

upds MAG

LE MAGAZINE DES PROFESSIONNELS
DE LA DÉPOLLUTION DES SITES



Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites.

// UPDS

Les chiffres de l'UPDS en 2024
Positions de l'UPDS

// HYGIÈNE & SÉCURITÉ

Accidentologie des adhérents de
l'UPDS pour l'année 2024

// ACTUALITÉ

Les dernières publications sites et
sols pollués

DOSSIER

**DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS
MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES //**



// SOMMAIRE

Edito //	3
Position de l'UPDS//	
FACE À LA CONTAMINATION DES MILIEUX PAR LES PFAS, ENGAGEONS UNE RÉPONSE COLLECTIVE.....	4
FACE À LA CONTAMINATION DES SOLS PAR LES MICROPLASTIQUES DANS LES SITES INDUSTRIELS, AGISSONS MAINTENANT.....	6
UPDS//	
LES CHIFFRES DE L'UPDS EN 2024	10
Hygiène & Sécurité//	
ACCIDENTOLOGIE des adhérents de l'UPDS en 2024.....	12
COMMISSION HYGIÈNE & SÉCURITÉ DE L'UPDS : des outils concrets pour les acteurs de terrain.....	14
DOSSIER : Gestion de chantiers multi-pollutions ou spéciales//	
FORAGES ET SÉCURISATION PYROTECHNIQUE : quand le passé conditionne l'avenir de nos chantiers.....	15
STABILISATION DES SOLS CONTAMINÉS PAR LES PFAS : UNE ALTERNATIVE DURABLE ? : Résultats d'essai de traitabilité réalisés en Allemagne.....	17
AGRO-INDUSTRIE : QUELLE GESTION PROPORTIONNÉE DANS UN CADRE SITES ET SOLS POLLUÉS (SSP) ?	20
LA "DÉCHARGE", CET ÉTRANGE SITE POLLUÉ.	23
LES PFAS DANS L'EAU, UN TRAITEMENT COMPLEXE MAIS CONCLUANT	29
FUKUSHIMA : FAISABILITÉ D'UNE BARRIÈRE PERMÉABLE RÉACTIVE : en alternative au confinement hydraulique par congélation.....	31
Actualité //	
LES DERNIÈRES PUBLICATIONS	36



UPDS MAG n°18 Novembre 2025

Magazine édité par l'UPDS
Union des Professionnels de la Dépollution des Sites
183 avenue Georges Clémenceau 92000 NANTERRE
www.upds.org

Réalisation : UPDS

Comité de rédaction : Christel de LA HOUGUE, Franck LECLERC, Yves GUELORGET, Nicolas FOURAGE, Jonathan SÉNECHAUD

Crédits photo : @UPDS @adhérents UPDS

Reproduction interdite sans accord de l'UPDS

// CALENDRIER

Cliquez pour plus d'info

[21ème Journée Technique d'information et de retour d'expérience de la gestion des sites et sols pollués](#)

4 décembre 2025 à Paris

[RECORD](#)

22 Janvier 2026

[Intersol](#)

24-26 mars 2026 à Lille

[Jour de la Terre](#)

22 avril 2026

[IFAT](#)

4-7 mai 2026 à Munich



// PUBLIER UN ARTICLE

Vous êtes un industriel, un aménageur, un établissement public foncier, un chercheur, un juriste, un institutionnel, un partenaire,... vous pouvez aussi contribuer à ce magazine !

Pour toute information :

upds@upds.org

// SUIVEZ-NOUS



// ÉDITO



Jean-Philippe TRACOL
Président de la
commission Hygiène
et Sécurité

Chères lectrices, chers lecteurs,

La dépollution des sols est une activité singulière, à la croisée des enjeux sanitaires, environnementaux et industriels. Les entreprises adhérentes à l'UPDS le savent : leur engagement dépasse le cadre technique pour intégrer un niveau d'exigence élevé en matière de santé et de sécurité.

Chaque chantier confronte nos équipes à une réalité complexe : la poly-exposition à des polluants variés, dont les concentrations sont rarement maîtrisées. Cette incertitude, combinée à des environnements souvent contraints – zones urbaines, sites industriels en activité, sols instables ou confinés – impose une anticipation rigoureuse et une vigilance permanente.

Les chiffres de l'accidentologie 2024 (ingénierie et travaux confondus) nous rappellent que la sécurité reste un défi majeur. Face à cette réalité, nous devons aller au-delà des obligations réglementaires. À titre de comparaison, les travaux de désamiantage bénéficient d'un cadre strict, imposant des procédures, des certifications et des contrôles renforcés. Pour la dépollution, la réglementation actuelle

n'impose pas aux maîtres d'ouvrage de recourir à des entreprises certifiées pour la réalisation des travaux. Cette absence d'obligation ne doit pas conduire à des choix dictés uniquement par des considérations économiques. Dans l'attente d'évolutions réglementaires, nous avons le devoir moral et professionnel d'appliquer des standards élevés, même sans contrainte légale.

Cette exigence repose sur une analyse de risques approfondie, permettant de définir les mesures de prévention adaptées : équipements de protection collective (EPC), équipements de protection individuelle (EPI), procédures de suivi des expositions. Ce triptyque constitue le socle d'une sécurité proactive, différenciante par rapport à d'autres acteurs ou secteurs.

Cette culture ne s'improvise pas. Elle s'appuie sur des démarches structurées, validées par des certifications exigeantes. Une large majorité de nos entreprises adhérentes sont certifiées MASE et LNE, gages de systèmes de management robustes et de pratiques rigoureuses. Ces certifications ne sont pas de simples labels : elles traduisent une organisation pérenne, un engagement collectif et une éthique environnementale sans compromis.

Je tiens à saluer les maîtres d'ouvrages qui ont déjà fait le choix de la sécurité et de la qualité, en assumant les investissements nécessaires pour travailler avec des entreprises certifiées et responsables. Ce choix est un signal fort : il démontre que la santé des salariés et la conformité des opérations sont des priorités partagées.

Je souhaite également remercier les adhérents très actifs au sein de la Commission Hygiène & Sécurité.

Leur implication dans la production d'outils concrets (mise à jour des fiches pratiques, partage de rex, création d'Evaexpo®, logigrammes, supports de communication...) illustre la force de notre collectif. Ces initiatives traduisent la volonté forte de protéger nos équipes.

J'encourage tous les autres adhérents à rejoindre cette dynamique vertueuse. Participer aux commissions, partager vos retours d'expérience, contribuer à la création d'outils : autant d'actions qui renforcent notre expertise et notre image auprès de nos équipes opérationnelles et de nos maîtres d'ouvrage.

Notre rôle ne se limite pas à l'exécution technique des chantiers. Il s'inscrit dans une finalité plus large : améliorer durablement la situation environnementale des sites pollués, tout en respectant le cadre défini par les maîtres d'ouvrages. En d'autres termes, nous travaillons pour réduire les risques sanitaires et environnementaux aujourd'hui, mais aussi pour contribuer à un avenir plus sûr et plus responsable.

L'UPDS et ses adhérents portent cette ambition avec constance : faire de la santé et de la sécurité non pas une contrainte, mais un levier de professionnalisme et de différenciation. C'est en affirmant ce haut niveau d'exigence que nous renforçons la confiance de nos partenaires, la crédibilité de notre secteur et, surtout, la protection de celles et ceux qui en sont les acteurs quotidiens.

Notre engagement est clair : dépolluer, oui, mais jamais au détriment de la santé de nos salariés.

Bonne lecture à toutes et à tous

// POSITION DE L'UPDS

FACE À LA CONTAMINATION DES MILIEUX PAR LES PFAS, ENGAGEONS UNE RÉPONSE COLLECTIVE

Les substances **per- et polyfluoroalkylées (PFAS)**, surnommées « polluants éternels » en raison de leur persistance extrême dans l'environnement, constituent aujourd'hui un enjeu sanitaire et environnemental majeur. En tant qu'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS), nous souhaitons contribuer à l'élaboration d'une **réponse collective** afin de définir un cadre réglementaire clair et opérationnel pour la gestion des PFAS dans le domaine des sites et sols pollués (SSP), en mobilisant l'expertise de nos adhérents.

PFAS et sites et sols pollués : des risques à anticiper

Utilisés massivement depuis les années 1950 dans de nombreuses applications industrielles et domestiques (textiles, mousses anti-incendie, revêtement antiadhésif, emballages alimentaires...), les PFAS se sont diffusés dans toutes les matrices : sols, eaux, air et chaînes alimentaires.

L'Union européenne envisage désormais une restriction généralisée de l'ensemble des PFAS via REACH (repris en France à travers la loi du 27/02/2025), et plusieurs pays voisins (Allemagne, Belgique, Suisse) déploient déjà des stratégies nationales de surveillance et de réduction. La France s'est récemment dotée d'un texte réglementaire visant également une réduction des rejets aqueux.

En France, malgré une prise de conscience, leur intégration dans les stratégies de gestion des SSP reste limitée. Sans cadre réglementaire, ni outils partagés, la gestion des PFAS risque de générer :

- une **insécurité juridique** pour les maîtres d'ouvrage ;
- des **retards dans les projets** de reconversion ;
- et des **coûts majeurs de dépollution** des eaux et des sols, estimés à date à plus de 100 milliards d'euros par an d'ici 2045 pour l'Europe, et qui seront bien plus élevés si aucune mesure n'est prise.



Dans un contexte de sobriété foncière et de réindustrialisation verte, il est donc urgent de structurer une approche collective et opérationnelle pour anticiper ces impacts et garantir la cohérence des politiques publiques.

PFAS : caractéristiques techniques complexes et verrous

Les PFAS se distinguent par leur diversité et leur persistance : **plus de 10 000 substances différentes** ont été identifiées, présentant des **propriétés et des mobilités très variées**. Cette complexité technique rend les investigations difficiles, en raison notamment des **risques de contaminations croisées** lors des prélèvements et des analyses, des **difficultés pour réaliser les analyses en laboratoire**, ainsi que du **manque de valeurs de références** (Valeurs Toxicologique de Référence et valeurs de fond) pour la majorité des composés rendant l'interprétation des résultats analytiques délicate.

Sur le plan opérationnel et réglementaire, plusieurs obstacles limitent la gestion efficace des PFAS : le **manque de référentiels de gestion** et l'**absence d'obligation réglementaire** encadrant la gestion des terres excavées.

L'engagement de l'UPDS : structurer une réponse opérationnelle

L'UPDS s'est déjà mobilisée pour structurer une réponse opérationnelle face aux PFAS en développant des outils concrets destinés à accompagner ses adhérents dans la gestion de ces polluants :

- **création d'une base nationale de valeurs de fond**, intégrée dans la base BDSolU du BRGM ;
- **réalisation d'un benchmark des référentiels disponibles**, incluant valeurs toxicologiques de référence (VTR), substances traceurs, seuils d'investigation et techniques de gestion ;
- **élaboration de fiches techniques de prélèvement** pour les matrices sol, eau et air susceptibles de contenir des PFAS.

Ces initiatives démontrent que le domaine des SSP est en capacité de proposer des solutions opérationnelles adaptées à la problématique PFAS.

Nos propositions : cinq priorités pour une politique nationale en matière de SSP

L'UPDS appelle les pouvoirs publics à engager une réponse collective autour de **5 axes** :

- **Encadrer la gestion des terres excavées contenant des PFAS (déchets)**, en définissant les filières de traitement (valorisation ou enfouissement) et les seuils d'acceptation associés ;
- **Investiguer systématiquement les PFAS dans les sols et les eaux souterraines** lors des diagnostics environnementaux ;
- **Elargir les listes des PFAS à rechercher en prenant en compte les différents usages passés ou présents des sites**, sans se limiter à la liste des PFAS de l'Arrêté ministériel de juin 2023. En effet, les passifs environnementaux définis uniquement à partir de cette base sont incomplets et peuvent générer des risques pour l'environnement et les parties prenantes ;
- **Accélérer l'établissement de VTR et de seuils de gestion, dans une logique de hiérarchisation des risques**, en clarifiant notamment l'usage des RPF (Relative Potency Factors) lorsque les VTR font défaut ;
- **Poursuivre les échanges avec les professionnels pour la rédaction des guides nationaux sur le sujet des PFAS, et les travaux des groupes d'experts en charge des politiques publiques** sur ces sujets.

Un appel à la coopération et à l'innovation

La France ne peut pas rester en retrait alors que d'autres pays avancent à grand pas sur le diagnostic, la gestion et la surveillance des PFAS. L'UPDS encourage à intensifier la **mobilisation coordonnée des pouvoirs publics, agences, chercheurs et professionnels**, et appelle à un **investissement renforcé dans la recherche et l'innovation** pour améliorer la compréhension du comportement des PFAS dans l'environnement et développer des solutions de traitement.

La pollution aux PFAS représente un **défi majeur** mais surmontable si la réponse est anticipée et coordonnée. En tant que chambre syndicale du secteur des SSP, l'UPDS réaffirme son engagement à contribuer activement à cette dynamique, afin que la gestion des PFAS ne soit pas celle de l'urgence subie, mais celle d'une **anticipation collective et responsable**.

¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/orf/id/JORFTEXT000051260902>

² https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2025/01/14/pfas-le-cout-vertigineux-de-la-depollution-de-l-europe_6496686_4355770.htm

³ <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/38905>

// POSITION DE L'UPDS

FACE À LA CONTAMINATION DES SOLS PAR LES MICROPLASTIQUES DANS LES SITES INDUSTRIELS, AGISSONS MAINTENANT

La pollution des sols par les microplastiques est une problématique d'une importance médiatique et sociétale croissante. En tant qu'Union des professionnels de la dépollution des sites (UPDS), nous prenons en compte ce sujet et nous alertons les pouvoirs publics sur la nécessité urgente de prendre des mesures concrètes pour gérer cette pollution émergente.

Un enjeu stratégique au croisement de la transition écologique et de la sobriété foncière

La pollution des sols par les microplastiques constitue un enjeu environnemental, aujourd'hui rarement pris en compte dans le domaine des sites et sols pollués. Pourtant, cette problématique s'inscrit déjà au cœur des priorités européennes. Dans sa stratégie «Zéro Pollution» (Green Deal, 2020), la Commission européenne reconnaît les microplastiques comme contaminants d'intérêt prioritaire. Plusieurs programmes de recherche (Horizon Europe : MINAGRIS, PAPILLONS, PlasticsFatE) explorent leur comportement dans les compartiments terrestres, en particulier les sols.

En France, cette problématique entre en résonance directe avec les politiques nationales de sobriété foncière (objectif Zéro Artificialisation Nette – ZAN), de reconversion des friches industrielles, et de limitation des pertes de Granulés de Plastiques Industriels (GPI) dans l'environnement (décret n° 2021-461). Dans ce contexte, la requalification de terrains à passif environnemental devient une nécessité. Or, la présence non caractérisée de microplastiques dans ces sols pourrait, à court ou moyen terme, compromettre la durabilité des opérations d'aménagement, tant sur le plan environnemental que juridique.

Des sources spécifiques liées aux milieux industriels et aux friches

Contrairement aux sols agricoles, les microplastiques présents dans les sols industriels proviennent de sources historiques ou structurelles présentes dans de nombreux secteurs d'activité :

- Déchets plastiques enfouis dans d'anciennes décharges ou friches ;
- Dégradation de géotextiles ou matériaux de confinement en place ;
- Activités industrielles anciennes, actuelles ou en cessation, liées au broyage, à la plasturgie, au stockage de déchets ou à l'utilisation de GPI ;
- Ruissellements et lixiviats diffusant les micro-plastiques.

Malgré la spécificité de ces contextes, aucune donnée n'est actuellement disponible sur la contamination des sols par les microplastiques. Les impacts toxicologiques ou écotoxicologiques associés à cette dispersion ne sont pas encore suffisamment évalués, et les connaissances bibliographiques actuelles sont lacunaires.



Premiers constats alarmants sur les sols français

Une étude nationale (ADEME – INRAE – IRDL, 2025) a montré que 76 % des 33 échantillons de sols agricoles analysés en France présentaient une contamination par des microplastiques, avec une moyenne de 15 particules par kilogramme de sol sec, majoritairement du polyéthylène. Bien que centrée sur des sols agricoles, cette étude démontre l'omniprésence des microplastiques dans les milieux terrestres. Les friches industrielles, les ICPE, les remblais et anciennes décharges constituent, du fait de leurs sols largement anthropisés probablement des réservoirs bien plus contaminés – mais non investigués.

Une pollution émergente mésestimée dans les sols

Les microplastiques présents dans les sols des sites industriels, ICPE, friches ou anciennes décharges constituent une menace environnementale et sanitaire encore peu prise en compte dans les politiques publiques actuelles. Pourtant, au-delà du risque sanitaire induit, leur présence peut profondément altérer la santé des sols, au sens défini par la proposition de directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols, qui reconnaît explicitement les fonctions vitales des sols pour les écosystèmes et les sociétés humaines.

