

upds MAG

LE MAGAZINE DES PROFESSIONNELS
DE LA DÉPOLLUTION DES SITES



Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites

// Hygiène & sécurité

Fiche à destination
des médecins travail

// Trophées action climatique

Retour des 2 lauréats

// Actualités

Les dernières publications sites
et sols pollués

DOSSIER

DES OUTILS NUMÉRIQUES POUR GÉRER LES SITES POLLUÉS //



// SOMMAIRE

Édito //	3
Hygiène et sécurité //	
Fiche à destination des médecins du travail	4
Trophées action climatique //	
Construire un bilan carbone plus juste : rigueur et équité	9
Décarboner l'ingénierie : des actions concrètes reconnues avec CLEA	11
Bonnes pratiques //	
Nouveau guide UPDS	13
Dossier : outils numériques //	
Réhabilitation de sites à l'ère numérique : Lyxea®, la solution digitale d'Antea Group de gestion des données environnementales	14
Volumes de terres à dépolluer : une approche novatrice par Modélisation Analytique Inverse	17
Transition numérique et géostatistique probabiliste en SSP : retour d'expérience sur un site à Rouen	20
Une dépollution toujours plus pointue grâce à la technologie numérique	22
Le numérique au cœur d'un grand projet de dépollution	25
Comment convertir une contrainte en utilité ? Quand les outils numériques deviennent des alliés de l'exploitation	28
Concevoir et réaliser la dépollution grâce aux jumeaux numériques	30
Mieux prédire l'évolution des sources de pollution NAPL	33
Les outils numériques au service des sites et sols pollués	36
Fiche outil //	
KARTOTRAK : logiciel de caractérisation des sites pollués	38
SOILREMEDIATION® : logiciel pour la gestion, l'analyse et la visualisation de l'ensemble des données	40
TERRAINDEX : Logiciel d'optimisation d'études des sols	42
Actualité //	
Les dernières publications Sites et sols pollués	44



UPDS MAG n° 19, Février 2026

Magazine édité par l'UPDS

Union des Professionnels de la Dépollution des Sites
183 avenue Georges Clémenceau - 92000 NANTERRE
www.upds.org

Réalisation : UPDS / etc. 06 15 97 58 72

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

Intersol

24-26 mars 2026 - Lille

Jour de la Terre

22 avril 2026

IFAT

4-7 mai 2026 - Munich

Chlorinated Conference

31/05-04/06/26 - Batelle - Texas

PFAS

16 au 19 juin 2026 à Paris

Appel à communications avant le 12/2/26

Colloque UPDS

19 novembre 2026 - Paris

STEP

1-2 décembre 2026 - Paris



SAVE THE DATE



Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites.

COLLOQUE DU
19 NOVEMBRE 2026
9H-17H30

MAÎTRISER LES PASSIFS
ENVIRONNEMENTAUX :
SÉCURISER LES PROJETS
À L'AUNE DE LA DIRECTIVE SOL



INSCRIPTION
prochainement



MAISON DE LA RATP
Paris 12e - Espace Centenaire

// 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



Yves GUELORGET,
président de la commission technique

Chères lectrices, chers lecteurs,

Dans un secteur où la rigueur méthodologique et la précision réglementaire sont essentielles, l'intégration des outils numériques n'est plus une option : c'est une révolution silencieuse qui redéfinit nos pratiques. Cartographie 3D, modélisation prédictive, plateformes collaboratives, capteurs connectés... Ces technologies transforment la manière dont nous diagnostiquons, surveillons et réhabilitons les sites pollués.

Le numérique apporte trois leviers majeurs :

- **Fiabilité et rapidité** : Les systèmes de collecte et d'analyse automatisée réduisent les délais et minimisent les erreurs humaines, même en présence d'un volume massif de données à acquérir et interpréter.
- **Vision globale** : Grâce aux reports des données et modélisations sur SIG (Systèmes d'Information Géographique), nous pouvons prédire l'évolution des pollutions, optimiser les scénarios de dépollution et orienter les décisions avant que les problèmes ne surviennent.
- **Collaboration renforcée** : Les plateformes partagées fluidifient les échanges entre maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, entreprises, administrations et le public, favorisant ainsi la transparence et la traçabilité.

Mais cette transformation pose aussi des défis : cybersécurité, interopérabilité et propriété des données, formation des équipes aux outils... Autant de sujets qui nécessitent une réflexion collective pour que le numérique soit un allié durable, et non une contrainte.

L'innovation numérique ne se limite plus à un simple support, elle redéfinit nos méthodes, nos outils, notre vision et change la culture du métier.

Dans ce numéro, nous explorons ces enjeux et mettons en lumière des initiatives de nos adhérents qui font bouger les lignes, avec des retours d'expérience, des solutions concrètes ou émergentes et la présentation d'outils spécifiquement dédiés au marché des SSP. Car demain, dépolluer ne sera pas seulement une affaire de chimie, géologie et hydrogéologie, mais aussi de data et d'algorithmes.

Enfin ce numéro est également l'occasion de vous restituer le travail de notre Commission H&S avec la publication d'une fiche à destination des médecins du travail et de revenir sur nos Trophées de l'action climatique, avec deux articles des lauréats. Notre engouement pour le numérique ne doit pas nous faire oublier nos multiples autres sujets de préoccupation.

Je vous souhaite à toutes et tous
une bonne lecture !

// HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

LA COMMISSION HYGIÈNE & SÉCURITÉ DE L'UPDS PUBLIE UNE FICHE À DESTINATION DES MÉDECINS DU TRAVAIL

La Commission Hygiène & Sécurité de l'UPDS a élaboré une fiche d'information (**cf. fiche jointe**) afin de faciliter les échanges entre les entreprises du secteur des sites et sols pollués (SSP) et les services de prévention et de santé au travail interentreprises (SPSTI).

La fiche vise à présenter les particularités des métiers du domaine des SSP, la diversité des situations de terrain et les risques de poly-exposition auxquels peuvent être confrontés les professionnels lors des investigations sur les sites pollués ou lors des travaux de dépollution.

Ce document apporte aux médecins du travail une vision synthétique des risques spécifiques, des mesures de prévention mises en place, soulignant ainsi l'intérêt d'instaurer un suivi individuel renforcé pour les professionnels de terrain.

Nous invitons les lecteurs à prendre connaissance de cette fiche, à l'utiliser, à la diffuser et à nous faire part de vos commentaires afin d'améliorer ce document si besoin.

