphériques et ainsi comprendre comment réduire leur concentration, il est nécessaire de développer des modèles de formation et d'évolution des particules. Cependant, les phénomènes microphysiques impliqués dans la formation des particules sont souvent complexes. Les principaux processus sont: la nucléation (création de nouvelles particules), la condensation/évaporation de composés dits

semi-volatils (composés organiques et inorganiques existant à la fois dans la phase gazeuse et la phase particulaire en fonction des conditions environnementales) et la coagulation (collision de deux particules qui en formeront une plus grosse). La formation des aérosols fait aussi intervenir des processus chimiques; en effet, certaines réactions peuvent mener à la formation de composés semi-volatils par oxydation de certains précurseurs tels que les oxydes d'azote et les composés organiques volatils. L'ensemble de ces processus est schématisé par la **Figure 1**.

Les processus impliqués dans la formation des aérosols sont complexes et variés et la connaissance scientifique évolue très rapidement. Pour simuler la formation d'aérosols, des modèles numériques pouvant prendre en compte l'ensemble de la complexité de ces processus physico-chimiques sont développés. L'Ineris et le CERECA [1] ont développé en collaboration un module de simulation d'aérosols destiné à être implanté dans les modèles de qualité de l'air ou à être utilisé par des expérimentateurs. Ce modèle

baptisé SSH-aerosol [2] est distribué en open source sur GitHub [3]. La structure du modèle est modulaire: l'utilisateur peut choisir différentes options (briques) pour trouver un compromis entre complexité des processus et temps de calcul (le coût en temps de calcul pouvant limiter très fortement certaines applications opérationnelles).

SSH-aerosol est basé sur la jonction de trois modèles séparés (la première lettre de chacun des modèles représente une des lettres de l'acronyme « SSH »):

- SCRAM [4] discrétise la distribution d'aérosols en taille et en composition et calcule l'évolution temporelle des concentrations en masse, en nombre (ce qui est pertinent pour les particules ultrafines) et l'état de mélange des particules (différence de composition entre particules de même taille). Il simule la microphysique (coagulation, condensation / évaporation et nucléation);
- SOAP [5] est un modèle de thermodynamique qui calcule le partage gaz/particule des

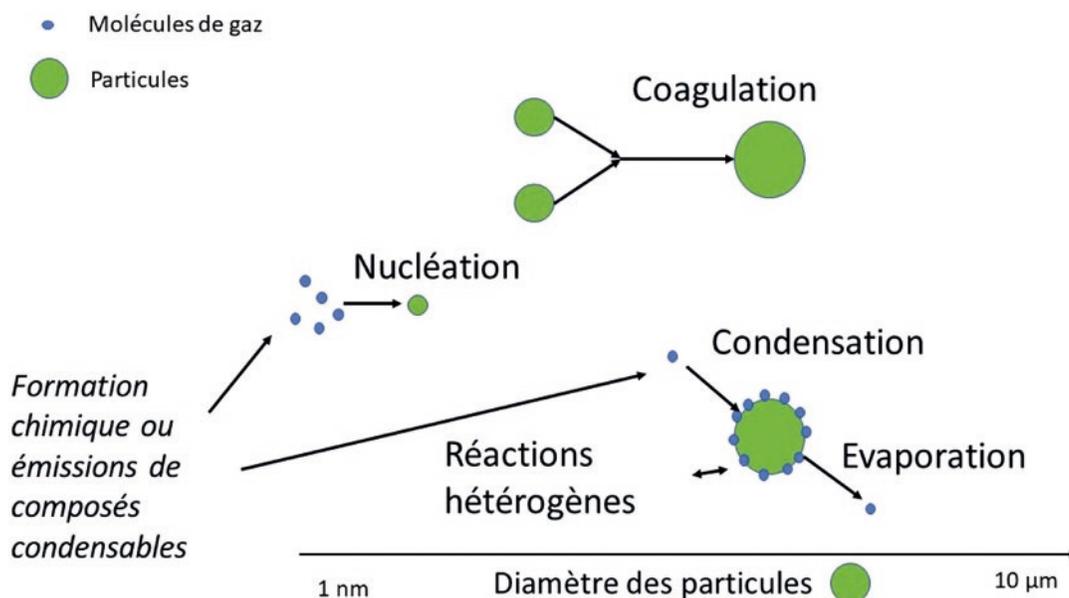
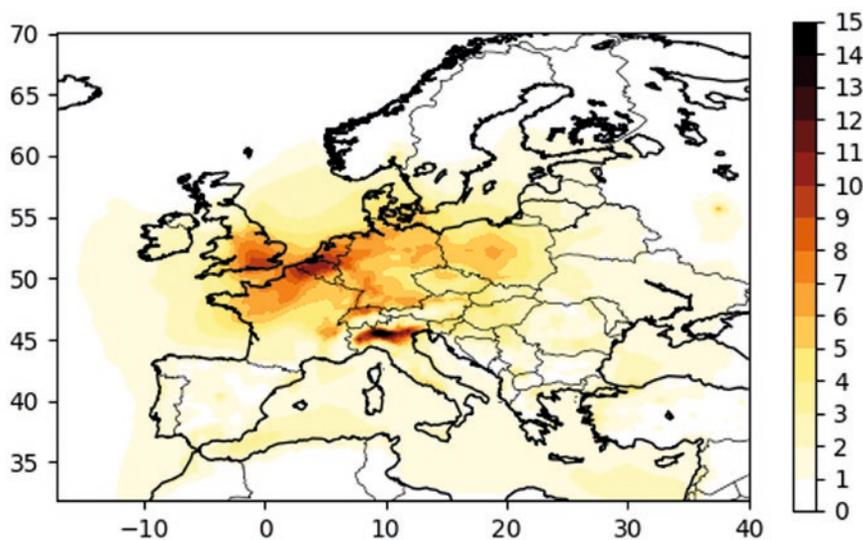


Figure 1

Schéma des processus impliqués dans la formation des particules atmosphériques secondaires.



**Figure 2** Concentrations de particules de nitrate (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) simulées par CHIMERE couplé à SSH-aerosol sur le mois de mars 2016.

composés organiques. Il prend en compte plusieurs processus intervenant dans la formation d'un aérosol organique : hygroscopicité (absorption d'eau par les aérosols), absorption dans les phases aqueuses ou organiques de particules, la non-idéalité (effet de la composition des particules sur l'absorption de composés), séparation de phases, effet de la viscosité, etc. ;

- $\text{H}_2\text{O}$  [6] simule le mécanisme *Hydrophilic / Hydrophobic Organics* et utilise une approche de composés suppléants pour représenter la formation d'une myriade de composés organiques semi-volatils formés par l'oxydation dans l'atmosphère de composés organiques volatils.

formation des aérosols. À l'heure actuelle, c'est le seul modèle de ce type permettant de représenter à la fois la masse, le nombre, l'état de mélange des aérosols, l'effet de la viscosité et la non-idéalité des aérosols. SSH-aerosol a actuellement été implémenté dans les modèles de qualité de l'air CHIMERE, Polyphemus, MUNICH et Code Saturne. Plusieurs projets de couplage de SSH-aerosol à d'autres modèles sont en cours. La **Figure 2** illustre un exemple de résultats obtenus par CHIMERE couplé à SSH-aerosol. Une thèse en partenariat entre l'Ineris et l'ENPC est en cours sur le développement de nouveaux mécanismes de formation d'aérosols organiques secondaires (formés par réaction chimique dans l'atmosphère) pour SSH-aerosol.

Grâce à la mise en commun de ces modèles, SSH-aerosol est un modèle représentant l'état de l'art de la

## ABSTRACT

Numerous physical and chemical processes are involved in the formation of atmospheric particles. Despite the large impact of aerosol on health and climate, large uncertainties remain concerning their representation in numerical models. Ineris and the CEREAs have collaborated to create a new best state-of-the-art aerosol model: SSH-aerosol. This model aims at representing all the processes involved in the formation and the evolution of particles. SSH-aerosol was therefore developed to represent the evolution of the mass and number concentrations of primary and secondary particles, across different scales (from the local scale to the global scale) by taking into account processes that are usually not considered in simplified air-quality or climate modelling. SSH-aerosol is modular and can be used with different levels of complexity. It is designed to be used by both modelers and experimenters. It is also designed to be easily coupled to 3D models, adapting the level of complexity to the spatial scale studied. SSH-aerosol is an open-source model distributed on GitHub.

## Références

- [1] Centre d'études et recherche en environnement atmosphérique, laboratoire commun École des Ponts Paristech/EDF
- [2] K. Sartelet, F. Couvidat, Z. Wang, C. Flageul, Y. Kim. SSH-Aerosol v1.1: A Modular Box Model to Simulate the Evolution of Primary and Secondary Aerosols. *Atmosphere*. 2020; 11(5):525. <https://doi.org/10.3390/atmos11050525>.
- [3] <https://github.com/sshaerosol/ssh-aerosol>
- [4] S. Zhu, K. Sartelet, C. Seigneur (2015). A size-composition resolved aerosol model for simulating the dynamics of externally mixed particles: SCRAM (v 1.0) *Geosci. Model Dev.*, 8, 1595-1612.
- [5] F. Couvidat and K. Sartelet (2015). The Secondary Organic Aerosol Processor (SOAP) model: a unified model with different ranges of complexity based on the molecular surrogate approach. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1111-1138.
- [6] F. Couvidat, E. Debry, K.N. Sartelet, and C. Seigneur (2012). A hydrophilic/hydrophobic organic ( $\text{H}_2\text{O}$ ) aerosol model: Development, evaluation and sensitivity analysis. *J. Geophys. Res.*, 117, D10304, doi:10.1029/2011JD017214.

# Présentation du programme CARA

## du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air

AUTEUR



Olivier FAVEZ

Dans le cadre de ses missions pour le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), l'Ineris a mis en place et coordonne depuis 2008 un dispositif opérationnel destiné à l'observation *in situ* de la composition chimique et des sources de particules (PM) en milieu urbain (le programme CARA [1]), avec notamment pour objectifs de :

- documenter la composition chimique et l'origine des particules lors d'épisodes de pollution particulaire de large échelle;
- réaliser des études de sources à long terme ( $\geq 1$  an) dans plusieurs grandes agglomérations françaises;
- produire des bases de données utiles pour la validation des modèles de chimie-transport;
- initier et/ou appuyer d'autres activités de recherche pour approfondir les connaissances fondamentales en matière de qualité de l'air.

### MÉTHODOLOGIES

Ce programme repose notamment sur l'application de procédures rigoureuses d'assurance et de contrôle qualité des données, comprenant notamment l'organisation d'exercices de comparaison interlaboratoires (CIL) pour les principales techniques de mesure mises en œuvre (Figure 1).

Initialement basé sur l'analyse en laboratoire d'échantillons (filtres) prélevés par les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), le programme CARA s'appuie désormais également sur des analyseurs automatiques. Ces mesures à haute résolution temporelle aident à mieux comprendre, en temps quasi réel, les principales sources d'émissions liées aux activités humaines (Figure 2), l'influence des processus secondaires, et/ou les origines géographiques des épisodes de pollution particulaire. Elles permettent également d'appréhender ces phénomènes sur le long terme, apportant des informations nécessaires à l'élaboration et l'évaluation de plans d'action efficaces pour la réduction des émissions.

### PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les résultats obtenus depuis une dizaine d'années soulignent notamment l'influence prédominante (a) du chauffage résidentiel au bois en hiver, et (b) des émissions des véhicules (à l'échappement et hors échappement) sur la qualité de l'air des grandes agglomérations françaises [2]. Ils illustrent également l'importance de sources additionnelles au niveau local (comme les émissions liées au transport maritime et aux activités industrielles à Marseille) ou pendant certaines périodes critiques de l'année (par exemple, les émissions d'ammoniac dues aux activités agricoles à la fin de l'hiver et au début du printemps). [1]

De récents travaux ont également mis en évidence la contribution non négligeable des particules primaires biogéniques (e.g., débris de plantes, spores, etc.) en particulier en été [2], ainsi que l'impact majeur des poussières sahariennes sur les dépassements des valeurs limites de  $PM_{10}$  dans les Antilles françaises (Figure 3) [3]. En outre, des travaux ont été entrepris pour approfondir nos connaissances sur l'origine des espèces secondaires, notamment en utilisant de nouveaux marqueurs moléculaires organiques. [4]

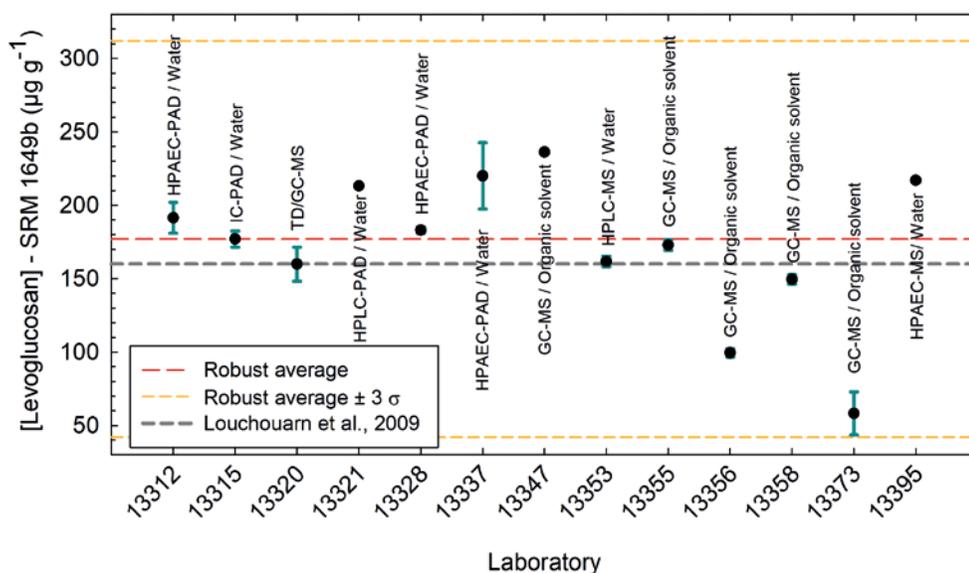
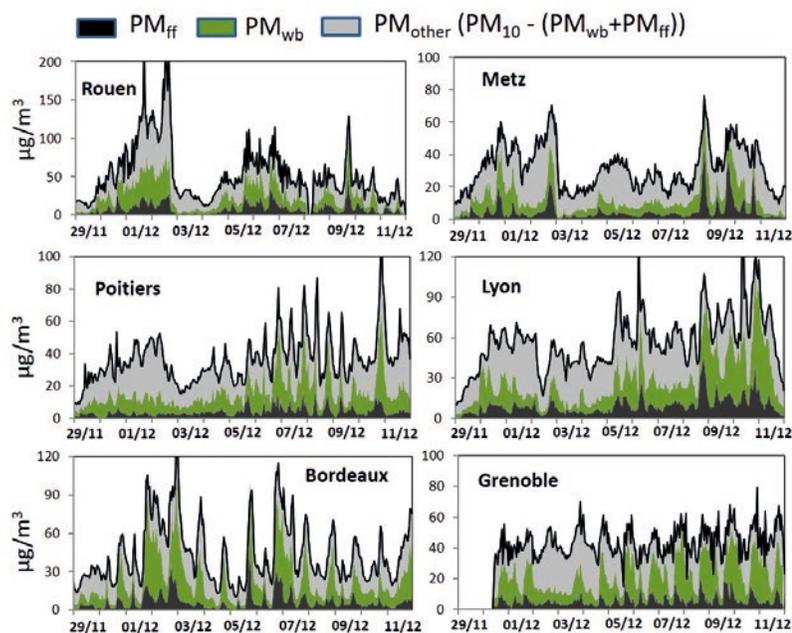


Figure 1

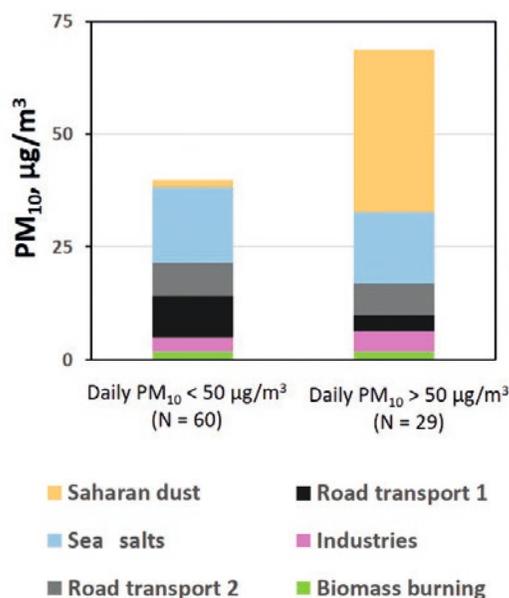
Exemple de résultats d'exercices de comparaison interlaboratoire réalisés dans le cadre du programme CARA : répartition des valeurs de concentration de lévoglucosan obtenues pour l'analyse d'un matériau de référence représentatif des poussières urbaines (SRM 1649b du NIST) parmi 13 participants (numéros d'identification arbitraires) et diverses méthodes d'analyse.



**Figure 2** Suivi de la contribution aux  $PM_{10}$  des émissions liées à la combustion d'hydrocarbure ( $PM_{ff}$ ) et de biomasse ( $PM_{wb}$ ) sur six sites du programme CARA pendant l'épisode de pollution de décembre 2016.

## PERSPECTIVES

Afin d'affiner la connaissance des sources d'émission et des processus de formation, le parc instrumental utilisé sur les stations du programme CARA est actuellement complété par des systèmes de mesure des particules ultrafines et de certains précurseurs gazeux des aérosols secondaires (en particulier l'ammoniac). Il convient également d'envisager des mesures à haute résolution temporelle d'un large éventail de métaux lourds, permettant notamment le suivi des émissions véhiculaires hors échappement (e.g., abrasion des freins et des pneus). L'ensemble des échantillons et des données collectés dans le cadre du programme CARA sont disponibles pour des études complémentaires, telles que la caractérisation de polluants émergents (e.g., microplastiques) ou l'analyse des liens entre les sources de PM et leur potentiel oxydant [5]. Les mesures automatiques pourront également servir de base à la réalisation d'études à long terme, notamment des analyses de tendances et des études épidémiologiques.



**Figure 3** Contributions des six principales sources de  $PM_{10}$  identifiées pour une station trafic de Fort-de-France (Renéville), en dehors et pendant des périodes de dépassement du seuil journalier de  $PM_{10}$  en 2018.

## ABSTRACT

The CARA program has been developed since 2008 by the French reference laboratory for air quality monitoring (LCSQA) and the regional air quality monitoring networks to gain a better knowledge on the particulate matter (PM) chemistry and its diverse origins in French urban environments. Here, we illustrate some of the main outputs obtained over the last decade thanks to this program, regarding methodological aspects as well as acquired knowledge on the predominant PM sources. Overall, these results underline the major influences of residential wood burning (during the cold period) and road transport emissions (exhaust and non-exhaust ones, all along the year), as well as substantial contributions of mineral dust and primary biogenic particles (mostly during the warm period). Long-range transport phenomena, e.g., advection of secondary inorganic aerosols from the European continental sector and of Saharan dust into the French West Indies, are also discussed in this paper. Finally, we briefly address the use of stable isotope measurements ( $\delta^{15}N$ ) and of various organic molecular markers for a better understanding of the origins of ammonium and of the different organic aerosol fractions, respectively.

## Références

- [1] Favez et al. (2021): Overview of the French operational network for in situ observation of PM chemical composition and sources in urban environments (CARA program). *Atmosphere*, 12, 207, doi: 10.3390/atmos12020207. Pour en savoir plus sur le programme CARA : [www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara](http://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara).
- [2] Weber et al. (2019): Comparison of  $PM_{10}$  source profiles at 15 French sites using a harmonized constrained positive matrix factorization approach. *Atmosphere*, 10, 310, doi: 10.3390/atmos10060310.
- [3] Samake et al. (2021): Variability of the atmospheric  $PM_{10}$  microbiome in three climatic regions of France. *Frontiers in Microbiology*, doi: 10.3389/fmicb.2020.576750.
- [4] Srivastava et al. (2019): Speciation of organic fraction does matter for source apportionment. Part 3: combining offline and online measurements. *Science of the Total Environment*, 690, 944-955, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.378.
- [5] Daellenbach et al. (2020): The sources of harmful components in particulate air pollution in Europe. *Nature*, 587 (7834), 414- doi: 10.1038/s41586-020-2902-8.

# Brown Carbon: l'autre composante absorbante des particules de combustion de biomasse

AUTEUR



Olivier FAVEZ

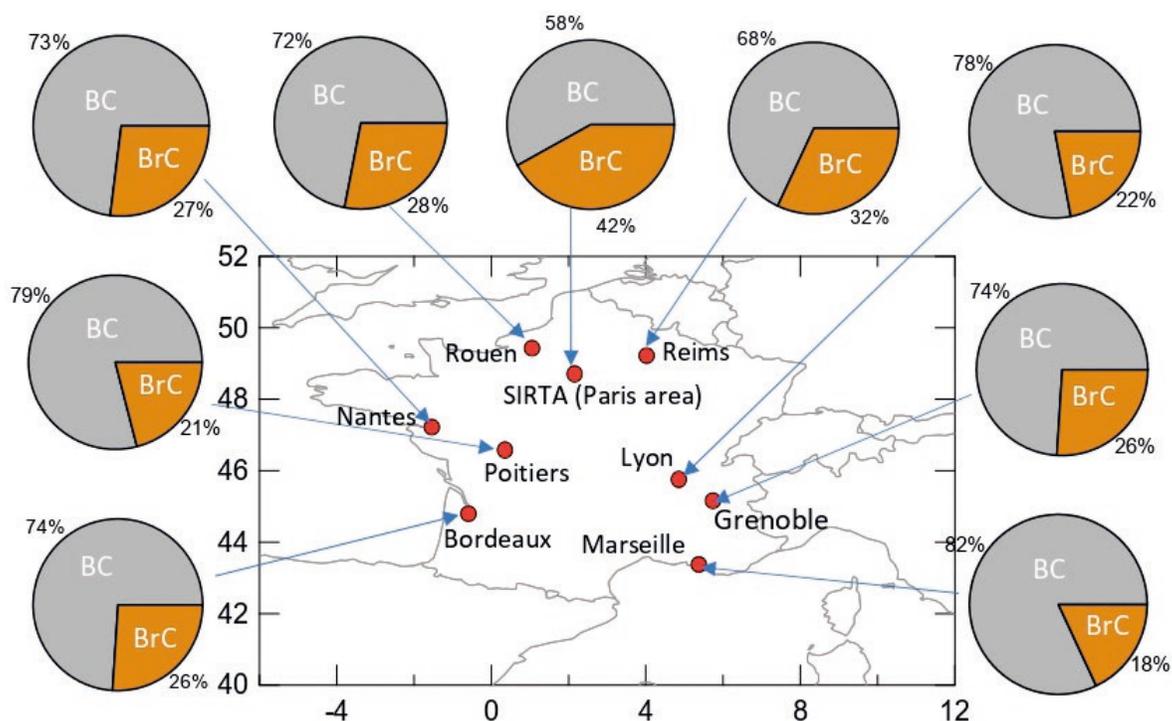


Figure 1 Contribution de BC et BrC à l'absorption de la lumière à 370 nm sur différents sites du programme CARA (hiver 2014-2015).