Les principaux risques identifiés sont les suivants :

- **Contamination de l'ensemble de la chaîne alimentaire** par les microplastiques et également par d'autres polluants organiques persistants (HAP, PCB, PFAS) et métaux lourds du fait de leur adsorption sur les microplastiques augmentant leur mobilité et leur potentiel de transfert vers les réseaux trophiques ou les eaux souterraines.
- **Perturbation de la microfaune édaphique** (vers de terre, collemboles, nématodes), essentielle aux processus de décomposition de la matière organique, de structuration du sol et de régulation biologique.
- **Dégradation de la biodiversité microbienne et altération des fonctions écologiques du sol** : déséquilibre des communautés bactériennes et fongiques, perturbation des cycles biogéochimiques (carbone, azote, phosphore), diminution des capacités de décomposition, de minéralisation et de résilience des sols face aux pollutions ou aux aléas climatiques.
- **Altération des propriétés physiques du sol** : réduction de la porosité, modification de la perméabilité et de la rétention hydrique, impactant directement la stabilité, l'infiltration et la circulation des eaux ainsi que les capacités d'autoépuration du sol.
- **Transferts secondaires** : migration des microplastiques vers les eaux souterraines ou émissions de fibres et particules volatiles pouvant se retrouver dans l'air ambiant, notamment lors de travaux de terrassement ou d'excavation.
- **Baisses de rendement des cultures** du fait de la perturbation de la photosynthèse par les microplastiques.

Ces perturbations compromettent l'ensemble des fonctions écologiques du sol : régulation hydrique, filtration des polluants, support à la biodiversité, stockage du carbone, recyclage des nutriments... Ce sont précisément ces fonctions que la directive européenne sur les sols entend protéger, en plaçant la santé des sols au cœur des stratégies de résilience écologique et de durabilité des aménagements.

Ainsi, les microplastiques ne peuvent plus être considérés comme des polluants marginaux dans les études sur les sites et sols pollués. Leur impact sur la capacité des sols à assurer leurs fonctions écosystémiques et les enjeux sanitaires, appellent une reconnaissance réglementaire et des mesures spécifiques de surveillance et de gestion.



Le positionnement de l'UPDS : Structurer une réponse collective

Face à cette situation, l'UPDS propose une mobilisation immédiate des acteurs publics et privés autour de **trois axes prioritaires** :

1. Caractérisation environnementale ciblée : état des lieux exploratoire

L'UPDS souligne l'importance de s'appuyer notamment sur les premières initiatives de l'ADEME, qui a lancé dès 2019 des appels à projets pour explorer la présence des microplastiques, en particulier à travers le plan de gestion des décharges littorales. Cette démarche a permis d'identifier et de diagnostiquer des dépôts pollués par des plastiques, et de soutenir la mise au point de méthodes analytiques adaptées (filtration, extraction, spectroscopie). Afin d'évaluer l'ampleur de la pollution des sols par les microplastiques dans le secteur des sites et sols pollués, **l'UPDS recommande de lancer une campagne nationale de diagnostic environnemental.**

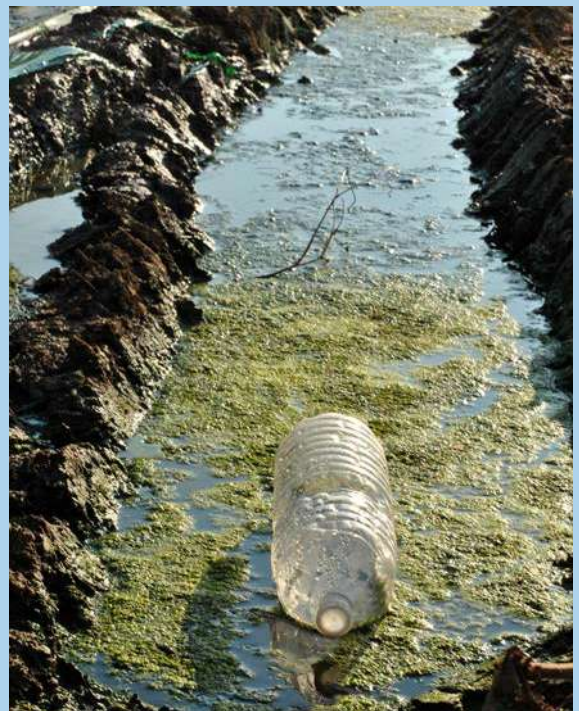
Celle-ci s'appuierait sur **trois axes** :

- **Investigation ciblée** sur un panel représentatif de sites (friches industrielles, ICPE à l'arrêt, anciennes décharges), afin d'identifier les types de contextes les plus propices à l'accumulation de microplastiques.
- **Développement de protocoles analytiques harmonisés**, en partenariat avec des laboratoires de référence, pour fiabiliser les méthodes d'échantillonnage, d'extraction et de quantification dans les matrices solides.
- **Remontée centralisée des résultats auprès des services de l'État** (DREAL, ADEME, CEREMA, INERIS), avec intégration progressive dans les campagnes d'investigations existantes, afin d'alimenter les doctrines de gestion.

2. Évolution du cadre méthodologique : intégrer les microplastiques dans la politique de gestion SSP

La reconnaissance des microplastiques comme une pollution émergente impose une adaptation progressive du cadre méthodologique applicable aux sites et sols pollués. Cette évolution doit s'appuyer sur l'état des connaissances scientifiques, encore en construction, notamment concernant les effets sanitaires et environnementaux des microplastiques dans les sols.

- **Inscription explicite des microplastiques comme polluants émergents dans le domaine des SSP**, en cohérence avec les recommandations européennes et les travaux de l'ECHA sur les polymères synthétiques.
- **Mise à jour des guides méthodologiques de référence** (INERIS, BRGM, ministère), afin d'intégrer les microplastiques aux protocoles d'investigation environnementale, d'évaluation des risques et de gestion des sites.
- **Lien étroit avec les avancées scientifiques** (absence actuelle de valeurs toxicologiques de référence (VTR) pour les microplastiques, impact écotoxicologique dans les sols ...), les **futures orientations réglementaires** devront s'appuyer sur les résultats issus des programmes de recherche nationaux et européens.



3. Développement de solutions de gestion : Adapter les pratiques de dépollution aux microplastiques

La gestion des sols contaminés par des microplastiques soulève des défis techniques spécifiques, en raison de leur taille microscopique, de leur composition polymérique variée et de leur comportement physico-chimique complexe dans les matrices solides. Actuellement, il n'existe pas de filière de traitement spécifiquement dédiée à ce type de polluants dans le domaine des SSP.

L'UPDS recommande plusieurs pistes pour intégrer cette problématique aux pratiques de dépollution :

- **Évaluation des performances des techniques existantes**, notamment le tri granulométrique, la flottation, le lavage physico-chimique ou les traitements thermiques, et favoriser le développement de techniques innovantes.
- **Innovation dans les méthodes de détection** rapide et sur site, afin de faciliter l'identification des microplastiques dans les matrices complexes, de réduire les coûts d'analyse et d'améliorer la réactivité des acteurs de terrain. Le développement de capteurs portables, de méthodes spectroscopiques simplifiées ou de kits de criblage semi-quantitatifs constitue un enjeu stratégique.
- **Réintégration contrôlée des terres excavées** : la présence potentielle de microplastiques dans les déblais issus de friches, d'anciennes décharges ou d'ICPE pose la question de leur réutilisation dans les projets de réaménagement urbain ou d'aménagement du territoire. Il est essentiel d'intégrer ce paramètre dans les doctrines de réutilisation ou valorisation des terres excavées, pour prévenir les transferts secondaires et protéger la santé des sols dans une logique de sobriété foncière.

A travers le plan «*Décharges du Littoral*», piloté par le CEREMA et l'ADEME, les acteurs du domaine des sites et sols pollués étoffent d'ores et déjà leurs connaissances et savoir-faire quant à la caractérisation et aux traitements des micro et nano plastiques. Mais l'accent doit être mis plus fortement sur ce type de polluants.

Intégrer les microplastiques dans la transition écologique des sols

Alors que la France s'engage dans une trajectoire de sobriété foncière et de réindustrialisation durable, la pollution des sols par les microplastiques constitue un angle mort préoccupant. Leur absence actuelle dans les politiques de gestion des SSP menace la cohérence des politiques de reconversion des friches, de revitalisation urbaine et de protection de la santé.

Faute d'anticipation, les risques sont multiples : transferts non maîtrisés de site à site et vers les milieux, incertitudes juridiques, entraves aux projets d'aménagement, dégradation de la qualité des sols. Cette situation appelle une réponse structurée, fondée sur la science et la concertation.

L'UPDS appelle les pouvoirs publics à engager, sans attendre, les actions suivantes :

- **Inscrire les microplastiques dans les priorités d'action** du Plan Friches, du plan France Nation Verte et des programmes de recherche environnementale, **en tant que polluants émergents affectant la santé des sols.**
- **Structurer une initiative nationale coordonnée**, associant les ministères compétents, les agences techniques (ADEME, INERIS, BRGM, CEREMA), les collectivités et les professionnels de la dépollution, afin de bâtir un cadre opérationnel de connaissance, de gestion et de prévention.
- **Soutenir l'innovation dans les outils de diagnostic et les solutions de traitement**, en intégrant ces problématiques aux appels à projets et aux investissements stratégiques de France 2030.

En tant qu'organisation représentative du secteur des SSP, l'UPDS réaffirme son engagement à contribuer activement à cette dynamique, aux côtés des institutions et des chercheurs, pour intégrer pleinement les microplastiques dans la transition écologique des sols.

// UPDS

LES CHIFFRES DE L'UPDS EN 2024

L'UPDS consolide chaque année les chiffres d'affaires et les effectifs de la profession en réalisant une enquête auprès de ses adhérents. Ces données reflètent l'évolution du marché des sites pollués en France ainsi que les ressources travaillant dans ce domaine.

SOCIÉTÉS ADHÉRENTES

En 2024, l'UPDS compte 61 adhérents, avec l'arrivée de 4 nouveaux adhérents : SUEZ Consulting au sein du collège ingénierie, TELL US au sein du collège microstructures et MERIEUX et ISODIAG en tant qu'adhérents associés. La figure 1 présente la répartition des adhérents par collège.

CHIFFRE D'AFFAIRES

En 2024, l'ensemble des sociétés adhérentes de l'UPDS hors associés (Collèges ingénierie, travaux et microstructures) a réalisé un CA de 517 M€ réparti à 60% en travaux et 40% en études, comme indiqué sur la figure 2.

Le chiffre d'affaires global a diminué de 5,1% entre 2023 et 2024, principalement en raison de la diminution du CA en travaux (-8,9%) non compensée par la légère augmentation du volume d'études (+1,2%). Toutefois, cette évolution côté travaux est à considérer avec précaution car elle est impactée par une comptabilité des chiffres d'affaires qui a évolué en 2024.

En effet, en 2024, les adhérents ont déclaré le CA de leurs plateformes de façon séparée de leur CA Travaux. Or, dans les années précédentes, certains adhérents incluaient le CA de leurs plateformes dans leur CA travaux, d'autres non. Cette évolution peut donc avoir une influence sur la tendance constatée.

Toutefois, la diminution du CA en travaux est cohérente avec le ressenti des adhérents du collège travaux au cours de l'année 2024.

Cette diminution du CA des sociétés du collège travaux de l'UPDS peut être reliée à l'apparition de nouveaux acteurs et à la gestion de sujets SSP par des sociétés de TP non spécialistes de ces questions.

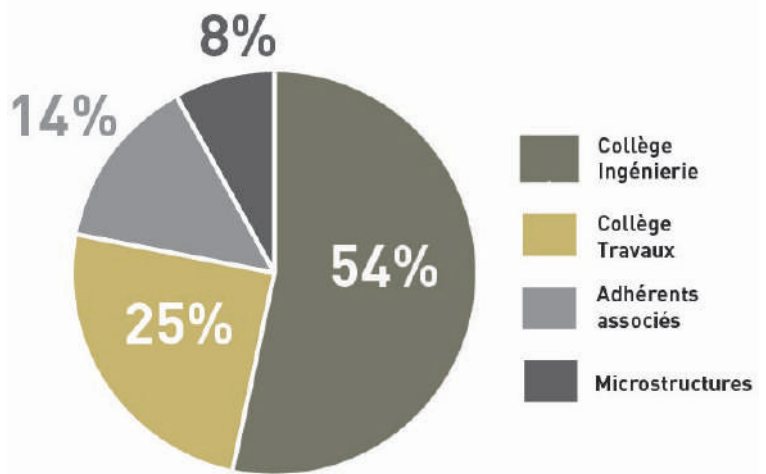


Fig 1 : Répartition des sociétés adhérentes de l'UPDS par collège en 2024

Depuis 2007, le CA des sociétés de l'UPDS a progressé en moyenne de 3,2% par an. Toutefois cette évolution ne se fait pas à périmètre constant : l'intégration régulière de nouveaux adhérents participe également à cette progression. Les chiffres UPDS semblent cependant montrer l'entrée du marché des SSP dans sa phase de maturité depuis plusieurs années.

Le chiffre d'affaires déclaré par les plateformes de traitement des terres excavées polluées détenues par les adhérents de l'UPDS s'est élevé à 40 millions d'euros en 2024. L'évolution de ce marché parallèle aux SSP, probablement en phase de croissance, sera à suivre pour l'UPDS.

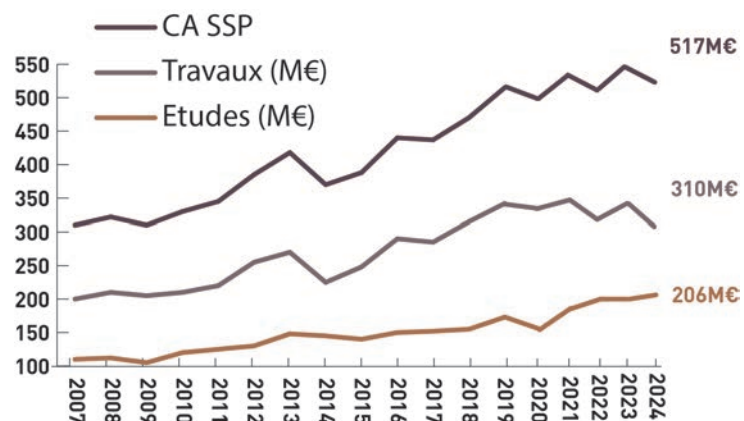


Fig 2 : Evolution du CA SSP des adhérents depuis 2007

EFFECTIFS ET PARITÉ

En 2024, les adhérents de l'UPDS représentent 2 700 salariés (emplois directs) avec 1102 personnes pour le collège Travaux, en hausse de 3%, 1585 personnes pour le collège Ingénierie, en hausse de 5% et 13 salariés pour le collège microstructures, en hausse de 30% par rapport à 2023.

Ces hausses d'effectifs, plus importantes que les évolutions de CA, ont probablement un impact sur la rentabilité du secteur.

La figure 3 montre que les entreprises du syndicat comptent toujours une majorité d'hommes (60%).

Toutefois, on se rapproche de la parité au sein du collège ingénierie (53% d'hommes) alors que les collèges travaux et microstructures doivent encore progresser sur ce sujet (respectivement 70% et 69% d'hommes).

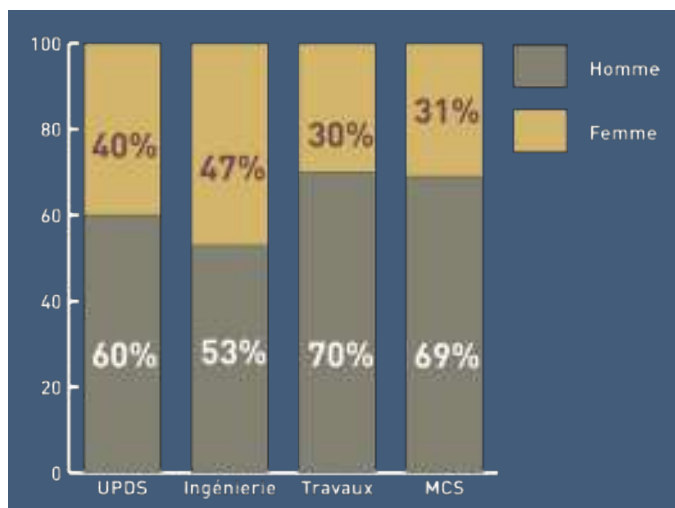


Fig 3 :Parité globale et par collège en 2024

RÉPARTITION DU PERSONNEL PAR CSP

Les métiers des SSP font appel à une majorité de cadres et ingénieurs qui représentent 74% des effectifs au global comme le montre la figure 4.

Cette tendance est plus marquée pour l'ingénierie et les microstructures (respectivement 85% et 69% de cadres et ingénieurs) que pour les Travaux, où cette proportion tombe à 59%.