Les membres

de la commission H&S
de l'UPDS

Anne-Charlotte SANNIER,

ABO-ERG

Marine TOANEN, EODD

Thierry GEGU, SECHE

Jean-Philippe TRACOL,

SECHE

Marie DUCLOS, UPDS



Fiche d'information à destination des médecins du travail des SPSTI sur les particularités de la problématique santé-sécurité en sites et sols pollués

La commission Hygiène et Sécurité de l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS) souhaite par le présent document faciliter les échanges entre ses adhérents et les services de prévention et de santé au travail interentreprises (SPSTI). La finalité de cette communication est l'amélioration continue de la protection de la santé des salariés concernés.

Les métiers du secteur des sites et sols pollués (SSP) ont pour objectif de **gérer les pollutions accidentelles et historiques du sous-sol** en tenant compte des **risques sanitaires et environnementaux** (voir vidéo ci-dessous).

Les métiers se répartissent en **2 grandes familles complémentaires : l'ingénierie et les travaux**. Les collaborateurs occupent des fonctions variées : opérateurs, techniciens, conducteurs d'engins, ingénieurs, chefs de projet ou de chantier, etc.

Dans le cadre de leurs activités, ils sont exposés aux risques du BTP. Mais la particularité des interventions de terrain du secteur SSP est **la poly-exposition potentielle à des composés chimiques et parfois aux agents biologiques**.

Cette poly-exposition, notamment en présence de CMR, peut engendrer des risques sanitaires décrits dans le DUERP de chaque entreprise et impose donc la mise en place d'un **suivi individuel renforcé** pour les salariés concernés.

Par ailleurs, un suivi par la médecine du travail pragmatique et standardisé au niveau national pour toutes les entreprises du secteur des SSP, est souhaitable.

Quels sont les différents métiers dans le domaine des SSP ?



[Vidéo UPDS sur les métiers dans le domaine des SSP](#)



Contexte

"Le secteur de la dépollution des sites et sols pollués se caractérise par une grande diversité d'environnements de travail, d'activités et de techniques (excavation, lavage de sols, dépollution biologique ou chimique, d'enfouissement, etc.). Les risques auxquels peuvent être exposés les opérateurs sont donc multiples et vont dépendre du chantier de dépollution." [définition de l'INRS](#)

// SUIVEZ-NOUS





Quels sont les risques spécifiques auxquels sont exposés les professionnels des SSP ?

Au-delà des risques classiques présents sur tout chantier (circulation d'engins, chutes, bruit, manutention...), les professionnels des SSP sont confrontés à un risque spécifique :

La poly-exposition aux substances chimiques et parfois biologiques.

Cette poly-exposition est due aux **polluants, résidus et déchets** divers retrouvés sur les sites lors des investigations et travaux dans les sols, les eaux ou les gaz des sols.



Important !

Sur les chantiers de **SSP**, la **nature et la concentration** des polluants ne sont pas toujours connues en amont.

De nombreuses substances présentes sont des **agents chimiques dangereux**, dont certains classés **CMR** (cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques) :

- **Métaux** : plomb, cadmium, arsenic, mercure, chrome...
- **Hydrocarbures** : HAP, HCT, BTEX (dont benzène)
Composés organiques volatils (COV)
- **Solvants chlorés** (COHV) : perchloréthylène, trichloréthylène, chlorure de vinyle...
- **PCB**
- **Poussières de chantier** : terrassements, circulation d'engins, mouvements de terre, concassage de béton : silice cristalline
- Phytosanitaire
- H₂S et ammoniac
- Amiante, ...



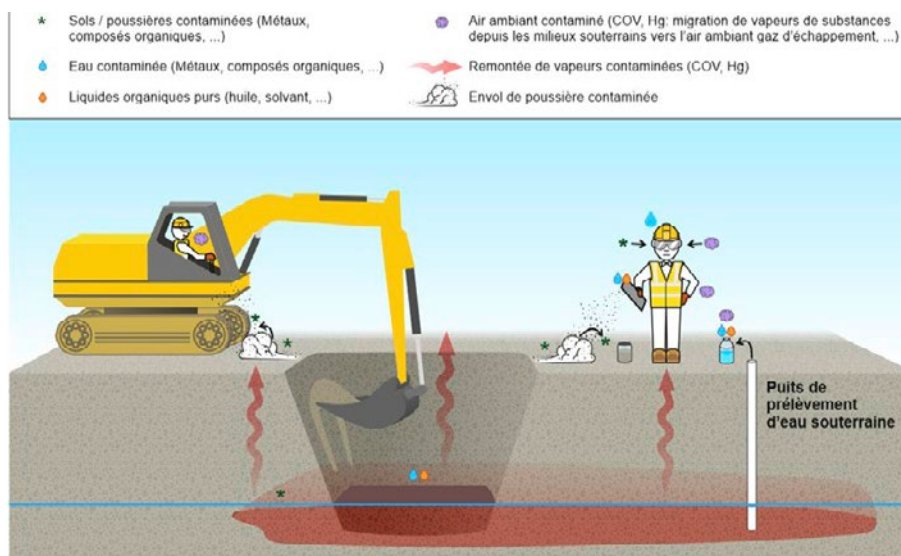


Schéma conceptuel des risques d'exposition aux polluants

Interventions concernées par les risques de poly-exposition :



1. BUREAUX D'ETUDES

- Visites de site
- Diagnostics environnementaux
- Suivi des travaux



2. ENTREPRISES DE SONDAGE / FORAGE

- Réalisation de sondages
- Réalisation de forages



3. EQUIPES DE TRAVAUX DE DEPOLLUTION

- Travaux de dépollution sur site, in situ et hors site
- Supervision des opérations

Le degré d'exposition des salariés dépend :



De la nature des polluants,

Forme, concentration, toxicité, etc



Des activités et tâches réalisées,



Des voies d'exposition possibles,

Principalement l'inhalation de vapeurs, gaz, poussières, le contact cutané et l'ingestion non intentionnelle de terres/ poussières par contact mains/ bouche.



De la fréquence et du temps de présence sur le chantier.

Durée quotidienne, récurrence des interventions...

// SUIVEZ-NOUS





Quelles mesures de prévention et quels moyens de protection permettent de limiter les risques ?

1/ EPC et mesures organisationnelles :

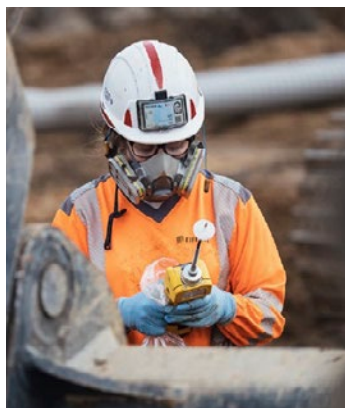
- **EPC** : cabine pressurisée à air épuré (CPAE) pour les engins, brumisation / abattement des poussières, ventilation de la zone de travail et traitement des gaz...
- De par la toxicité et le caractère CMR de certains polluants, des **mesures organisationnelles** sont mises en œuvre (ex : réaménagement du poste de travail pour les femmes enceintes et/ou allaitantes pour empêcher la transmission au fœtus ou nourrisson, travaux interdits pour certaines catégories de travailleurs (intérimaires et CDD) en fonction des polluants présents).