Les aérosols carbonés, constitués de carbone suie (ou *Black Carbon*, BC) et de matière organique, représentent une fraction majeure des particules fines dans l'air ambiant. Ils ont des effets à la fois directs et indirects sur le bilan radiatif de l'atmosphère et donc sur le changement climatique. Le rôle joué par BC dans les phénomènes d'absorption de la lumière et de l'énergie restituée par la Terre, sur l'ensemble du spectre visible et dans l'infrarouge, est largement reconnu. Par ailleurs, une partie des aérosols organiques, appelée *Brown Carbon* (BrC) peut également absorber le rayonnement solaire, principalement aux courtes longueurs d'onde (ultraviolet). Les origines et les propriétés optiques de cette fraction organique restent mal connues, induisant de fortes incertitudes dans l'évaluation du forçage radiatif dans les modèles climatiques.

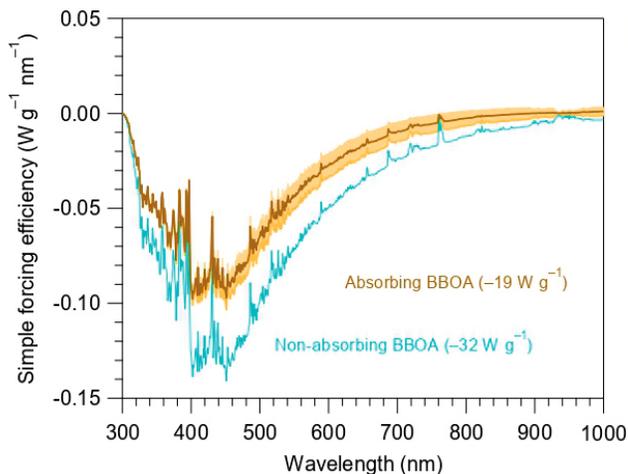
### UNE ÉTUDE À L'INTERFACE ENTRE LA RECHERCHE ET L'APPUI AUX POUVOIRS PUBLICS

Au travers de son implication dans l'infrastructure de recherche européenne ACTRIS [1] pour l'observation *in situ* des aérosols et gaz réactifs au SIRTA, ainsi que du programme CARA [2], l'Ineris a pu mener une étude de caractérisation du BrC sur un panel de sites de fond urbain répartis sur l'ensemble du territoire national (métropole) [3]. Cette étude tire profit des observations réalisées à l'aide d'aérolomètres multilongueurs d'onde et de prélèvements sur filtres suivis d'analyses chimiques sur les stations du programme CARA, en étroite collaboration avec les associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) et l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE). Elle bénéficie également des mesures de

spéciation chimique à haute résolution temporelle réalisées au SIRTA [4] pour la détermination des principales composantes chimiques de l'aérosol organique (AO), en partenariat avec le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE).

### DES ÉMISSIONS DOMINÉES PAR LE CHAUFFAGE RÉSIDENTIEL AU BOIS EN HIVER

Les résultats obtenus indiquent des contributions élevées de BrC à l'absorption totale des aérosols dont les longueurs d'onde sont proches de l'ultraviolet (autour de 400 nm) en hiver. De plus, les estimations de quantité de lumière absorbée par le BrC à ces longueurs d'onde présentent une excellente corrélation avec les concentrations de lévoglucosan (traceur des émissions de combustion de biomasse) sur tous les sites étudiés.



**Figure 2**  
Modélisation du forçage radiatif induit par les particules de combustion de biomasse selon que les propriétés d'absorption du BrC soient prises en compte ou non.

Cette corrélation illustre l'influence prédominante du chauffage résidentiel au bois sur les concentrations de BrC dans l'air ambiant, suggérant que les mesures de BrC peuvent être utilisées comme un traceur de ce type d'émissions dans l'air ambiant en France au cours de la saison hivernale. Ces résultats viennent conforter la pertinence de l'utilisation des aethalomètres multilongueurs d'onde pour le suivi en temps réel des particules primaires issues des processus de combustion, au sein du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air [5].

### ESTIMATION DE L'IMPACT RADIATIF À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Les résultats, obtenus à l'aide des données de spectrométrie de masse pour aérosol en temps réel, ont également permis de décrire les aérosols organiques issus de la combustion de biomasse selon deux familles principales, présentant des signatures chimiques et des propriétés optiques différentes (dont les efficacités d'absorption massique). Il a pu être démontré que ces deux fractions de l'AO ont une influence substantielle des aérosols de combustion de biomasse sur le forçage radiatif direct global. En particulier, une augmentation de l'ordre de 40 % du forçage radiatif direct, associée à la combustion de biomasse, a

pu être modélisée en tenant compte des propriétés d'absorption de l'AO déterminées au cours de l'étude. Ainsi, une régulation plus stricte des émissions liées au chauffage résidentiel au bois en France (et plus largement en Europe) pourrait influencer favorablement non seulement la qualité de l'air, mais aussi le climat à l'échelle régionale en période hivernale.

### DES ORIGINES ET DES IMPACTS SANITAIRES ENCORE À EXPLORER

Outre le chauffage résidentiel au bois, le brûlage de déchets verts à l'air libre est également susceptible de générer de fortes quantités de BrC. De récents travaux de l'Ineris permettent de faire un premier pas vers une meilleure caractérisation de ces deux types de combustion de biomasse dans l'air ambiant [6]. Par ailleurs, la matière organique constitutive du BrC, au sein des particules, est généralement associée à la présence des composés moléculaires présentant un fort potentiel de toxicité cellulaire (tels que les dérivés nitrés d'hydrocarbures aromatiques polycycliques). L'Ineris mène actuellement des travaux complémentaires visant à affiner la compréhension des impacts sanitaires de ce type d'émissions par combustion de biomasse.

## ABSTRACT

Sources and optical properties of brown carbon (BrC) are still poorly documented, leading to large uncertainties in climate model outputs. Investigating chemical speciation and multi-wavelength light absorption measurements at various French stations, we show its major wintertime contribution to total aerosol absorption at near-ultraviolet region and excellent correlations with levoglucosan, suggesting important contribution of wood burning emissions to ambient BrC aerosols in France. Furthermore, the geographic origin analysis highlighted the high potential contribution of local and/or small-regional emissions to BrC. Finally, the biomass burning organic aerosols (BBOA) direct radiative forcing effect was found to be 40% higher when BrC is treated as light-absorbing species, compared to the non-absorbing BBOA scenario. Further works led by Ineris are dedicated to a better assessment of the toxicity of biomass burning aerosols as well as to methodologies allowing to distinguish between wood combustion and garden green waste burning particles in ambient air.

### Références

- [1] <https://www.actris.eu/>
- [2] <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara>
- [3] O. Favez, Y. Zhang et al., Substantial brown carbon emissions from wintertime residential wood burning over France. *Science of the Total Environment*, (2020) 743, 140752, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140752.
- [4] <https://sirta.ipsl.fr/>
- [5] Note technique du LCSQA (2019): Estimation des concentrations de PM liées à la combustion de biomasse à partir des mesures d'absorption par le Brown Carbon. [https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA\\_2017\\_Estimation\\_concentration-PM-BrCarbon.pdf](https://www.lcsqa.org/system/files/media/documents/LCSQA_2017_Estimation_concentration-PM-BrCarbon.pdf)
- [6] C. Noblet et al. Emission factors and chemical characterization of particulate emissions from garden green waste burning. *Science of the Total Environment*, (2021) : Emission factors and chemical characterization of particulate emissions from garden green waste burning. *Science of the Total Environment*, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149367.

# Fusion de données de capteurs et de modélisation pour la cartographie de la qualité de l'air : faisabilité et valeur ajoutée

AUTEUR

CONTEXTE



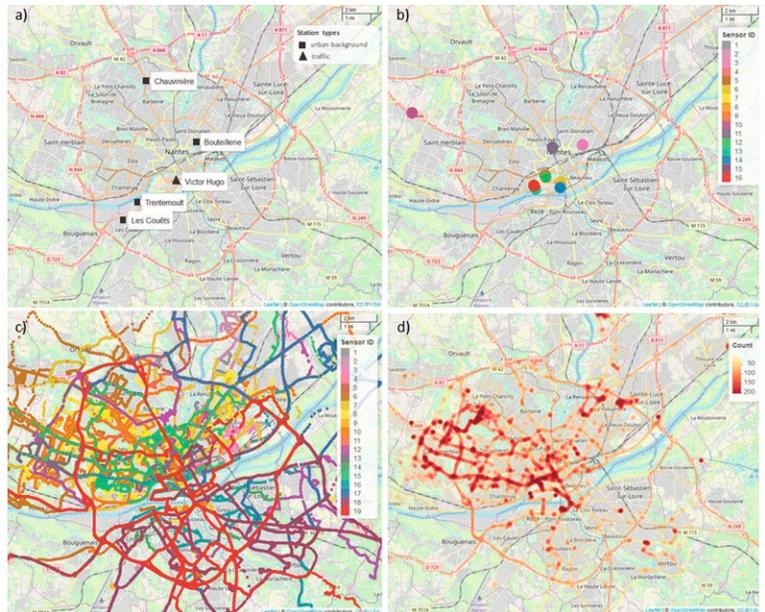
**Collaborateurs :**

- Laure MALHERBE<sup>1</sup>
- Augustin COLETTE<sup>1</sup>
- Hugo ROLLIN<sup>1</sup>
- Romain SCIMIA<sup>2</sup>

La surveillance réglementaire des concentrations de polluants dans l'air ambiant repose sur des réseaux de stations de mesure qui répondent à plusieurs critères relatifs au matériel utilisé, aux incertitudes de mesure, à la localisation géographique, etc., pour disposer de données représentatives de la qualité de l'air sur un territoire. De plus, la modélisation est utilisée pour estimer la pollution, notamment aux endroits où il n'y a pas de station de mesure. La combinaison des observations *in situ* et des calculs des modèles permet une cartographie plus précise de la qualité de l'air et une prévision des concentrations de polluants, comme le fait le système national de prévision français PREV'AIR [1]. Ces dernières années, de nouveaux instruments de mesure miniaturisés et à faible coût ont été développés pour mesurer les concentrations de polluants [2]. Ces capteurs, fixes ou mobiles, peuvent être déployés en grand nombre, offrant une couverture spatiale supérieure à celle des stations réglementaires de référence et donc de nouvelles possibilités de développement pour la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine.

**DONNÉES**

L'Ineris a mené un travail exploratoire [3] portant sur l'estimation des concentrations de particules d'un diamètre inférieur à 10 µm (PM<sub>10</sub>) à l'aide des observations de capteurs de la société AtmoTrack collectées à Nantes en novembre 2018 (Figure 1). Pendant la période d'échantillonnage, 16 capteurs fixes ont été déployés et 19 capteurs mobiles embarqués à bord de véhicules auto-école, d'ambulances et de véhicules de service pour mesurer les concentrations de PM<sub>10</sub>. Les mesures sur véhicules assurent une couverture spatiale unique de la zone urbaine, bien qu'elles dépendent



**Figure 1** Les stations de surveillance de référence (réseau Air Pays de la Loire) (a), les positions des capteurs fixes (b), les routes d'échantillonnage des capteurs mobiles (c) et la carte des observations des capteurs fixes et mobiles (d), sont données pour le mois 2018 à Nantes.

des itinéraires et des périodes de conduite (principalement pendant la journée). Les données brutes des capteurs ont été prétraitées avant d'être utilisées pour la cartographie dans le but d'éliminer des données non fiables, sur la base du critère de répétabilité, et de corriger la variation quotidienne des concentrations de fond, sur la base des mesures des stations de références de l'Association agréée de surveillance de la qualité de l'air Pays de La Loire. [4]

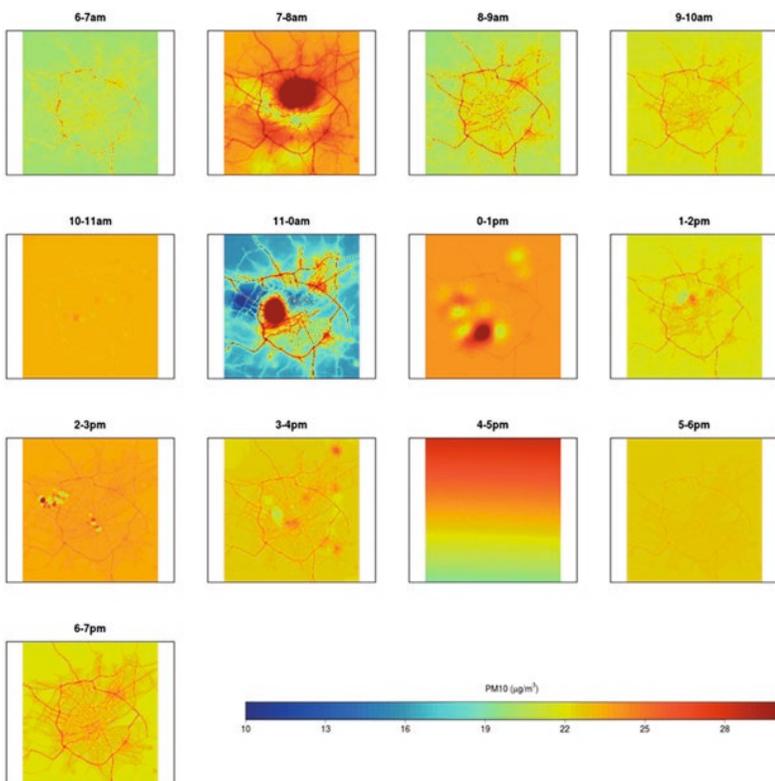
**CARTOGRAPHIE**

Pour réaliser la cartographie, une méthode de krigeage en dérive externe est utilisée, la moyenne annuelle 2016 simulée par le modèle urbain ADMS-Urban (mis à disposition par AirPDL) étant définie comme dérive. La fusion de données a été réalisée toutes les heures, de 7h à 19h et est présentée pour

le 29 novembre 2018 (Figure 2). Les cartes obtenues sont étroitement liées à la variabilité associée aux points d'observation. En effet, plus la variabilité est élevée, moins le poids du point d'observation sera important dans l'estimation, de telle sorte que les concentrations de PM<sub>10</sub> estimées suivent le modèle en dérive. L'estimation est également influencée par la corrélation entre les données des capteurs et la dérive. Les données de capteurs apportent de l'information uniquement lorsque la variance d'erreur de mesure (VME) est faible et que la corrélation avec la dérive est satisfaisante. La performance de la fusion de données a été étudiée en comparant la moyenne quotidienne de la fusion, des observations de référence et des sorties du modèle à chaque station du réseau AirPDL. Il en ressort que le biais est réduit de 8 % à 2,5 % en appliquant la fusion de données

**Notes**

- 1- Ineris
- 2- AtmoTrack



**Figure 2** Les cartes fusionnées pour les  $PM_{10}$  issues de l'approche de krigeage par dérive externe sont présentées de 7 h à 19 h le 29/11/2018 à Nantes.

plutôt que d'utiliser le modèle seul. Cependant, les distributions de  $PM_{10}$  estimées sont caractérisées par une dispersion plus faible. En conclusion, la fusion des données lisse les pics de concentration de  $PM_{10}$  mais présente une meilleure estimation des niveaux et de la distribution des polluants en moyenne. Par ailleurs, l'effet de l'incertitude de mesure a été étudié par des tests de sensibilité qui montrent que la performance augmente en réduisant l'incertitude et qu'il y a un impact sur la variabilité spatiale des concentrations de  $PM_{10}$ . Cela souligne l'importance d'estimer avec précision l'incertitude de mesure des capteurs et ouvre des perspectives quant à l'exploitation de ces données malgré leurs imperfections.

Ce travail a été conduit par l'Ineris dans le cadre d'une étude menée au titre de sa participation au Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), en collaboration avec la société Atmotrack qui a fourni un accès privilégié aux données de capteurs fixes et mobiles, et l'AASQA-Air Pays de la Loire qui a mis à disposition les modélisations urbaines et les données des stations de référence. Le code de cartographie ainsi développé est à présent distribué en open source [5]. Le développement de cet outil se poursuit notamment à travers une thèse en collaboration entre l'Ineris et l'École des Mines ParisTech. Le mode de distribution open source permettra d'étendre son domaine d'application à des capteurs provenant de fabricants divers.

## ABSTRACT

In Nantes, fixed and mobile sensors were used to measure  $PM_{10}$  concentrations. In this work, the large amount of sensor observations for air quality mapping was used to show the potential added-value with respect to urban dispersion model (ADMS-Urban) calculations. Data fusion is performed by merging the preprocessed sensor observations and the 2016 annual average of the ADMS-Urban outputs. The measurement uncertainty related to the sensors and the dispersion of the data are considered in data fusion as the variance of measurement error. Hourly fused maps show disparate responses to data fusion mainly depending on the variability of the sensor data and the correlation between the sensor observations and the drift. Results show that considering the model alone implies 8% bias whereas including the sensor observations reduces the bias to 2.5%. In addition, a sensitivity study demonstrates that the performance is increasing by reducing the uncertainty of the sensor. This highlights the importance to estimate accurately the measurement uncertainty of the devices to ensure relevant air quality mapping.

## Références

- [1] L. Rouil, C. Honore, R. Vautard, M. Beekmann, B. Bessagnet, et al. (2009). PREV'Air: an operational forecasting and mapping system for air quality in Europe, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 90, n° 1, pp. 73-83.
- [2] P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, et al. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution cities, Environment International 75, 199-205.
- [3] A. Gressent, L. Malherbe, A. Colette, H. Rollin, and R. Scimia, (2020). Data fusion for air quality mapping using low-cost sensor observations: Feasibility and added-value, Environment International, Volume 143, 105965, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105965>.
- [4] <http://www.airpl.org/>
- [5] <https://github.com/AliciaGressent/SESAM>

# Évaluer l'exposition interne fœtale par modélisation pharmacocinétique physiologique (PBPK)

AUTEUR



Céline BROCHOT<sup>1</sup>

Collaborateurs:

- Marc CODACCIONI<sup>2</sup>
- Florence ZEMAN<sup>1</sup>

Lors de la grossesse, de nombreuses substances chimiques peuvent traverser la barrière placentaire et atteindre le fœtus. Les expositions prénatales à des xénobiotiques peuvent entraîner des toxicités développementales avec des conséquences néfastes sur la santé de l'enfant en pleine croissance. L'intensité et la nature des effets attendus dépendent de la fenêtre d'exposition aux xénobiotiques au cours de la vie prénatale ainsi que du niveau d'exposition. L'exposition interne fœtale, définie comme la quantité de xénobiotiques ou de leurs métabolites dans les organes en développement ou le sang fœtal, est un facteur clé du risque d'effets toxiques. Les concentrations maternelles pendant la grossesse et les concentrations sanguines ombilicales à l'accouchement peuvent être utilisées pour estimer l'exposition interne fœtale. Cependant, en l'absence d'informations précises sur les expositions environnementales de la mère (doses, durées d'exposition, etc.), ce type de données peut être difficile à interpréter. Dans ce contexte, les modèles

pharmacocinétiques physiologiques de la grossesse (pPBPK) peuvent, à l'aide de données indirectes, simuler les expositions internes des organes maternels et fœtaux à une ou plusieurs substances. La connaissance de certains processus pharmacocinétiques reste, pour l'instant, encore limitée. Nos travaux récents ont porté en particulier sur une meilleure caractérisation des échanges placentaires de xénobiotiques entre la mère et le fœtus [1].

ÉTAT DES LIEUX

La première étape a été de faire un état des lieux des différents modèles de transfert placentaire développés dans les modèles pPBPK animaux et humains, et les méthodes expérimentales actuellement disponibles pour quantifier le taux de transferts placentaires [2]. Notre revue a mis en évidence l'hétérogénéité des pratiques pour tenir compte des transferts placentaires dans les modèles pPBPK. Ainsi, 12 structures ont été identifiées parmi 50 modèles originaux. À l'aide de simulations, nous avons montré que certaines de ces

structures prédisent des expositions fœtales similaires, alors que d'autres permettent de simuler différents profils cinétiques fœtales. Au total, quatre types de profils cinétiques ont pu être reproduits selon le nombre de constantes de passage entre les placentas maternel et fœtal. Cette revue a aussi fait le point sur les méthodes et des données (*in vitro*, *in vivo*, *ex vivo* et cliniques) qui peuvent être utilisées pour quantifier le taux de transferts placentaires. Jusqu'à aujourd'hui, les données animales représentent la principale source. Récemment, un développement accéléré des nouvelles méthodes *in silico*, à savoir des algorithmes prédisant le transfert selon quelques caractéristiques structurales des molécules et de méthodes *ex vivo* sur placenta humain, est observé.