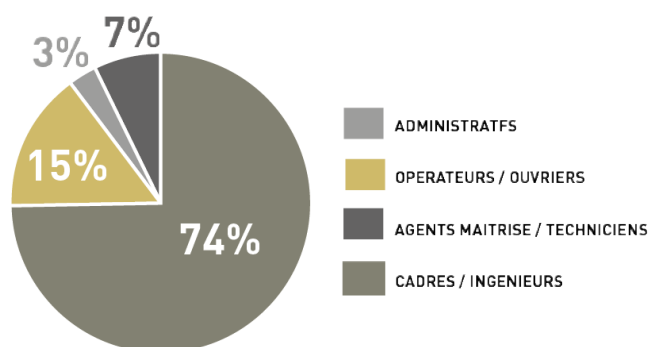


Fig 4 : répartition du personnel par CSP

Marie DUCLOS (UPDS)

// HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

ACCIDENTOLOGIE DES ADHÉRENTS DE L'UPDS DE L'ANNÉE 2024

Depuis 2016, l'UPDS collecte chaque année les données d'accidentologie de ses adhérents, dans le but de mieux comprendre et prévenir les risques au sein du secteur des sites et sols pollués.

Sur l'année 2024, les données accidentologie de 53 adhérents de l'UPDS issus des 3 collèges (ingénierie, travaux, microstructures) et représentant 2 523 salariés en ETP¹ ont été consolidées. Leur analyse met en évidence plusieurs tendances.

UNE HAUSSE RÉGULIÈRE DU NOMBRE D'ACCIDENTS DEPUIS 2021

Après un minimum atteint en 2021 (53 accidents), le nombre d'accidents du travail chez les adhérents de l'UPDS (collèges travaux et ingénierie) augmente en moyenne de 8 % par an (cf. Figure 1) alors que, sur la même période, le nombre d'ETP augmente en moyenne de 1,3% par an. En 2024, il s'établit à 69 accidents, un chiffre aligné sur la moyenne annuelle observée depuis 2016 (68 accidents en moyenne par an). En 2024, le nombre d'accidents du travail est plus élevé au sein du collège ingénierie (40 accidents pour 1492 ETP) qu'en travaux (29 accidents pour 1022 ETP).

Toutefois le taux d'accidents pour 100 ETP est équivalent dans les deux collèges (2,68 en ingénierie et 2,84 en travaux). Le collège microstructures (9,5 ETP) n'enregistre quant à lui aucun accident du travail.

FORTE AUGMENTATION DES ACCIDENTS AVEC ARRÊT EN 2024

Quel que soit le collège, comme le montre la figure 1, le nombre d'Accidents Sans Arrêt (ASA), au nombre de 43 en 2024, bien qu'en diminution de 14% par rapport à 2023, représente environ deux tiers des accidents

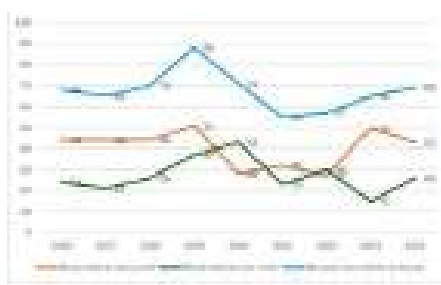


Figure 1 – Evolution du nombre d'accidents du travail depuis 2016

et reste légèrement supérieur à la moyenne constatée depuis 2016 (40 ASA en moyenne par an).

Le nombre d'Accidents Avec Arrêt (AAA) a, quant à lui, connu une augmentation significative de 73 % par rapport à 2023, atteignant 26 cas contre 15 cas en 2023. Cette augmentation est principalement liée au collège ingénierie, qui double le nombre de ses AAA entre 2023 et 2024.

AUGMENTATION SIGNIFICATIVE DES JOURS D'ARRÊT DE TRAVAIL EN 2024...

Après une chute en 2023, le nombre de jours d'arrêt de travail connaît une forte reprise en 2024 (Cf. Figure 2), notamment au sein du collège ingénierie (x7 entre 2023 et 2024) mais également en travaux (x3,7). En 2024, le nombre de jours d'arrêt (538 jours) revient dans la moyenne observée depuis 2016 (554 jours d'arrêt par an). Les accidents avec arrêt donnent lieu, pour le collège ingénierie, à 15,5 jours d'arrêt en moyenne contre 18 pour le collège travaux.



Figure 2 – Evolution du nombre de jours d'arrêt depuis 2016

DES ACCIDENTS DE TRAJETS SANS ARRÊT EN FORTE AUGMENTATION...

Comme le montre la figure 3, l'année 2024 marque une inversion de tendance par rapport à ces dernières années. Après une baisse encourageante depuis 2021, les accidents de trajet sans arrêt ont atteint un niveau record avec 37 cas recensés. Cette augmentation est principalement liée à celle observée dans le collège ingénierie, qui multiplie par 3 le nombre de ses accidents de trajet entre 2023 et 2024 (de 8 à 29 accidents de trajet sans arrêt), une des sociétés adhérente en comptabilisant 10.

En revanche, les accidents de trajet avec arrêt poursuivent leur diminution constante et atteignent leur plus bas niveau en 2024, avec seulement 3 cas enregistrés, dont 2 au sein du collège ingénierie.

IMPACT SUR LES INDICATEURS DE FRÉQUENCE ET DE GRAVITÉ

Les observations ci-dessus ont un impact direct sur les indicateurs de fréquence et de gravité. Comme on peut le constater sur la figure 4, le TF1² se dégrade en raison de la forte augmentation des accidents avec arrêt, qui ont progressé de 73 %.

En revanche, le TF2³ reste stable. En effet, la hausse (6%) du nombre d'accidents (avec et sans arrêt) est compensée par une augmentation du volume d'heures travaillées (+4 %).

Par ailleurs, comme le montre la figure 5, le TG⁴ a été multiplié par 3,7 car il est directement corrélé à l'augmentation du nombre de jours d'arrêt. Malgré cette forte progression, il demeure légèrement inférieur au TG moyen constaté depuis 2016, qui est de 0,14.

DES LÉSIONS TOUJOURS DU MÊME TYPE

Les accidents restent majoritairement liés à la manutention manuelle. Les lésions observées sont principalement des douleurs d'effort, des luxations et des blessures superficielles. Celles-ci touchent principalement les membres inférieurs et supérieurs ainsi que les doigts et les mains. Quelques accidents avec arrêt sont liés à des agressions par des animaux.

EN CONCLUSION...

L'année 2024 a donné lieu à une nette dégradation des indicateurs en accidentologie, notamment dans le collège ingénierie. Le nombre d'accidents de trajet a fortement augmenté. Il serait intéressant de collecter des informations sur la responsabilité de ces accidents. De même, la part de rechutes dans l'augmentation importante du nombre de jours d'arrêt devrait faire l'objet d'une analyse. L'UPDS s'attachera donc à collecter ces informations complémentaires dès 2025 afin d'éclairer l'interprétation de ces chiffres.

Les deux collèges doivent continuer leurs efforts et leur vigilance pour prévenir tous types d'accidents.

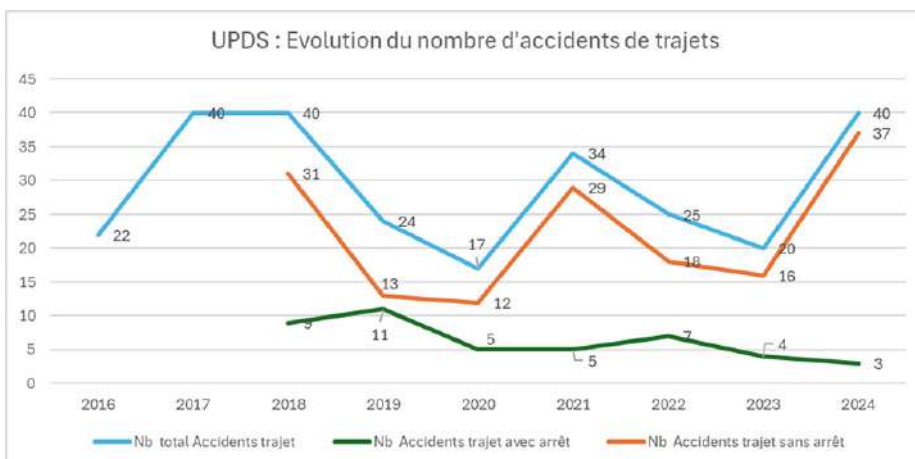


Figure 3 – Evolution du nombre d'accidents de trajets depuis 2016

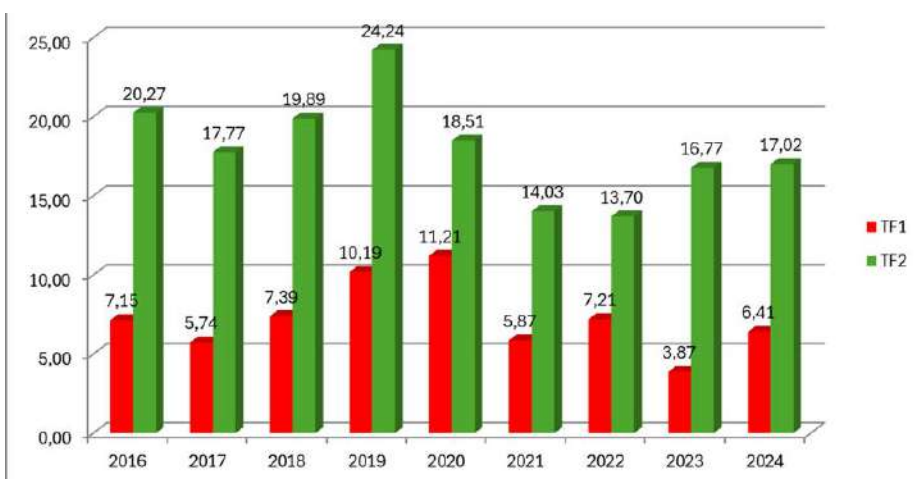


Figure 4 – Evolution des indicateurs TF1 et TF2 depuis 2016

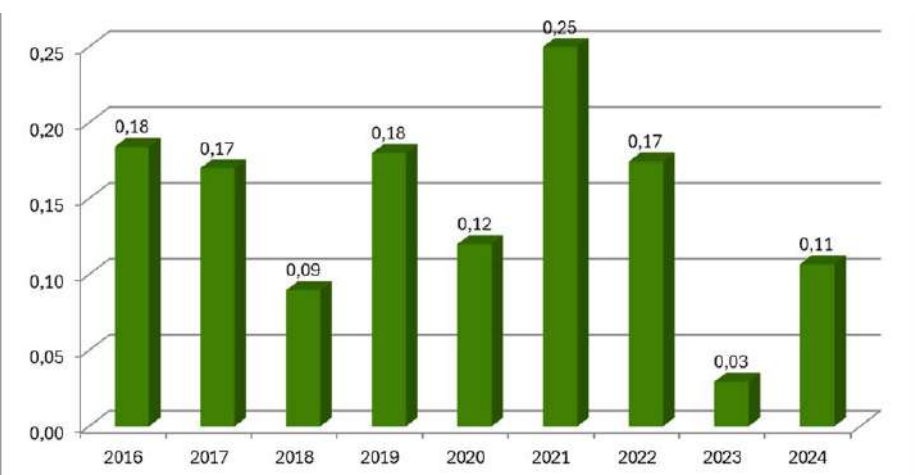


Figure 5 – Evolution du TG depuis 2016

Christel de LA HOUGUE (UPDS)

²Taux de fréquence (TF1) = (nb des AAA en premier règlement/heures travaillées) x 1 000 000

³Taux de fréquence (TF2) = (nb des AAA + ASA en premier règlement/heures travaillées) x 1 000 000

⁴Taux de gravité (TG) = (nb jours arrêt travail/heures travaillées) x 1 000

// DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES

FORAGES ET SÉCURISATION

PYROTECHNIQUE :

QUAND LE PASSÉ CONDITIONNE L'AVENIR DE NOS CHANTIERS

Bombes, mines, obus, grenades... Sous nos pieds sommeillent parfois les vestiges explosifs de conflits passés. Pour les professionnels du forage, qu'il s'agisse de fondations spéciales ou d'études environnementales, la sécurisation pyrotechnique n'est pas une option mais une nécessité absolue qui transforme radicalement l'approche des interventions.

UN ENJEU MÉCONNU AUX CONSÉQUENCES MAJEURES

En France, près de 12 millions d'hectares sont potentiellement pollués par des munitions non explosées, héritages des deux guerres mondiales.

Cette réalité, longtemps occultée, s'impose aujourd'hui comme un paramètre incontournable dans la planification de tout projet de terrassement ou de travaux intrusifs, et en particulier les forages. Fondations spéciales, études géotechniques ou bien encore investigations environnementales, tous les travaux intrusifs sont concernés.

La problématique dépasse largement les zones de combat historiques. Les dépôts de munitions, les champs de tir, les zones d'essais militaires, mais aussi les sites industriels ayant produit des explosifs constituent autant de secteurs à risque.

Face à cette réalité, comment concilier impératifs de sécurité, contraintes techniques et exigences économiques ?

QUAND L'HISTOIRE RESURGIT SOUS NOS PIEDS

Les statistiques parlent d'elles-mêmes: chaque année en France, plus de 900 tonnes de munitions sont découvertes et neutralisées par les services de déminage. Pour les professionnels du forage, cette donnée prend une dimension particulière.

L'acte de forer, par nature invasif et aveugle, multiplie les risques de rencontre fortuite avec ces "cadeaux" du passé.

L'exemple des chantiers du Grand Paris illustre parfaitement cette problématique.

Les travaux du métro automatique ont nécessité une sécurisation pyrotechnique systématique, révélant la présence de munitions à des profondeurs variables, parfois à plus de 8 mètres sous la surface.

Ces découvertes, loin d'être anecdotiques, ont conditionné l'ensemble de la planification des forages et des fondations.



Fig 1 : Passage du géoradar en surface pour sécuriser le premier mètre

UNE APPROCHE MÉTHODIQUE INDISPENSABLE

La sécurisation pyrotechnique des forages s'articule autour d'une méthodologie rigoureuse en trois phases distinctes.

L'étude historique documentaire constitue le socle de cette démarche. Elle consiste à croiser archives militaires, témoignages, cartes d'état-major et photographies aériennes pour identifier les zones à risque.

Cette phase documentaire est complétée par une détection géophysique adaptée au type de sol et aux objectifs du forage. Magnétométrie, détection électromagnétique et géoradar (Fig 1) permettent de localiser les anomalies métalliques suspectes. Enfin, la phase de sondage et de mise au jour, réalisée exclusivement par des équipes spécialisées, confirme ou infirme la présence d'engins explosifs.

TECHNOLOGIES AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ

L'évolution technologique révolutionne les méthodes de détection pyrotechnique. Les détecteurs multi-fréquences nouvelle génération permettent une discrimination plus fine entre débris métalliques inertes et munitions potentielles en surface.

Les systèmes de géolocalisation précis facilitent le marquage et le suivi des anomalies détectées.



Fig 2 : Domaines d'activité de sécurisation

L'intégration des données aux systèmes d'informations géographiques, ouvre de nouvelles perspectives pour l'identification automatisée des signatures caractéristiques des munitions. Ces innovations réduisent significativement les temps d'intervention tout en améliorant la fiabilité des diagnostics.

Le graphique ci dessus (Fig. 2) résume les divers domaines d'activité de sécurisation pyrotechnique en forage de la division DPMS de Sarpi Remediation, principalement pour les diagnostics environnementaux mais aussi en fondations spéciales et géothermie.

RETOUR D'EXPÉRIENCE : LE CAS D'UN CHANTIER URBAIN

Le projet de construction d'une gare de métro en région parisienne illustre concrètement les défis de la sécurisation pyrotechnique.

Ce site de 1 hectare, destiné à accueillir une nouvelle gare dans le cadre d'une nouvelle ligne de métro, nécessitait 721 forages géotechniques préalables aux fondations. (Fig 3)

L'étude historique révéla que la zone avait été lourdement bombardée durant la Seconde Guerre mondiale.

La détection géophysique identifia 3 anomalies suspectes sur l'emprise des forages prévus. Certains ouvrages ont pu être décalés dans des zones sans risque, et la présence d'un opérateur en dépollution pyrotechnique pendant les excavations a permis de terminer la sécurisation.

Finalement, bien qu'aucune munition active n'ait été découverte, des éclats de bombes déflagrées ont été mis au jour pendant les excavations, témoignant du risque bien réel qui subsistait.

Cette expérience souligne l'importance d'intégrer la sécurisation pyrotechnique dès la phase de conception du projet, permettant d'anticiper les surcoûts et les délais additionnels.



Fig 3 : Nombreux forages de sécurisation

RÉGLEMENTATION ET BONNES PRATIQUES

"Assurer la sécurité et protéger la santé des travailleurs" : cette formule de l'article L4121-2 du Code du travail prend une dimension particulière quand il s'agit de forer potentiellement au-dessus d'une bombe de 250 kg !