2/ EPI :

Protections respiratoires
filtrantes contre les gaz,
vapeurs et/ou poussières.

Utilisation de **dispositifs de détection in-situ** (détecteurs 4/5 gaz et PID) pour détecter certains polluants.

Vérification et entretien régulier des EPI pour garantir leur efficacité.



Vêtements de travail couvrants ou combinaisons de protection chimique et lunettes de protection.

Gants jetables pour limiter le contact avec les contaminants.

3/ Contrôle d'exposition :

Les adhérents de l'UPDS organisent régulièrement des **campagnes de mesures d'exposition réglementaires** sur leurs chantiers et les résultats sont transmis aux médecins du travail le cas échéant.

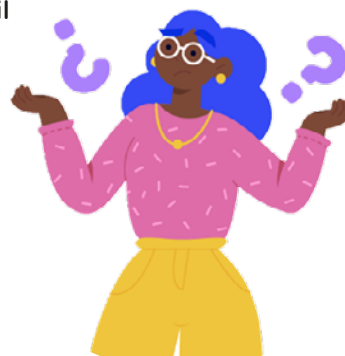


Que faut-il retenir ?

Le secteur des SSP se caractérise par une **grande diversité de métiers et d'activités** – ingénieurs, techniciens, opérateurs – intervenant en bureaux d'études comme en entreprises de travaux. Sur la base de l'évaluation des risques spécifiques à nos activités SSP, fournie dans le DUERP de chaque entreprise, il est essentiel d'assurer un **suivi individuel renforcé (SIR)** pour les professionnels intervenant sur le terrain. Le **risque de poly-exposition** à diverses substances peut engendrer des **risques sanitaires complexes**, nécessitant une vigilance accrue. Cela inclut le **recours à des équipements de protection collective (EPC)**, à des **équipements de protection individuelle (EPI)**, ainsi qu'à l'organisation de **contrôles d'exposition réguliers**.

Dans ce contexte, la **vigilance partagée entre employeurs, salariés et services de prévention et de santé au travail (SPSTI)** est indispensable pour assurer un suivi individuel renforcé adapté aux risques spécifiques du terrain.

Enfin, dans le cadre du SIR, des **examens complémentaires** (biométrie ou biosurveillance) pertinents en fonction des substances rencontrées permettront de **surveiller efficacement l'état de santé des collaborateurs**.



Cette fiche a pour vocation de renforcer le dialogue entre les entreprises du secteur SSP et les médecins du travail, pour anticiper les situations à risque dès les phases amont des projets et mieux suivre les expositions.

Suivi individuel renforcé : [articles L. 4624-2 et R. 4624-23 et suivants du Code du travail](#)

Examen préalable à la mise en place d'un suivi post-professionnel ou post-exposition : [articles L. 4624-2-1 et R. 4624-28-1 à R. 4624-28-3 du Code du travail](#)

Examens complémentaires : [articles R. 4624-35 du Code du travail](#)

Dispositions à mettre en œuvre lorsque les résultats de l'évaluation des risques chimiques révèlent un risque pour la santé et la sécurité des travailleurs : [article R. 4412-12 du Code du travail](#)

Suivi individuel de l'état de santé des travailleurs exposés aux Agents Chimiques Dangereux (ACD), y compris CMR : [articles R. 4412-44 à R. 4412-57 du Code du travail](#)

// TROPHÉES ACTION CLIMATIQUE

CONSTRUIRE UN BILAN CARBONE DE L'ENTREPRISE PLUS JUSTE : ENTRE RIGUEUR DES DONNÉES ET ÉQUITÉ DANS LA COMPENSATION

Depuis plus de dix ans, TESORA s'est engagée dans une démarche de bilan carbone rigoureuse et évolutive pour ses activités. Une méthodologie complète et équitable qui montre qu'il est possible de concilier croissance de l'entreprise et transition bas carbone.

Réaliser un bilan carbone est aujourd'hui un exercice structurant pour une entreprise, à condition qu'il repose sur des données fiables et qu'il s'inscrive dans une logique d'actions. Au-delà des données chiffrées, cet outil doit permettre d'identifier les principaux postes d'émissions et d'orienter les choix vers des actions bas carbone. Bien que la réalisation d'un bilan carbone ne soit réglementairement obligatoire que pour les entreprises de plus de 500 salariés, TESORA a fait le choix de s'y engager volontairement, convaincue de l'intérêt de cette démarche. Chez TESORA, cette conviction guide depuis plus de dix ans une démarche qui s'est structurée au fil des ans, fondée sur sélection des données rigoureuse, l'établissement de plans d'actions concrets revus chaque année et une réflexion collaborative sur une manière de compenser ses émissions.

UNE MÉTHODOLOGIE ÉPROUVÉE

TESORA s'appuie sur la méthodologie Bilan Carbone® développée par l'ADEME et sur les méthodes de calcul proposées par l'outil Carbo. La démarche repose sur une collecte fine des données et une intégration dans un outil de calcul dédié. Les déplacements professionnels, achats de matériels et consommables, vie au bureaux, services de gestion, déchets ou encore organisation d'événements : l'ensemble des postes d'émissions est pris en compte afin d'obtenir une vision globale et représentative de l'empreinte carbone de l'entreprise. Cette méthodologie est schématisée dans la **Figure 1**.

DES PLANS D'ACTIONS QUESTIONNÉS

Le bilan carbone n'a de sens que s'il débouche sur des actions concrètes. À partir des résultats obtenus, TESORA a défini un plan de réduction ciblé. Parmi les mesures mises en œuvre figurent le renouvellement progressif de la flotte automobile vers des véhicules électriques, l'encouragement aux transports en commun, l'évolution des habitudes alimentaires avec la mise en place d'un «jeudi végétarien», ou encore le recours systématique au matériel électronique reconditionné. Ces actions, évaluées et chiffrées, permettent de mesurer leur impact réel et d'inscrire l'entreprise dans une logique d'amélioration continue vers une transition bas carbone.