QUATRE MODÈLES DE TRANSFERTS PLACENTAIRES

À partir de cette revue, quatre méthodes non animales ont été sélectionnées pour informer les échanges placentaires chimiques dans un modèle pPBPK et leurs

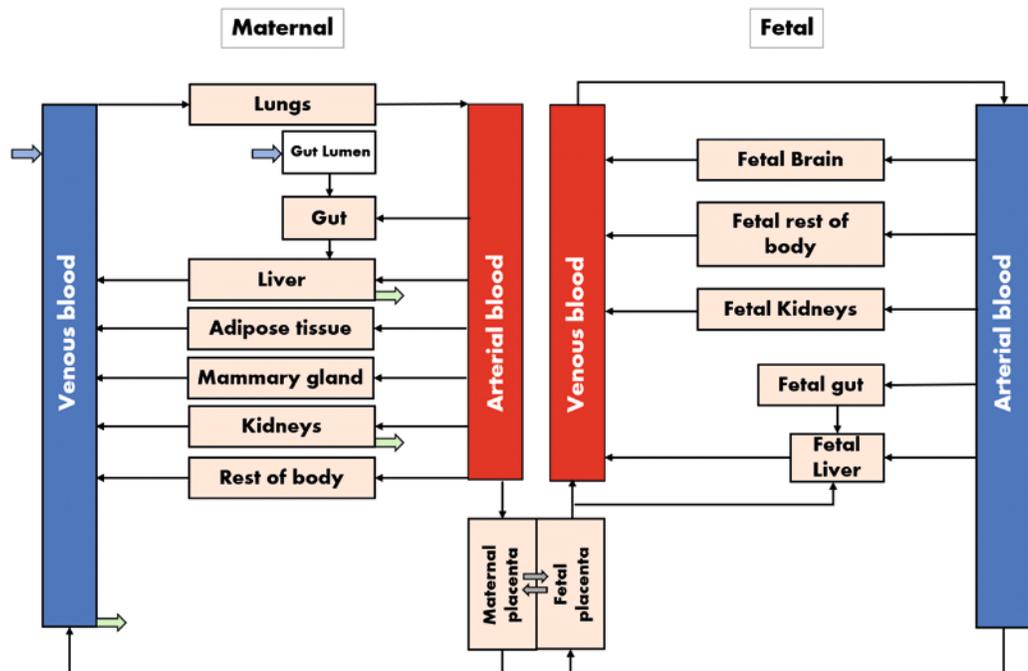
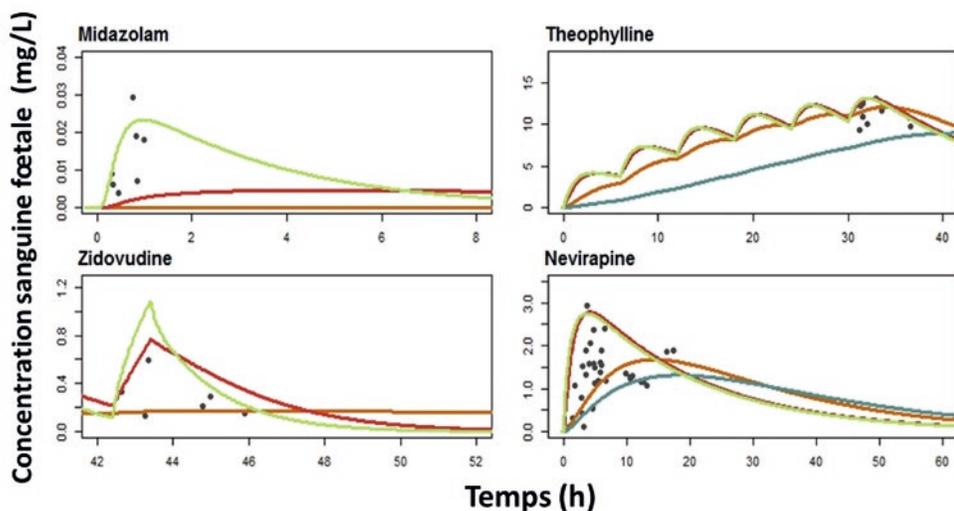


Figure 1 Représentation du modèle pPBPK avec 2 sous-modèles représentant la mère et le fœtus. Les flèches bleues représentent les sites d'administration, les flèches vertes les voies d'élimination et les flèches grises la diffusion passive placentaire.

Notes  
1- Ineris  
2- Certara



**Figure 2** Evolution de la concentration du sang de cordon ombilical en fonction du temps pour quatre des dix substances testées. Les points noirs représentent les concentrations mesurées. Les lignes pleines représentent la concentration plasmatisque moyenne prédite selon les quatre modèles de transfert placentaire : modèle *in silico* en orange ; modèle *in vitro* en rouge ; modèle limitation par la perfusion en vert ; modèle *ex vivo* en bleu.

performances prédictives tout au long de la grossesse ont été évaluées [3]. En premier lieu, un modèle pPBPK humain (Figure 1) adapté du modèle adulte développé pour le criblage à haut débit a été mis au point [4]. Ce modèle pPBPK intègre les modifications physiologiques et biochimiques qui surviennent lors d'une grossesse chez la mère et le fœtus. Quatre approches ont été implémentées pour la paramétrisation du transfert placentaire (transfert limité en perfusion ou transfert limité en diffusion avec des données *ex vivo*, *in vitro* ou *in silico*) afin d'évaluer : a) leurs performances prédictives des concentrations maternelles et fœtales *in vivo* mesurées à différentes périodes de la grossesse sur un ensemble de dix substances ; b) leurs impacts sur la dosimétrie interne fœtale pendant la grossesse. Ces modèles n'avaient pas d'impact sur la cinétique maternelle mais simulaient des profils différents chez le fœtus (Figure 2). Deux modèles (basés sur la limitation par la perfusion et sur des paramètres *in vitro*) présentaient une bonne

performance prédictive vis-à-vis des concentrations fœtales. À l'exception du modèle basé sur des données *ex vivo*, les modèles ont prédit un niveau d'exposition fœtale plus élevé en fin de grossesse.

### CONCLUSION

Ce travail souligne le potentiel de la modélisation pPBPK pour l'évaluation des expositions prénatales. Il démontre la capacité d'un modèle à simuler des indicateurs d'exposition interne adéquats d'un point de vue mécanistique et temporel. Dans un contexte de fortes contraintes éthiques et réglementaires, ce travail éclaire sur l'apport de méthodes non animales dans la paramétrisation de processus clé de la dose interne fœtale tel que le passage transplacentaire. Les outils développés ici pourront être mis en œuvre dans l'étude de l'exposome prénatal comme dans l'évaluation du risque de toxicité développementale d'une substance.

## ABSTRACT

Pregnancy physiologically-based pharmacokinetic (pPBPK) models can assess the internal exposure of chemicals in pregnant women and their foetus by simulating the chemicals concentrations in the maternal and foetal organs throughout pregnancy. Although pPBPK models often account for physiological and biochemical changes throughout pregnancy, some processes are still poorly known. The aim of our studies was to improve the characterization of the placental transfers of xenobiotics in pPBPK modelling. First, a literature review identified 12 structures for placental transfer among 50 original pPBPK models, and different sources of experimental data to quantify the transfers. Then, we developed a pPBPK model which integrates four transfer models calibrated using non-animal methods and assessed their predictive performances on ten substances. Our results showed that the performance varied among models and substances, and that one of the models differed from the others in terms of foetal exposure across trimesters. In conclusion, our work highlights the potential of pPBPK modelling in the prenatal exposure assessment by accounting for mechanistic data and critical sensitive windows.

### Références

- [1] M. Codaccioni. Évaluation de l'exposition foetale aux substances chimiques grâce à la modélisation pharmacocinétique basée sur la physiologie (PBPK) et son application aux données d'imprégnation des populations. Thèse de doctorat soutenue publiquement le 11 décembre 2020.
- [2] M. Codaccioni, F. Y. Bois, C. Brochot (2019). Placental transfer of xenobiotics in pregnancy physiologically-based pharmacokinetic models: structure and data. *Computational Toxicology*. 12 100111.
- [3] M. Codaccioni and C. Brochot (2020). Assessing the impacts on fetal dosimetry of the modelling of the placental transfers of xenobiotics in a pregnancy physiologically based pharmacokinetic model. *Toxicology and Applied Pharmacology* 409: 115318.
- [4] Pearce, G. Robert, Setzer, R. Woodrow, Strobe, Cory L., Wambaugh, John F., Sipes, Nisha S. (2017). Httk: R package for high-throughput toxicokinetics. *J. Stat. Softw.* 79 (4), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v079.i04>.

# Pratiques et éthique autour des alternatives en expérimentation animale

## AUTEURS



Céline  
BOUDET



Laure  
GEOFFROY



Enrico  
MOMBELLI

Voilà plusieurs décennies que les méthodes alternatives en expérimentation animale ont émergé avec une volonté d'y intégrer un cadre éthique en faveur de la protection des animaux utilisés à des fins scientifiques. L'ouvrage *Quelles alternatives en expérimentation animale?*, publié en 2020 aux éditions Quæ [1], et auquel l'Ineris a été associé, dresse un état des lieux des différentes options qui s'offrent au monde scientifique. Il traite des différentes approches et applications possibles, de leurs avantages mais également leurs limites, à travers le prisme d'une réglementation de plus en plus ferme en faveur du bien-être des animaux utilisés en laboratoire. Le concept des 3R (remplacement, réduction et raffinement), évoqué dès 1959 par William Russel et Rex Burch [2], a permis de poser les premiers jalons de la réglementation en faveur de la prise en compte du bien-être animal. Ces trois règles encadrent chaque protocole d'une expérimentation animale. Si celle-ci est inévitable, les 3R doivent d'abord avoir été successivement examinés par les chercheurs afin de satisfaire les exigences en vigueur.

### LE COUPLAGE DES MÉTHODES *IN VITRO*, *IN SILICO* ET *IN VIVO*

Les approches *in vitro*, *in silico*, *in vivo* et les applications bio-informatiques sont aujourd'hui associées afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un organisme complexe, tel que celui de l'être humain, face à des modifications de son environnement. Si ce couplage a permis de diminuer le recours à l'expérimentation animale, celle-ci demeure néanmoins un outil fondamental de la recherche médicale et permet, au fil du temps, de déterminer la genèse et le développement de pathologies chroniques. La communauté scientifique bénéficie désormais d'algorithmes de pointe applicables en simulation numérique pour prédire le comportement

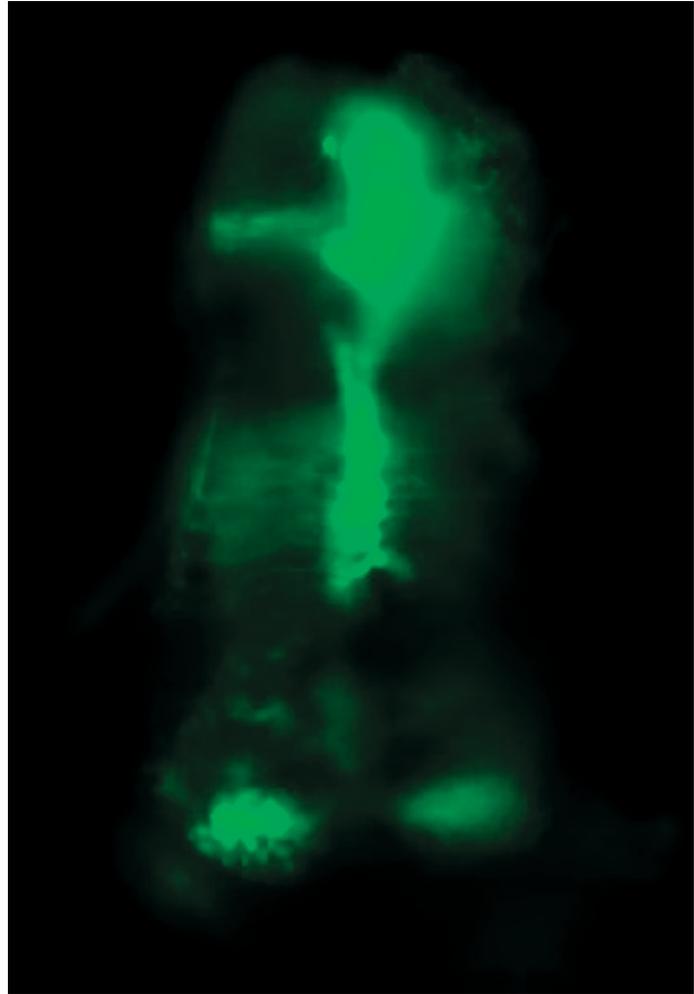


Figure 1

Le test EASZY repose sur l'imagerie *in vivo* et la quantification de la fluorescence du gène rapport (la GFP) qui est sous le contrôle du gène *cyp19a1b*. Cette mesure se réalise sur des embryons de poisson-zèbre transgénique *cyp19a1b-GFP* âgés de 4 jours post-fécondation. Elle est non invasive en raison de la transparence de l'embryon à ce stade de développement et permet de quantifier l'activité oestrogénique des substances testées.

des systèmes biologiques les plus complexes tout en favorisant les échanges d'informations fondamentales. Le modèle QSAR (*Qualitative Structure Activity Relationship*) ou la modélisation d'organes virtuels, par exemple, sont des compléments de l'expérimentation animale puisqu'ils fournissent une base d'informations conséquente en toxicologie via l'interprétation des expériences réalisées,

l'optimisation de leur conception ou encore l'identification d'altérations cellulaires et tissulaires dues à l'exposition d'un organisme à des substances chimiques [3]. Il s'agit d'étapes clés qui réduisent les coûts éthiques et monétaires d'investigations toxicologiques et représentent une alternative au recours animal, basée sur la compréhension des mécanismes.

## D'AUTRES MODÈLES ANIMAUX ALTERNATIFS [4]

L'expérimentation animale utilise des modèles connus tels que des rongeurs, appréciés pour leur petite taille mais aussi pour leur proximité évolutive avec le genre humain. Avec l'émergence des nouvelles méthodes *in silico* et l'amélioration de l'imagerie du petit animal, la communauté scientifique a mis au point des solutions pouvant réduire l'utilisation de mammifères. De nouvelles espèces sont ainsi utilisées depuis quelques années: xénopes, poissons-zèbres, oursins, drosophiles... Ces modèles présentent des avantages certains en termes d'imagerie et de génétique moléculaire et sont intéressants pour leur cycle de reproduction et de développement rapide. Les modèles non-mammifères sont utilisés en priorité afin de répondre rapidement aux besoins scientifiques: compréhension des pathologies, développement de nouvelles thérapies.

## PERSPECTIVES

Le génome de nombreuses espèces a démontré qu'il existait une proximité génétique et fonctionnelle entre des organismes *a priori* éloignés. Le développement de méthodes moins invasives est encouragé: imagerie du petit animal, expérimentation sur organoïdes mais aussi des méthodes *in vitro*. Ces nouvelles connaissances ont également favorisé l'évolution de la modélisation et son exploration

des bases de données déjà conséquentes. L'expérimentation animale a permis à la recherche de progresser mais la question demeure: peut-on bénéficier d'une recherche qualitative sans recours à l'animal? L'objectif est difficile à atteindre. Les nouvelles méthodes et stratégies de tests intégrées mises en place se doivent d'être au moins aussi fiables que les modèles animaux utilisés afin de prédire les effets chez l'Homme. Les coûts engendrés et les réglementations en vigueur sont également à prendre en compte dans le choix d'une solution alternative. En effet, la validation réglementaire est contraignante dans la mesure où une méthode recevable doit apporter, outre ce qui est demandé pour reconnaître scientifiquement une méthode, les preuves qu'elle est applicable de façon fiable et répétable en dehors du laboratoire de recherche [5]. Ainsi, s'il est difficile de se passer encore aujourd'hui de l'animal, les progrès dans la connaissance du « vivant » aident à mieux le protéger, dans le respect des 3R.

## ABSTRACT

The genome of many species has shown that there is a genetic and functional proximity between seemingly distant organisms. Small animal imaging has encouraged the development of less invasive methods, organoid experiments but also *in vitro* methods. This knowledge has also contributed to the evolution of modelling and its exploration of existing databases. Animal testing has allowed research to progress, but the question remains. Can we make quality research without recourse to animals? The objective is difficult to achieve. The new methods and integrated strategies put in place must be, at least, as reliable as the animal models used to predict human effects. They have their advantages and their limits. The costs incurred and the regulations in force must also be taken into account when choosing an alternative solution. Although it is still difficult to do without the animal today, the acquired knowledge of "the living" helps to better protect it, while respecting the 3 R rule. Ineris research activities develop in such a framework and contribute to the development and evaluation of alternative approaches.

## Références

- [1] F. Marano, P. Hubert, L. Geoffroy, H. Juin et al, 2020. Quelles alternatives en expérimentation animale ? Pratiques et éthique, éditions Quæ.
- [2] W.M.S. Russell, R.L. Burch, 1959. The Principle of Human Experimental Technique, Wheathampstead, Universities Federation of Animal Welfare, 229 p.
- [3] E. Mombelli, I. Vignon Clementel, D. Drasdo. Méthodes *in silico* et modélisation des mécanismes de toxicité (AOP) - chapitre 6 de l'ouvrage Quæ.
- [4] L. Geoffroy, H. Tricoire. Les autres modèles animaux alternatifs - chapitre 9 de l'ouvrage Quæ.
- [5] C. Boudet. Définir et évaluer une méthode expérimentale crédible – chapitre 2 de l'ouvrage Quæ.

# Améliorer les tests de criblage des perturbateurs endocriniens à l'aide de poissons-zèbres (*Danio rerio*) génétiquement modifiés

## AUTEURS



Nathalie HINFRAY



Edith CHADILI



François BRION

Ces dernières années, la communauté scientifique s'est beaucoup intéressée aux perturbations du système endocrinien des organismes exposés à une catégorie de produits chimiques appelée perturbateurs endocriniens (PE). Chez différentes espèces de poissons, l'exposition à des PE a été associée à des effets néfastes sur la reproduction à la fois au niveau de l'individu mais aussi de la population [1-2].

Récemment, les dangers et les risques que représentent ces PE ont été pris en compte dans la réglementation européenne qui définit les PE selon leurs modes d'action et leurs effets néfastes sur la santé d'un organisme ou de la population, ainsi que sur la démonstration d'un lien de causalité entre les deux.

Depuis plusieurs années, l'Ineris a développé différentes lignées de poissons-zèbres transgéniques exprimant des gènes rapporteurs (codant la GFP ou *Green Fluorescent Protein*) sous le contrôle de gènes impliqués dans la synthèse d'hormones stéroïdiennes qui jouent un rôle majeur dans le développement et la reproduction des vertébrés. Ces lignées permettent d'étudier les mécanismes d'actions des PE

de manière non invasive et ont permis le développement à l'Ineris d'un test réglementaire validé à l'OCDE (TG250) [3].

Dans le cadre du projet AIDEZ, nous avons pour objectif de déterminer si de nouvelles lignées de poissons-zèbres transgéniques permettaient de suivre les perturbations de l'expression de ces gènes par des PE et si ces perturbations pouvaient rendre compte d'effets sur la capacité de reproduction des individus. Différentes expérimentations ont donc été entreprises, notamment en se basant sur un test déjà développé à l'OCDE, le test TG 229 [4].

### LES POISSONS-ZÈBRES TRANSGÉNIQUES

Les lignées de poissons-zèbres sélectionnées pour ce projet expriment la GFP sous contrôle du promoteur de l'aromatase A (*cyp19a1a*), enzyme responsable de la synthèse des œstrogènes dans les gonades et jouant un rôle clé dans la reproduction [5-6]. Dans un premier temps, nous avons démontré que les capacités de reproduction de ces lignées étaient similaires aux poissons-zèbres non génétiquement modifiés,

permettant leur utilisation dans le test OCDE [6]. Dans un second temps, nous avons mis au point un protocole permettant de quantifier l'expression du gène de l'aromatase A *in vivo* par des mesures de fluorescence (Figure 1), de manière répétée et sans perturber le suivi du processus de reproduction.