Loin d'être une simple obligation administrative, cette disposition légale transforme radicalement l'approche des chantiers en zones à risque pyrotechnique. Pour les professionnels du forage, cette réglementation se traduit par l'obligation de faire appel à des entreprises certifiées pour les interventions en zones suspectes. (Fig 4)

Les bonnes pratiques du secteur recommandent une approche graduée : consultation systématique des bases de données historiques, évaluation préliminaire du risque pyrotechnique, et adaptation des méthodes de forage aux conclusions de cette évaluation.

Cette démarche préventive s'avère économiquement plus avantageuse qu'une gestion a posteriori des découvertes fortuites.

VERS UNE APPROCHE INTÉGRÉE ET PRÉVENTIVE

Les retours d'expérience de ces dernières années démontrent l'efficacité d'une approche préventive de la sécurisation pyrotechnique.

Les projets intégrant cette dimension

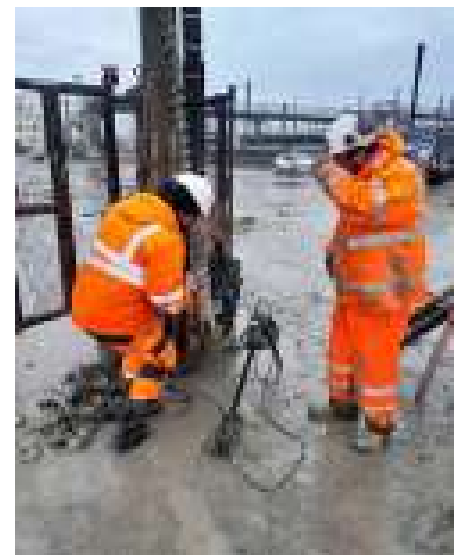


Fig 4 : Opérateur en dépollution pyrotechnique réalisant une mesure à l'aide d'un magnétomètre borehole

dès leur conception affichent des taux de réussite supérieurs et des délais mieux maîtrisés.

La satisfaction client s'en trouve renforcée, créant un cercle vertueux pour l'ensemble de la profession.

Les prochaines étapes s'orientent vers une digitalisation accrue des processus de détection et une meilleure intégration des données historiques dans les systèmes d'information géographique.

L'objectif : transformer cette contrainte de sécurité en avantage concurrentiel par la maîtrise de l'expertise.

Maxime CHAUPUIS (SARPI Remediation)

// // DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES

STABILISATION DES SOLS CONTAMINÉS PAR LES PFAS : UNE ALTERNATIVE DURABLE ?

RÉSULTATS D'ESSAIS DE TRAITABILITÉ RÉALISÉS EN ALLEMAGNE

La contamination des sols par les substances per- et polyfluoroalkylées (PFAS) constitue aujourd'hui un défi majeur pour la réhabilitation des sites pollués, tant en raison de la complexité de leur comportement dans les matrices naturelles que de leur résistance exceptionnelle aux procédés de traitement classiques. C'est dans ce contexte exigeant que RSK Group a été mandaté pour intervenir sur un site militaire en Allemagne, historiquement utilisé comme terrain d'entraînement au tir, où l'utilisation intensive de mousses anti-incendie (AFFF) a durablement impacté les sols et les eaux souterraines.

Alors que des opérations de dépollution des eaux souterraines avaient été engagées, associant le contrôle hydraulique du panache de contamination et le traitement des eaux extraites, les autorités locales ont exigé la prise en charge du réservoir source représenté par les sols eux-mêmes.

Dès lors, l'équipe de RSK a conçu une approche visant à identifier une solution de stabilisation durable, économiquement viable et techniquement adaptée, afin de limiter la mobilité des PFAS dans les sols contaminés.

LES PFAS, UNE PROBLÉMATIQUE ENVIRONNEMENTALE DE LONG TERME

Les PFAS, désignés comme "polluants éternels", tirent leur sinistre réputation de leur extrême stabilité chimique. La force exceptionnelle de la liaison carbone-fluor, qui caractérise ces molécules, leur confère une persistance remarquable tant dans l'environnement que dans les organismes vivants.

Ces substances, qui ne subissent pratiquement pas de biodégradation, peuvent demeurer actives dans les milieux



Fig 1 : Photographie de Biochar

naturels sur des échelles de temps allant de plusieurs décennies à des siècles. Dans les sols, les PFAS manifestent une forte propension à s'adsorber aux particules

minérales et organiques, notamment dans les matrices riches en matière organique ou en minéraux argileux.

Sample ID:	GWM78B 0,2-1,0 m	GWM78B 1,0-2,0 m	GWM78A 0,2-1,0 m	BS01 0-0,2 m
Soil Type:	Sandy Clays			Topsoil
Control (untreated)	32,4 [-]	89,5 [-]	319,5 [-]	7,024 [-]
Biochar low quality 1%	1,6 [97,8%]	0,36 [99,3%]	3,9 [98,4%]	141,6 [84,6%]
Biochar high quality 1%	0,013 [99,9%]	0,05 [99,9%]	0,03 [99,9%]	8,2 [99,1%]
Biochar low quality 3%	0,198 [99,7%]	0,39 [99,3%]	0,596 [99,7%]	34,4 [96,2%]
Biochar high quality 3%	0,005 [99,9%]	0,022 [99,9%]	0,09 [99,9%]	0,78 [99,9%]
Fluoro-Sorb® 100 1%	0,065 [99,9%]	0,01 [99,9%]	0,0697 [99,9%]	0,37 [99,9%]
GAC 1%	0,21 [99,7%]	0,22 [99,6%]	0,449 [99,8%]	28,1 [96,9%]
GAC 3%	0,15 [99,7%]	0,1 [99,8%]	0,328 [99,8%]	4,85 [99,4%]
PAC/GAC 1%	0,096 [99,8%]	0,074 [99,8%]	0,303 [99,8%]	9,39 [98,9%]

Figure 2 - Résultats des tests de Phase 1 : Concentrations de PFAS lixiviables (µg/L) et pourcentage de réduction de la lixivibilité

Cette adsorption renforce leur immobilisation relative dans les horizons supérieurs, mais ne garantit pas leur confinement à long terme, en raison des dynamiques d'échange avec les phases mobiles et du potentiel de migration progressive vers les nappes phréatiques.

LE BIOCHAR ET LE CHARBON ACTIF : DEUX MATÉRIAUX ADSORBANTS AUX PROPRIÉTÉS DISTINCTES

Pour répondre au défi de la stabilisation des PFAS, le recours à des matériaux adsorbants carbonés a été envisagé au stade de l'étude de traitabilité, notamment le biochar et le charbon actif. (Fig. 1)

S'il existe une certaine parenté fonctionnelle

entre ces deux matériaux, leurs origines et leurs propriétés physico-chimiques diffèrent sensiblement.

Le biochar est produit par pyrolyse lente de biomasses végétales en atmosphère contrôlée, aboutissant à la formation d'un matériau principalement composé de carbone (80 à 90%), doté d'une structure poreuse variable.

Cette porosité, bien que généralement inférieure à celle du charbon actif, peut être significativement améliorée par activation thermique ou chimique.

Le biochar est valorisé non seulement pour ses capacités d'adsorption, mais aussi pour son rôle comme puits de carbone dans les sols, participant à la lutte contre le changement climatique.

Le charbon actif, quant à lui, est obtenu par activation sévère de précurseurs carbonés, souvent à haute température, avec pour

objectif d'optimiser la surface spécifique (> 1000 m²/g) et la distribution de micropores favorables à l'adsorption rapide de molécules organiques et inorganiques.

Sa vocation est essentiellement tournée vers des applications de traitement de fluides (eaux, air) nécessitant une adsorption rapide et massive.

L'intérêt du biochar a été exploré dans l'étude de faisabilité car il semblait être une solution durable, offrant à la fois un potentiel d'adsorption des PFAS et une stabilité chimique sur plusieurs siècles en milieu naturel.

DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

Afin de maximiser l'efficacité du biochar utilisé, un procédé d'activation thermique haute température a été mis en œuvre par un fabricant allemand, aboutissant à un doublement de la surface spécifique du biochar standard.

Ce biochar activé a ensuite été comparé, en conditions contrôlées de laboratoire, à d'autres adsorbants, dont du charbon actif en grain et en poudre ainsi qu'à un matériau argileux modifié, le Fluoro-Sorb 100.

Les expérimentations ont consisté à mélanger à hauteur de 1% ou 3% les différents adsorbants aux sols contaminés, issus de quatre horizons prélevés sur site : une terre végétale présentant une concentration exceptionnelle en PFAS (7 000 µg/L sur lixiviats) et trois échantillons issus de niveaux inférieurs présentant des teneurs plus modérées (30 à 300 µg/L sur lixiviats).

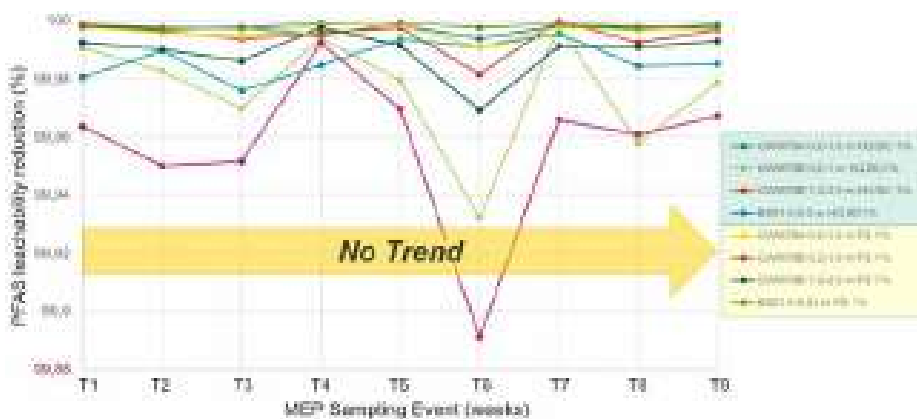


Figure 3 - Résultats des tests de Phase 2 : Résumé de la réduction de la lixivibilité des PFAS au cours du temps

La première phase d'expérimentation s'est appuyée sur des tests de lixiviation standards (DIN EN 12457-4 / DIN 38414), visant à évaluer la réduction de la mobilité des PFAS.

Cette méthode de laboratoire consiste à agiter l'échantillon mélangé pendant 24 heures avec un ratio eau/solide de 10:1.

L'échantillon est ensuite laissé au repos pour décantation, puis des échantillons d'eau filtrée sont prélevés pour l'analyse des PFAS dans les lixiviats (c'est pourquoi les concentrations en PFAS sont exprimées en µg/L, voir Figure 2).

Par conséquent, cette méthode permet d'évaluer la quantité de PFAS adsorbée et retenue dans le sol stabilisé, et simule ainsi dans quelle mesure le transfert des PFAS depuis les sols stabilisés vers le milieu eaux souterraines peut être réduit sur un site.

Les meilleurs résultats obtenus ont conduit à la sélection de deux formulations pour des essais prolongés selon la méthode d'extraction multiple (MEP), sur une durée de neuf semaines.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Les résultats de la première phase ont révélé une nette supériorité du biochar activé et du Fluoro-Sorb 100 par rapport aux autres adsorbants.

Dans les sols les plus contaminés comme dans les horizons sous-jacents, ces deux matériaux ont permis une réduction de la lixivabilité des PFAS supérieure à 99%, démontrant une capacité remarquable à immobiliser les polluants.

Le biochar activé s'est montré significativement plus performant que son équivalent non activé, validant l'hypothèse que l'augmentation de la surface spécifique accroît l'efficacité d'adsorption des PFAS.

Dans la terre végétale fortement contaminée, cependant, le Fluoro-Sorb 100 a surpassé le biochar, suggérant que, selon la nature du sol et la concentration initiale en polluants, l'efficacité relative des adsorbants peut varier.

La seconde phase d'essais a confirmé la robustesse de ces résultats dans le temps. Sur les neuf semaines de tests MEP, aucune recrudescence de la lixivabilité des PFAS n'a été observée, même sur les prélèvements tardifs. (Fig. 3)

Le taux de réduction est demeuré supérieur à 99,88% dans tous les cas, attestant de la

stabilité du confinement chimique assuré par les deux matériaux.

En confrontant ces performances aux critères allemands VK2 prévus pour 2025, il a été établi que les sols stabilisés par biochar activé pouvaient être envisagés pour une réutilisation sur site dans le cas des horizons argileux sableux, tandis que le Fluoro-Sorb 100 semblait plus adapté pour les horizons de terre végétale.

VERS UNE REMÉDIATION DURABLE : PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Au-delà des résultats expérimentaux très prometteurs, cette étude met en lumière l'intérêt stratégique de solutions de stabilisation pour la gestion des sols contaminés par les PFAS.

Le recours au biochar activé, matériau durable et multifonctionnel, ouvre la voie à des approches intégrées, combinant efficacité environnementale et valorisation des ressources locales.

Toutefois, afin de valider pleinement la pertinence de ces procédés dans des conditions réelles, la réalisation de programmes pilotes de grande ampleur est indispensable.

Ces expérimentations permettront de tester l'homogénéité des mélanges à l'échelle industrielle, d'évaluer la stabilité du confinement dans des contextes hydrogéologiques variés et d'affiner les modèles prédictifs du comportement des PFAS à long terme.

Ainsi, en intégrant ces innovations à une démarche rigoureuse de suivi environnemental, la stabilisation des PFAS par biochar ou argiles modifiées pourrait constituer une réponse alternative crédible et durable aux défis que posent ces contaminants majeurs.

Andrew ROLFE (RSK Alenco GmbH)

Julien BRETON (RSK Environnement)

// // DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES

AGRO-INDUSTRIE : QUELLE GESTION PROPORTIONNÉE DANS UN CADRE SITES ET SOLS POLLUÉS (SSP) ?

Depuis le 01/06/2022 (date d'applicabilité de la Loi ASAP et du Décret du 19/08/2021), davantage d'Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) sont concernées par la réalisation de diagnostics de pollution préalables à la cessation d'activité visant à définir les opérations de remise en état. Pour certaines, comme les entreprises de l'agro-industrie, l'application de la méthodologie SSP présente des particularités associées à la présence de composés spécifiques liés à leurs activités, comme les matières fertilisantes ou les produits phytosanitaires, et peut s'avérer complexe, notamment en l'absence de valeurs de référence associées pour les sols.

NOUVELLES OBLIGATIONS DES ICPE

Les entreprises de l'agro-industrie représentent 20% des installations classées pour la protection de l'environnement, avec 120 000 installations connues en 2020.

Les élevages, les silos et installations de stockage en vrac, les dépôts de fumier et d'engrais, les installations de méthanisation font notamment partie de la nomenclature. Elles sont soumises au régime d'autorisation (A), d'enregistrement (E) ou de déclaration (D) en fonction de l'importance des risques ou des inconvénients qu'elles peuvent engendrer.

Dans le cadre de leur cessation d'activité, toutes les ICPE A et E ainsi que certaines ICPE D (rubriques concernées listées dans l'article R512-66-3 du Code de l'Environnement) doivent depuis le 01/06/2022 (date d'applicabilité de la Loi ASAP) fournir des attestations garantissant a minima la mise en sécurité des installations concernées par la cessation d'activité et, selon les cas, l'adéquation des mesures de gestion proposées pour la réhabilitation ainsi que, le cas échéant, la conformité des travaux réalisés par rapport aux objectifs de réhabilitation.

Pour pouvoir délivrer ces attestations, le bureau d'études certifié doit s'appuyer,



Coopérative agricole

dans un premier temps, sur un schéma conceptuel élaboré en conformité avec la NFX 31-620-2 (prestation A130).

Celui-ci montrant généralement des potentialités de transfert lié aux activités vers l'environnement, un diagnostic s'avère nécessaire afin de disposer de l'ensemble des informations requises permettant de délivrer l'attestation.

Ainsi, des ICPE, jusqu'alors peu concernées par la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, nécessitent de faire l'objet de diagnostics de pollution.

Pour certaines de ces activités, l'évaluation de l'impact exercé sur l'environnement ou la gestion des anomalies relevées s'avère complexe, en l'absence de valeurs de comparaison, qu'elles soient réglementaires ou tout simplement représentatives des valeurs de fond.

C'est notamment le cas pour les activités de l'agro-industrie, dont certaines des substances produites, stockées ou manipulées, comme les matières fertilisantes ou produits phytosanitaires, ont des utilisations largement répandues



Coopérative agricole

dans le domaine agricole, en épandage sur les sols.

COMPOSÉS SPÉCIFIQUES DES AGRO-INDUSTRIES: DES « POLLUANTS » ESSENTIELS À LA VIE

Parmi les composés spécifiques des activités de l'agro-industrie se trouvent les éléments nutritifs majeurs : azote (N), phosphore (P) et potassium (K).

Ces composés ne sont pas des polluants à proprement parler : l'azote et le phosphore notamment font en effet partie des six éléments chimiques principaux (rassemblés sous l'acronyme mnémotechnique CHNOPS) qui constituent les êtres vivants.