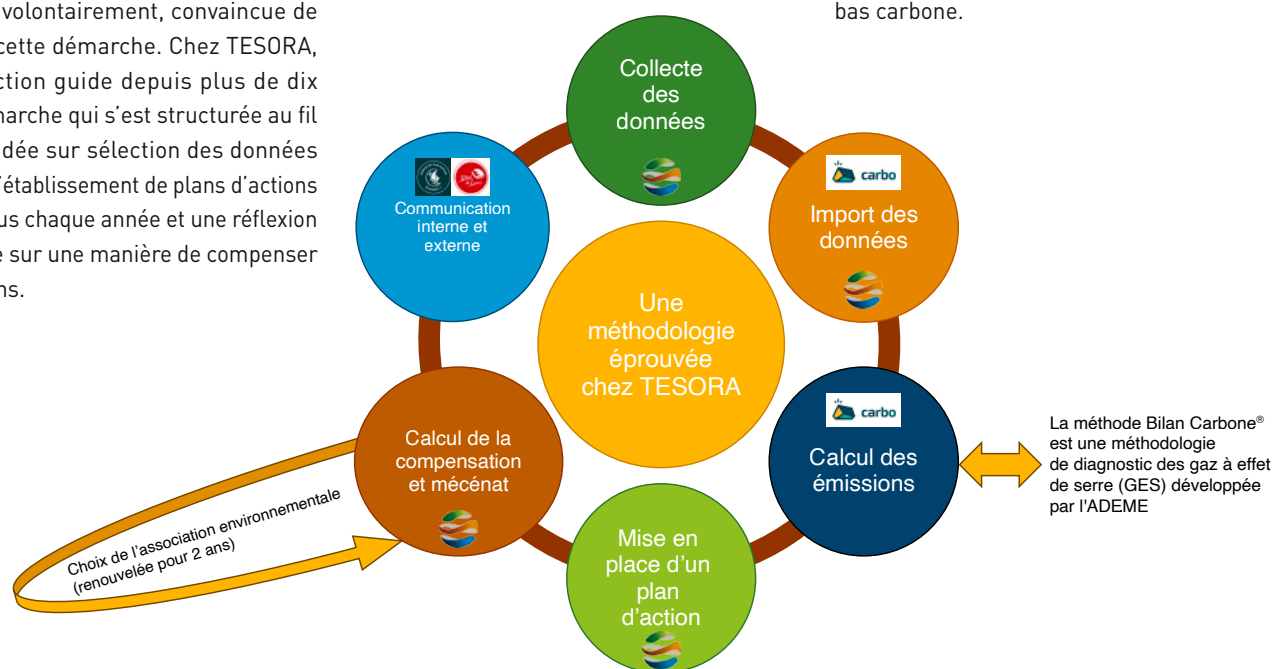


Figure 1 : Méthodologie de réalisation du bilan carbone appliquée par TESORA

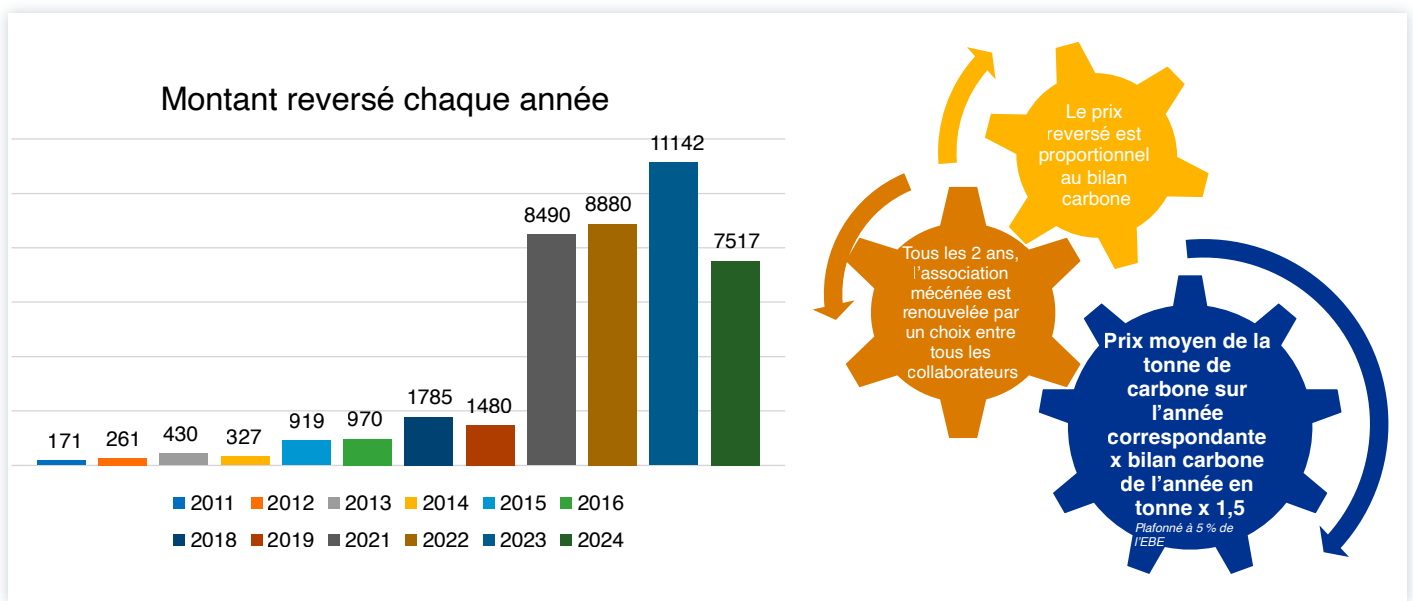


Figure 2 : Montants des compensations carbone reversées par TESORA depuis 2011

UNE COMPENSATION ÉQUITABLE ET COLLABORATIVE

Consciente que certaines émissions restent incompressibles, TESORA a choisi de compléter sa démarche de réduction par une stratégie de compensation volontaire. Depuis 2011, l'entreprise soutient financièrement des projets environnementaux. Aujourd'hui, la compensation repose sur un mécénat à destination d'associations environnementales, sélectionnées par les collaborateurs et renouvelée tous les 2 ans, et proportionnel au bilan carbone annuel. Cette contribution est encadrée, transparente et plafonnée, afin de

garantir un juste équilibre entre engagement environnemental et réalité économique. Les montants reversés depuis 2011 sont présentés en **Figure 2**.

Dans un souci d'évolution continue, TESORA a revu sa méthode de calcul de la compensation reversée en 2021, avec une augmentation du coût par tonne émise. Cette modification est concomitante à l'évolution de la méthodologie de calcul du bilan carbone.

DES RÉSULTATS ENCOURAGEANTS

Les résultats observés sur plusieurs années montrent que les émissions de TESORA n'évoluent pas au même rythme que sa croissance d'activité. L'évolution des émissions et du chiffre d'affaire de TESORA sont présentées à la **Figure 3**. Cette décorrélation témoigne de l'efficacité des actions engagées et confirme qu'une performance peut être effective tout en contribuant à la transition bas carbone.