### EFFETS D'UN FONGICIDE AZOLÉ, LE PROCHLORAZ

La lignée transgénique *cyp19a1a*-eGFP a été utilisée pour étudier les effets d'un fongicide azolé, le prochloraz, selon un protocole basé sur le test TG 229 [7]. Les femelles exposées présentaient une baisse de la fécondité ainsi qu'une baisse des concentrations en vitellogénine, protéine précurseur des réserves nutritives des œufs (Figure 2). En parallèle, une induction concentration et temps-dépendante de l'expression de l'aromatase A (mesures de fluorescence *in vivo*) a également été mise en évidence chez les femelles exposées. Ces effets biologiques ont pu être associés aux concentrations mesurées dans l'eau ainsi que dans les gonades, apportant des données précieuses pour une évaluation correcte des dangers et des risques de cette substance. Réalisées au cours

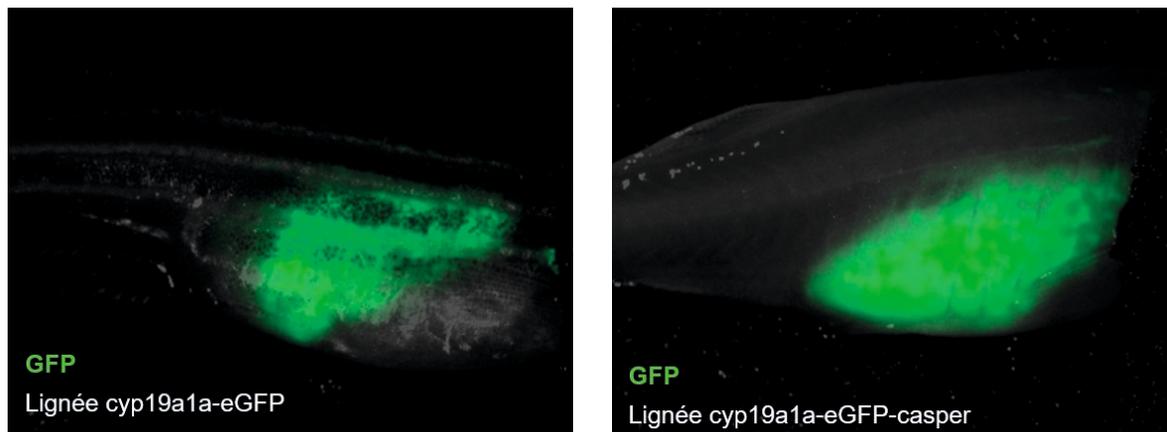
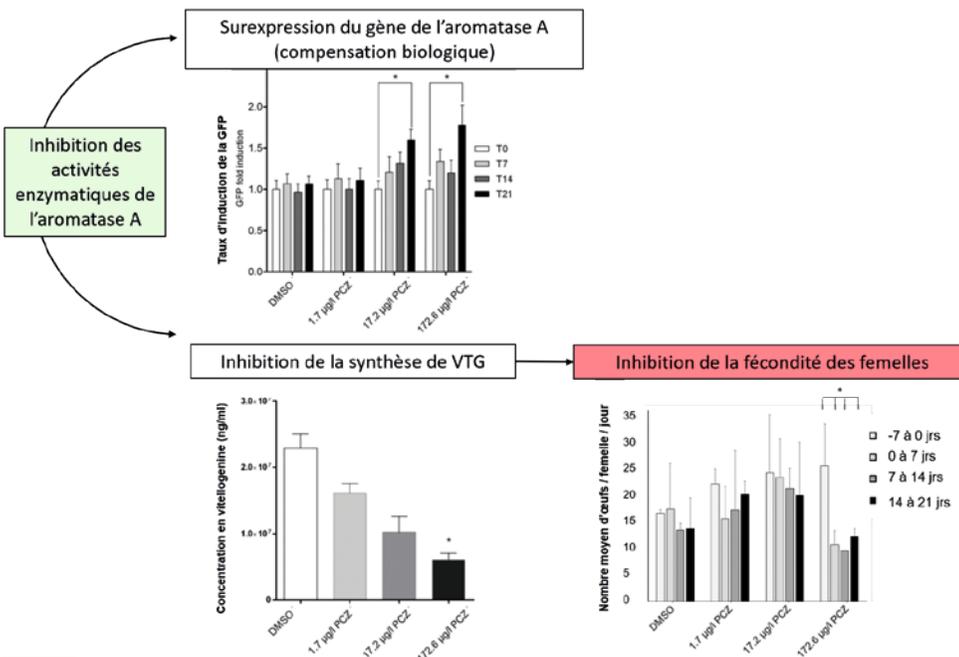


Figure 1

Mesures *in vivo* de fluorescence de la GFP ovarienne chez des femelles de poissons-zèbres transgéniques des lignées *cyp19a1a*-eGFP et *cyp19a1a*-eGFP-casper (méthode non invasive). La lignée *cyp19a1a*-eGFP-casper présente une absence totale de pigmentation de la peau permettant de visualiser l'intégralité de la gonade.



**Figure 2**

Effets d'une exposition au prochloraz chez les poissons-zèbres transgéniques *cyp19a1a-eGFP* femelles. L'inhibition des activités enzymatiques de l'aromatase A (mécanisme initiateur) entraîne une inhibition de la synthèse de vitellogénine ainsi qu'une baisse de la fécondité des femelles (effet adverse), et une surexpression du gène de l'aromatase A (compensation biologique de ces inhibitions).

des TG 229, ces mesures de fluorescence permettent un suivi temps et concentration-dépendant de l'expression de l'aromatase A de manière non invasive, en parallèle du suivi de reproduction, apportant ainsi des informations sur le mécanisme d'action des substances.

## CONCLUSION

Au cours du projet AIDEZ, les lignées transgéniques ont été exposées à différentes substances (œstradiol, prochloraz, imazalil, clotrimazole, norethindrone) permettant ainsi de montrer l'intérêt de leur utilisation pour l'étude des dangers des PE. L'utilisation de ces lignées transgéniques s'inscrit parfaitement dans

la règle des 3R (réduire, raffiner, remplacer) qui régit aujourd'hui l'expérimentation animale.

En effet, elles permettent d'obtenir des informations sur les mécanismes d'actions (effets temps et concentration-dépendants des substances sur l'expression de l'aromatase A) sans augmenter le nombre d'individus nécessaires à la réalisation des tests. *In fine*, les nouvelles données acquises au cours du projet AIDEZ serviront à modéliser de manière quantitative les liens existants entre les perturbations de l'aromatase A (mécanisme d'action) et les effets néfastes des PE sur la viabilité des populations. Ce travail se poursuit avec le projet GinFiz qui a débuté fin 2020 et qui est cofinancé par l'Anses.

## ABSTRACT

In the AIDEZ project (funded by Anses), we determined the interest of transgenic zebrafish lines expressing GFP under the control of the aromatase A (*cyp19a1a*) gene promoter to assess endocrine disruptors (ED) effects. These transgenic lines behave and reproduce like non genetically modified zebrafish. We developed a method to measure *in vivo* gonadal aromatase A expression in females (non-invasive imaging of GFP fluorescence) without disturbing reproduction. The *cyp19a1a-eGFP* transgenic zebrafish were then used in a fish short term reproduction assay (OECD TG229) to assess the effects of prochloraz (PCZ), an imidazole fungicide. PCZ exposure significantly reduced female circulating vitellogenin levels and fecundity while increasing time and concentration-dependently *in vivo* ovarian GFP fluorescence (aromatase A gene expression). Overall, the *cyp19a1a-eGFP* transgenic line is a relevant tool to assess the effects of ED in TG229 assays while providing complementary information on the mechanism of action of chemicals (time and concentration-dependent effects on *cyp19a1a* gene) without increasing the number of fish necessary for the assays (3R rule).

## Références

- [1] J. P. Nash, D. E. Kime, L. T. Van der Ven, P. W. Wester, F. Brion, G. Maack, P. Stahlschmidt-Allner and C. R. Tyler (2004). Long-term exposure to environmental concentrations of the pharmaceutical ethynylestradiol causes reproductive failure in fish. *Environ Health Perspect* 112(17): 1725-1733.
- [2] K. A. Kidd, P. J. Blanchfield, K. H. Mills, V. P. Palace, R. E. Evans, J. M. Lazorchak and R. W. Flick (2007). Collapse of a fish population after exposure to a synthetic estrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(21): 8897-8901.
- [3] OCDE (2021), Test No. 250: EASZY assay - Detection of Endocrine Active Substances, acting through estrogen receptors, using transgenic tg(*cyp19a1b:GFP*) Zebrafish embryos. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/0a39b48b-en>.
- [4] OCDE (2012), Test No. 229: Fish Short Term Reproduction Assay, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264185265-en>.
- [5] N. Hinfray, F. Sohm, M. Caulier, E. Chadili, B. Piccini, C. Torchy, J. M. Porcher, Y. Guiguen and F. Brion (2018). Dynamic and differential expression of the gonadal aromatase during the process of sexual differentiation in a novel transgenic *cyp19a1a-eGFP* zebrafish line. *Gen Comp Endocrinol* 261: 179-189.
- [6] J. De Oliveira, E. Chadili, C. Turies, F. Brion, X. Cousin and N. Hinfray (2021). A comparison of behavioral and reproductive parameters between wild-type, transgenic and mutant zebrafish: Could they all be considered the same "zebrafish" for reglementary assays on endocrine disruption? *Comp Biochem Phys Part C* 239: 108879
- [7] J. De Oliveira, E. Chadili, B. Piccini, C. Turies, E. Maillot-Maréchal, O. Palluel, H. Budzinski, X. Cousin, F. Brion, N. Hinfray (2020). Refinement of an OECD test guideline for evaluating the effects of endocrine disrupting chemicals on aromatase gene expression and reproduction using novel transgenic *cyp19a1a-eGFP* zebrafish. *Aquat Toxicol* 220: 105403.

# Étude des effets directs et indirects du diclofénac en mésocosme lotique : vers une valorisation des données dans un cadre réglementaire

AUTEUR

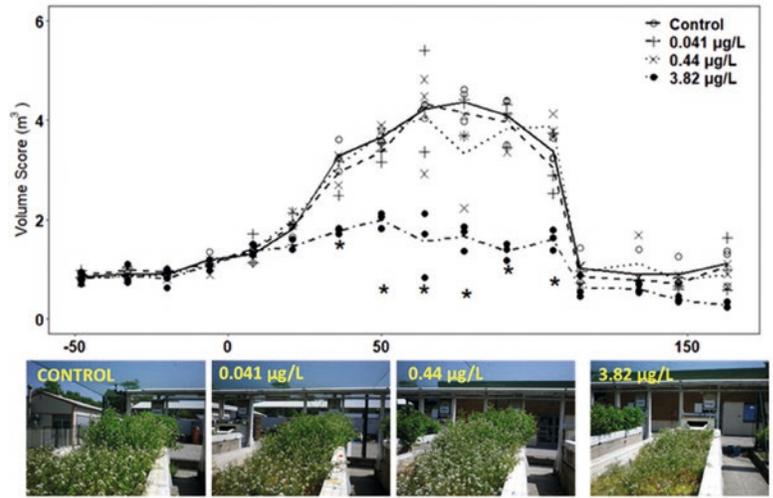


**Collaborateurs :**

- Rémy BEAUDOUIN<sup>2</sup>
- Anne BADO-NILLES<sup>1</sup>
- Cléo TEBBY<sup>2</sup>
- Olivier PALLUEL<sup>3</sup>
- Cyril TURIÈS<sup>1</sup>
- Patrick BAUDOIN<sup>1</sup>
- Alice JAMES<sup>3</sup>
- Sandrine ANDRES<sup>3</sup>
- Jean-Marc PORCHER<sup>1</sup>
- Gaëlle DANIELE<sup>4</sup>
- Alain GEFFARD<sup>5</sup>

Les médicaments utilisés en médecine humaine et vétérinaire représentent une classe de contaminants environnementaux émergents [1]. Une fois consommés par les humains ou les animaux d'élevage, les résidus de médicament peuvent pénétrer dans l'environnement par différentes voies et finir par se retrouver dans les eaux de surface, les eaux potables, les eaux souterraines, et même les sols. Parmi eux, le diclofénac, anti-inflammatoire non stéroïdien analgésique, est fréquemment détecté dans les eaux usées brutes et traitées, les eaux potables et les rivières à travers le monde, avec des concentrations allant de quelques ng/L au µg/L [2].

Face à ces données de présence dans l'environnement, les données d'écotoxicité chronique sont parfois trop incomplètes pour une utilisation en évaluation des risques. Le premier Plan national sur les résidus de médicaments dans l'eau [3] avait, parmi ses objectifs, celui d'acquérir des connaissances scientifiques et techniques relatives à la présence, au devenir et aux effets des résidus de médicaments sur l'environnement et la santé humaine, afin d'évaluer le risque pour les écosystèmes et l'Homme. Il semble donc primordial d'évaluer les risques des médicaments en fédérant une communauté



**Figure 2.** Évolution du biovolume (m<sup>3</sup>) du cresson des fontaines en fonction du temps et de la concentration en diclofénac.

d'experts au niveau national sur ce sujet. Dans ce contexte, le projet DOREMIPHARM [4] financé par l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) et coordonné par l'Ineris, avec comme partenaire l'université de Reims et l'Institut des sciences analytiques de Lyon, avait pour principaux objectifs de proposer et d'évaluer une méthodologie expérimentale et statistique novatrice en la matière. Ainsi, les effets à long terme du diclofénac

ont été étudiés en mésocosme lotique notamment pour produire des données d'écotoxicité chronique à différents niveaux d'organisation biologique (individu, population, communauté), utilisables dans une démarche d'évaluation des risques selon une approche graduée.

**PHASE EXPÉRIMENTALE**

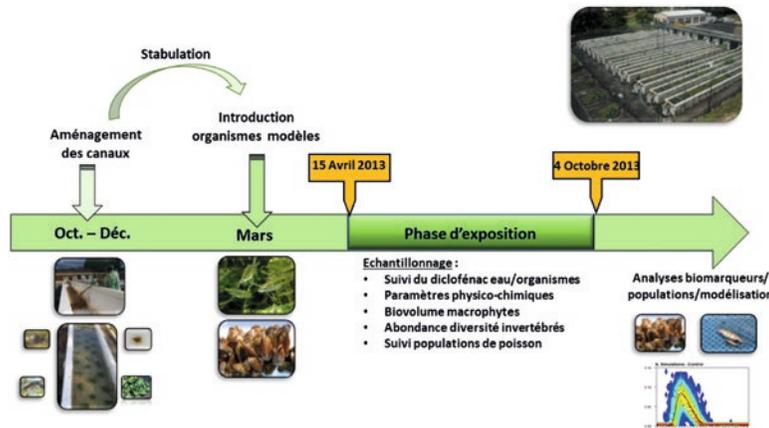
L'expérimentation a été réalisée en utilisant la plateforme de l'Ineris (12 rivières artificielles de 20 m de long chacune et 1 m de large). Sur la base de l'occurrence connue du diclofénac dans l'environnement ainsi que des données sur les effets écotoxicologiques issues de la littérature, trois concentrations ont été testées en continu en triplicat : 0,1 ; 1 et 10 µg/L. Le déroulement expérimental est présenté dans la Figure 1.

**LES PRINCIPAUX RÉSULTATS**

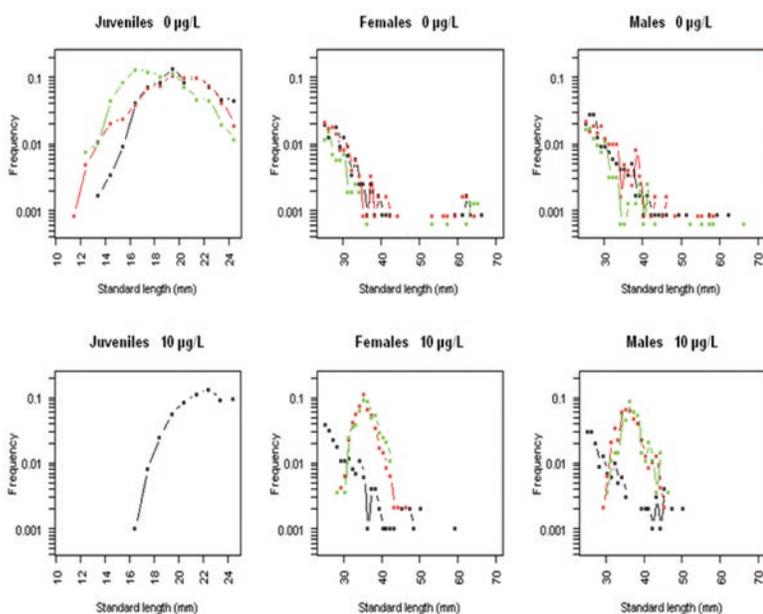
À la plus forte concentration de 3,82 µg/L (concentration mesurée correspondant à la concentration nominale de 10 µg/L), une inhibition du biovolume du cresson des fontaines a été observée (Figure 2).

**Notes**

- 1- Ineris, Unité d'écotoxicologie des milieux et des substances (ESMI)/UMR-I 02 SEBIO
- 2- Ineris, Unité de toxicologie expérimentale et modélisation (TEAMS)/UMR-I 02 SEBIO
- 3- Ineris, Expertise en toxicologie/écotoxicologie des substances chimiques (ETES)
- 4- Institut des sciences analytiques/UMR 5280
- 5- Université de Reims Champagne-Ardenne/UMR-I 02 SEBIO



**Figure 1.** Déroulement expérimental.



**Figure 3** Distribution de la fréquence des tailles des populations d'épinoches à trois épines (juvéniles, femelles et mâles) à la fin de l'expérimentation dans le bassin témoin et le traitement au diclofénac à 10 (3,82) µg/L.

## ABSTRACT

Due to the potential hazard of diclofenac on aquatic organisms and the lack of higher ecotoxicological studies, a long-term freshwater mesocosm experiment was set up to study the effects on primary producers and consumers at environmentally realistic nominal concentrations 0,1; 1 and 10 µg/L. During the five-month exposure period, the biovolume of two macrophyte species (*Nasturtium officinale* and *Callitriche platycarpa*) significantly decreased at the highest treatment level. Subsequently, a decrease in dissolved oxygen levels was observed. In the highest treatment level, one month after the beginning of the exposure, mortality of adult fish (*Gasterosteus aculeatus*) caused effects on the final population structure. Total abundance of fish and the percentage of juveniles decreased whereas the percentage of adults increased. The No Observed Effect Concentration (NOEC) value at the individual level was < 0,1 (0,041) µg/L and 1 (0,44) µg/L at the population and community levels. Our study showed that in more natural conditions, diclofenac could cause more severe effects compared to those observed in laboratory conditions. The use of our results in regulatory matters is also discussed.

Cette diminution en masse a entraîné une diminution de l'activité photosynthétique et en retour une modification de la qualité physico-chimique de l'eau. En effet, des teneurs en oxygène dissous plus faibles ont été observées à cette concentration tout au long de l'expérimentation. Après un mois d'exposition, une mortalité importante des poissons fondateurs a été constatée à 3,82 µg/L. Ceci a eu des conséquences sur la structure des populations à la fin de l'expérimentation: impacts sur le nombre de femelles fondatrices, absence d'alevins et de juvéniles, modification du sexe ratio (Figure 3).

De surcroît, une augmentation du stress oxydatif a été mise en évidence chez les poissons nés dans les mésocosmes. Des concentrations sans effets (NOECs) à différents niveaux d'organisation biologique (e.g.: individu, population, communauté) ont été dérivées pour chaque espèce étudiée selon des méthodologies décrites préalablement [4-5].

## VERS UNE UTILISATION DES DONNÉES DANS LA RÉGLEMENTATION

Dans cette étude, des effets ont été observés au niveau individuel (taux de mortalité plus élevé, inhibition ou induction de biomarqueurs, impacts sur le système immunitaire), au niveau des populations (macrophytes, poissons) et des communautés (zooplancton et macro-invertébrés). Les organismes les plus sensibles sont la moule zébrée, l'épinoche à trois épines et le cresson des fontaines. En considérant l'ensemble des résultats et les concentrations mesurées dans l'eau, une NOEC < 0,041 µg/L au niveau individuel et 0,44 µg/L au niveau de la population et de la communauté ont été dérivées. La détermination de ces paramètres vient grossir le jeu de données chroniques existant, et cette expérimentation en mésocosme lotique sur une durée de 5 mois constitue surtout la seule expérimentation du genre sur cette molécule à ce jour. Les données issues de ces travaux sont en cours d'utilisation pour dériver la NQE (norme de qualité environnementale) pour le diclofénac, dans le cadre de la Directive-Cadre sur l'eau, au travers des groupes d'experts auxquels l'Ineris participe.

## Références

- [1] Académie nationale de pharmacie. (2019). Médicaments et environnement. 103 pp.
- [2] D. Marinov, and T. Lettieri (2020). Results of the Watch List under the Water Framework Directive from the 4th reporting year and the combined dataset. Part A: Data quality, Publications Office of the European Union, Luxembourg (under printing). Available at <https://circabc.europa.eu/ui/group/9ab5926d-bed4-4322-9aa7-9964bbe8312d/library/deabbc4-c001-4855-b503-04f27996ca7d/details>
- [3] Plan national sur les résidus de médicaments dans les eaux (2011). [https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Plan\\_national\\_sur\\_les\\_residus\\_de\\_medicaments\\_dans\\_les\\_eaux\\_PNRM.pdf](https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Plan_national_sur_les_residus_de_medicaments_dans_les_eaux_PNRM.pdf)
- [4] S. Andrés (2017). Rapport scientifique de fin de projet. Projet « Développement d'Outils Robustes d'Évaluation pour les Milieux aquatiques du danger des substances Pharmaceutiques ». Coordonnateur: Sandrine ANDRES. Référence ANSM: AAP-2012-028. ANSM p.40.
- [5] G. de Kermoyan, et al. (2013). Effects of bisphenol A on different trophic levels in a lotic experimental ecosystem *Aquatic Toxicology* 144- 145, 186- 198.
- [6] C. Tebby, et al. (2017). Analysis of Community-Level Mesocosm Data Based on Ecologically Meaningful Dissimilarity Measures and Data Transformation *Environ Toxicol Chem.* 36, 1667-1679.
- S. Joachim et al., (2021), Effects of diclofenac on sentinel species and aquatic communities in semi-natural conditions, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211 : art. 111812.

## ENTRETIEN AVEC



**Cléo TEBBY**

Ingénieure en statistiques et modélisation  
Unité Toxicologie expérimentale et modélisation  
Direction Milieux et impacts sur le vivant

« Le développement de modèles génériques pourrait permettre une utilisation plus large tout en répondant aux critères de certitude fixés par les évaluations. »

### Comment vos travaux de modélisation s'intègrent-ils dans la recherche et l'expertise en matière de toxicocinétique à l'Ineris ?

L'étude de la toxicocinétique à l'Ineris se place dans la perspective des 3R (remplacement, réduction et raffinement) en affinant l'évaluation des dangers des substances chimiques. L'intégration de données de cinétique obtenues *in vivo*, *in vitro*, et *in silico* dans des modèles basés sur la physiologie de l'organisme (modèles PBPK) permet de mieux exploiter les données existantes. Nos modèles PBPK génériques (applicables à de nombreuses substances) permettent d'intégrer des données *in vitro* haut débit. Plusieurs de nos modèles sont ainsi intégrés dans des plateformes d'outils destinées aux évaluateurs de risques et aux instances réglementaires. Dans ce cadre réglementaire, nous avons récemment prédit des plombémies chez l'enfant à partir de multiples bases de données de contamination environnementale.

### Comment la réglementation existante (par exemple REACH) oriente-t-elle vos recherches ? Quelles sont les attentes réglementaires en matière de modélisation ?

Actuellement, les modèles PBPK ne sont pas requis dans les dossiers réglementaires et présentent essentiellement un intérêt dans l'évaluation des dangers toxicologiques. Les connaissances et l'expérience nécessaires au développement de modèles adaptés aux spécificités de chaque substance impliquent que de tels modèles soient disponibles

uniquement pour les contaminants environnementaux jugés prioritaires. L'unité TEAM a contribué à élaborer des recommandations dans le cadre d'un groupe de travail de l'OCDE, afin de guider le développement de modèles lorsqu'aucune donnée *in vivo* n'est disponible. Dans ce contexte, le développement de modèles génériques pourrait en permettre une utilisation plus large, tout en répondant aux critères de certitude fixés par les évaluations.