Ces éléments sont primordiaux pour l'agriculture et donc l'alimentation. L'azote joue un rôle capital dans le métabolisme des plantes en tant que principal constituant des protéines. Il est présent dans les sols, sous forme organique (humus) ou minérale (ammonium, nitrate).

La majorité des plantes ne pouvant pas absorber l'azote sous sa forme gazeuse, il doit être apporté par les fertilisants afin d'améliorer la qualité des produits agricoles.

L'essentiel de la nutrition azotée des plantes est assuré par les nitrates issus de la transformation de l'azote organique par les bactéries du sol (minéralisation).

Bien qu'il soit utilisé par les plantes en moins grande quantité que l'azote ou le potassium, le phosphore représente également un élément indispensable pour la croissance

des plantes ainsi que pour le stockage ou le transfert d'énergie de celles-ci.

Malgré leur caractère fondamental, l'apport de ces éléments dans les sols doit être adapté aux besoins des plantes pour ne pas risquer un impact sur l'environnement en cas d'excès.

En effet, l'azote est très soluble sous forme d'ions nitrate. Il est peu retenu par les sols et non dégradable. En cas d'apport excessif dans les cultures, il est susceptible d'être mobilisé et peut être à l'origine de la pollution des eaux superficielles et souterraines. Le phosphore, principalement présent sous forme d'ions phosphates absorbés par les plantes, est moins soluble que l'azote.

Toutefois, bien qu'il soit relativement immobile dans le sol, il est tout de même susceptible d'être mobilisé par les sédiments dans les eaux superficielles, ce qui peut impacter fortement la santé et la biodiversité des cours d'eau (phénomène d'eutrophisation).

Quant aux produits phytosanitaires, qui sont des mélanges de substances d'origine

chimique ou biologique extrêmement variés, ils contiennent des substances actives généralement nocives pour l'environnement ou la santé humaine en cas de mauvaise utilisation.

Il convient donc de respecter les conditions d'emploi co-définies par le fabricant et les autorités responsables de l'homologation du produit.

Un déversement accidentel est un exemple typique de mauvaise utilisation. A nouveau, comme ces produits sont largement utilisés en agriculture en épandage sur les cultures, ils peuvent être retrouvés dans les sols, à des concentrations représentatives de conditions normales d'utilisation ou en concentrations excessives.

Cela soulève la question suivante : à partir de quand, un excès de matières fertilisantes ou de produits phytosanitaires devient-il une pollution des sols, au sens de la méthodologie nationale SSP, nécessitant la mise en place de mesures de gestion ?

CADRES RÉGLEMENTAIRES ET RÉFÉRENCES TECHNIQUES : UN VIDE À COMBLER ?

L'enjeu environnemental lié à la présence de nitrates dans les eaux est identifié de longue date. Par exemple, la directive européenne 91/676/CEE, entrée en vigueur le 12 décembre 1991, vise spécifiquement à réduire la pollution des eaux provoquée par les nitrates utilisés à des fins agricoles.

Cette directive a été intégrée, par les États membres, dans leur droit de l'environnement national, pour protéger les ressources naturelles en eau. Des normes de qualité environnementale (NQE) françaises existent pour l'azote et les phosphates dans l'eau. Mais qu'en est-il des sols ?

Bien souvent, les ICPE de l'agro-industrie ne disposent pas de réseau piézométrique, aucune donnée de surveillance de la qualité des eaux souterraines n'est disponible.

Dans ces conditions, il est nécessaire de pouvoir se prononcer sur la présence ou non d'une pollution sur la base d'un diagnostic lors de la cessation d'activité. Il peut être envisagé de déterminer, lors de ce diagnostic, les teneurs « sols lixiviables » et susceptibles d'atteindre la nappe puis de modéliser la dilution dans



Stockage engrais liquides

les eaux souterraines pour permettre une comparaison aux valeurs de gestion disponibles pour les eaux.

Néanmoins, ces estimations basées sur des modélisations, sont sujettes à incertitudes.

En parallèle, les réglementations agricoles ou relatives aux déchets de ces activités (ex. épandage de composts ou digestats) fixent des seuils ou recommandations en matière de fertilisants.

Ces valeurs peuvent être utilisées comme repères indicatifs, en comparant une teneur estimée par hectare aux doses d'utilisation des engrais ou aux critères d'épandage déjà autorisés pour l'agriculture mais ces valeurs de référence ne s'appliquent pas directement aux diagnostics SSP.

Le fond géochimique européen FOREGS (Forum of European Geological Surveys) propose bien des valeurs pouvant être utilisées pour les phosphates totaux mais aucune valeur de référence nationale permettant d'interpréter les teneurs en nitrates ou phosphore mesurées dans les sols n'est disponible à l'heure actuelle.

Cette lacune réglementaire pose la question des possibilités de mise en œuvre d'une approche proportionnée et contextualisée. Comment déterminer les enjeux environnementaux liés à ces mélanges de substances et évaluer les nécessités de mise en place de mesure de réhabilitation ?

Afin de s'affranchir de ces difficultés, certains exploitants, comme les coopératives agricoles, disposent de suffisamment de données issues de diagnostics réalisés sur les sols d'un grand nombre de leurs sites, pour se baser sur leur retour d'expérience interne. Ils peuvent ainsi déterminer si les teneurs mesurées correspondent aux valeurs de fond dans un environnement agricole ou à des pollutions concentrées générées par leur activité.

Le bureau d'étude, fort de son retour d'expérience interne, peut également être force de proposition dans la définition de valeurs de fond pour les matières fertilisantes ou produits phytosanitaires.

Les composés en question, éléments nutritifs majeurs ou phytosanitaires, reviennent en effet de façon récurrente dans de nombreuses activités : élevages intensifs, coopératives agricoles, fabricants et distributeurs de produits phytosanitaires, industries agroalimentaires ou de valorisation des produits et déchets agricoles.



Cases pour engrais solides

EXEMPLE DE LA GESTION DES POLLUTIONS CONCENTRÉES EN NPK

Afin de réhabiliter rapidement leur site en vue de leur cessation d'activité et de leur vente, les acteurs de l'agro-industrie optent généralement pour une excavation et une évacuation des terres présentant des pollutions concentrées en produits azotés ou phosphorés.

Les filières ne disposant pas de seuils d'acceptabilité pour ces paramètres sont généralement frileuses à l'idée de recevoir ces terres pour lesquelles il n'existe pas de valeur réglementaire et peu de retour expérience.

Ainsi les filières adaptées retenues pour l'élimination des terres impactées se révèlent souvent être des installations de stockage de déchets dangereux. En plus de représenter un coût important pour l'exploitant de l'activité mise à l'arrêt, l'enfouissement de sols naturels, chargés en composés servant à les rendre plus fertiles, semble aberrant à une époque où les besoins en terres végétales ou supports de culture s'accroissent.

Certaines sociétés réalisent déjà du recyclage de terres inertes en sols fertiles. La possibilité d'adapter ce genre de protocoles à la valorisation de terres présentant un excès de nutriments serait intéressante à étudier pour éviter le gaspillage de sols naturels dans une logique d'économie circulaire.

VERS UNE GESTION INNOVANTE DES POLLUTIONS AGRO-INDUSTRIELLES DANS LES SSP ?

La gestion des matières fertilisantes contenant des éléments nutritifs majeurs, tels que l'azote et le phosphore, et des produits phytosanitaires résiduels dans le cadre des sites et sols pollués, est un défi à la fois technique, réglementaire et environnemental.

Si les risques associés à leur excès dans les eaux sont bien documentés, les approches actuelles de gestion des problématiques sols paraissent inadaptées face aux spécificités de ces paramètres.

L'absence de valeurs de référence dédiées, couplée au manque de retour d'expérience sur la gestion de ces composés, rend l'évaluation des enjeux environnementaux particulièrement délicate et peut représenter un poids financier important pour ces exploitants d'ICPE nouvellement confrontés à la méthodologie SSP.

La gestion de ces pollutions est un enjeu crucial pour la préservation de la qualité des sols, des eaux et de la biodiversité. À travers une approche adaptée, innovante et collaborative entre les acteurs du secteur agro-industriel et les bureaux d'études, il semble possible d'optimiser la réhabilitation des sites pollués tout en contribuant à la résilience de nos écosystèmes et à la sécurité alimentaire de demain.

Yves GUELORGET (ANTEA GROUP)

// // DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES

LA "DÉCHARGE", CET ÉTRANGE SITE POLLUÉ.

Dans le domaine de la gestion des Sites et Sols Pollués (SSP), la "décharge" est singulière : de par ses spécificités propres, elle requiert une approche dédiée dont le cadre déborde de la méthodologie SSP. Le présent article passe en revue l'ensemble de ces particularités afin de mettre en lumière la diversité des disciplines sollicitées tout au long du processus de réhabilitation.

MISE EN CONTEXTE

Fixons au préalable le contexte sémantique du sujet : le terme "décharge" se réfère aux anciens sites non autorisés de dépôts de déchets, qui ont majoritairement essaimé sur la seconde moitié du 20^{ème} siècle. Nous ne parlerons donc pas ici des Installations de Stockage de Déchets (ISD), dûment autorisées par les Préfets, ICPE¹ régies par une législation ad hoc particulièrement exigeante et protectrice de l'environnement.

Les "décharges" ont en effet cette originalité d'être des "ICPE illégales" se caractérisant de façon quasi-systématique par :

- L'absence d'autorisation préfectorale (parfois faussement "compensée" par une autorisation municipale car ne revêtant aucune valeur réglementaire).
- Un contexte d'implantation d'une qualité écologique généralement très riche : anciennes carrières ou gravières, berges de cours d'eau, zones naturelles ou forestières éloignées de secteurs urbanisés, ...
- L'absence d'équipements de protection environnementale : absence d'étanchéité, non gestion des effluents liquides et gazeux, pas de mesure en faveur de la protection de la biodiversité.
- Des pratiques d'exploitation ayant concouru à des impacts environnementaux : accueil sans contrôle de tous types de déchets (dont dangereux), brûlage des déchets, rejets d'effluents dans les milieux, effondrements de talus avec épandage de déchets, ...



Fig. 1 : La décharge, un méga-PPC

- Le manque de reporting et la perte mémorielle de l'historique d'exploitation.

Ces caractéristiques font de la "décharge" un objet à part dans le monde des sites pollués qui peut en effet s'apparenter à un "méga point de pollution concentrée (PPC)" (Fig. 1).

Afin de résorber ces points noirs, des actions très concrètes ont été menées, la plupart au cours des décennies 1990 et 2000 ; en effet, grâce à des programmes ambitieux de subvention par l'Ademe et les Conseils Départementaux, ce sont des milliers de décharges qui ont fait l'objet :

- D'inventaires à l'échelle départementale ;
- De diagnostics environnementaux, déjà basés sur la notion de schéma conceptuel (source-vecteur-cible) alors que la méthodologie SSP n'en était qu'à ses prémices ;

- D'opérations de travaux de réhabilitation, voire de reconversion (photovoltaïque, ISDI, ...).

Cette dynamique de réhabilitation s'est ensuite naturellement estompée, par l'effet combiné d'un arrêt des soutiens, d'une baisse du gisement de décharges restant à traiter et d'une tendance à l'oubli des sites (en raison de l'arrêt de leur exploitation et leur abandon subséquent).

Il n'est pourtant pas si rare qu'une ancienne décharge oubliée de tous ressurgisse au gré de travaux (construction d'une route, aménagement d'un lotissement, création d'un parc sportif, ...) ou d'un événement climatique .

Par ailleurs, certaines décharges, déjà réhabilitées ou non, doivent être réexaminées à l'aune des effets du changement climatique ; il s'agit en

particulier des décharges littorales qui sont soumises à l'accroissement des aléas marins (montée du niveau marin, évènements cycloniques, inondations, sapement des berges, recul du trait de côte, ...), risquant ainsi d'augmenter le relargage dans les mers et océans de macro et micro-déchets (dont micro et nanoplastiques). (Fig 2)

A la lumière des pratiques et méthodes actuelles en matière de gestion des sites et sols pollués, comment aborder cet étrange objet qu'est la décharge ? Quelles spécificités doivent être considérées ? En quoi la méthodologie SSP doit-elle être adaptée voire abondée ? Eclairage.

LA FIN DU FILM EST CONNUE PAR AVANCE

A l'instar des enquêtes de l'inspecteur Columbo au cours desquelles le coupable était connu dès le départ, le sort de la décharge est couru d'avance : sauf exceptions très particulières², le méga-PPC demeurera en place. En effet, par "méga" on entend une volumétrie et un tonnage de plusieurs dizaines ou centaines de milliers de m³ ou de tonnes de déchets, mélangés, dans un état de dégradation varié, et regroupant un panel de polluants d'une grande diversité et jamais identifiés en totalité. L'on comprend alors aisément que retirer la source concentrée comme le préconise la méthodologie SSP se heurte à un mix de contraintes rédhitoires :

- Un volume substantiel de matière polluée qui occuperait un autre espace, en l'occurrence le plus souvent une ISDND³ dont les capacités ont tendance à drastiquement réduire (LTECV⁴ oblige) et à être priorisées pour les déchets ménagers et d'activités économiques.
- Un coût économique de l'ordre de 200 € la tonne qui tient compte des travaux d'excavation, du transport, de l'entrée en ISD et de la TGAP⁵ à 65 € la tonne [voire la sur-TGAP à 5 € la tonne dans certains cas⁶].
- Un bilan environnemental défavorable au regard des émissions de GES⁷ issues des centaines ou milliers de rotations de poids lourds pour acheminer des déchets.
- Une incertitude sur le contenu réel des polluants, susceptible de limiter les acceptations en ISD.

Ainsi, le bilan coûts/avantages sera rapidement conclusif et ne nécessitera pas de s'éterniser sur une analyse multicritères poussée. Tout l'enjeu de l'ingénierie sera en revanche de concevoir et dimensionner des solutions de réhabilitation in situ adaptées à la nature des déchets, à l'état des milieux et



Fig 2 : Une décharge littorale au bord de l'océan Indien



aux moyens disponibles.

DES EFFLUENTS ET POLLUANTS « EXOTIQUES » DU POINT DE VUE DES SSP

HCT, HAP, COHV, BTEX, ETM, PFAS, packs ISDI, ... des termes on ne peut plus courants pour tout ingénieur travaillant sur des sites pollués "classiques". Mais sur des décharges, le cocktail analytique est à la fête !

En effet, à ces polluants usuels, il convient d'ajouter les micro et nanoplastiques, l'amiante, la microbiologie, certains métaux traceurs caractéristiques (manganèse notamment), les phénols, les fluorures, le phosphore, la charge organique (COT⁸, DCO⁹, DBO5¹⁰), les MEST¹¹, certains sels typiques (chlorures en particulier), les différentes formes azotées (réduites, oxydées, totales), ...

De surcroît, au-delà de cette vaste combinaison analytique, d'autres particularités (Fig. 3) renforcent la nécessité de l'approche spécifique qui doit être suivie dès la phase de diagnostic :

- Des effluents propres aux décharges :
 - o les lixiviats, ce mélange liquide noirâtre qui concentre l'essentiel des polluants lessivables ;
 - o le biogaz, ce mélange majoritairement constitué de méthane, de dioxyde de carbone, de dioxygène et de mercaptans.
- Des risques d'envols de déchets légers et



Fig 3 : L'hétérogénéité des pollutions et nuisances des décharges

de poussières contaminées lors des phases d'investigations et a fortiori de travaux.

- La présence d'une faune sauvage à prendre en compte pour la sécurité des intervenants : serpents, nids de guêpes, rongeurs, sangliers, ...

La méthodologie des classiques SSP peut dans ce contexte apparaître incomplète, et l'on veillera ainsi à suivre en complément les recommandations des différents guides techniques qui traitent spécifiquement des décharges¹²

DES MOYENS D'INVESTIGATIONS À ADAPTER

A matrices et polluants spécifiques, moyens d'investigations adaptés. Dans la plupart des cas :

- Des conditions d'intervention en sous-section 4 (SS4) sont à prévoir par défaut afin d'appréhender le risque de présence d'amiante.

- La pelle mécanique constitue le meilleur compromis technico-économique en termes de souplesse d'intervention et de pertinence d'acquisition de données : la masse et l'hétérogénéité des déchets militent en effet pour multiplier les sondages, les positionner aisément, adapter leur implantation en phase d'exécution, bénéficier d'une observation visuelle optimisée des déchets et lixiviats, et faciliter les prélèvements.

En corollaire, les personnels devront être dûment protégés contre les risques de contact cutané, d'inhalation et de nuisances olfactives.

- On évitera en général les forages profonds traversant les déchets car :

- o ils ne permettent pas de bénéficier d'une vision étendue du contenu de la décharge ;

- o les prélèvements qui en seraient issus ne sont pas idéalement représentatifs considérant leur faible masse prélevée ;

- o au regard de l'emprise habituellement étendue de la décharge, leur multiplication génère rapidement des coûts élevés, sans compter les difficultés de manœuvre sur des terrains souvent chaotiques et le risque de casse des équipements en cas de traversée de blocs indurés ;

- o il existe une probabilité très significative de percer le fond de la décharge et ainsi d'aggraver le risque de

mise en contact des lixiviats avec le milieu souterrain.