En conclusion, à travers sa démarche de bilan carbone, TESORA démontre qu'il est possible de construire une stratégie à la fois économiquement croissante et environnementale. Cette démarche est appelée à s'enrichir encore, notamment par l'intégration de nouvelles sources d'émissions comme les émissions indirectes ou une estimation des méthodes de réhabilitation proposées afin de préciser les émissions des solutions étudiées dans les bilans coûts avantages dans le cadre de la réalisation de nos plans de gestion.

Julia CUCINOTTA, TESORA
Robert CARRERAS, TESORA

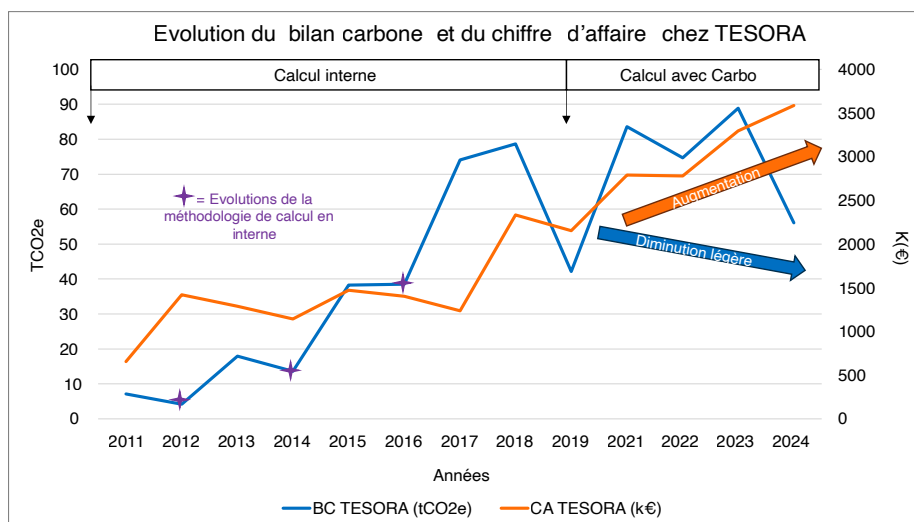


Figure 3 : Evolutions du bilan carbone et du chiffre d'affaire chez TESORA depuis 2011

// TROPHÉES ACTION CLIMATIQUE

DÉCARBONER L'INGÉNIERIE :

DES ACTIONS CONCRÈTES RECONNUES AVEC CLEA

(ACRONYME DE CONNECTÉ, LÉGER, ÉLECTRIQUE/
ERGONOMIQUE, AUTONOME)

Lauréat des Trophées UPDS de l'Action Climatique 2025 lors du salon Pollutec, le Groupe Fondasol voit son engagement en faveur de la décarbonation de l'ingénierie reconnu par la profession. Fruit de plusieurs années de R&D et d'innovation, CLEA marque une avancée majeure dans l'univers des ateliers de forage et dans la décarbonation des activités du Groupe. CLEA est le premier atelier de forage en France 100 % électrique (cf. Figure 1). Le Groupe démontre que l'innovation technique constitue un levier concret, mesurable et opérationnel de réduction des émissions de gaz à effet de serre, dès les phases d'investigation.

À l'occasion du salon Pollutec 2025, le Groupe Fondasol a reçu le **Trophée UPDS de l'Action Climatique**, une distinction remise par l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS), avec le soutien de The Shifters (cf. Figure 2). Cette récompense salue une action concrète et mesurable en faveur de la transition bas-carbone dans le secteur de la construction.

Dans un contexte où les enjeux climatiques sont désormais bien identifiés par l'ensemble de la filière, toutes les phases des projets ne font pas encore l'objet du même niveau d'exigence environnementale. Les investigations géotechniques et environnementales, pourtant indispensables à la sécurisation des ouvrages, reposent encore majoritairement sur des équipements thermiques, générateurs d'émissions de gaz à effet de serre, de nuisances sonores et de contraintes d'intervention.

C'est précisément sur cette phase amont que le Groupe Fondasol a choisi d'agir, en inscrivant la décarbonation de l'ingénierie au cœur de sa stratégie.

UNE TRAJECTOIRE DE DÉCARBONATION STRUCTURÉE ET RECONNUE

Sa stratégie climatique repose sur un objectif clair : réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 5 % par an, tout en maintenant un haut niveau d'exigence technique et opérationnelle. En 2024, cette trajectoire devient pleinement mesurable et s'impose comme un levier structurant des décisions et des innovations. Les résultats confirment la dynamique engagée : les émissions passent de **10 374 à 9 369 tCO2e en un an**, soit une **réduction de 9,7 %**, correspondant à l'objectif initialement fixé à l'horizon 2027. Cette performance repose sur plusieurs leviers complémentaires : sobriété énergétique sur les sites, mobilité raisonnée, réduction et gestion des déchets, achats responsables et évolution des pratiques de chantier. Déployées de manière progressive et maîtrisée, ces actions inscrivent la réduction de l'empreinte carbone du Groupe dans la durée.

CLEA : DÉCARBONER LES INVESTIGATIONS IN SITU

C'est avec **CLEA**, son atelier de forage 100 % électrique, que le Groupe Fondasol a candidaté et remporté cette distinction (Lauréat des Trophées UPDS de l'Action Climatique 2025). Première machine de forage intégralement électrifiée en France, CLEA permet de supprimer totalement l'usage de carburant sur les chantiers de reconnaissance géotechnique et



Figure 1 : CLEA atelier de forage 100 % électrique

environnementale. Cette innovation a également été récompensée par le Prix de l'Innovation au Salon SOLSCOPE 2025.

Fonctionnant exclusivement sur batteries rechargeables via une prise standard, avec une autonomie de 1 à 2 semaines, CLEA est dédiée aux sondages et essais les plus courants. Elle agit directement sur la principale source d'émissions lors des investigations in situ : l'outil de forage lui-même.

PROGRÈS TECHNOLOGIQUE ET PERFORMANCE OPÉRATIONNELLE

Le développement de CLEA ne s'est pas limité à un simple changement de source d'énergie. Le passage à l'électrique a conduit à une refonte globale du fonctionnement de l'atelier de forage. Selon la nature des travaux réalisés, l'autonomie varie de deux jours à une semaine. La recharge s'effectue en une nuit, tandis qu'une solution de recharge rapide, de l'ordre de deux heures, est actuellement à l'étude.