### Le développement de futurs modèles QSAR et PBPK est-il prévu à l'Ineris ? Si oui, quels en seraient les objectifs ?

Nous réalisons actuellement une compilation de nos modèles PBPK chez l'humain dans le but de comparer les prédictions de modèles génériques vs spécifiques à des substances, afin d'en faciliter l'utilisation. Les travaux de l'unité TEAM portent actuellement sur la prédiction de la toxicocinétique chez les populations sensibles (fœtus *via* la femme enceinte, enfants). Nous travaillons également sur des modèles PBPK d'embryon de poisson-zèbre en vue de l'extrapolation à l'homme à partir de données *in vitro*. D'autre part, les modèles QSAR que nous développons sont de plus en plus tournés vers la prédiction de propriétés toxicocinétiques, notamment la distribution des substances dans l'organisme et, prochainement, le métabolisme.

# ANNEXES

**70** Programmes de recherche  
menés en 2020

**75** Gouvernance scientifique

**78** 51 thèses de doctorat  
en cours au 31 décembre 2020

**81** Publications 2020

# PROGRAMMES DE RECHERCHE MENÉS EN 2020

## PROGRAMMES EUROPÉENS /

Horizon H2020	
ACTRIS IMP	ACTRIS Implementation Project
AQUALITY	Multi-sensor automated water quality monitoring and control system for continuous use in recirculation aquaculture systems
BLACKCYCLE	Recycling end of life tyres into secondary raw materials for tyres and other product applications
BIORIMA	Risk management of nano-material
C <sub>4</sub> U	Développement de deux technologies émergentes de captage du carbone, appelées DISPLACE et CASOH, qui ont le potentiel d'éliminer jusqu'à 94 % des sources de CO <sub>2</sub> dans une aciérie
CHEOPS	Achieving low-cost highly efficient perovskite solar cells
Circular Flooring	New Products from Waste PVC Flooring and Safe End-of-Life Treatment of Plasticisers
DEMOBASE	Design and modelling for improved battery safety and efficiency
EuToxRisk21	An integrated european 'Flagship' programme driving mechanism-based toxicity testing and risk assessment for the 21 <sup>st</sup> century
FLEDGED	Flexible dimethyl ether (DME) production from biomass gasification with sorption-enhanced processes
FORCeS	Constrained aerosol forcing for improved climate projections
Gov4Nano	Implementation of risk governance: meeting the needs of nanotechnology
HBM4EU	Coordinating and advancing human biomonitoring in Europe to provide evidence for chemical policy making
InnovEOX	Training a new generation of researchers in Innovative Electrochemical Oxidation processes
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 hearth elements
ZELCOR	Zero waste ligno-cellulosic biorefineries by integrated lignin valorisation
LIFE – Programme for the environment and climate action	
LIFE Ask REACH	Enabling REACH consumer information rights on chemicals in articles by IT-tools
VERMEER	Integrating VEGA, toxRead, MERLIN-Expo, and ERICA in a platform for risk assessment and substitution of risky substance

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

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

### EMPIR - European Metrology Programme for Innovation and Research

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

### RFCS - Research fund for coal and steel

MEGA +	Methane production through underground coal gasification form deep European coal seams
RAFF	Risk assessment of final pits during flooding
SUMAD	Sustainable use of mining waste dumps

### EuroNanoMed

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

### COST - European Cooperation in Science and Technology

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

## PROGRAMMES NATIONAUX /

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe)	
ACIBIOQA	Amélioration des connaissances des installations biomasse sur la qualité de l'air
APoLLO	Analyse économique des impacts de la pollution atmosphérique de l'ozone sur la productivité agricole et sylvicole
BIOAC'ERS	Outil de caractérisation des expositions de l'Homme pour améliorer les évaluations de risques sanitaires
BRAINSOL	Évaluation de la toxicité pour le cerveau des mélanges de polluants retrouvés au niveau de sites et sols pollués
CaRPE	Caractérisation et réduction des émissions des procédés poudres métalliques Hautes énergies
CARTHAGE	Contribution de l'air dans les risques et transferts associés aux HAP en agricultures urbaines : gestion et évaluation
CONCEPTECH	Conception d'appareils domestiques de chauffage au bois performants
EPOCHAG	Émissions par les poêles et les chaudières à granules
EVALPHYTO	Suite du projet Phytosed
EVORA	Détermination des émissions d'espèces semi-volatiles organiques par classes de volatilité – impact sur la modélisation de la qualité de l'air
EXTRA-ZN	Production de biomasses enrichies en Zn par phytoextraction pour l'écocatalyse
IDOLES	Innovation et pré-développement d'éléments lithium-ion optimisés à électrolytes liquides
METERDIOX-TER	Vers un dispositif de détection de dioxines à l'émission de sources fixes
MethanEmis	Recommandations et travaux en cours en vue de limiter les émissions de méthane dans les installations de méthanisation agricole
LOCKAIR	Effet des restrictions d'activité en réponse à l'épidémie de Covid-19 sur les émissions anthropiques et la qualité de l'air en France et en Europe
PhytEO	Phytostabilization and Essential. La production d'huiles essentielles : une filière éco-innovante de reconversion des sites historiquement pollués
PRESSENS	Émissions de composés volatils 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
RHAPSODIE	Répartition gazeuse et particulaire des HAPs, nitro-HAP et oxy-HAP émis par des véhicules Euro 6 diesel et essence
RHAPSODIE 2	Émission de polluants non réglementés des véhicules légers et impact des carburants
REGIC	Renforcement par géosynthétique intelligent pour risque cavités
SODEMASS	Déconvolution des sources de combustion de biomasse
TIPOMO	Étude du transfert, indice de préoccupation : outil pour la valorisation des friches moyennement contaminées
TOXINTRANSPORT	Caractérisation des particules inhalées : s'approcher de l'impact sur le vivant
TRIPODE	Amélioration puis démocratisation de l'utilisation de la norme d'évaluation du risque pour les écosystèmes Triade

### Agence de l'eau Artois-Picardie

MAQUEREAU Exploration du lien pression impact en cours d'eau à l'aide des biomarqueurs

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

ED-SCREEN	Projet axé autour du développement d'un outil informatique pouvant mettre à disposition un aperçu rapide et fiable des modes d'action des perturbations endocriniennes liées aux voies des œstrogènes, des androgènes, de la thyroïde et de la stéroïdogenèse (EATS)
GinFiz	Inhibition de l'aromatase gonadique et autres chemins de toxicité conduisant à une diminution de la fécondité chez le poisson-zèbre : de l'événement initiateur aux impacts sur les populations
Indee	Caractérisation et identification de perturbateurs endocriniens environnementaux dans les milieux aquatiques : une approche inter-espèces
LuLi	Développement d'un dispositif innovant <i>in vitro</i> pour l'évaluation toxicologique de xénobiotiques inhalés : poumon/foie
MOTHERR	Modélisation numérique de l'interaction des champs RF sur les récepteurs thermiques – Mécanismes et expérimentations <i>in vivo</i> et <i>in vitro</i>
NeuroPrem-RF	Impact de l'exposition chronique aux champs électromagnétiques de type radiofréquences sur le développement physiologique du nouveau-né prématuré

### Agence nationale de la recherche (ANR)

Argonaut	Suivi des émissions de polluants et de gaz à effet de serre à haute résolution depuis l'espace
DESIHR	Drones en essais pour la surveillance de l'air des Sites Industriels à Hauts Risques
FEATS	Utilisation des embryons de poisson-zèbre pour l'évaluation du risque toxicologique : cas des perturbateurs endocriniens agissant sur l'aromatase cérébrale
PREVIPOL	Allergie au pollen : vers un système de prévision du risque
MAPSEA	Matériaux absorbants pour la protection des sites industriels

### CNRS

DERBI DERBI : Développement d'un modèle PBTK-TD pour étudier les réponses physiologiques de poissons exposés aux bisphénols

### Conseil régional des Hauts-de-France

C3PEAUX	Contamination en microPlastiques et Polluants organiques Persistants associés dans les eaux superficielles et souterraines
PHYTOEXCO	Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur <i>Arabidopsis halleri</i> en co-culture avec le saule

**Labex Serenade**

TILT Toxicologie transverse aux case studies

**Ministère de la Transition écologique**

PEPPER Plateforme public-privé pour la prévalidation de méthodes de caractérisation des perturbateurs endocriniens

Empreintes environnementales Identification des sources de contamination et intelligence artificielle

**Office français de la biodiversité**

NEUROPHYTO Évaluation des effets sur le neurodéveloppement de l'exposition prénatale et postnatale aux produits phytopharmaceutiques

**ULCO**

DEPHYTOP Démonstrateur de phytomanagement des sols contaminés par les ETM basé sur l'économie circulaire : optimisation de la filière huiles essentielles

# GOUVERNANCE SCIENTIFIQUE

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

## CONSEIL SCIENTIFIQUE

### Présidente : Corinne GENDRON

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

### Vice-président : Philippe FREYSSINET

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

## MEMBRES

### Vincent-Henri PEUCH

- Directeur du CAMS  
ECMWF

### Isabelle MOMAS

- Professeure des universités  
Faculté de Pharmacie de Paris  
Université Paris Descartes

### Michel SARDIN

- Professeur  
ENSIC, Université de Lorraine

### Jean-Paul CHABARD

- Directeur scientifique  
EDF R&D

### Nadine GABAS

- Professeure en Sécurité des procédés  
ENSIACET

## COMMISSIONS SCIENTIFIQUES SPÉCIALISÉES

### Commission scientifique "Risques accidentels"

#### Président : Hervé BREULET

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

#### Vice-présidente : Nabiha CHAUMEIX

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

## MEMBRES

### André CARRAU

- Ingénieur sénior  
EDF

### Khaled CHETEHOUNA

- Professeur des Universités  
INSA Centre-Val de Loire

### Franck DUMEIGNIL

- Directeur de l'UCCS  
Université de Lille

### Lionel ESTEL

- Professeur  
Laboratoire de sécurité des procédés chimiques  
INSA Rouen

### Simon JALLAIS

- Expert sénior international  
Air Liquide R&D

### Marc-Xavier JOUBERT

- Vice-président du département génie incendie avancé  
SUEZ

### Jean-Paul LABARTHE

- Chef de groupe Facteurs organisationnels et humains  
EDF R&D

### Valérie SAUVANT-MOYNOT

- Cheffe de département Électrochimie et matériaux  
IFP Énergies nouvelles

## Commission scientifique "Risques chroniques"

#### Présidente : Patricia MERDY

- Maître de conférences  
Université de Toulon

#### Vice-président : Luc MOSQUERON

- Expert Évaluation des risques sanitaires  
Veolia Environnement, Recherche et Innovation

#### Nils Axel BRAATHEN

- Administrateur principal, division des performances et de l'information environnementales  
Direction de l'Environnement  
OCDE

**Cécile DELATTRE**

- Pilote d'affaire Environnement RTE

**Juliette FABURÉ**

- Maître de conférences AgroParisTech

**Guillaume GARCON**

- Professeur en toxicologie Responsable du département Toxicologie et de Santé publique Faculté de pharmacie de Lille

**Martial HAEFFELIN**

- Responsable scientifique du SIRTA
- Directeur adjoint de l'IPSL École Polytechnique de Palaiseau

**Virginie MARECAL**

- Directrice de recherche CNRM

**Michel MENCH**

- Directeur de recherche INRAE

**Christophe ROUSSELLE**

- Toxicologue Chef d'unité et chef de pôle Dangers des substances ANSES

**Emmanuelle VULLIET**

- Directrice adjointe ISA Lyon

### Commission scientifique "Risques sol et sous-sol"

**Président : Patrick DE BUHAN**

- Professeur de calcul des structures École des Ponts ParisTech

**Vice-présidente : Evelyne FOERSTER**

- Cheffe du Laboratoire ESMI CEA

**Serge BROUYÈRE**

- Chef de travaux Urban environnement engineering Université de Liège

**Christophe CHEVALIER**

- Directeur du Laboratoire SRO Département GERS IFSTTAR

**Philippe DE DONATO**

- Directeur adjoint de l'UMR GéoRessources Université de Lorraine

**Albert GENTER**

- Directeur général adjoint ÉS Géothermie

**Rafik HADADOU**

- Directeur de GEODERIS

**Charles KREZIAK**

- Ingénieur géotechnicien Société du Grand Paris

**Vincent LAGNEAU**

- Directeur adjoint du Centre de Géosciences MINES ParisTech

**Jean SCHMITTBUHL**

- Directeur de recherche EOST

**Katshidikaya TSHIBANGU**

- Ingénieur civil des mines
- Professeur et chef de service Génie minier Université de Mons

### COMMISSION DE LA RECHERCHE ET DE L'EXPERTISE (CORE)

**Mandat 2021- 2023**

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

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

### Personnalités qualifiées de l'enseignement supérieur ou de la recherche

**Céline GRANJOU**

- Directrice de recherche Laboratoire Écosystèmes et Sociétés en Montagne (LESSEM), INRAE

**Brice LAURENT (Vice-président)**

- Chargé de recherche Centre de Sociologie de l'innovation, MINES ParisTech

### Collège Industriels

**Jean-François LECHAUDEL**

- Chef du département Affaires réglementaires Total SA

**Roland RIEFER,**

Ancien responsable HSE au sein du Groupe MBDA

**Sylvaine RONGA-PEZERET**

- Médecin toxicologue Service des Études médicales, EDF

**Marie ZIMMER**

Responsable Management des produits, France Chimie

## Collège Associations

### **Maxime COLIN,**

Chargé de mission juridique, France Nature Environnement (FNE) Île-de-France

### **Marion FORTUNE**

• Bénévole à Nature 18  
Coordinatrice territoriale bassin Adour-Garonne au FNE Midi-Pyrénées

### **Patrick HAUTIERE**

• Membre du bureau national  
Responsable du secteur Environnement, CLCV

### **Jean-Yves LEBER**

• Porte-parole d'Écologie Sans Frontière (ESF)  
Administrateur de Green Cross France et Territoires

## Collège Syndicats

### **Bertrand BRULIN,**

• Délégué fédéral, FCE-CFDT

## Collège Élus

### **Irène FELIX (Présidente)**

• Présidente de la Communauté d'agglomération de Bourges Plus  
• Conseillère municipale de Bourges Cher

### **Jacques REIS**

• Conseiller municipal d'Oberhausbergen Bas-Rhin

### **Patrice SCHOEPFF**

• Conseiller eurométropolitain et Conseiller municipal délégué de Strasbourg Bas-Rhin

### **Marine TONDELIER,**

• Conseillère communautaire d'Hénin-Carvin, Conseillère municipale d'Hénin-Beaumont Pas-de-Calais

## Collège État

### **Thierry COURTINE**

• Chef du service de la Recherche et de l'innovation (représenté par Sylvain ROTILLON, Adjoint au coordonnateur interministériel pour le développement du vélo), ministère de la Transition écologique

### **Cédric BOURILLET**

• Directeur général de la Prévention des risques (représenté par Delphine RUEL, Sous-directrice des Risques accidentels), ministère de la Transition écologique

# 51 THÈSES DE DOCTORAT EN COURS AU 31 DÉCEMBRE 2020

## RISQUES CHRONIQUES

<b>Abd El Rahman EL MAIS</b>	BBSOAT : compréhension des processus de formation et de la toxicité de l'aérosol organique secondaire (AOS) issu de la combustion de biomasse	2020/2023
<b>Alexandre PERLEIN</b>	Évaluation des performances techniques et environnementales d'un projet biobasé à potentiel maximal : de l'outil d'aide à la décision au terrain, et inversement	2019/2023
<b>Ambre DELATER</b>	Développement d'une méthode de prélèvement <i>in situ</i> d'aérosols en vue de l'évaluation des réponses pulmonaires induites	2020/2023
<b>Amélie CANT</b>	Approche multi-marqueurs de la génotoxicité chez l'épinoche à trois épines pour une application en biosurveillance de la qualité des milieux aquatiques	2019/2022
<b>Andrea RIVERO ARZE</b>	Interaction et accumulation des nanoparticules chez les organismes aquatiques	2018/2021
<b>Armelle CHRISTOPHE</b>	Étude des polluants PE chez les embryons de poisson-zèbre : apport des modèles génétiquement modifiés (transgéniques, Knock out) pour prédire les impacts toxicologiques sur la santé humaine et environnementale	2019/2022
<b>Arnaud GRIGNET</b>	Étude des performances de phytoextraction du Zn et du Cd de l'hyperaccumulateur <i>Arabidopsis halleri</i> en coculture avec le saule (PHYTOEXCO)	2017/2021
<b>Camille MOUGIN</b>	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
<b>Camille NOBLET</b>	Caractérisation chimique de l'aérosol organique atmosphérique en utilisant des approches d'analyses non ciblées	2018/2021
<b>Clémence CHARDON</b>	Développement de l'approche EDA : optimisation de la méthodologie et application à la caractérisation de perturbateurs endocriniens (PE) spécifiques du poisson-zèbre dans les eaux de surface	2018/2022
<b>Corentin MIT</b>	Modélisation mécanistique du lien entre les biomarqueurs d'effets précoces et les impacts sur les populations chez l'épinoche à trois épines	2019/2022
<b>Corentin REGRAIN</b>	Optimisation des outils d'évaluation de l'exposition spatialisée et intégrée	2017/2020
<b>Dimitri BESSET</b>	Impact de l'exposition chronique aux champs électromagnétiques de type radiofréquences sur le développement neurophysiologique du nouveau-né prématuré	2018/2021
<b>Florian PHILIPPE</b>	Analyse physico-chimique et compréhension des mécanismes de génération des particules aérosols issues du freinage d'un véhicule automobile	2017/2021
<b>Elisa THEPAUT</b>	Évaluation de l'exposition prénatale et postnatale aux substances chimiques grâce à la modélisation pharmacocinétique appliquée à la physiologie (PBPK)	2020/2023
<b>Étienne PETITPREZ</b>	Déploiement de flottilles de drones pour la réalisation de tâches complexes	2020/2023
<b>Hasna CHEIBACHEB</b>	Sources of Fine Aerosols at various French Sites using Highly Time-Resolved Multi-Year datasets (SAMy)	2020/2023
<b>Hugo ROLLIN</b>	Utilisation des données de microcapteurs pour la modélisation et la cartographie de la qualité de l'air à l'échelle urbaine	2019/2022

<b>Ibtihel BEN DHIAB</b>	Étude de la biodistribution quantitative et qualitative de nanoparticules d'oxyde de titane (TiO <sub>2</sub> ) après inhalation chez le rat	2017/2021
<b>Jasmina WALLACE</b>	Effets des champs radiofréquences sur l'activité électrique cérébrale d'éveil. Étude par analyse d'EEG/MEG combinées chez des volontaires sains	2016/2020
<b>Jennifer MAALOUF</b>	Modélisation numérique de l'interaction des champs RF sur les récepteurs thermiques - mécanismes et expérimentations <i>in vivo</i> et <i>in vitro</i> (MOTHERR)	2020/2023
<b>Julie DE OLIVEIRA</b>	Utilisation de poissons-zèbres génétiquement modifiés pour l'étude des mécanismes et des effets des perturbateurs endocriniens	2017/2020
<b>Layla JAMAL</b>	Recherche des biomarqueurs et indices physiologiques dans la sensibilité aux champs électromagnétiques	2020/2023
<b>Lei JIANG</b>	Amélioration des prévisions de la qualité de l'air à haute résolution - Focus sur les zones urbaines et périurbaines et les épisodes de pollution spécifiques en France	2017/2021
<b>Leïla SIMON</b>	Détermination des sources de polluants atmosphériques carbonés (gazeux et particulaires) en Île-de-France	2019/2022
<b>Marie DELLISE</b>	Évaluation multicritère et multi-objectif à l'échelle locale des performances des entreprises au regard des Meilleures Techniques Disponibles (MTD)	2017/2020
<b>Maiqi XIANG</b>	Technique de prélèvement d'aérosol sur grille MET poreuse	2017/2021
<b>Marc CODACCIONI</b>	Évaluation de l'exposition foetale aux substances chimiques grâce à la modélisation pharmacocinétique basée sur la physiologie (PBPK). Applications aux données d'imprégnation des populations	2016/2020
<b>Quynh Khoa PHAM</b>	Évaluation de méthodes de préparation d'échantillon et d'analyse pour la détection de produits de dégradation de procédés d'oxydation avancés	2020/2023
<b>Sabrina MADIEDO-PODVRSAN</b>	Barrières pulmonaires <i>in vitro</i> cultivées en condition dynamique et couplées à une bio-puce hépatique : application en toxicologie prédictive	2019/2022
<b>Ségolène SIMEON</b>	Modélisation mathématique systémique de la toxicité envers la reproduction et le développement du poisson-zèbre	2017/2020
<b>Thi Cuc MAI</b>	Dysfonctionnement de la régulation thermique après exposition chronique chez les rongeurs	2017/2020
<b>Wang GAO</b>	Réseaux bayésiens : méthodologie et application à l'inférence sur la structure des schémas de mode d'action en toxicologie prédictive	2017/2020
<b>Wassim ALMOUALLEM</b>	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	2018/2022
<b>Yourdasmine ALI DAOUD</b>	Prédire les effets néfastes des contaminants environnementaux dans les études de biosurveillance humaine : apport du couplage de modèles toxicocinétiques basés sur la physiologie (PBPK) et de modèles d'effets	2020/2023
<b>Zhizhao WANG</b>	Influence des émissions anthropiques sur la formation d'aérosol organique en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'environnement	2019/2022