- Des méthodes géophysiques pourront parfois être envisagées, prioritairement pour préciser les limites surfaciques et volumétriques en cas de grosse incertitude à l'issue de l'étape INFOS.

- Les classiques packs ISDI sont loin d'être suffisants (cf. le panel analytique précédemment évoqué). En outre, l'intérêt de déployer systématiquement ces packs sur des matrices polluées est discutable car la nature hétérogène des échantillons conduit le plus souvent de facto à des catégorisations en déchets non inertes.

- Des analyses agro-pédologiques sont recommandées afin d'évaluer le potentiel de réutilisation des terres locales et/ou d'identifier les possibilités de régénérer des sols vivants à partir de remblais amendables.

- Les méthodes de prélèvements des

échantillons micro et nanoplastiques nécessitent des précautions très particulières afin de limiter tout risque de contamination externe (par les vêtements, le matériel d'investigations ou encore l'air ambiant).

- Des moyens géotechniques peuvent être requis afin de caractériser les paramètres géomécaniques des sols et déchets en vue de qualifier les enjeux de stabilité, de tassements, et de réutilisation de matériaux (Fig. 4).

- Pour le cas particulier des décharges littorales soumises aux aléas marins, des expertises dédiées devront être menées, passant par une analyse fine des dynamiques d'érosion et des modélisations expertes.

- Enfin, on n'oubliera pas d'évaluer le potentiel gazeux de la décharge ; là encore, aux classiques mesures de gaz du sol, il conviendra d'ajouter la détection des



Fig. 4 : Signes d'instabilités géotechniques et feux couvant sur une décharge



Fig. 5 : Mesures par chambre à flux des débits de biogaz

composés caractéristiques du biogaz. (Fig 5)

DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX SPÉCIFIQUES

Les décharges sont à l'interface d'enjeux environnementaux qu'elles génèrent ou qu'elles "subissent".

Souvent implantées aux confins des territoires communaux, abandonnées et oubliées, les décharges sont quasi systématiquement le siège d'une biodiversité émancipée :

- La présence des déchets a constitué en phase d'exploitation une source d'alimentation pour de nombreuses espèces, générant des habitudes d'occupation et de circulation.
- L'abandon du site et l'absence d'entretien conduisent très rapidement les espèces à s'installer et s'y développer.
- L'aspect chaotique de la topographie des massifs de déchets et leur hétérogénéité créent des habitats que les espèces animales et végétales ne tardent pas à occuper.
- De même, la présence courante de milieux aquatiques sur ou à proximité de la décharge (fossés, ornières, bassins, ...) systématisent le développement d'espèces hygrophiles.

Et force est de constater que la plupart des espèces animales et végétales que l'on retrouve sont protégées et/ou rares, et qu'à l'inverse, nombre d'entre elles sont des espèces exotiques envahissantes (EEE). Cette situation complexifie la gestion administrative des opérations de diagnostic et de réhabilitation, en rendant nécessaire un inventaire écologique, un plan de gestion des EEE et parfois même une demande de dérogation espèces ou milieux.

L'aspect paysager constitue une composante également propre aux décharges. Oubliées et reconquises par la végétation, elles finissent par s'intégrer dans leur environnement et parfois seul un œil aguerri permet d'identifier leur présence. Or, procéder à leur réhabilitation les remet forcément au jour (au moins temporairement) et nécessite un traitement particulier de la part de l'ingénierie en charge de concevoir son design. (Fig. 6). Là encore, les seules compétences SSP ne suffisent généralement pas et l'appel à un paysagiste peut s'avérer pertinent.

Enfin, on n'oubliera pas le risque non négligeable d'incendie associé aux



Illustrations de l'appropriation par le Lézard des murailles d'un habitat anthropique créé par un stock de déchets papiers



Illustrations d'EEE rencontrées sur des décharges : Raisin d'Amérique et Tortue de Floride



Fig. 6 : Projet de réaménagement paysager d'une décharge en carrière avec photomontage à droite

décharges, en raison de quatre facteurs principaux :

- Un stock de matériaux combustibles (plastiques et bois notamment).
- La présence de méthane et de sulfure d'hydrogène, gaz hautement inflammables.
- L'existence parfois de feux couvants, alimentés par le biogaz et consommant les matériaux combustibles.
- Les conséquences du changement climatique : réchauffement de l'air, augmentation de l'évapotranspiration et perturbation des cycles pluviométriques.

En outre, l'implantation fréquente des décharges en zone naturelle ou forestière participe du risque de propagation des

incendies (Fig. 7) (dans les deux sens : depuis la décharge ou vers la décharge).

DES SOLUTIONS DE TRAITEMENT DÉDIÉES



Fig. 7 : Un incendie sur une décharge

Ces particularités propres aux décharges se traduisent aussi par des spécificités en matière de travaux. On l'a vu précédemment, sauf exceptions, le massif de déchets sera traité sur place.

Dans la plupart des cas, les travaux s'orienteront vers un remodelage et un confinement des déchets dont le niveau de performance en termes d'étanchéité naturelle ou synthétique (le plus souvent géomembrane ou géosynthétique bentonitique) sera défini en fonction des enjeux environnementaux à protéger.

Rares seront les opérations de dépollution de nappes ou de sols telles que couramment pratiquées sur des sites pollués.

La gestion des effluents devra être réfléchie au regard des possibilités de drainage des lixiviats et de captage du biogaz. (Fig. 8)

Le plus souvent, ces travaux viseront une gestion passive et rustique en s'appuyant sur l'optimisation des phénomènes d'atténuation naturelle. (Fig. 9)

La gestion des eaux pluviales devra être examinée finement car l'objectif premier des travaux sera le plus souvent de limiter les infiltrations d'eaux vers les déchets.

Ainsi, remodelage et confinement engendreront des augmentations significatives de ruissellements superficiels par rapport à la situation d'avant travaux, qui nécessiteront des ouvrages hydrauliques dimensionnés pour des périodes de retour d'événements météoriques anticipant les effets du changement climatique.

Les sols de couverture, si conservés et sous réserve de compatibilité sanitaire avec les futurs usages, feront l'objet d'une étude attentive destinée à qualifier leur potentialité agro-pédologique et leur capacité à être amendés pour générer des sols vivants.

En corollaire, le mélange d'espèces herbacées qui sera épandu devra être formulé selon le bioclimat local, et constitué d'espèces les plus endogènes possibles et résistantes aux conséquences du réchauffement climatique.

Les futurs usages des décharges réhabilitées se caractérisent eux aussi par des reconversions ciblées : parc photovoltaïque, pâturage, parcours de loisirs ou éco-pédagogique, ... En effet, les contraintes géotechniques (tassements des déchets), écologiques et urbanistiques (zones fréquemment classées N aux PLU) réduisent le champ des possibles.



Fig. 8 : Création d'un bassin de stockage de lixiviats, et foration d'un puits biogaz



Fig. 9 : Dégazage passif par biofiltre



Illustrations de décharges réaménagées avec nouveaux usages

Du reste, les Analyses de Risques Résiduels (ARR) déployées sur des sites pollués "classiques" seront souvent moins pertinentes pour les décharges dont les usages futurs drainent généralement peu de visiteurs.

Par ailleurs, selon leur surface et leur potentialité écologique, les décharges peuvent aussi être envisagées comme SNCRR (Sites Naturels de Compensation, Restauration et Renaturation).

S'agissant enfin des cas particuliers pour lesquels des opérations d'excavation seraient nécessaires, un atelier de tri-criblage des déchets sera opportun pour chercher à maximiser les volumes de matériaux valorisables et en conséquence minimiser les volumes de déchets ultimes destinés à retourner en stockage au sein d'ISD dûment autorisées et aménagées. (Fig. 10)

Lors de ces travaux, le risque de présence d'amiante devra être particulièrement surveillé, et les entreprises veilleront à ne pas se baser sur des rendements trop optimistes au regard de l'hétérogénéité (et du foisonnement) des déchets excavés pouvant réduire significativement les cadences (blocs indurés, longues bâches plastiques, matrices humides, ...).

UN CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE COMPLEXE

Par leur statut d'ICPE illégale, les décharges confrontent les équipes d'ingénierie et les services de l'Etat à des questionnements sur l'applicabilité des obligations réglementaires associées aux sites pollués ; ainsi, faut-il prévoir des ATTES ASAP alors même que la cessation d'activité de ces décharges n'a par essence jamais pu être déclarée en l'absence d'autorisation initiale ? Dans tous les cas, les DREAL qui s'emparent de ces sujets prescriront le plus souvent un arrêté préfectoral fixant les objectifs de réhabilitation sur la base du plan de gestion élaboré par le bureau d'études. Nonobstant cet arrêté, pourront être appelées les réglementations relatives :

- Aux AOT¹³ pour les terrains en tout ou partie sur le domaine de l'Etat (en particulier les décharges littorales) ;



Fig. 10 : Un tas de fines valorisables après tri-criblage d'une décharge

- A la protection ad hoc des intervenants en cas de présence d'amiante ;
- A la protection de la biodiversité, avec éventuel dossier de demande de dérogation en cas de déplacement ou de destruction d'espèces ou de milieux ;
- Aux rubriques IOTA¹⁴ (rejets d'eaux pluviales, création de bassins, installations de piézomètres, ...) ;
- Aux énergies renouvelables en cas de reconversion en parc solaire.

CONCLUSION

Parmi les différentes typologies de friches, la décharge se démarque par la nécessité d'une approche transversale convoquant de multiples compétences, dépassant très largement le seul champ d'application de la méthodologie SSP : écologie, géotechnique, physico-chimie des lixiviats, gestion du biogaz, amiante, micro et nanoplastiques, aléas marins, terrassements, tri et criblage, étanchéités naturelles ou synthétiques, renaturation, sols vivants, paysage, énergies renouvelables, réglementations, ...

La prise en charge synergique de l'ensemble de ces disciplines par l'ingénierie en charge du projet de réhabilitation constitue pour le donneur d'ordre une garantie de maîtrise du long processus menant à sa réussite.

Guillaume LACOUR (EODD ingénieurs conseils)

¹Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

²Certains très rares cas peuvent justifier un retrait total, ou le plus souvent partiel, des déchets : pollution d'un captage AEP le rendant inexploitable, tronçon d'aménagement routier ou ferré traversant la décharge, risque géotechnique majeur sur des biens ou des usages, risque d'emport massif des déchets par l'eau, intérêt économique à la revalorisation des déchets. Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

³Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux.

⁴<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/economie-circulaire/11-evolution-des-tonnages-de-dechetsmis>

⁵Taxe Générale sur les Activités Polluantes.

⁶<https://entreprendre.service-public.fr/actualites/A17984>

⁷Gaz à effet de Serre.

⁸Carbone Organique Total

⁹Demande Chimique en Oxygène ¹⁰Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours.

¹¹Matières En Suspension Totales

¹²Guide Ademe 2005 : « Remise en état des décharges : méthodes et techniques », EODD ingénieurs conseils (épuisé).

Guide BRGM 2022 : « Guide méthodologique de gestion des anciennes décharges situées sur ou à proximité du littoral » (réf. BRGM/RP-71745-FR).

¹³Autorisation d'Occupation Temporaire

¹⁴Installations, Ouvrages, Travaux ou Activités (« loi sur l'eau »).

/// DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES

LES PFAS DANS L'EAU, UN TRAITEMENT COMPLEXE MAIS CONCLUANT

Alors qu'ils posent des défis majeurs à notre société tant d'un point de vue sanitaire qu'environnemental, les per- et polyfluoroalkyles (PFAS) aussi appelés « polluants éternels » sont difficilement dégradables mais pas impossibles à traiter. Le principal verrou technique de dépollution des PFAS réside dans la complexité de la structure chimique de ces composés nécessitant la mise en place de techniques avancées pour y remédier.

CONTEXTE LIÉ AU PROJET

Situé au cœur du plus grand port de Belgique, à Anvers, l'un des projets récents de Colas Environnement, illustre les défis actuels de gestion des PFAS.

Ce secteur géographique, reconnu pour sa contamination profonde, présente un sol impacté sur près d'un mètre, faisant de lui l'un des sites les plus pollués de la planète par ces substances.

EN QUOI CONSISTE LE PROCESSUS DE DÉPOLLUTION ?

Dans le cadre de la réalisation d'un chantier de voirie de grande envergure pour la pose de réseaux enterrés, nécessitant le rabattement des eaux, Colas Environnement a été mandaté pour mettre en œuvre un dispositif de traitement assurant un rejet conforme des eaux ainsi pompées.

En service depuis le mois de mai 2025, cette installation est amenée à fonctionner durant les deux prochaines années. Elle doit permettre de respecter les seuils de rejet en vigueur, à raison de 20 ng/L par PFAS individuel et 100 ng/L pour la somme. (Fig. 1)

Le dimensionnement a été établi pour traiter un volume d'eau journalier variable selon les phases de travaux, pouvant atteindre jusqu'à 2 400 m³/jour.



Fig. 1 : Process de traitement des PFAS dans les eaux – conception & exploitation par COLAS Environnement (Belgique)

UNE UNITÉ DE TRAITEMENT INNOVANTE ET PERFORMANTE :

Colas Environnement a conçu une unité de traitement capable de traiter les PFAS avec un débit de 50 m³/h et pouvant être modulée pour atteindre jusqu'à 100 m³/h. (Fig. 2)

La technologie employée repose sur un pré-traitement des eaux (MES) puis filtration sur

charbon actif et résine échangeuse d'ions en finition, garantissant ainsi l'élimination efficace d'une large gamme de PFAS, y compris à chaîne courte.

Une flexibilité et une robustesse nécessaires pour s'adapter aux enjeux et aux contraintes spécifiques de chaque projet de dépollution.



Fig. 2 : Intervention d'un technicien spécialisé de COLAS Environnement pour le suivi et la maintenance d'un process de traitement des eaux impactées en PFAS

LES PFAS AU CENTRE DES PRÉOCCUPATIONS

Depuis près de 10 ans, l'entreprise porte une attention particulière aux problématiques PFAS, aussi bien dans le cadre de la R&D que, plus récemment, pour des projets de dépollution.

Active depuis plusieurs années, en France et en Belgique notamment, les clients et partenaires sont accompagnés sur divers projets liés au traitement des eaux impactées par des molécules fluorées.

Forts de travaux de Recherche et Développement, dans le cadre de projets de grande envergure, à l'échelle Européenne (PROMISCES, PERMUTE – en partenariat avec le BRGM), Colas Environnement met l'accent sur l'innovation et le développement des techniques de traitement ainsi que sur le déploiement de nouveaux procédés pour répondre aux enjeux multiples imposés par cette pollution majeure.

Ainsi, à travers les projets de recherche menés en partenariat avec le BRGM, la réduction chimique a pu être écartée ne se montrant pas efficace sur la dégradation en masse des PFAS. Par contre, on peut développer une technologie efficace de lessivage amélioré de sol contaminés, parfaire les techniques de concentrations d'effluents chargés en PFAS et développer une technologie permettant la dégradation de certains PFAS jusqu'à plus de 99% (notamment sur le PFOA et le TFA).

Cette dernière, basée sur le chauffage à basse température d'un mélange composé d'une eau contaminée en PFOA, d'un solvant polaire aprotique et d'une base forte (soude) contribue à une oxydation avancée des PFAS en solution.

Cette technologie permet une décontamination complète des PFAS en moins de 24h, y compris le TFA, à des niveaux de concentrations allant du ng/L au g/L, avec seulement la génération de fluor inorganique F- comme produit de décontamination (Fig. 3). Cette méthode de dégradation prometteuse fait actuellement l'objet de publications scientifiques et Colas Environnement est sur le point de la déployer à l'échelle pilote industrielle.

C'est ainsi que nos équipes œuvrent actuellement à développer ces innovations à grande échelle, à la suite de l'obtention de résultats prometteurs sur des pilotes plurimétriques. Nous pouvons citer à titre d'exemple la dégradation complète du PFOA.

Dégradation des PFAS en solution à faible température sur 24 heures

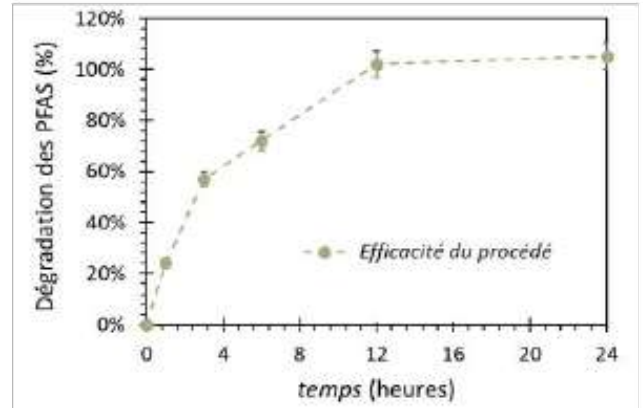


Fig. 3 : Dégradation des PFAS en solution à faible température sur 24 heures

CONCLUSION : UNE RÉGLEMENTATION QUI TEND VERS UN TRAITEMENT PLUS IMPORTANT DES PFAS

La prise de conscience croissante des dangers posés par les PFAS a conduit à l'émergence de réglementations de plus en plus strictes à travers l'Europe.