L'intégration de motorisations électriques permet un meilleur rendement énergétique et une acquisition plus complète et plus fiable des paramètres de forage. Cette maîtrise accrue autorise un pilotage plus précis, contribuant à améliorer la qualité d'exécution des forages et, par conséquent, la pertinence des essais in situ associés. L'enregistrement de ces paramètres ne requiert aucune instrumentation externe complexe. Par ailleurs, les performances mécaniques sont renforcées et les besoins de maintenance réduits par rapport à un atelier thermique de gabarit équivalent.

CLEA illustre ainsi la capacité de l'innovation technologique à conjuguer performance opérationnelle, fiabilité des données et réduction de l'impact environnemental.

DES RÉSULTATS ENVIRONNEMENTAUX CONCRETS

Les bénéfices environnementaux de CLEA sont immédiats et quantifiés. Chaque machine permet d'éviter environ **8,2 tonnes de CO2 par an**, soit l'empreinte carbone annuelle d'un atelier de forage thermique standard.

L'absence totale d'émissions directes sur chantier améliore la qualité de l'air et du bruit et facilite les interventions en milieux sensibles ou occupés. CLEA a notamment été utilisée sur des sites hospitaliers en activité ou en environnements clos, où le silence des moteurs électriques et l'absence de gaz d'échappement constituent des critères déterminants.

Le niveau sonore est divisé par dix par rapport à une machine thermique équivalente, avec environ **65 décibels au poste de commande**.

CHIFFRES CLÉS CLEA

- Atelier de forage 100 % électrique
- Puissance équivalente : 50 CV
- Fonctionnement sur batteries rechargeables – prise 220V
- Autonomie : 1 à 2 semaines selon les terrains
- Temps de recharge : 1 nuit
- Consommation : < 20 kWh par semaine pour des sondages courants
- Zéro émission directe sur chantier
- Environ 8,2 tCO₂ évitées par an et par machine
- Niveau sonore : ~ 65 dB au poste de commande
- Coût énergétique divisé par 9 par rapport au gasoil

CONCLUSION

En distinguant CLEA lors des Trophées UPDS de l'Action Climatique 2025, la profession reconnaît la capacité du Groupe Fondasol à transformer une ambition climatique en actions concrètes et mesurables.

En intégrant la réduction de l'empreinte carbone dès les phases d'investigation, le Groupe démontre que l'ingénierie peut jouer un rôle actif dans la transition écologique, tout en développant la performance et des moyens d'investigations. Une reconnaissance qui s'inscrit dans la continuité d'une stratégie visant à faire évoluer durablement les pratiques de la filière.

Dessie LECUE, FONDASOL
Marc FLOREANI, FONDASOL



Figure 2 : Trophée UPDS de l'Action Climatique.

// BONNES PRATIQUES

NOUVEAU GUIDE UPDS : GUIDE DES BONNES PRATIQUES - CAHIERS DES CHARGES ET CONTRATS POUR LES SITES ET SOLS POLLUÉS

Face aux difficultés souvent rencontrées lors de la rédaction de cahiers des charges, de la réponse aux appels d'offres ou de la réalisation de prestations d'ingénierie et de travaux dans le domaine des Sites et Sols Pollués (SSP), l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites (UPDS) a publié en octobre 2025 un guide de bonnes pratiques dédié aux «Cahiers des charges et contrats pour les SSP». Le guide se compose de trois tomes.

TOME 1 : DÉFINITIONS

Le tome 1 présente les définitions issues du Code de la Commande Publique et de la norme NF X31-620, ainsi que la répartition des rôles et responsabilités des différents acteurs (MOA, AMO, MOE, prestataires). L'objectif est de favoriser des relations sereines et équilibrées entre les parties prenantes.

TOME 2 : DOSSIERS DE CONSULTATION DES ENTREPRISES (DCE)

Le tome 2 détaille le contenu des DCE pour chaque type de prestation et les bonnes pratiques à suivre lors de leur rédaction. Il met l'accent sur une approche itérative des diagnostics, conformément à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués.

TOME 3 : CONTRATS

Le tome 3 présente les bonnes pratiques pour la rédaction des contrats, explique les enjeux de chaque clause et attire l'attention sur les risques de pratiques abusives. Les questions d'assurance y sont également abordées.

Ce guide offre des clés pour que les projets de réhabilitation se déroulent dans les meilleures conditions possibles. Il fournit des conseils pragmatiques pour élaborer



Figure 1 : Guide des bonnes pratiques - Cahier des charges pour les sites et sols pollués. Tome 1 : Définitions

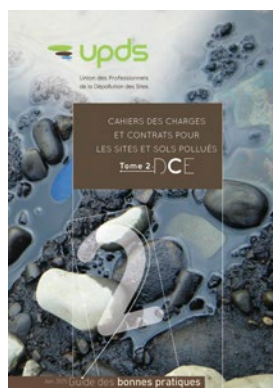


Figure 2 : Guide des bonnes pratiques - Cahier des charges pour les sites et sols pollués. Tome 2 : Dossiers de Consultation des Entreprises (DCE)



Figure 3 : Guide des bonnes pratiques - Cahier des charges pour les sites et sols pollués. Tome 3 : Contrats

les cahiers de charges afin de limiter les risques et les incertitudes tout au long de la réhabilitation d'un site, propose des sommaires-types, la liste des données dont il faut disposer dans les cahiers des charges pour chiffrer de façon la plus précise possible les travaux, des objectifs à atteindre par technique et les moyens envisageables de réception des travaux et des exemples de clauses contractuelles. Il comporte également de nombreux liens vers des outils et guides complémentaires pour approfondir certains sujets.

Sa rédaction s'est appuyée sur les retours d'expérience des acteurs du marché et des échanges avec les maîtres d'ouvrage, permettant de mettre en lumière des points d'attention et des axes d'amélioration sur plusieurs thématiques : rôles et responsabilités, éléments techniques à intégrer dans le DCE, aléas et sujétions imprévues, analyse de risques, types de contrats et couvertures assurantielles.

Le guide vise à instaurer un partenariat fondé sur des bases techniques et contractuelles solides, pour sécuriser et faciliter la réhabilitation des sites et sols pollués. Il s'adresse aux maîtres d'ouvrages comme aux prestataires ingénierie et travaux du domaine des SSP.

Les trois volets du guide sont accessibles via le lien suivant : <https://upds.org/guides-upds/> ou via le QR Code ci-dessous.

Si vous avez des commentaires sur son contenu ou des propositions de modifications, n'hésitez pas à revenir vers nous (upds@upds.org) car il est prévu de publier une version mise à jour d'ici quelques temps.