	<b>RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL</b>	
<b>Dalija NAMJESNIK</b>	Origine de la sismicité dans une mine de charbon abandonnée ennoyée à Gardanne	2017/2021
<b>Elodie LACROIX</b>	Développement d'outils de monitoring pour la détection des fuites d'hydrogène (H <sub>2</sub> ) à l'aplomb des sites de stockage géologique	2018/2021
<b>Emeline LHOUMAUD</b>	Caractérisation et prévention des ruptures dans les massifs rocheux soumis à l'activité anthropique par auscultation <i>in situ</i> et modélisation numérique	2020/2023
<b>Emilio ABI AAD</b>	Modélisation physique et numérique de la stabilité des ouvrages souterrains	2020/2023
<b>Ever Dennys COARITA TINTAYA</b>	Modélisation du comportement hydromécanique des argilites : anisotropie structurale et induite, relation endommagement/perméabilité	2017/2020
<b>Imen ZAIER</b>	Rôle du transport particulaire lié à la destructuration de gypses poreux dans le développement de cavités de dissolution	2017/2021
<b>Kamel DRIF</b>	Développement d'outils de monitoring des réservoirs géothermiques profonds à partir du suivi haute résolution de la micro-sismicité induite et d'approches d'intelligence artificielle	2019/2022
	<b>RISQUES ACCIDENTELS</b>	
<b>Audrey SANTANDREA</b>	Compréhension des spécificités des particules nanométriques pour une meilleure prédiction des conséquences des explosions de poussières	2017/2020
<b>Cléante LANGREE</b>	Vers la modélisation de la propagation de vitesse de flamme pour des déflagrations consécutives à des rejets industriels accidentels	2018/2021
<b>Hamza EL YAMANI</b>	Caractérisation du comportement de matériaux dissipatifs isolants sous chocs	2018/2021
<b>Nicolas FAYARD</b>	Modélisation de menaces collectives	2019/2022
<b>Stéphanie EL-ZAHLANIEH</b>	Étude expérimentale des inflammations d'aérosols liquides : application aux brouillards d'hydrocarbures	2019/2022
<b>Tamara OUEIDAT</b>	Maîtrise des risques cyberphysiques dans les installations classées	2019/2022
<b>Thi Thu Dieu NGUYEN</b>	Compréhension du phénomène d'emballement thermique des batteries Li-ion par modélisation multiphysique	2017/2020
	<b>OUVERTURE À SOCIÉTÉ</b>	
<b>Lucile OTTOLINI</b>	Institutionnalisation de l'ouverture à la société au sein des organismes de recherche : vers de nouvelles interactions sciences/sociétés ?	2017/2020

# PUBLICATIONS 2020

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques accidentels	SANTANDREA, Audrey ; GAVARD, Marine ; PACAULT, Stéphanie ; VIGNES, Alexis ; PERRIN, Laurent ; DUFAUD, Olivier	Knock on nanocellulose : approaching the laminar burning velocity of powder-air flames	Process Safety and Environmental Protection, 2020, 134 : pp. 247-259
	FAYET, Guillaume ; TRIBOUILLOY, Benoît ; ROTUREAU, Patricia	Flash point of binary mixtures of chlorinated hydrocarbons with toluene and their predictability with existing mixing rule	Process Safety Progress, 2020 : art. e2127
	LAROUZEE, Justin ; LE COZE, Jean-Christophe	Good and bad reasons : the Swiss cheese model and its critics	Safety Science, 2020, 126 : art. 104660
	FORESTIER, Coralie ; LECOCQ, Amandine ; ZANTMAN, Aurélien ; GRUGEON, Sylvie ; SANNIER, Lucas ; MARLAIR, Guy ; LARUELLE, Stéphane	Study of the role of LiNi1/3Mn1/3Co1/3O2/graphite Li-Ion pouch cells confinement, electrolyte composition and separator coating on thermal runaway and off-gas toxicity	Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167 (9) : art. 090513
	LIU, Qi ; PROUST, Christophe ; GOMEZ, François ; LUART, Denis ; LEN, Christophe	The prediction multi-phase, multi reactant equilibria by minimizing the Gibbs energy of the system : review of available techniques and proposal of a new method based on a Monte Carlo technique	Chemical Engineering Science, 2020, 216 : art. 115433
	MENICACCI, Eleonora ; ROTUREAU, Patricia ; FAYET, Guillaume ; ADAMO, Carlo	Toward the mechanistic understanding of the additives' role on ammonium nitrate decomposition : calcium carbonate and calcium sulfate as case studies	ACS OMEGA, 2020, 5 (10) : pp. 5034-5040
	LACOME, Jean-Marc ; LEMOFACK, Cédric ; JAMOIS, Didier ; REVEILLON, Julien ; DURET, Benjamin ; DEMOULIN, François-Xavier	Experimental data and numerical modeling of flashing jets of pressure liquefied gases	Process Safety Progress, 2020 : art. prs12151
	SANTANDREA, Audrey ; VIGNES, Alexis ; KRIETSCH, Arne ; BRUNELLO, David ; PERRIN, Laurent ; LAURENT, André ; DUFAUD, Olivier	Evaluating the explosion severity of nanopowders : international standards versus reality	Process Safety and Environmental Protection, 2020, 138 : pp. 279-291
	SANGREGORIO, Anna ; MURALIDHARA, Anitha ; GUIGO, Nathanael ; THYGESEN, Lisbeth G. ; MARLAIR, Guy ; ANGELICI, Carlo ; DE JONG, Ed ; SBIRRAZZUOLI, Nicolas	Humin based resin for wood modification and property improvement	Green Chemistry, 2020, 22 (9) : pp. 2786-2798
	PENELON, Thibault ; DEBUY, Véronique ; TRUCHOT, Benjamin ; WAGNER, Christophe ; DONNAT, Ludovic ; LECHAUDEL, Jean-François	Pool evaporation : experimental tests at medium-scale with gasoline	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 65 : art. 104072
	LE COZE, Jean-Christophe	Ideas for the future of safety science	Safety Science, 2020, 132 : art. 104966
	PROUST, Christophe ; BEN MOUSSA, Rim	Understanding the role of thermal radiation in dust flame propagation	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques accidentels	PROUST, Christophe	A new technique to produce well controlled electrical sparks. application to MIE measurements	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	JAMOIS, Didier ; PROUST, Christophe ; HEBRARD, Jérôme ; LEPRETTE, Emmanuel ; HISKEN, Helene ; MAURI, Lorenzo ; ATANGA, Gordon ; LUCAS, Melodia ; VAN WINGERDEN, Kees ; SKJOLD, Trygve ; QUILLATRE, Pierre ; DUTERTRE, Antoine ; MARTEAU, Thibault ; PEKALSKI, Andrzej ; JENNEY, Lorraine ; ALLASON, Dan ; JOHNSON, Mike	Turbulence in real flammable gas releases	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	SANTANDREA, Audrey ; TORRADO, David ; PIETRACCINI, Matteo ; VIGNES, Alexis ; PERRIN, Laurent ; DUFAUD, Olivier	A flame propagation model for nanopowders	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	EL-ZAHLANIEH, Stéphanie ; CHARVET, Augustin ; VIGNES, Alexis ; TRIBOUILLOY, Benoît ; DUFAUD, Olivier	Hydrocarbon aerosol explosion : towards hazardous area classification	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	HISKEN, Helene ; MAURI, Lorenzo ; ATANGA, Gordon ; LUCAS, Melodia ; VAN WINGERDEN, Kees ; SKJOLD, Trygve ; QUILLATRE, Pierre ; DUTERTRE, Antoine ; MARTEAU, Thibault ; PEKALSKI, Andrzej ; JENNEY, Lorraine ; ALLASON, Dan ; JOHNSON, Mike ; LEPRETTE, Emmanuel ; JAMOIS, Didier ; HEBRARD, Jérôme ; PROUST, Christophe	Assessing the influence of real releases on explosions : selected results from large-scale experiments	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	LECOCQ, Guillaume ; DUTERTRE, Antoine ; LEPRETTE, Emmanuel	Impact of photovoltaic power plants on far-field effects of UVCEs	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	LANGREE, Cléante ; FRANQUET, Erwin ; REVEILLON, Julien ; LECOCQ, Guillaume ; DEMOULIN, François-Xavier	CFD Simulation of an unconfined vapor cloud explosion through obstacles using OpenFoam	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	JOUBERT, Lauris ; LEROY, Guillaume ; BETTERIDGE, Steven ; VYAZMINA, Elena ; BERNARD, Laurence ; JAMBUT, Romain ; FRINDEL, Jérôme	Presentation of the experimental JIP SPARCLING: inside and beyond a pressurised LNG release	Proceedings of the 13 <sup>th</sup> international symposium on hazards, prevention, and mitigation of industrial explosions (ISHPMIE). 2020
	GIUBILATO, Elisa ; CAZZAGON, Virginia ; AMORIM, Monica ; BLOSI, Magda ; BOUILLARD, Jacques ; BOUWMEESTER, Hans ; COSTA, Anna Luisa ; FADEEL, Bengt ; FERNANDES, Teresa ; FITO, Carlos ; HAUSER, Marina ; MARCOMINI, Antonio ; NOWACK, Bernd ; PIZZOL, Lisa ; POWELL, Leigh ; PRINA-MELLO, Adriele ; SARIMVEIS, Haralambos ; SCOTT-FORDSMAND, Janek James ; SEMENZIN, Elena ; STAHLMECKE, Burkhard ; STONE, Vicki ; VIGNES, Alexis ; WILKINS, Terry ; ZABEO, Alex ; TRAN, Lang ; DANAIL, Hristozov	Risk management framework for nano-biomaterials used in medical devices and advanced therapy medicinal products	Materials, 2020, 13 (20) : art. 4532
	SANTANDREA, Audrey ; PACAULT, Stéphanie ; BAU, Sébastien ; OUDART, Yohan ; VIGNES, Alexis ; PERRIN, Laurent ; DUFAUD, Olivier	Safer and stronger together ? Effects of the agglomeration on nanopowders explosion	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020 : Accepté

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques accidentels	TRUCHOT, Benjamin ; CARRAU, André ; DEBUY, Véronique ; PENELON, Thibault ; BERTRAND, Jean-Pierre	Experimental and numerical evaluation of toxic pool evaporation	Applied Sciences, 2020, 10 (23) : art. 8448
	GENTILHOMME, Olivier ; WEINBERGER, Benno ; JOUBERT, Lauris	Étude de sécurité d'une station de distribution d'hydrogène gazeux	Actes du 22 <sup>e</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. 2020, pp. 45-50
	VALLEE, Agnès ; LE-ROUX, Benjamin ; CHAUMETTE, Sylvain ; DUPLANTIER, Stéphane	Activités économiques autour des sites SEVESO seuil haut : comment se protéger du risque technologique ?	Actes du 22 <sup>e</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. 2020, pp. 69-75
	LE COZE, Jean-Christophe ; VALLEE, Agnès ; PLOT, Emmanuel ; BOUTILLON, Marine ; MASSE, François ; MAZRI, Chabane ; MARCON, Thomas	Transitions et analyses de risques : défis et perspectives	Actes du 22 <sup>e</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. 2020, pp. 147-156
	QUINTIN, Aurélie ; DUVAL, Carole ; DE DIANOUS, Valérie ; LE MORVAN, Thiphaine ; MARCON, Thomas ; LANNOY, André	Identification des différences de traitement des événements internes, agressions internes et agressions naturelles extrêmes, lors de l'évaluation du risque d'une installation industrielle	Actes du 22 <sup>e</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. 2020, pp. 681-686
	QUEIDAT, Tamara ; FLAUS, Jean-Marie ; MASSE, François	Classification des principales méthodes d'analyse des risques combinant la sécurité et la sûreté	Actes du 22 <sup>e</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. 2020, pp. 781-790
	MAZRI, Chabane ; LEJEUNE, Christophe ; VOISIN, Véronique ; SOUMARE, Idriss ; GRUSON, Benoît ; SAINTE ROSE FANCHINE, Céline	Indicateurs de performance sécurité : analyse comparative de pratiques dans différents systèmes à risques	Actes du 22 <sup>e</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement. 2020, pp. 1096-1106
	FAYET, Guillaume ; ROTUREAU, Patricia	Chemoinformatics for the safety of energetic and reactive materials at Ineris	Molecular Informatics, 2020
	DI BARI, Cinzia ; LECOCQ, Amandine ; MARLAIR, Guy ; TRUCHOT, Benjamin ; MAZZARO, Michele ; MELE, L.E. ; RUSSO, Paolo	Recent safety focused overall analysis, testing and accident reviews towards safer e-mobility and energy storage	Proceedings of the International Conference on Fires In Vehicles (FIVE 2020). NC : RISE Safety, 2020
	MNNAMEE, Margaret ; MARLAIR, Guy ; TRUCHOT, Benjamin ; MEACHAM, Brian	Research roadmap : environmental impact of fires in the built environment. Final report.	Fire Protection Research Foundation, 2020
	BOUDALAA, Mohamed ; OLLIER, Yannick	Électricité statique : source d'incendie et d'explosion	Techniques de l'Ingénieur. Paris : Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2020, p. SE 5 120v2
	LE COZE, Jean-Christophe	Human and organisational factors : fad or not fad?	JOURNE, Benoît ; LAROCHE, Hervé ; BIEDER, Corinne ; GILBERT, Claude - Human and Organisational Factors. Practices and Strategies for a Changing World. Cham : Springer, 2020, pp. 117-123 (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology)
	LE COZE, Jean-Christophe	Post normal accident : revisiting perrow's classic	CRC PRESS, 2020

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	MIGAULT, Lucile ; GARLANTEZEC, Ronan ; PIEL, Clément ; MARCHAND-MARTIN, Laeticia ; ORAZIO, Sébastien ; CHEMINAT, Marie ; ZAROS, Cécile ; CARLES, Camille ; CARDIS, Elisabeth ; ANCEL, Pierre-Yves ; CHARLES, Marie-Aline ; DE SEZE, René ; BALDI, Isabelle ; BOUVIER, Ghislaine	Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields, prematurity and small for gestational age : a pooled analysis of two birth cohorts	Occupational and Environmental Medicine, 2020, 77(1) : pp. 22-31
	VAILLANT, Colette ; GUEGUEN, Marie-Madeleine ; FEAT, Justyne ; CHARLIER, Thierry ; COUMAILLEAU, Pascal ; KAH, Olivier ; BRION, François ; PELLEGRINI, Elisabeth	Neurodevelopmental effects of natural and synthetic ligands of estrogen and progesterone receptors in zebrafish eleutheroembryos	General and Comparative Endocrinology, 2020, 288 : art. 113345
	BOUJI, Marc ; LECOMTE, Anthony ; GAMEZ, Christelle ; BLAZY, Kelly ; VILLEGIER, Anne-Sophie	Impact of cerebral radiofrequency exposures on oxidative stress and corticosterone in a rat model of alzheimer's disease	Journal of Alzheimers Disease, 2020, 73 (2) : pp. 467-476
	DE OLIVEIRA, Julie ; CHADILI, Edith ; PICCINI, Benjamin ; TURIÉS, Cyril ; MAILLOT-MARECHAL, Emmanuelle ; PALLUEL, Olivier ; PARDON, Patrick ; BUDZINSKI, Hélène ; COUSIN, Xavier ; BRION, François ; HINFRAY, Nathalie	Refinement of an OECD test guideline for evaluating the effects of endocrine disrupting chemicals on aromatase gene expression and reproduction using novel transgenic cyp19a1a-eGFP zebrafish	Aquatic Toxicology, 2020, 220 : art. 105403
	VAN DER VOET, Hilko ; KRUISSELBRINK, Johannes W. ; DE BOER, Waldo J. ; VAN LENTHE, Marco S. ; VAN DEN HEUVEL, J.J.B. ; CREPET, Amélie ; KENNEDY, Marc C. ; ZILLIACUS, Johanna ; BERONIUS, Anna ; TEBBY, Cléo ; BROCHOT, Céline ; LUCKERT, Claudia ; LAMPEN, Alfonso ; RORIJE, Emiel ; SPRONG, Corinne ; VAN KLAVEREN, Jakob D.	The MCRA toolbox of models and data to support chemical mixture risk assessment	Food and Chemical Toxicology, 2020, 138 : art. 111185
	BLECHSCHMIDT, Anne-Marlene ; ARTETA, Joaquim ; COMAN, Adriana ; CURIEE, Lyana ; ESKES, Henk ; FORET, Gilles ; GIELEN, Clio ; HENDRICK, François ; MARECAL, Virginie ; MELEUX, Frédéric ; PARMENTIER, Jonathan ; PETERS, Enno ; PINARDI, Gaia ; PITERS, Ankie J.M. ; PLU, Matthieu ; RICHTER, Andreas ; SEGERS, Arjo ; SOFIEV, Mikhail ; VALDEBENITO, Alvaro M. ; VAN ROOZENDAEL, Michel ; VIRA, Julius ; VLEMMIX, Tim ; BURROWS, John P.	Comparison of tropospheric NO <sub>2</sub> columns from MAX-DOAS retrievals and regional air quality model simulations	Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20 (5) : pp. 2795-2823
	SIMEON, Ségolène ; BROTMANN, Katharina ; FISHER, Ciaran ; GARDNER, Iain ; SILVESTER, Steve ; MACLENNAN, Richard ; WALKER, Paul ; BRAUNBECK, Thomas ; BOIS, Frédéric Y.	Development of a generic zebrafish embryo PBPK model and application to the developmental toxicity assessment of valproic acid analogs	Reproductive Toxicology, 2020, 93 : pp. 219-229
	BRESSOT, Christophe ; MORGENEYER, Martin ; AGUERRE-CHARIOL, Olivier ; BOUILLARD, Jacques ; ZARAS, Kevin ; WISSER, Germ W. ; MEIER, Robert J.	Sanding and analysis of dust from nano-silica filled composite resins for stereolithography	Chemical Engineering Research and Design, 2020, 156 : pp. 23-30
	ARRHENIUS, Karine ; FISCHER, Andreas ; BUKER, Oliver ; ADRIEN, Hervé ; EL MASRI, Ahmad ; LESTREMAU, François ; ROBINSON, Tim	Analytical methods for the determination of oil carryover from CNG/biomethane refueling stations recovered in a solvent	RSC Advances, 2020, 10 (20) : pp. 11907-11917