Cela s'est par exemple concrétisé avec la loi promulguée le 27 février 2025 prévoyant que les PFAS dans l'eau potable soient obligatoirement contrôlés par les autorités sanitaires ou encore par l'arrêté du 20 juin 2023 relatif à l'analyse des substances per- et polyfluoroalylées dans les rejets aqueux des installations classées pour la protection de l'environnement relevant du régime de l'autorisation.

Par conséquent, la combinaison de technologies avancées de traitement et d'une réglementation proactive ouvre la voie à des solutions durables de gestion face à la menace persistante des PFAS.

Rémi DEGRAIX (Colas Environnement)
 Raphaël TUR (Colas Environnement)
 Sofia OUAHAB (Colas Environnement)

/// DOSSIER : GESTION DE CHANTIERS MULTI-POLLUTIONS OU SPÉCIALES

FUKUSHIMA : FAISABILITÉ D'UNE BARRIÈRE PERMÉABLE RÉACTIVE EN ALTERNATIVE AU CONFINEMENT HYDRAULIQUE PAR CONGÉLATION

À la suite du tsunami de 2011 ayant endommagé la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, TEPCO a mis en place diverses contre-mesures pour limiter la contamination des eaux. Une mesure clé a été la construction d'une enceinte de confinement par congélation, entourant les réacteurs, mesurant 1,5 km de long et descendant à 30 m de profondeur. Cette barrière vise à réduire voire stopper la quantité d'eau souterraine s'infiltrant dans les réacteurs et donc le volume d'eau contaminée. TEPCO et Kajima Corporation ont conçu et installé cette barrière, avec l'appui d'experts américains. La construction, incluant 1927 forages, s'est achevée en novembre 2015 et a été mise en route en 2016. Des études pilotes et des évaluations indépendantes confirment l'efficacité potentielle de cette technologie pour le contexte spécifique de Fukushima.

La barrière de sol congelé (Figure 1) isole les eaux souterraines autour des installations endommagées pour éviter la contamination.

Elle vise à réduire le niveau de la nappe phréatique et l'afflux d'eau dans les bâtiments, diminuant ainsi les volumes d'eau à traiter, les capacités de stockage nécessaires et les rejets en mer à l'issue du traitement.

En parallèle, TEPCO gère deux flux d'eaux souterraines : Un premier système de traitement permet de décontaminer l'eau pompée dans la zone des bâtiments endommagés, l'eau est ainsi traitée et ensuite stockée dans des réservoirs.

Un second, à l'extérieur des réacteurs, permet la dérivation des eaux collectées en amont via un système de drainage des eaux souterraines.

L'eau peu contaminée est rejetée dans l'océan après analyse et approbation des parties prenantes. Le mur imperméable côté terre (sol congelé) et la barrière en bord de mer complètent le dispositif de confinement.

Description de la congélation des sols : La congélation artificielle des sols est utilisée dans le génie civil et minier pour la stabilisation géotechnique et le contrôle



Figure 1. Schéma général du confinement hydraulique par congélation de sol

des eaux (étanchement) des sols délicats à traiter par voie classique.

Trois systèmes existent : le plus courant utilise une saumure (chlorure de calcium) refroidie recirculant dans des tuyaux.

Les autres utilisent des réfrigérants non réutilisables (azote liquide, etc.) ou un

système biphasique type pompe à chaleur. Pour le site de Fukushima Daiichi, un système à saumure a été choisi, avec des tuyaux de congélation composés d'une enveloppe extérieure et d'un tuyau intérieur où circule la saumure refroidie à -30°C, absorbant la chaleur du sol et ressortant à -25°C.

La conception de TEPCO/Kajima a été basée sur une modélisation numérique, qui a été validée par une évaluation indépendante.

Les calculs confirment que les vitesses de l'eau sont suffisamment faibles, malgré les variations de perméabilité, pour permettre la soudure entre les colonnes de sol gelé se formant autour des pointes réfrigérantes.

L'évaluation indépendante a aussi confirmé l'adéquation de la barrière de sol congelé de Fukushima, l'une des plus grandes au monde, pour réduire l'afflux d'eau dans les réacteurs endommagés. TEPCO a obtenu

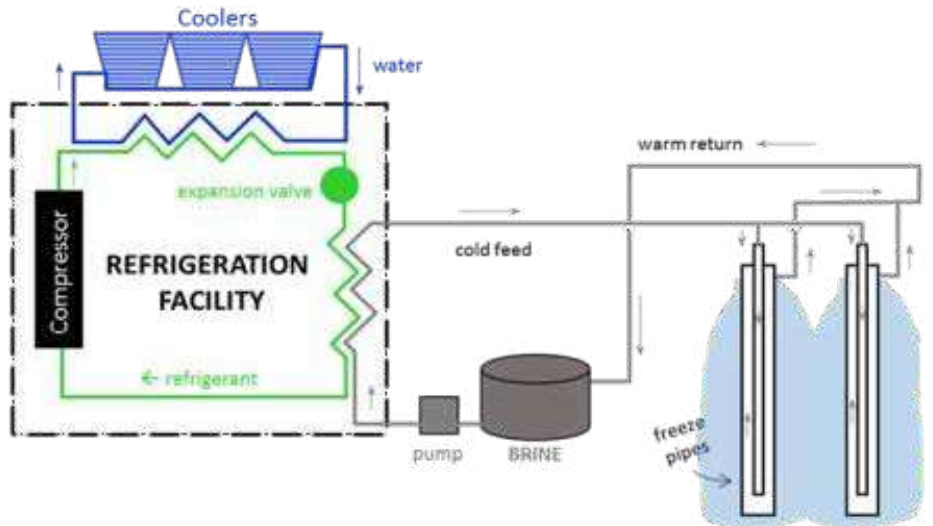


Figure 2. Congélation du sol à l'aide d'un système de saumure (installation de réfrigérant primaire avec une boucle de liquide de refroidissement secondaire pompée)

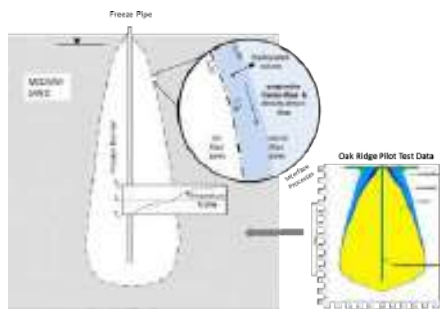


Figure 4. Zone de sol gelé pour un tuyau de congélation individuel dans un matériau relativement homogène (modélisation basée sur la théorie) à gauche et profil de gel mesuré lors d'un essai pilote au laboratoire national d'Oak Ridge, à droite [2,4]

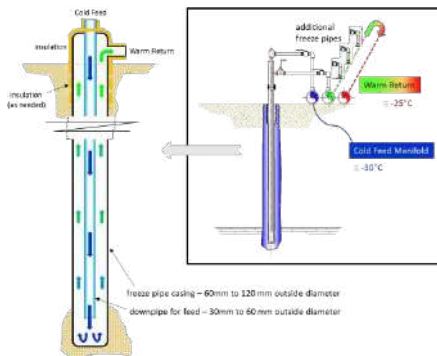


Figure 3. Déploiement et configuration typiques d'un tuyau de congélation

l'autorisation de la NRA (autorité japonaise) pour démarrer les opérations à grande échelle. (Figures 2-3-4-5-6)

PLAN B ?

En alternative à la congélation qui commençait et dont la réussite opérationnelle restait incertaine, le MRI (MITSUBISHI Research Institute), organisme de recherche Japonais, a lancé en 2013 des études alternatives à la congélation, plus précisément un plan visant à démontrer la capacité à résoudre le problème des eaux



Figure 5: Planche photos de la mise en route de la congélation (Source Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. Date June 6, 2016).

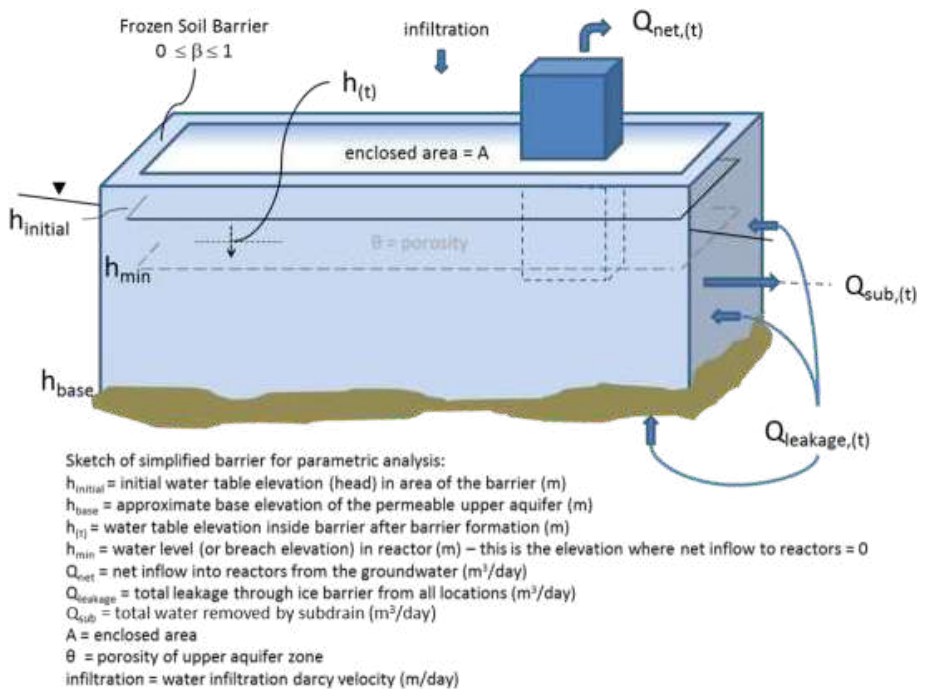


Figure 6. bilan hydraulique du confinement

souterraines contaminées à Fukushima en utilisant des barrières réactives. (Figure 7)

Ces technologies de traitement de panache font appel à des mécanismes de séquestration des polluants par des réactifs solides injectés dans le sol pour fixer ou dégrader chimiquement la pollution et ainsi épurer l'eau souterraine.

Le consortium ANADEC / ATOX / AREVA (Maintenant ORANO) a été retenu par le MRI pour la réalisation de l'étude, avec l'appui de SUEZ Remediation (maintenant SARPI Remediation du Groupe VEOLIA et membre de l'UPDS), comme partenaire maîtrisant la technique des barrières perméables réactives par portes filtrantes depuis 1998 et par injection d'imprégnation particulaire depuis 2012. (Figure 8)

La nouveauté de l'étude se trouvait essentiellement sur le fait que les eaux souterraines à traiter par ces dispositifs potentiels étaient salées, car lors de l'accident de la centrale, les générateurs électriques de secours ont été rendus non opérationnels par submersion par le tsunami. Le refroidissement des réacteurs a donc dû recourir à l'aspersion d'eau de mer.

Si les retours d'expérience sur les radionucléides issus d'accidents nucléaires montrent les techniques utilisées pour traiter, le césium 137Cs et le strontium 90Sr en eau douce, leur traitement en eau de mer n'était pas documenté. En effet, outre la salinité, la difficulté apportée par l'eau de mer est qu'elle contient naturellement du strontium en grande quantité (de l'ordre du mg/l), car cela peut conduire à une surconsommation de réactif séquestrant car ces derniers ne sont généralement pas isotopiquement sélectifs.

La première partie du projet portait sur des essais en laboratoire pour tester différents médias réactifs. Le projet est divisé en 3 étapes :

- Tests inactifs (sur eau de mer avec strontium non radioactif) :

Deux types de tests de séquestration du strontium non radioactif ont été effectués par Sarpi Remediation : tests en batchs pour une présélection des réactifs et tests sur colonnes pour affiner la sélection des réactifs ;

- Tests actifs :

Pour évaluer le facteur de décontamination (DF) des réactifs sélectionnés, des tests sur colonne active (eau de mer avec strontium radioactif) ont été effectués dans les laboratoires d'ORANO à Erlangen (Allemagne) ;

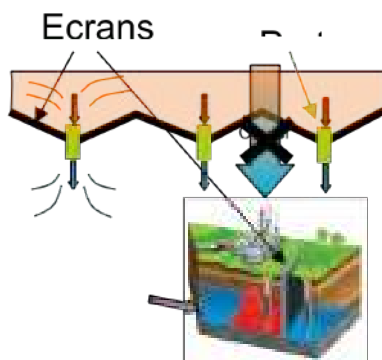


Figure 7: schémas de funnel & gate KEOPS® paroi étanche et porte filtrante (source Sole-tanche Bachy - Sarpi Remediation)

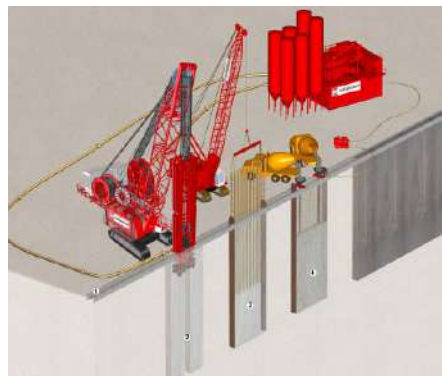


Figure 8: Barrière perméable réactive (Permeable Reactive Barrier - PRB) injectée (tube à manchettes)



- Tests de confirmation :

Pour valider le réactif dans les conditions les plus proches possibles de celles de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, des tests en colonne sur des sols issus du site ont été effectués au Japon par ANADEC/ ATOX.

L'étude a commencé par un benchmark des solutions de séquestration du strontium, et du césium par extension. Parmi les plus connues, les bases phosphatées calciques comme les apatites ou les os broyés également composés de phosphates de calcium, sont souvent cités.

Plusieurs brevets ont été étudiés et font appel à de multiples variations de compositions d'apatites (brevet n°US5678233A) ou de mise en œuvre. A ce titre, nous pouvons citer l'injection séparée de phosphate et de calcium (US6416252B1) ou encore l'injection simultanée de calcium chélaté (citrate de calcium) et de phosphate (US6592294B1) pour éviter une précipitation immédiate et permettre une imprégnation correcte dans les sols très fins.

Le principe de cette dernière technique de dépollution réside en la libération progressive de calcium par dégradation biologique du citrate par les bactéries présentes dans les sols.

Cette solution a déjà été mise en œuvre et documentée en eau douce sur le site de Hanford aux USA.

Ainsi, les réactifs et mécanismes étudiés

en première étude en mode "inactif" (radiologiquement), ont consisté à étudier d'autres pistes et de les comparer à des solutions connues. Ils ont été les suivants :

- Fer zéro valent : sorption sur fer / oxyhydroxydes de fer ou sulfures de fer généré par réaction de corrosion du fer avec les sulfates ;

- Précipitation in situ via des carbonates (strontianite) et/ou des phosphates ;

- Sulfuration biologique : biowall réduisant les sulfates de l'eau de mer en sulfures par sulfato réduction par injection d'une source de carbone ;

- Échange d'ion sur base de phosphates de calcium précipitées en labo en milieu alcalin (hydroxyapatite) sans ou avec fluor (hydroxy fluoroapatite). Apatites précipitées sur site ou in situ (production d'apatite nanoscale à microscale) ;

- Poudre d'os ;

- Sorption sur zéolites artificielles, spécialement fabriquées pour la rétention du strontium.

Le sous-sol du site de Fukushima étant peu perméable car sablo limoneux, les réactifs de tailles inférieures à quelques microns ou à la dizaine de micron ont été privilégiés dans le cadre de traitement par injection d'imprégnation.

Au-delà de la centaine de microns, les injections se font par fracturation hydraulique, peu recommandée dans

ce cadre d'intervention (soulèvements possibles / passages préférentiels occasionnés par les injections).

Pour les réactifs plus grossiers (poudre d'os / zéolites naturelles) l'usage dans des filtres ou des pieux sécants ou parois en trancheuse avec substitution reste envisageable, selon la profondeur et les réseaux souterrains existants.

A noter pour ce dernier point que les injections d'imprégnation sont de loin les moins invasives en termes de travaux (maillage ajustable / forages inclinables pour le franchissement d'obstacles...).

Les premiers résultats en batchs sur eau de mer contenant naturellement 1200 µg/l de strontium, sont résumés dans la figure 9.