Christel de La Hougue, UPDS
Marie Duclos, UPDS

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

RÉHABILITATION DE SITES À L'ÈRE NUMÉRIQUE :

LYXEA®, LA SOLUTION DIGITALE D'ANTEA GROUP DE GESTION DES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

À Frontignan, à proximité de Montpellier (34), l'un des plus vastes chantiers de réhabilitation d'Europe (couvrant une superficie de 11 hectares) s'appuie depuis son lancement sur un dispositif de traçabilité numérique. Un outil développé par Antea Group, maître d'œuvre sur le chantier, permet de suivre en temps réel l'avancement des travaux. Cette innovation contribue également à une surveillance environnementale rigoureuse.

UNE OPÉRATION DE GRANDE ENVERGURE

En amont des travaux (entre 2017 et 2022), les données collectées lors des 1 100 sondages réalisés selon un maillage de 10 m x 10 m, ainsi que les résultats des analyses de sol ont été enregistrés dans une base de données Lyxea® afin d'établir le plan de terrassement et de préparer un outil de suivi des travaux. Depuis le démarrage des travaux de réhabilitation en 2022, ce sont plus de 165 000 m³ de terres qui ont été terrassés sur ce chantier dont plus de 80 000 m³ qui ont été évacués en

centre de traitement autorisé (cf. **Figure 1**). Au-delà de son envergure technique, cette opération doit relever plusieurs défis majeurs : maîtrise des nuisances pour les riverains (bruits, odeurs), suivi atmosphérique des poussières, traçabilité des terres évacuées et remblayées, analyses de sols, des eaux souterraines et superficielles ainsi que de l'air sous tente et au niveau des rejets des unités de traitement d'air.

Dans ce contexte complexe, soumis à des exigences réglementaires strictes, une problématique centrale se pose : comment

centraliser, fiabiliser et exploiter efficacement la masse d'informations recueillies quotidiennement par de multiples opérateurs sur le terrain ?

UN OUTIL INTUITIF ET ACCESSIBLE

L'hétérogénéité et la masse importante des données et leur important volume ont conduit au choix d'une solution numérique : il a été décidé, spécifiquement pour ce chantier, d'étendre le périmètre de la base des données analytiques pour :

- Permettre l'exploitation et la valorisation de toutes les données ;
- Gérer des données variées (textes, chiffres, photographies, documents) ;
- Assurer la centralisation des informations via une application web (chaque acteur du projet doit pouvoir y accéder en temps réel et sur l'ensemble des postes de travail) ;
- Permettre la traçabilité des modifications effectuées ;
- Garantir la sécurité des informations.

L'un des principaux enjeux lors du développement de l'application a été de concilier la robustesse technique et la simplicité d'usage afin de favoriser son utilisation par l'ensemble des intervenants du chantier. L'objectif : proposer un outil intuitif et accessible, tout en garantissant une gestion rigoureuse et fiable des données.



©Antea Group - Séché

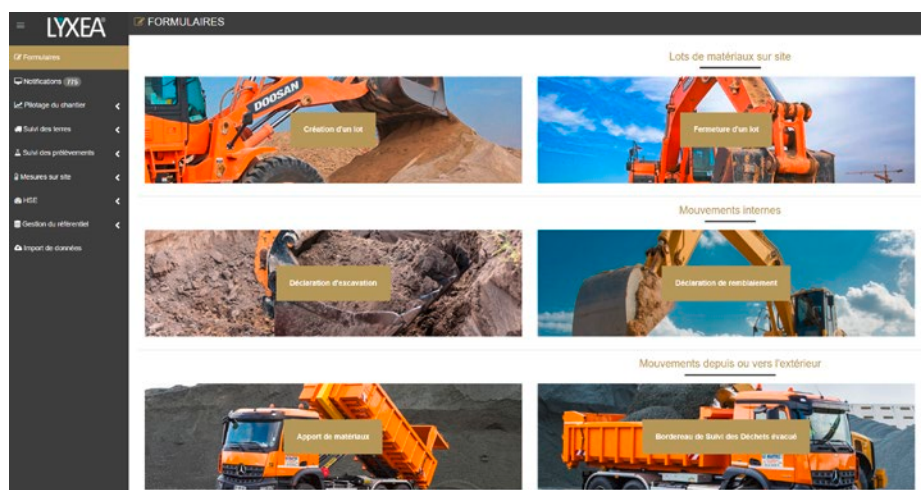


Figure 2 : Interface utilisée pour la saisie des données de terrain par les utilisateurs

DIFFÉRENTS MODULES POUR DIFFÉRENTS BESOINS

L'outil développé s'articule sur plusieurs axes pour répondre aux différentes missions du maître d'œuvre sur le chantier :

- Traçabilité des matériaux terrassés ;
- Suivi environnemental (prélèvements d'eau, de sol et d'air) ;
- Suivi de l'avancement des travaux.

Ces modules fonctionnent avec des formulaires de saisie sur le terrain, des interfaces de visualisation (cartes, tableaux, graphiques) ainsi que des exports et imports de données via des tableaux Excel (cf. Figure 2).

TRAÇABILITÉ DES MATÉRIAUX TERRASSÉS

Grace à différents formulaires et à une connexion à l'API (application programming interface ou «interface de programmation d'application») de Trackdéchets, les terres excavées sont suivies depuis leur excavation jusqu'à leur évacuation en centre de traitement ou leur réutilisation sur site. Les terres remblayées sont suivies depuis leur origine (carrière ou terres du site) jusqu'à leur remblaiement dans les fouilles.

Un **formulaire excavation**, permet d'indiquer la zone d'excavation et le lot de stockage temporaire, ainsi que différentes informations nécessaires à la réception des travaux, comme par exemple, les cotes atteintes lors des excavations.

Les terres excavées sont déplacées dans des lots terres qui vont soit être traitées (criblage, concassage...), soit stockées temporairement pour être réutilisées ou évacuées en

centre de traitement. Ces mouvements sont tracés via des **formulaires de mouvements de matériaux**.

Lors de l'évacuation des terres, un autre formulaire permet de sélectionner le lot à évacuer pour générer un BSD (Bordereau de Suivi des Déchets) sur Trackdéchets grâce à son système d'API. Le BSD pourra ensuite être signé par toutes les parties prenantes (producteur du déchet, transporteur et centre de traitement). Une fois le camion réceptionné, le centre de traitement confirme sa réception sur Trackdéchets et indique les dernières informations nécessaires pour finaliser le BSD (tonnage réceptionné, filière finale). Ces informations sont ensuite récupérées par l'application et consultables sur la plateforme Lyxea®.

Ensuite, le **formulaire remblaiement** permet d'indiquer l'origine des matériaux utilisés pour combler chacune des fouilles ainsi que les cotes de mise en œuvre des matériaux. Toutes ces données permettent de fournir au client des informations précises et actualisées en permanence sur l'avancement du chantier (planning, volumes terrassés, volumes remblayés et tonnages évacués).