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	TOMASETIG, Florence ; TEBBY, Cléo ; GRAILLOT, Vanessa ; ZEMAN, Florence Anna ; PERY, Alexandre ; CRAVEDI, Jean-Pierre ; AUDEBERT, Marc	Comparative genotoxic potential of 27 polycyclic aromatic hydrocarbons in three human cell lines	Toxicology Letters, 2020, 326 : pp. 99-105
	SHANDILYA, Neeraj ; MARCOULAKI, Effie ; VERCAUTEREN, Sven ; WITTERS, Hilda ; SALAZAR-SANDOVAL, Eric Johansson ; VIITANEN, Anna-Kaisa ; BRESSOT, Christophe ; FRANSMAN, Wouter	Blueprint for the development and sustainability of national nanosafety centers	Nanoethics, 2020, 14 : pp. 169-183
	AUDOUZE, Karine ; SARIGIANNIS, Denis ; ALONSO-MAGDALENA, Paloma ; BROCHOT, Céline ; CASAS, Maribel ; VRIJHEID, Martine ; BABIN, Patrick J. ; KARAKITSIOS, Spyros ; COUMOUL, Xavier ; BAROUKI, Robert	Integrative strategy of testing systems for identification of endocrine disruptors inducing metabolic disorders - An introduction to the OBERON project	International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21 : art. 2988
	CATTEAU, Audrey ; BADO-NILLES, Anne ; BEAUDOUIN, Rémy ; JOACHIM, Sandrine ; PALLUEL, Olivier ; TURIÉS, Cyril ; GALET, Christophe ; GEFFARD, Alain ; PORCHER, Jean-Marc	An active biomonitoring approach using three-spined stickleback ( <i>Gasterosteus aculeatus</i> , L.) to assess the efficiency of a constructed wetland as tertiary treatment of wastewater	Ecological Indicators, 2020, 114 : art. 106238
	DE SEZE, René ; POUTRIQUET, Carole ; GAMEZ, Christelle ; MAILLOT-MARECHAL, Emmanuelle ; ROBIDEL, Franck ; LECOMTE, Anthony ; FONTA, Caroline	Repeated exposure to nanosecond high power pulsed microwaves increases cancer incidence in rat	PLoS One, 2020, 15 (4) : art. e0226858
	DE SEZE, René ; POUTRIQUET, Carole ; GAMEZ, Christelle ; ROBIDEL, Franck ; LECOMTE, Anthony ; FONTA, Caroline	Effect of non-thermal radiofrequency on body temperature in mice	Scientific Reports, 2020, 10 : art. 5724
	MENUT, Laurent ; SIOUR, Guillaume ; BESSAGNET, Bertrand ; COUVIDAT, Florian ; JOURNET, Emilie ; BALKANSKI, Yves ; DESBOEUF, Karine Virginie	Modelling the mineralogical composition and solubility of mineral dust in the Mediterranean area with CHIMERE 2017r4	Geoscientific Model Development, 2020, 13 (4) : pp. 2051-2071
	LANNUQUE, Victor ; COUVIDAT, Florian ; CAMREDON, Marie ; AUMONT, Bernard ; BESSAGNET, Bertrand	Modeling organic aerosol over Europe in summer conditions with the VBS-GECKO parameterization : sensitivity to secondary organic compound properties and IVOC (intermediate-volatility organic compound) emissions	Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20 (8) : pp. 4905-4931
	BELIS, Claudio A. ; PERNIGOTTI, Denise ; PIROVANO, Guido ; FAVEZ, Olivier ; JAFFREZO, Jean-Luc ; et al.	Evaluation of receptor and chemical transport models for PM <sub>10</sub> source apportionment	Atmospheric Environment : X, 2020, 5 : art. 100053
	THYBAUD, Eric ; LEFRANC, Agnès	Réglementations et pesticides	Environnement Risques & Santé, 2020, 19 (2) : pp. 90-92
	BOUDET, Céline ; WALLET, France ; THYBAUD, Eric	Pesticides : diversité des sources d'information et effet sur la perception des risques	Environnement Risques & Santé, 2020, 19 (2) : pp. 82-89
LAMBE, Andrew ; WOOD, Ezra C. ; KRECHMER, Jordan E. ; MAJLUF, Francesca ; WILLIAMS, Leah ; CROTEAU, Philip ; CIRTOG, Manuela ; FERON, Anaïs ; PETIT, Jean-Eudes ; ALBINET, Alexandre ; JIMENEZ, Jose L. ; PENG, Zhe	Nitrate radical generation via continuous generation of dinitrogen pentoxide in a laminar flow reactor coupled to an oxidation flow reactor	Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13 (5) : pp. 2397-2411	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	DELISE, Marie ; VILLOT, Jonathan ; GAUCHER, Rodolphe ; AMARDEIL, Anne ; LAFOREST, Valérie	Challenges in assessing Best Available Techniques (BATs) compliance in the absence of industrial sectoral reference	Journal of Cleaner Production, 2020, 263 : art. 121474
	SERRA, Hélène ; BRION, François ; CHARDON, Clémence ; BUDZINSKI, Hélène ; SCHULZE, Tobias ; BRACK, Werner ; AIT-AISSA, Selim	Estrogenic activity of surface waters using zebrafish and human-based in vitro assays : The Danube as a case-study	Environmental Toxicology and Pharmacology, 2020, 78 : art. 103401
	D'AMATO, Francesco ; VICIANI, Silvia ; MONTORI, Alessio ; LAPINI, Andrea ; FRABOULET, Isaline ; POULLEAU, Jean	Optical detection of ammonia inside a stack : comparison of different techniques	Measurement, 2020, 159 : art. 107746
	DAVID, Viviane ; JOACHIM, Sandrine ; CATTEAU, Audrey ; NOTT, Katherine ; RONKART, Sébastien ; ROBERT, Christelle ; GILLARD, Nathalie ; BADO-NILLES, Anne ; CHADILI, Edith ; PALLUEL, Olivier ; TURIÉS, Cyril ; JULIAN, Nais ; CASTIGLIONE, Julie ; DEDOURGE-GEFFARD, Odile ; HANI, Younes ; GEFFARD, Alain ; PORCHER, Jean-Marc ; BEAUDOUIN, Rémy	Effects of chronic exposure to a pharmaceutical mixture on the three-spined stickleback ( <i>Gasterosteus aculeatus</i> ) population dynamics in lotic mesocosms	Aquatic Toxicology, 2020, 224 : art. 105499
	COLLIGNAN, Bernard ; DIALLO, Thierno M.O. ; TRAVERSE, Sylvie ; CHASTANET, Juliette ; ABADIE, Marc ; POWAGA, Emilie ; HULOT, Corinne ; ROMANI, Zaid ; ALLARD, Francis ; GRASSET, Marie	Methodology for the <i>in situ</i> characterisation of soil vapor contaminants and their impact on the indoor air quality of buildings	Building and Environment, 2020, 177 : art. 106900
	TEBBY, Cléo ; VAN DER VOET, Hilko ; DE SOUSA, Georges ; RORIJE, Emiel ; KUMAR, Vikas ; DE BOER, Waldo J. ; KRUISSELBRINK, Johannes W. ; BOIS, Frédéric Y. ; FANIBAND, Moosa ; MORETTO, Angelo ; BROCHOT, Céline	A generic PBTK model implemented in the MCRA platform : predictive performance and uses in risk assessment of chemicals	Food and Chemical Toxicology, 2020, 142 : art. 111440
	GALEY, Louis ; AUDIGNON-DURAND, Sabyne ; BROCHARD, Patrick ; DEBIA, Maximilien ; LACOURT, Aude ; LAMBERT, Pierre ; LE-BIHAN, Olivier ; MARTINON, Laurent ; PASQUEREAU, Pierrick ; WITSCHGER, Olivier ; GARRIGOU, Alain	Vers une méthode opérationnelle d'évaluation de l'exposition aux aérosols de nanoparticules par l'intégration de l'activité de travail à la mesure	Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 2020, 81 (6) : pp. 838-850
	GUIGUES, Nathalie ; LEPOT, Bénédicte ; DESENFANT, Michèle ; DUROCHER, Jacky	Estimation of the measurement uncertainty, including the contribution arising from sampling, of water quality parameters in surface waters of the Loire-Bretagne river basin (France)	Accreditation and Quality Assurance, 2020 : Accepté
	VIDAL, Alice ; BABUT, Marc ; GARRIC, Jeanne ; BEAUDOUIN, Rémy	Temperature effect on perfluorooctane sulfonate toxicokinetics in rainbow trout ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> ): exploration via a physiologically based toxicokinetic model	Aquatic Toxicology, 2020, 225 : art. 105545
	FOURRIER, Camille ; LUGLIA, Mathieu ; HENNEBERT, Pierre ; FOULON, Julie ; AMBROSI, Jean-Paul ; ANGELETTI, Bernard ; KELLER, Catherine ; CRIQUET, Steven	Effects of increasing concentrations of unamended and gypsum modified bauxite residues on soil microbial community functions and structure - A mesocosm study	Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 201 : art. 110847
VANACKER, Marie ; QUINDROIT, Paul ; ANGELI, Karine ; MANDIN, Corinne ; GLORENNEC, Philippe ; BROCHOT, Céline ; CREPET, Amélie	Aggregate and cumulative chronic risk assessment for pyrethroids in the french adult population	Food and Chemical Toxicology, 2020, 143 : art. 111519	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	LABILLE, Jérôme ; CATALANO, Riccardo ; SLOMBERG, Danielle ; MOTELLIER, Sylvie ; PINSINO, Annalisa ; HENNEBERT, Pierre ; SANTAELLA, Catherine ; BARTOLOMEI, Vincent	Assessing sunscreen lifecycle to minimize environmental risk posed by nanoparticulate UV-filters - A Review for Safer-by-Design products	Frontiers in Environmental Science, 2020, 8 : art. 101
	DULIO, Valeria ; KOSCHORRECK, Jan ; VAN BAVEL, Bert ; VAN DEN BRINK, Paul J. ; HOLLENDER, Juliane ; MUNTHE, John ; SCHLABACH, Martin ; AALIZADEH, Reza ; AGERSTRAND, Marlene ; AHRENS, Lutz ; et al.	The NORMAN Association and the European Partnership for Chemicals Risk Assessment (PARC) : let's cooperate !	Environmental Sciences Europe, 2020, 32 (1) : art. 100
	SLOMBERG, Danielle ; AUFFAN, Mélanie ; GUENICHE, Nelly ; ANGELETTI, Bernard ; CAMPOS, Andrea ; BORSCHNECK, Daniel ; AGUERRE-CHARIOL, Olivier ; ROSE, Jérôme	Anthropogenic release and distribution of titanium dioxide particles in a river downstream of a nanomaterial manufacturer industrial site	Frontiers in Environmental Science, 2020, 8 : art. 76
	SARTELET, Karine ; COUVIDAT, Florian ; WANG, Zhizhao ; FLAGEUL, Cedric ; KIM, Youngseob	SSH-Aerosol v1.1 : a modular box model to simulate the evolution of primary and secondary aerosols	Atmosphere, 2020, 11 (5) : art. 525
	BESSAGNET, Bertrand ; MENUT, Laurent ; LAPERE, Remy ; COUVIDAT, Florian ; JAFFREZO, Jean-Luc ; MAILLER, Sylvain ; FAVEZ, Olivier ; PENNEL, Romain ; SIOUR, Guillaume	High resolution chemistry transport modeling with the on-line CHIMERE-WRF model over the French Alps -Analysis of a feedback of surface particulate matter concentrations on mountain meteorology	Atmosphere, 2020, 11 (6) : art. 565
	JIANG, Lei ; BESSAGNET, Bertrand ; MELEUX, Frédéric ; TOGNET, Frédéric ; COUVIDAT, Florian	Impact of physics parameterizations on high-resolution air quality simulations over the Paris region	Atmosphere, 2020, 11 (6) : art. 618
	SZILAGYI, Zsofia ; NEMETH, Zsuzsanna ; BAKOS, Jozsef ; PAL NECZ, Peter ; SAFAR, Anna ; KUBINYI, Gyorgyi ; SELMAOUI, Brahim ; THUROCZY, Gyorgy	Evaluation of inflammation by cytokine production following combined exposure to ultraviolet and radiofrequency radiation of mobile phones on 3D reconstructed human skin in vitro	International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (12) : art. 4401
	NELISSEN, Inge ; HAASE, Andrea ; ANGUISSOLA, Sergio ; ROCKS, Louise ; JACOBS, An ; WILLEMS, Hanny ; RIEBELING, Christian ; LUCH, Andreas ; PIRET, Jean-Pascal ; TOUSSAINT, Olivier ; TROUILLER, Bénédicte ; LACROIX, Ghislaine ; GUTLEB, Arno C. ; CONTAL, Servane ; DIABATE, Silvia ; WEISS, Carsten ; LOZANO-FERNANDEZ, Tamara ; GONZALEZ-FERNANDEZ, Africa ; DUSINSKA, Maria ; HUK, Anna ; STONE, Vicki ; KANASE, Nilesh ; NOCUN, Marek ; STEPNIK, Maciej ; MESCHINI, Stefania ; AMMENDOLIA, Maria Grazia ; LEWINSKI, Nastassja ; RIEDIKER, Michael ; VENTURINI, Marco ; BENETTI, Federico ; TOPINKA, Jan ; BRZICOVA, Tana ; MILANI, Silvia ; RADLER, Joachim ; SALVATI, Anna ; DAWSON, Kenneth A.	Improving quality in nanoparticle-induced cytotoxicity testing by a tiered inter-laboratory comparison study	Nanomaterials, 2020, 10 (8) : art. 1430
	BOIS, Frédéric Y. ; HSIEH, Nan-Hung ; GAO, Wang ; CHIU, Weihsueh A. ; REISFELD, Brad	Well-tempered MCMC simulations for population pharmacokinetic models	Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics, 2020 : Accepté

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	HULIN, Marion ; LEROUX, Carole ; MATHIEU, Aurélie ; GOUZY, Aurélien ; BERTHET, Aurélie ; BOIVIN, Arnaud ; BONICELLI, Bernard ; CHUBILLEAU, Catherine ; HULIN, Agnès ; LEOZ-GARZIANDIA, Eva ; MAMY, Laure ; MILLET, Maurice ; PERNOT, Pierre ; QUIVET, Etienne ; SCELO, Anne-Laure ; MERLO, Mathilde ; RUELLE, Bernadette ; BEDOS, Carole	Monitoring of pesticides in ambient air : prioritization of substances	Science of the Total Environment, 2021, 753 : art. 141722
	WALLACE, Jasmina ; ANDRIANOME, Soafara ; GHOSN, Rania ; BLANCHARD, Erwan Stephan ; TELLIEZ, Frédéric ; SELMAOUI, Brahim	Heart rate variability in healthy young adults exposed to global system for mobile communication (GSM) 900-MHz radiofrequency signal from mobile phones	Environmental Research, 2020, 191 : art. 110097
	GAROCHE, Clémentine ; AIT-AISSA, Selim ; BOULAHTOUF, Abdelhay ; CREUSOT, Nicolas ; HINFRAY, Nathalie ; BOURGUET, William ; BALAGUER, Patrick ; BRION, François	Human and zebrafish nuclear progesterone receptors are differently activated by manifold progestins	Environmental Science & Technology, 2020, 54 (15) : pp. 9510-9518
	FISCHER, Marc ; CHAKRAVARTY, Somik ; LE BIHAN, Olivier ; MORGENEYER, Martin	Parametric study of the particle motion induced by a vortex shaker	Powder Technology, 2020, 374 : pp. 70-81
	GRESSENT, Alicia ; MALHERBE, Laure ; COLETTE, Augustin ; ROLLIN, Hugo ; SCIMIA, Romain	Data fusion for air quality mapping using low-cost sensor observations : feasibility and added-value	Environment International, 2020, 143 : art. 105965
	ZHANG, Yunjiang ; ALBINET, Alexandre ; PETIT, Jean-Eudes ; JACOB, Véronique ; CHEVRIER, Florie ; GILLE, Gregory ; PONTET, Sabrina ; CHRETIEN, Eve ; DOMINIK-SEGUE, Marta ; LEVIGOUREUX, Gilles ; MOCNIK, Grisa ; GROS, Valérie ; JAFFREZO, Jean-Luc ; FAVEZ, Olivier	Substantial brown carbon emissions from wintertime residential wood burning over France	Science of the Total Environment, 2020, 743 : art. 140752
	AMOSSE, Joel ; BART, Sylvain ; BRULLE, Franck ; TEBBY, Cléo ; BEAUDOUIN, Rémy ; NELIEU, Sylvie ; LAMY, Isabelle ; PERY, Alexandre ; PELOSI, Céline	A two years field experiment to assess the impact of two fungicides on earthworm communities and their recovery	Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 203 : art. 110979
	JAMES CASAS, Alice ; MIRNEJAD, Peyam ; AIT-AISSA, Selim ; BRION, François ; HINFRAY, Nathalie ; ANDRES, Sandrine	How non-standard studies and their weight of evidence evaluation may be used within environmental quality standards derivation : a case study with endocrine disrupting assessment of tebuconazole	30. SETAC Europe annual meeting, 03/05/2020 - 07/05/2020, Online meeting
	DE OLIVEIRA, Julie ; CHADILI, Edith ; TURIES, Cyril ; MAILLOT-MARECHAL, Emmanuelle ; PICCINI, Benjamin ; BRION, François ; COUSIN, Xavier ; HINFRAY, Nathalie	A comparison of behavior, reproductive parameters and response to pollutant between wild-type, transgenic and mutant zebrafish : could they all be considered the same "zebrafish" ?	30. SETAC Europe annual meeting, 03/05/2020 - 07/05/2020, Online meeting
	CHRISTOPHE, Armelle ; LEONARD, Marc ; PANDARD, Pascal ; DE CROZE, Noémie ; BRION, François	Usefulness of the transgenic cyp19a1b-GFP zebrafish model to refine the zebrafish embryo acute toxicity test (FET)	30. SETAC Europe annual meeting, 03/05/2020 - 07/05/2020, Online meeting
LAJ, Paolo ; BIGI, Alessandro ; ROSE, Clémence ; ANDREWS, Elisabeth ; FAVEZ, Olivier	A global analysis of climate-relevant aerosol properties retrieved from the network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-surface observatories	Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13 (8) : pp. 4353-4392	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
<b>Risques chroniques</b>	RIVERO ARZE, Andrea ; MANIER, Nicolas ; CHATEL, Amelie ; MOUNEYRAC, Catherine	Characterization of the nano-bio interaction between metallic oxide nanomaterials and freshwater microalgae using flow cytometry	Nanotoxicology, 2020 : Acceptée
	REGRAIN, Corentin ; CAUDEVILLE, Julien ; DE SEZE, René ; GUEDDA, Mohammed ; CHOBINEH, Amirreza ; DE DONCKER, Philippe ; PETRILLO, Luca ; CHIARAMELLO, Emma ; PARAZZINI, Marta ; JOSEPH, Wout ; AERTS, Sam ; HUSS, Anke ; WIART, Joe	Design of an integrated platform for mapping residential exposure to Rf-Emf sources	International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (15) : art. 5339
	DE OLIVEIRA, Julie ; CHADILI, Edith ; TURIES, Cyril ; BRION, François ; COUSIN, Xavier ; HINFRAY, Nathalie	A comparison of behavioral and reproductive parameters between wild-type, transgenic and mutant zebrafish : could they all be considered the same "zebrafish" for reglementary assays on endocrine disruption ?	Comparative Biochemistry and Physiology. Part C - Toxicology and Pharmacology, 2020, 239 : art. 108879
	POULAIN, Laurent ; SPINDLER, Gerald ; GRUNER, Achim ; TUCH, Thomas ; STIEGER, Bastian ; VAN PINXTEREN, Dominik ; PETIT, Jean-Eudes ; FAVEZ, Olivier ; HERRMANN, Hartmut ; WIEDENSOHLER, Alfred	Multi-year ACSM measurements at the central european research station Melpitz (Germany) - Part 1 : instrument robustness, quality assurance, and impact of upper size cutoff diameter	Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13 : pp. 4973-4994
	MAZZOLA, Thomas ; HANNA, Steven ; CHANG, Joseph ; BRADLEY, Scott ; MERIS, Ronald ; SIMPSON, Steven ; MINER, Sean ; GANT, Simon ; WEIL, Jeffrey ; HARPER, Michael ; NIKMO, Juha ; KUKKONEN, Jaako ; LACOME, Jean-Marc ; NIBART, Maxime ; BJORNHAM, Oscar ; KHAJEHNAJAFI, Shah ; HABIB, Karim ; ARMAND, Patrick ; BAUER, Thimoty ; FABBRI, Luciano ; SPICER, Tom ; EK, Nils	Results of comparisons of the predictions of 17 dense gas dispersion models with observations from the Jack Rabbit II chlorine field experiment	Atmospheric Environment, 2021, 244 : art. 117887
	CAUDEVILLE, Julien ; FILLLOL, Clemence	Évaluation de l'exposition des populations aux pyréthrinoides : vision croisée des démarches de caractérisation	Year book Santé et Environnement. Montrouge : John Libbey Eurotext Ltd., 2020, pp. 91-94
	BAUDU, Michel ; CHARRIAU, Adeline ; HALM-LEMEILLE, Marie-Pierre ; PANDARD, Pascal ; LISSALDE, Sophie ; FEUILLADE, Geneviève ; PALLIER, Virginie ; WIMEL, Laurence	Risque environnemental associé aux médicaments vétérinaires équinés et à la gestion des fumiers	Environnement Risques & Santé, 2020, 19 (Suppl. 1) : pp. 27-33
	GRAMMONT, Vincent	Projet 4éCOS : évaluation des émissions, des expositions et des risques sanitaires liés à l'activité d'un écosite	Environnement Risques & Santé, 2020, 19 (Suppl. 1) : pp. 41-50
	OTTOLINI, Lucile	Les politiques d'ouverture à la société. Instruments du changement des relations entre associations et instituts d'expertise dans le domaine de la santé-environnement en France ?	Environnement Risques & Santé, 2020, 19 (4) : pp. 241-244
	ZDANEVITCH, Isabelle ; LENCAUCHEZ, Jeanne ; DAMIANO, Armelle ; ANDRE, Laura ; RIBEIRO, Thierry ; PINEAU, Christophe	Valorisation d'herbes de bords de routes par méthanisation	Environnement Risques & Santé, 2020, 19 (Suppl. 1) : pp. 71-76

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	GATEUILLE, David ; GASPERI, Johnny ; BRIAND, Cyrielle ; GUIGON, Elodie. ; ALLIOT, Fabrice ; BLANCHARD, Martine ; TEIL, Marie-Jeanne ; CHEVREUIL, Marc ; ROCHER, Vincent ; AZIMI, Sam ; THEVENOT, Daniel ; MOILLERON, Régis ; BRIGNON, Jean-Marc ; MEYBECK, Michel ; MOUCHEL, Jean-Marie	Mass balance of PAHs at the scale of the Seine River Basin	FLIPO, Nicolas ; LABADIE, Pierre ; LESTEL, Laurence - The Seine River Basin. Berlin : Springer, 2020 (The Handbook of Environmental Chemistry)
	BOUDET, Céline	Définir et évaluer une méthode expérimentale crédible	MARANO, Francelyne ; HUBERT, Philippe ; GEOFFROY, Laure ; JUIN, Hervé - Quelles alternatives en expérimentation animale ? Pratiques et éthique. Versailles : Quae, 2020, pp. 43-55
	MOMBELLI, Enrico ; VIGNON-CLEMENTEL, Irène ; DRASDO, Dirk	Méthodes <i>in silico</i> et modélisation des mécanismes de toxicité (AOP)	MARANO, Francelyne ; HUBERT, Philippe ; GEOFFROY, Laure ; JUIN, Hervé - Quelles alternatives en expérimentation animale ? Pratiques et éthique. Versailles : Quae, 2020, pp. 113-126
	GEOFFROY, Laure ; TRICOIRE, Hervé	Les autres modèles animaux alternatifs	MARANO, Francelyne ; HUBERT, Philippe ; GEOFFROY, Laure ; JUIN, Hervé - Quelles alternatives en expérimentation animale ? Pratiques et éthique. Versailles : Quae, 2020, pp. 149-164
	HUBERT, Philippe	La diversité des méthodes d'investigation dans les sciences du vivant	MARANO, Francelyne ; HUBERT, Philippe ; GEOFFROY, Laure ; JUIN, Hervé - Quelles alternatives en expérimentation animale ? Pratiques et éthique. Versailles : Quae, 2020, pp. 149-164
	CARRE, Florence ; ADAM, Karine ; COINTE, Raymond ; GENTILHOMME, Olivier ; BRUGIDOU, Mathieu ; GUILLAUME, Olivier ; GABILLET, Pauline ; GENDRON, Corinne ; JAKUBOWICZ, Magali ; LEBER, Jean-Yves ; MOCANU, Stéphane ; MORETTI, Isabelle ; VIDALENC, Eric ; VILLENEUVE, Jacques	Les leviers d'action pour un mix énergétique propre et sûr au service de la transition énergétique dans les territoires	Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2020 (98) : pp. 92-95
	CAPPELLI, Claudia Ileana ; MANGANELLI, Serena ; TOMA, Cosimo ; BENFENATI, Emilio ; MOMBELLI, Enrico	Prediction of the partition coefficient between adipose tissue and blood for environmental chemicals : from single QSAR models to an integrated approach	Molecular Informatics, 2020, 39 : art. 2000072
	BABUT, Marc ; FERRARI, Benoît J.D. ; JAME, Patrick ; ASSOUMANI, Azziz ; LESTREMAU, François ; HETTE-TRONQUART, Nicolas ; MIEGE, Cécile ; PERCEVAL, Olivier	Monitoring priority substances in biota under the water framework directive: how effective is a tiered approach based on caged invertebrates ? A proof-of-concept study targeting PFOS in french rivers	Environmental Sciences Europe, 2020, 32 (1) : art. 131