Les premiers enseignements sont :

- le fer ne permet pas de séquestrer significativement le strontium et a montré un relargage ;
- L'échange d'ion sur apatite précipitée s'est révélée efficace mais modeste avec environ 30% du strontium abattu ;
- La poudre d'os semble être efficace pour 60% de la charge en strontium abattue ;
- Les précipitations i) carbonate ont montré un bon abattement et ii) phosphatique, s'est montrée bien plus efficace. Toutefois ces réactifs liquides nécessitent une injection continue car ils peuvent être potentiellement entraînés par le courant naturel de la nappe
- La séquestration sur zéolites artificielles est confirmée en eau de mer, et reste le meilleur support réactionnel.

NB : aucun de ces produits séquestrants n'est sélectif entre le strontium naturel et le strontium radioactif. La surconsommation restera toutefois un des grands enjeux du procédé du fait de la présence d'eau de mer.

Ces premiers résultats ont donc motivé le lancement d'essais dynamiques en colonne, toujours en conditions non actives radiologiquement. (Figure 10)

Pour ce faire, un sable calibré a été mélangé avec les réactifs tous dosés à 1% pour simuler l'injection d'imprégnation. Au cours de ces tests, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les zéolites.

Compte tenu de ces premiers résultats, les essais en "actif" sur radioéléments ont été menés par ORANO en Allemagne. Pour ce faire, des essais en colonne simple ou doublés en série ont été menés sur les médias qui avaient donné les meilleurs résultats lors des tests "inactifs" :

Compte tenu de la bien plus grande sensibilité de la méthode analytique par

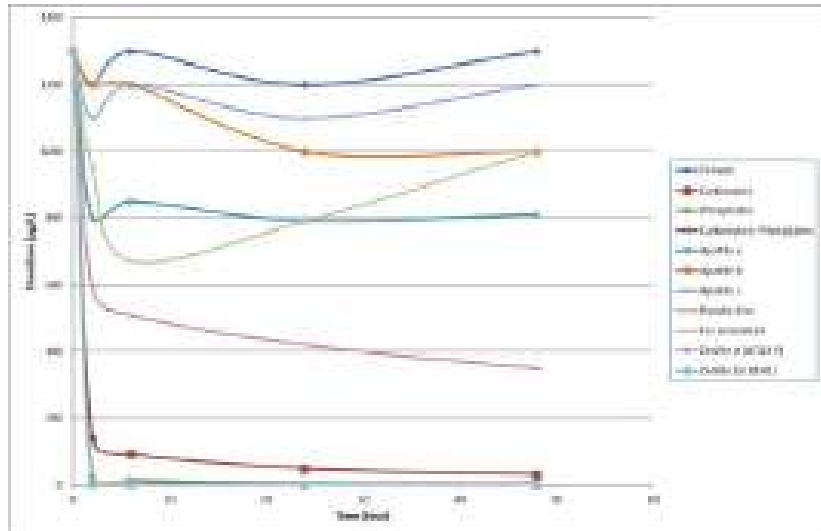


Figure 9 : Résultats sur la solubilité du strontium au contact des réactifs en batchs

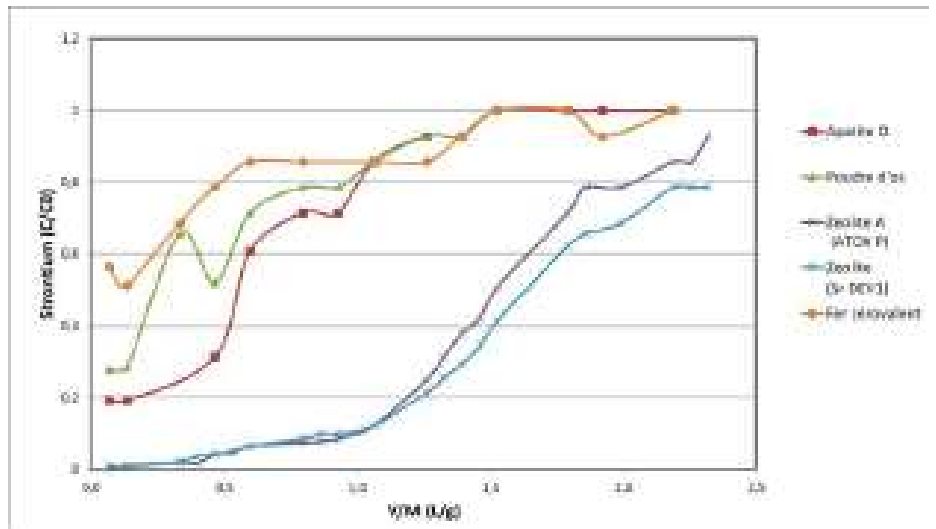


Figure 10 : courbes d'adsorption du strontium au contact des réactifs en colonnes

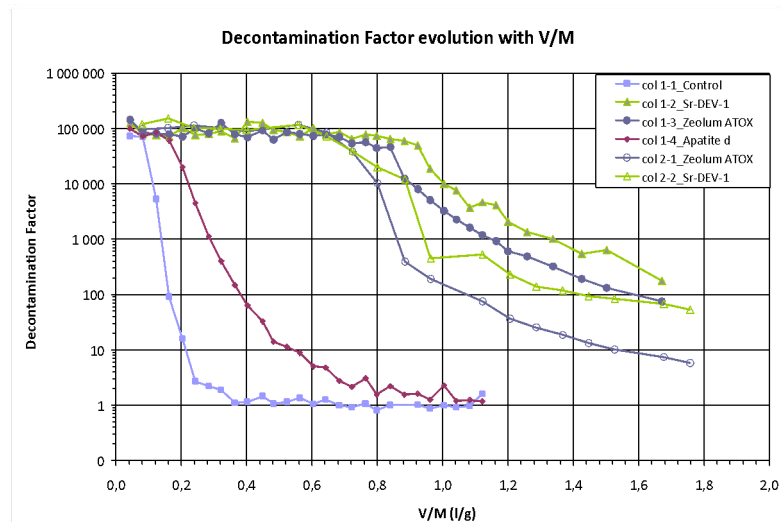


Figure 11 : Test actif - Facteur de décontamination en laboratoire

mesure d'activité radiologique que celle des analyseurs à plasma ICP utilisés sur le strontium non radioactif (la sensibilité de l'analyse est de l'ordre du microgramme par litre, ainsi les facteurs de décontamination ne peuvent dépasser 103), on peut en conclure que le facteur de décontamination (celui qui compte le plus en radiologie) est de 105. Les essais ont été confirmés par les laboratoires japonais.

Les meilleurs résultats sur zéolite artificielle sont confirmés. Une nouvelle formulation d'apatite D s'est toutefois montrée plus efficace que la poudre d'os en essais non actif, et environ un quart moins performantes que les zéolites artificielles, ce qui a conduit Sarpi Remediation à déposer un brevet (FR 1552218) pour la formulation et les modalités d'injection.

Probablement plus économique et plus rapide à produire en cas d'accident, cette solution permettrait de venir en complément des zéolites artificielles.

Pour mettre en perspective une phase opérationnelle, une simulation numérique d'une barrière perméable réactive de protection d'un puits de pompage a été réalisée par Sarpi Remediation.

Dans cet exemple, un écran fictif vertical cylindrique injecté par forages en quinconce espacés de 2,25 m en moyenne est implanté autour du puits No.2-6. (Figure 12)

La distance au puits a été calculée de manière à éviter l'entraînement des particules par lessivage (érosion hydraulique), en prenant en compte le débit de pompage (donc la vitesse d'eau due au pompage additionnée à la vitesse naturelle de l'eau souterraine), la taille des particules de zéolite et leur densité absolue.

Pour ce faire, il a été considéré le frottement visqueux de l'eau (force motrice) via la formule de Stokes, équilibrée par la force résistante par frottement des grains sous eau dans la porosité du sol.

Pour l'effet du pompage seul, cette distance D_p du puits est estimée à environ 20 m sur le site de Fukushima pour 25 m³/j de pompage, selon la relation suivante :

$$D_p \geq \frac{9\mu Q_p}{4.\pi.H.n.g.r^2 \left(\rho_s - \rho_w \right) \sin\varphi}$$

avec

- Q_p = débit de pompage (m³/s)
- μ = viscosité de l'eau (1 mPa.s)
- H = hauteur mouillée du puits (env. 10 m)
- g = 9,81 m/s²
- r = rayon moyen de la particule de réactif (environ 1 μm = 10⁻⁶ m)
- ρ_s = densité absolue du réactif (3200 kg/m³),
- ρ_w = densité absolue de l'eau = 1000 kg/m³)
- φ = angle de frottement (35° pour les particules)

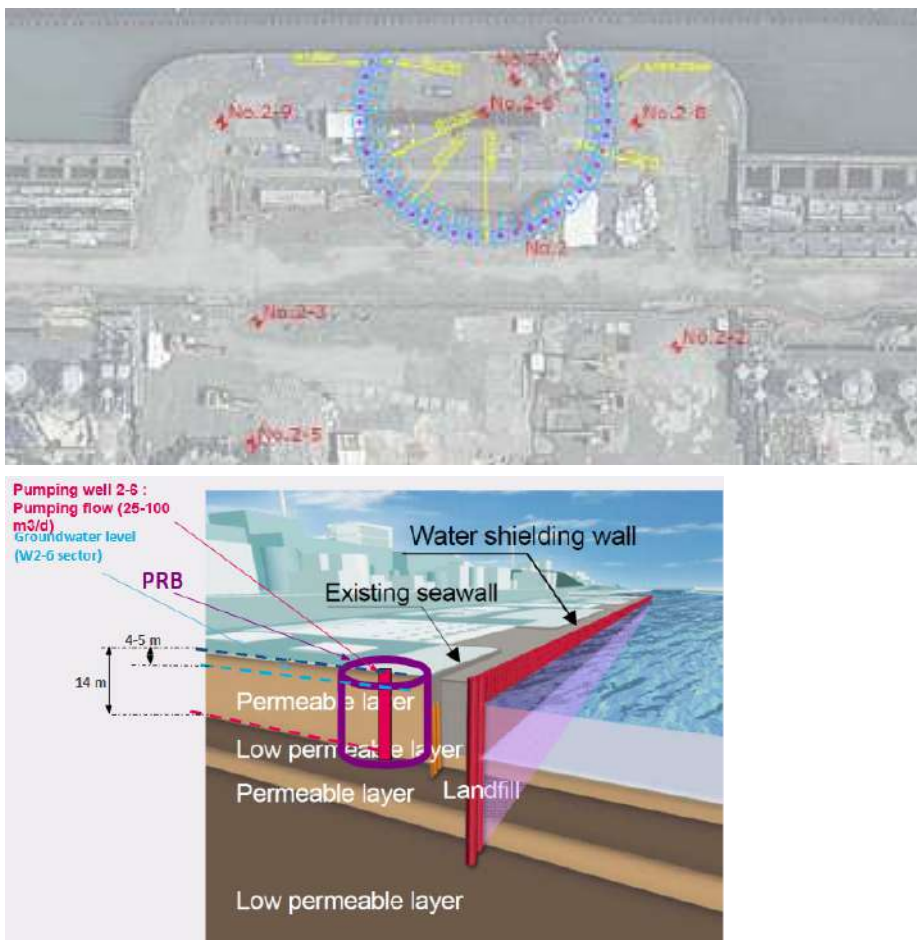


Figure 12: Schéma conceptuel du pompage et implantation de la BPR de protection

La modélisation hydrodynamique a calculé la durée de vie d'une injection de 1% de zéolite artificielle en masse avec un pompage à 25 m³/jour. La durée de vie obtenue est de l'ordre de 5 ans :



En conclusion de l'étude, si on considère une injection maximale cumulée de 5% masse de réactif pour éviter de colmater (notion usuelle en injection environnementale), 5 injections à 1% permettent de maintenir durant 25 ans une barrière sans recourir à de nouveaux ouvrages d'injection à disposer en amont de la barrière.

Dans ce cadre de gestion, il est entendu que la radioactivité reste en place mais décroît avec le temps.

La technique d'injection reste pertinente dans la mesure où la quantité de matériau radioactif manipulée est uniquement constituée des cuttings de forage et donc reste modeste au regard des volumes de déblais d'autres techniques comme les parois au coulis, pieux foré ou trancheuse.

La faisabilité de mise en œuvre d'une barrière perméable réactive a ainsi été démontrée. Ce projet n'est resté qu'en phase d'étude. La congélation a fonctionné et n'a pas nécessité de plan B.

Boris DEVIC-BASSAGET (SARPI Remediation)
Jean-Christophe PIROUX (Exodys Energy)
Laurent CHEROUX (ORANO)

Sources pour la partie congélation :

WM2016 Conference, March 6 – 10, 2016, Phoenix, Arizona, USA.

Noriyoshi Nakamura*, Ryosuke Kobayashi *, Brian Looney **, Dennis Jackson **, Michael Truex ***, Christian Johnson ***

(*Tokyo Electric Power Company / ** Savannah River National Laboratory *** Pacific Northwest National Laboratory)

Sources pour la partie analyses conditions actives : ORANO (AREVA)

// ACTUALITÉ

LES DERNIÈRES PUBLICATIONS

SITES ET SOLS POLLUÉS

REGLEMENTATION



- [Arrêté du 14/03/25](#) relatif à l'utilisation d'eaux impropres à la consommation humaine pour des usages domestiques au sein des installations classées pour la protection de l'environnement
- [Décret n°2025-239 du 14/03/25](#) relatif à l'utilisation d'eaux impropres à la consommation humaine pour des usages domestiques au sein des installations classées pour la protection de l'environnement et des installations nucléaires de base et modifiant les dispositions relatives à l'utilisation des eaux usées traitées et des eaux de pluie pour des usages non domestiques
- [Avis du 16/5/25 sur les méthodes normalisées pour les mesures dans l'air, l'eau et les sols des ICPE](#)
- [Plaquette de présentation du dispositif Tiers demandeur](#) – Juillet 2025

GUIDES ET RAPPORTS



- [Contextes SSP prédéfinis sur le visualiseur InfoTerre](#) – 27/3/2025



- [Projet CARACTAIR – Dvp de prélèvement longue durée dans les gaz du sol et air intérieur – outil de modélisation](#) – GESIPOL 2019 – 16 mai 2025
- [BAPPET : Base de données des teneurs en éléments traces métalliques de plantes potagères](#) – 2 juin 2025
- [BARIAIR : Guide méthodologique pour la conception et la mise en œuvre d'un système couplé géomembrane et SDS actif](#) – 12 juin 2025
- [DEPSI – Analyse des déterminants du transfert des particules sur le continuum sol/air extérieur et intérieur](#) – GESIPOL 2020 – 12 juin 2025
- [DEMEQAI – Caractérisation in situ des polluants gazeux du sol et quantification des impacts sur la Qualité de l'Air Intérieur des bâtiments](#) – GESIPOL 2019 – 13 juin 2025
- [PHYTOPOC – Phyto-management et remédiation de sols maraichers contaminés aux pesticides organo-chlorés](#) – GESIPOL 2019 – APR GRAINE 2019 – 18 juin 2025



- [Elaboration de VTR long terme pour plusieurs perfluorés](#) – Avis – 30 juin 2025 – PFAS concernés: PFBA, PFHxA, 6:2 FTSA et leurs sels

GUIDES ET RAPPORTS (SUITE)



- [Evaluation de la dangerosité des déchets-V3](#)-22 novembre 2024
- [Identification des principales voies d'exposition aux PFAS](#) -8 avril 2025
- [Parangonnage en matière de contrôle des PFAS dans les rejets industriels](#) -6 février 2025
- [Etude bibliographique sur la thermodégradation des PFAS](#) -5 février 25
- [Indice de préoccupation \(Idp\) - Outil d'aide à la gestion pour identifier les friches polluées éligibles à une reconversion écologique](#) - 14 janvier 2025
- [Composés per ou polyfluoroalkylés\(PFAS\) Méthode d'analyse multimatrice](#)-29 avril 2025
- [Méthode d'élaboration des valeurs d'analyse de la situation et choix des valeurs toxicologiques de référence pour la voie ingestion dans le cadre de la démarche de diagnostics réalisés dans les lieux accueillant des enfants & adolescents \(démarche ETS\)](#) -15 mai 2025
- [Synthèse des valeurs réglementaires de gestion en vigueur pour les substances chimiques, dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 01 mars 2025](#) -23 juin 2025 (8^{ème}MàJ)



- [Valorisation de matériaux alternatifs en infrastructures linéaires de transport terrestre. Étude environnementale et sanitaire](#) - 01 avril 2025



- [Etat des lieux des rejets de PFAS par les ICPE](#) -01 avril 2025

Les sols pollués et dégradés : gestion des risques et des incertitudes Vision croisée des parties prenantes

- Conception du projet • Diagnostic • Travaux • Réception et suivi
- Innovation : session jeunes chercheurs, créateurs, startups

Appel à communications

**Date limite de candidature:
5 décembre 2025**

24, 25 & 26 mars 2026 - Lille, France



Partenaires



Avec la participation de