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	AMADOU, Amina ; COUDON, Thomas ; PRAUD, Delphine ; SALIZZONI, Pietro ; LEFFONDRE, Karen ; LEVEQUE, Emilie ; BOUTRON-RUAULT, Marie-Christine ; DANJOU, Aurélie M.N. ; MORELLI, Xavier ; LE CORNET, Charlotte ; PERRIER, Lionel ; COUVIDAT, Florian ; BESSAGNET, Bertrand ; CAUDEVILLE, Julien ; FAURE, Elodie ; ROMANA MANCINI, Francesca ; GULLIVER, John ; SEVERI, Gianluca ; FERVERS, Béatrice	Chronic low-dose exposure to xenoestrogen ambient air pollutants and breast cancer risk : XENAIR protocol for a case-control study nested within the french E3N cohort	JMIR Research Protocols, 2020, 9 (9) : art. e15167
	GEBA, Elodie ; RIOULT, Damien ; PALLUEL, Olivier ; DEDOURGE-GEFFARD, Odile ; BETOULLE, Stéphane ; AUBERT, Dominique ; BIGOT-CLIVOT, Aurélie	Resilience of dreissena polymorpha in wastewater effluent : use as a bioremediation tool ?	Journal of Environmental Management, 2021, 278 : art. 111513
	SRIVASTAVA, Deepchandra ; DAELLENBACH, Kaspar Rudolf ; ZHANG, Yunjiang ; BONNAIRE, Nicolas ; CHAZEAU, Benjamin ; PERRAUDIN, Emilie ; GROS, Valérie ; LUCARELLI, Franco ; VILLENAVE, Eric ; PREVOT, André S.H. ; EL HADDAD, Imad ; FAVEZ, Olivier ; ALBINET, Alexandre	Comparison of five methodologies to apportion organic aerosol sources during a PM pollution event	Science of the Total Environment, 2021, 757 : art. 143168
	SANCHEZ JIMENEZ, Araceli ; PUELLES, Raquel ; PEREZ-FERNANDEZ, Marta ; GOMEZ, Paloma ; BARRUETABENA, Leire ; RAUN JACOBSEN, Nicklas ; SUAREZ-MERINO, Blanca ; MICHELETTI, Christian ; MANIER, Nicolas ; TROUILLER, Bénédicte ; NAVAS, José Maria ; KALMAN, Judit ; SALIERI, Beatrice ; HISCHIER, Roland ; HANDZHIYSKI, Yordan ; APOSTOLOVA, Margarita D. ; HADRUP, Niels ; BOUILLARD, Jacques ; OUDART, Yohan ; MERINO, Cesar ; GARCIA, Erika ; LIGUORI, Biase ; SABELLA, Stefania ; ROSE, Jérôme ; MAISON, Armand ; GALEA, Karen S. ; KELLY, Sean ; STEPANKOVA, Sandra ; MOUNEYRAC, Catherine ; BARRICK, Andrew ; CHATEL, Amelie ; DUSINSKA, Maria ; RUNDEN-PRAN, Elise ; MARIUSSEN, Espen ; BRESSOT, Christophe ; AGUERRE-CHARIOL, Olivier ; SHANDILYA, Neeraj ; GOEDE, Henk ; GOMEZ-CORDON, Julio ; SIMAR, Sophie ; NESSLANY, Fabrice ; JENSEN, Keld Alstrup ; VAN TONGEREN, Martie ; RODRIGUEZ-LLOPIS, Isabel	Safe by design implementation in the nanotechnology industry	NanoImpact, 2020, 20 : art. 100267
	XIANG, Maiqi ; MORGENEYER, Martin ; PHILIPPE, Florian ; MANOKARAN, Maheandar ; BRESSOT, Christophe	Comparative review of efficiency analysis for airborne solid submicrometer particle sampling by nuclepore filters	Chemical Engineering Research and Design, 2020, 164 : pp. 338-351
	CATTEAU, Audrey ; BADO-NILLES, Anne ; BEAUDOUIN, Rémy ; TEBBY, Cléo ; JOACHIM, Sandrine ; PALLUEL, Olivier ; TURIES, Cyril ; CHRETIEN, Nina ; NOTT, Katherine ; RONKART, Sébastien ; GEFFARD, Alain ; PORCHER, Jean-Marc	Water quality of the Meuse watershed : assessment using a multi-biomarker approach with caged three-spined stickleback ( <i>Gasterosteus aculeatus L.</i> )	Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208 : art. 111407
	GUEDEGBA, Nicresse Léa ; TOKO, Ibrahim Imorou ; BEN AMMAR, Imen ; FRANCOIS, Loic ; OREINS, Noëlle ; PALLUEL, Olivier ; MANDIKI, Syaghalirwa N.M. ; JAUNIAUX, Thierry ; PORCHER, Jean-Marc ; SCIPPO, Marie-Louise ; KESTEMONT, Patrick	Chronic effects of a binary insecticide Acer 35 EC on nile tilapia <i>Oreochromis niloticus</i> through a multi-biomarker approach	Chemosphere, 2020 : Accepté

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	QUINDROIT, Paul ; CREPET, Amélie ; BROCHOT, Céline	Estimating human exposure to pyrethroids' mixtures from biomonitoring data using physiologically based pharmacokinetic modeling	Environmental Research, 2020, 192 : art. 110281
	CODACCIONI, Marc ; BROCHOT, Céline	Assessing the impacts on fetal dosimetry of the modelling of the placental transfers of xenobiotics in a pregnancy physiologically based pharmacokinetic model	Toxicology and Applied Pharmacology, 2020 : Accepté
	OUADAH, Nihal ; BLAZY, Kelly ; VILLEGIER, Anne-Sophie	Effect of radiofrequency electromagnetic fields on thermal sensitivity in the rat	International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (20) : art. 7563
	BARCA, Cristian ; SCANU, Dario ; PODDA, Nicola ; MICHE, Hélène ; POIZAT, Laurent ; HENNEBERT, Pierre	Phosphorus removal from wastewater by carbonated bauxite residue under aerobic and anoxic conditions	Journal of Water Process Engineering, 2021, 39 : art. 101757
	GONCALVES, Nuno ; VARGA, Zsuzsanna ; BOUCHONNET, Stéphane ; DULIO, Valeria ; ALYGIZAKIS, Nikiforos ; DAL BELLO, Federica ; MEDANA, Claudio ; CALZA, Paola	Study of the photoinduced transformations of maprotiline in river water using liquid chromatography high-resolution mass spectrometry	Science of the Total Environment, 2021, 755(2) : art. 14355
	FORTEMS-CHEINEY, Audrey ; DUFOUR, Gaele ; DUFOSSÉ, Karine ; COUVIDAT, Florian ; GILLIOT, Jean-Marc ; SIOUR, Guillaume ; BECKMANN, Matthias ; FORET, Gilles ; MELEUX, Frédéric ; CLARISSE, Lieven ; COHEUR, Pierre-François ; VAN DAMME, Martin ; CLERBAUX, Cathy ; GENERMONT, Sophie	Do alternative inventories converge on the spatiotemporal representation of spring ammonia emissions in France ?	Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20 : pp. 13481-13495
	LANZAFAME, Grazia-Maria ; SRIVASTAVA, Deepchandra ; FAVEZ, Olivier ; BANDOUE, Benjamin ; SHAHPOURY, Pourya ; LAMMEL, Gerhard ; BONNAIRE, Nicolas ; ALLEMAN, L.Y. ; COUVIDAT, Florian ; BESSAGNET, Bertrand ; ALBINET, Alexandre	One-year measurements of secondary organic aerosol (SOA) markers in the Paris region (France) : concentrations, gas/particle partitioning and SOA source apportionment	Science of the Total Environment, 2021, 757 : art. 143921
	DAELLENBACH, Kaspar Rudolf ; UZU, Gaëlle ; JIANG, Jianhui ; CASSAGNES, Laure-Estelle ; LENI, Zaira ; VLACHOU, Athanasia ; STEFANELLI, Giulia ; CANONACO, Francesco ; WEBER, Samuel ; SEGERS, Arjo ; KUENEN, Jeroen ; SCHAAP, Martijn ; FAVEZ, Olivier ; ALBINET, Alexandre ; AKSOYOGLU, Sebnem ; DOMMEN, Josef ; BALTENSPERGER, Urs ; GEISER, Marianne ; EL HADDAD, Imad ; JAFFREZO, Jean-Luc ; PREVOT, André	Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe	Nature, 2020, 587 : pp. 414-419
	SELMAOUI, Brahim ; TOUITOU, Yvan	Association between mobile phone radiation exposure and the secretion of melatonin and cortisol, two markers of the circadian system : a review	Bioelectromagnetics, 2020 : Accepté
	PHILIPPE, Florian ; XIANG, Maiqi ; MORGENEYER, Martin ; CHEN, Yan-Ming ; CHARLES, Pierre ; GUINGAND, Frédéric ; BRESSOT, Christophe	Emission rate assessment of airborne brake particles by characterization of the pad and disc surfaces from a pin-on-disc tribometer	Toxicology Research and Application, 2020 : Accepté

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	BESSET, Dimitri ; SELMAOUI, Brahim ; DELANAUD, Stéphane ; DE SEZE, René ; LEKE, André ; STEPHAN-BLANCHARD, Erwan	Influence of chronic radiofrequency electromagnetic fields exposure on autonomic nervous activity during sleep in preterm neonates : preliminary results	25. Congress of the European Sleep Research Society (ESRS), 22/09/2020 - 24/09/2020, Online, SUISSE
	BESSET, Dimitri ; SELMAOUI, Brahim ; DELANAUD, Stéphane ; DE SEZE, René ; LEKE, André ; STEPHAN-BLANCHARD, Erwan	Influence of chronic radiofrequency electromagnetic fields exposure on cerebral oxygenation in preterm neonates : preliminary results	25. Congress of the European Sleep Research Society (ESRS), 22/09/2020 - 24/09/2020, Online, SUISSE
	ROUIL, Laurence	Transport maritime : quels impacts sur la qualité de l'air ?	Year book Santé et Environnement. Montrouge : John Libbey Eurotext Ltd., 2020, pp. 171-174
	BONIFAZI, Giuseppe ; FIORE, Ludovica ; HENNEBERT, Pierre ; SERRANTI, Silvia	Development of a selection system based on hyperspectral imaging for plastic waste with brominated flame retardants	Environmental Engineering and Management Journal, 2020, 19 (10) : pp. 1755-1763
	BONIFAZI, Giuseppe ; FIORE, Ludovica ; HENNEBERT, Pierre ; SERRANTI, Silvia	An efficient strategy, hyperspectral imaging based, for brominated plastics separation and sorting plastic in a circular economy perspective	HOPMANN, Christian ; DAHLMANN, Rainer - Advances in Polymer Processing 2020 : Proceedings of the International Symposium on Plastics Technology. Berlin : Springer, 2020, pp. 14-27
	HENNEBERT, Pierre	Concentrations of brominated flame retardants in plastics of electrical and electronic equipment, vehicles, construction, textiles and non-food packaging : a review of occurrence and management	Detritus, 2020, 12 : pp. 34-50
	DE OLIVEIRA, Julie	Utilisation de poissons-zèbres génétiquement modifiés pour l'étude des mécanismes et des effets des perturbateurs endocriniens	Thèse de doctorat. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, 01/12/2020
	DELLISE, Marie	Évaluation multicritère et multi-objectif à l'échelle locale des performances des entreprises au regard des Meilleures Techniques Disponibles	Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 03/12/2020
	SIMEON, Ségolène	Modélisation mathématique systémique de la toxicité envers la reproduction et le développement du poisson-zèbre	Thèse de doctorat. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, 09/11/2020
	MAI, Thi Cuc	Effets d'une exposition répétée aux ondes radiofréquences sur la régulation thermique des rongeurs	Thèse de doctorat. Université d'Amiens, 11/12/2020
WALLACE, Jasmina	Effets des champs radiofréquences sur l'activité électrique cérébrale d'éveil. Étude par analyse d'EEG/MEG combinées chez des volontaires sains	Thèse de doctorat. Université d'Amiens, 27/05/2020	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques chroniques	SANTANDREA, Audrey	Compréhension des spécificités des particules nanométriques pour une meilleure prédiction des conséquences des explosions de poussières	Thèse de doctorat. Université de Lorraine, 15/06/2020
	OTTOLINI, Lucile	Travailler avec le tiers secteur - Études de cas des politiques d'ouverture à la société dans les instituts d'expertise et de leurs effets en France de 1990 à 2020	Thèse de doctorat. Université de Paris 12, 11/09/2020
	COARITA TINTAYA, Ever Dennys	Modélisation du comportement hydromécanique des argilites : anisotropie structurale et induite, relation endommagement/perméabilité	Thèse de doctorat. Université de Paris 12, 06/10/2020
	CODACCIONI, Marc	Évaluation de l'exposition foetale aux substances chimiques grâce à la modélisation pharmacocinétique basée sur la physiologie (PBPK). Applications aux données d'imprégnation des populations	Thèse de doctorat. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, 11/12/2020
	AMADOU, Amina ; PRAUD, Delphine ; COUDON, Thomas ; DEYGAS, Floriane ; GRASSOT, Leny ; FAURE, Elodie ; COUVIDAT, Florian ; CAUDEVILLE, Julien ; BESSAGNET, Bertrand ; SALIZZONI, Pietro ; GULLIVER, John ; LEFFONDRÉ, Karen ; SEVERI, Gianluca. ; MANCINI, Francesca Romana ; FERVERS, Béatrice	Risk of breast cancer associated with long-term exposure to benzo[a]pyrene (BaP) air pollution: evidence from the french E3N cohort study	Environment International, 2021, 149 : art. 106399
	FAVEZ, Olivier ; WEBER, Samuël ; PETIT, Jean-Eudes ; ALLEMAN, Laurent ; ALBINET, Alexandre ; RIFFAULT, Véronique ; CHAZEAU, Benjamin ; AMODEO, Tanguy ; SALAMEH, Dalia ; ZHANG, Yunjiang ; SRIVASTAVA, Deepchandra ; SAMAKÉ, Abdoulaye ; AUJAY-PLOUZEAU, Robin ; PAPIN, Arnaud ; BONNAIRE, Nicolas ; BOULLANGER, Carole ; CHATAIN, Mélodie ; CHEVRIER, Florie ; DETOURNAY, Anaïs ; DOMINIK-SÈGUE, Marta ; FALHUN, Raphaële ; GARBIN, Céline ; GHERSI, Véronique ; GRIGNION, Guillaume ; LEVIGOUREUX, Gilles ; PONTET, Sabrina ; RANGOGNIO, Jérôme ; ZHANG, Shouwen ; BESOMBES, Jean-Luc ; CONIL, Sébastien ; UZU, Gaëlle ; SAVARINO, Joël ; MARCHAND, Nicolas ; GROS, Valérie ; MARCHAND, Caroline ; JAFFREZO, Jean-Luc ; LEOZ-GARZIANDIA, Eva	Overview of the french operational network for <i>in situ</i> observation of PM chemical composition and sources in urban environments (CARA Program)	Atmosphere, 2021, 12 (2) : art. 207
	VIATTE, Camille ; PETIT, Jean-Eudes ; YAMANOUCI, Shoma ; VAN DAMME, Martine ; DOUCERAIN, Carole ; GERMAIN-PIAULENNE, Emeric ; GROS, Valérie ; FAVEZ, Olivier ; CLARISSE, Lieven ; COHEUR, Pierre-François ; STRONG, Kimberly ; CLERBAUX, Cathy	Ammonia and PM <sub>2.5</sub> air pollution in Paris during the 2020 COVID lockdown	Atmosphere, 2021, 12 (2) : art. 160

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
	JOACHIM, Sandrine ; BEAUDOUIN, Rémy ; DANIELE, Gaëlle ; GEFFARD, Alain ; BADO-NILLES, Anne ; TEBBY, Cleo ; PALLUEL, Olivier ; DEDOURGE-GEFFARD, Odile ; FIEU, Maëva ; BONNARD, Marc ; PALOS-LADEIRO, Mélissa ; TURIÉS, Cyril ; VULLIET, Emmanuelle ; DAVID, Viviane ; BAUDOIN, Patrick ; JAMES, Alice ; ANDRES, Sandrine ; PORCHER, Jean-Marc	Effects of diclofenac on sentinel species and aquatic communities in semi-natural conditions	Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 211 : art. 111812
<b>Risques du sol et du sous-sol</b>	YANG, Jie ; YIN, Zhen-Yu ; LAOUAFA, Farid ; HICHER, Pierre-Yves	Three-dimensional hydromechanical modeling of internal erosion in dike-on-foundation	International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2020, 44(8) : 1200-1218
	EDJOSSAN-SOSSOU, Abla-Mimi ; GALVEZ, Daniel ; DECK, Olivier ; AL HEIB, Marwan ; VERDEL, Thierry ; DUPONT, Laurent ; CHERY, Olivier ; CAMARGO, Mauricio ; MOREL, Laure	Sustainable risk management strategy selection using a fuzzy multi-criteria decision approach	International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 45 : art. 101474
	YANG, Jie ; JIN, Yin-Fu ; YIN, Zhen-Yu ; LAOUAFA, Farid ; HICHER, Pierre-Yves	Identifying the parameters of a hydro-mechanical model for internal erosion occurring in granular soils by using an enhanced backtracking search algorithm	European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020 : Accepted
	ORLECKA-SIKORA, Beata ; LASOCKI, Stanislaw ; KOCOT, Joanna ; SZEPIENIEC, Tomasz ; GRASSO, Jean Robert ; GARCIA-ARISTIZABAL, Alexander ; SCHAMING, Marc ; URBAN, Pawel ; JONES, Glenda ; STIMPSON, Ian ; DINEVA, Savka ; SALEK, Piotr ; LEPTOKAROPOULOS, Konstantinos ; LIZUREK, Grzegorz ; OLSZEWSKA, Dorota ; SCHMITTBUHL, Jean ; KWIATEK, Grzegorz ; BLANKE, Aglaja ; SACCOROTTI, Gilberto ; CHODZINSKA, Karolina ; RUDZINSKI, Lukasz ; DOBRZYCKA, Izabela ; MUTKE, Grzegorz ; BARANSKI, Adam ; PIERZYNA, Aleksandra ; KOZLOVSKAYA, Elena ; NEVALAINEN, Jouni ; KINSCHER, Jannes ; SILENY, Jan ; STERZEL, Mariusz ; CIELESTA, Szymon ; FISCHER, Tomas	An open data infrastructure for the study of anthropogenic hazards linked to georesource exploitation	Scientific Data, 2020, 7 : art. 89
	DE SANTIS, Francesca ; RENAUD, Vincent ; GUNZBURGER, Yann ; KINSCHER, Jannes ; BERNARD, Pascal ; CONTRUCCI, Isabelle	<i>In situ</i> monitoring and 3D geomechanical numerical modelling to evaluate seismic and aseismic rock deformation in response to deep mining	International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 129 : art. 104273
	AN, Ni ; CUI, Yu-Jun ; CONIL, Nathalie ; TALANDIER, Jean ; CONIL, Sébastien	Soil-atmosphere interaction in the overburden of a short-lived low and intermediate level nuclear waste (LLW/ILW) disposal facility	Computers and Geotechnics, 2020, 124 : art. 103610
	KINSCHER, Jannes ; DE SANTIS, Francesca ; POIATA, Natalia ; BERNARD, Pascal ; PALGUNADI, Kadek ; CONTRUCCI, Isabelle	Seismic repeaters linked to weak rock-mass creep in deep excavation mining	Geophysical Journal International, 2020, 222 (1) : pp. 110-131
	COARITA TINTAYA, Ever Dennys ; GOLFIER, Fabrice ; SOULEY, Mountaka ; VU, Minh-Ngoc	Anisotropic hydro-viscoplastic modelling of a drift at the Meuse/Haute-Marne URL	European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020 : Accepted
YIN, Zhen-Yu ; YANG, Jie ; LAOUAFA, Farid ; HICHER, Pierre-Yves	A framework for coupled hydro-mechanical continuous modelling of gap-graded granular soils subjected to suffusion	European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020 : Accepted	

Type de risque	Auteurs	Titre	Source
Risques du sol et du sous-sol	LAFORTUNE, Stéphane ; GOMBERT, Philippe ; POKRYSZKA, Zbigniew ; LACROIX, Elodie ; DE DONATO, Philippe ; JOZJA, Nevila	Monitoring scheme for the detection of hydrogen leakage from a deep underground storage. Part 1 : on-site validation of an experimental protocol via the combined injection of helium and tracers into an aquifer	Applied Sciences, 2020, 10 (17) : art. 6058
	CONIL, Nathalie ; VITEL, Manon ; PLUA, Carlos ; VU, Minh-Ngoc ; SEYEDI, Darius ; ARMAND, Gilles	<i>In situ</i> investigation of the THM behavior of the callovo-oxfordian claystone	Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53 (6) : pp. 2747-2769
	GOMBERT, Philippe ; POULAIN, Angélique ; GODERNIAUX, Pascal ; ORBAN, Philippe ; PUJADES, Estanislao ; DASSARGUES, Alain	Potentiel de valorisation de sites miniers et carrières en step en France et en Belgique	La Houille Blanche, 2020 (4) : pp. 33-42
	SOULEY, Mountaka ; VU, Ngoc Minh ; ARMAND, Gilles	3D anisotropic modelling of deep drifts at the Meuse/Haute-Marne URL	BILLAUX, Daniel ; HAZZARD, Jim ; NELSON, Michele ; SCHOPFER, Martin - Applied Numerical Modeling in Geomechanics : Proceedings of the 5th International Itasca Symposium. 2020
	ZAIER, Imen ; BILLIOTTE, Joël ; CHARMOILLE, Arnaud ; LAOUAFA, Farid	The dissolution kinetics of natural gypsum: a case study of Eocene facies in the north-eastern suburbs of Paris	Environmental Earth Sciences, 2021, 80 : art. 8
	LAOUAFA, Farid ; GUO, Jianwei ; QUINTARD, Michel	Underground rock dissolution and geomechanical issues	Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021 : Accepté
	SAEIDI, Ali ; DECK, Olivier ; SEIFADDINI, Mahdiyeh ; AL HEIB, Marwan ; VERDEL, Thierry	An improved methodology for applying the influence function for subsidence hazard prediction	Georisk : Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2021 : Accepté
	SAMAKE, Abdoulaye ; MARTINS, Jean ; BONIN, Aurélie ; UZU, Gaëlle ; TABERLET, Pierre ; CONIL, Sébastien ; FAVEZ, Olivier ; THOMASSON, Alexandre ; CHAZEAU, Benjamin ; MARCHAND, Nicolas ; JAFFREZO, Jean-Luc	Variability of the atmospheric PM <sub>10</sub> microbiome in three climatic regions of France	Frontiers in Microbiology







**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](http://www.ineris.fr)