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

L'application permet de réaliser différents suivis :

Les rondes de surveillance d'odeur et de bruit sont saisies via la plateforme. Le suivi des poussières est réalisé avec des stations de mesure de la qualité de l'air extérieur équipées de capteurs dont les données, qui sont enregistrées en continu, sont récupérées en direct via l'API du fournisseur. Ces données sont consultables en direct par les membres du chantier via la plateforme.

Pour chaque prélèvement réalisé (sol, eau et air), un formulaire permet de recueillir les informations lors du prélèvement, afin de générer automatiquement les fiches de prélèvement au format normalisé. Les résultats d'analyses sont ensuite importés dans une base de données via les fichiers Excel fournis par le laboratoire. Ce système permet aux ingénieurs d'agrégier simplement les informations de leurs prélèvements avec les résultats d'analyses du laboratoire.

Les automates des unités de traitement d'air des tentes de confinement et les balises mesurant la qualité de l'air sous tente génèrent une quantité importante de données.

Ces données sont extraites des appareils sous forme de tableaux Excel et sont ensuite importées sur la plateforme pour être traitées, allégées et valorisées par des algorithmes.

ADHÉSION DES UTILISATEURS

En raison de la diversité des utilisateurs (entreprise de travaux de dépollution et maître d'œuvre) et contributeurs (techniciens, chefs de chantier, ingénieurs ou directeur de projet, préventeur, etc.), l'un des principaux défis du développement a été d'obtenir l'adhésion de tous. En effet, il n'est pas toujours évident d'abandonner ses habitudes pour adopter un nouvel outil numérique. Pour favoriser cette transition, plusieurs leviers ont été mis en place :

- Visualisation des données saisies : la présentation des données a été mise en avant sur la plateforme via des cartes, des graphiques et des tableaux rendant l'information rapidement exploitable pour les opérateurs ;
- Amélioration continue de l'ergonomie : un travail approfondi a été mené à partir des retours des utilisateurs. Le fait que cet outil soit développé en interne a permis la prise en compte régulière des demandes. L'ergonomie des formulaires a été plusieurs fois ajustée afin de rendre leur utilisation plus fluide et plus intuitive pour les opérateurs ;
- Automatisation des process de saisie garantissant des données plus fiables tout en optimisant le temps d'exploitation ;
- Possibilité de travailler hors ligne pour certaines fonctionnalités afin d'éviter les problèmes de connexion internet qui peuvent être instables sur un chantier.

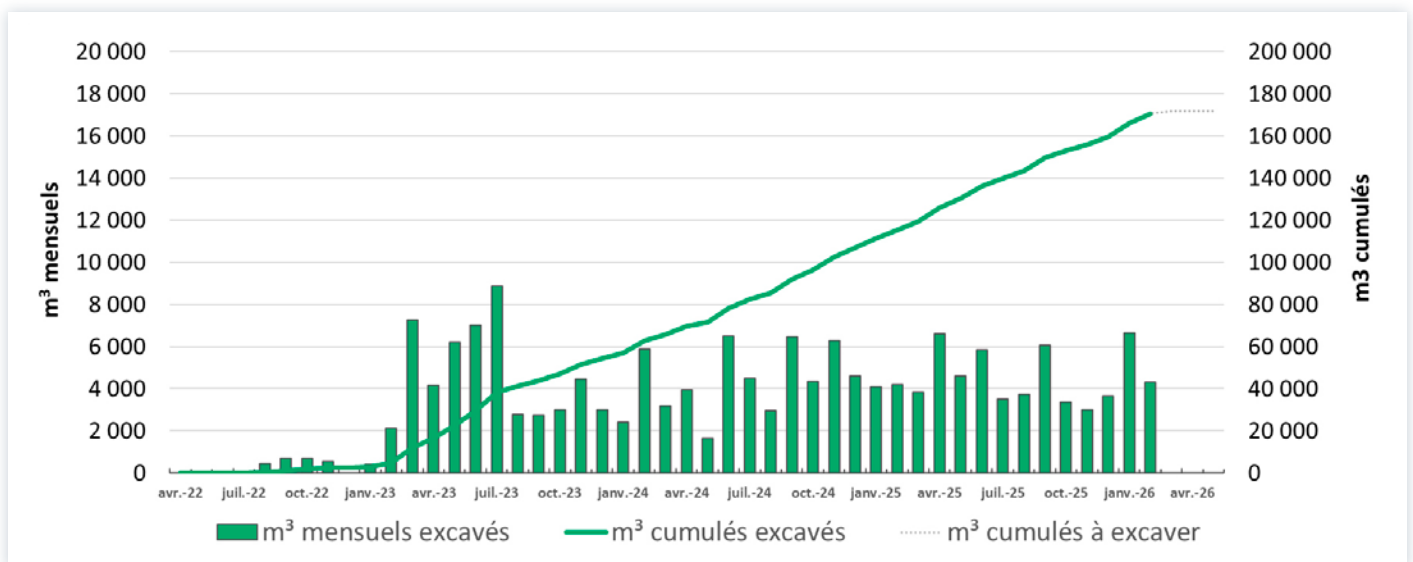


Figure 3 : Exemple de rendu automatisé via Excel

VALORISATION DES DONNÉES

L'ensemble des données collectées est ensuite analysé : soit directement sur l'application, soit à partir de tableaux de bord Excel automatisés, développés par les ingénieurs de la maîtrise d'œuvre (cf. **Figure 3**). Ces rendus permettent d'alimenter les rapports, de fournir des supports de communication, de valider les factures de l'entreprise et, pour finir, ils permettent de réaliser des statistiques pour calculer les volumes prévisionnels des travaux (cf. **Figures 4 et 5**). Les rendus permettent également d'alimenter les informations du site internet mis en place pour informer les riverains.

Lien : [Avancement du chantier | Travaux de réhabilitation Ancienne raffinerie Mobil de Frontignan](#)

UNE RÉUSSITE OPÉRATIONNELLE

La mise en place de cet outil constitue une réussite opérationnelle. Il répond pleinement aux besoins du chantier. Les données sont centralisées, stockées de manière pérenne et accessibles depuis une plateforme unique. Les prochaines étapes visent à renforcer l'efficacité et la portée de l'outil en le rendant modulable afin de pouvoir l'adapter à tous types de chantiers.

- 1 000 jours de suivi en temps réel des émissions de poussières
- 6 000 bordereaux de suivi des déchets émis sur Trackdéchets (BSD)
- 4 600 fiches de prélèvement digitalisées
- 1 000 campagnes de suivi odeur réalisées sur la plateforme
- 60 000 résultats d'analyses de sols, d'eau et d'air bancarisés
- 16 000 mouvements de terres renseignés

Pauline KERSAHO, Antea Group

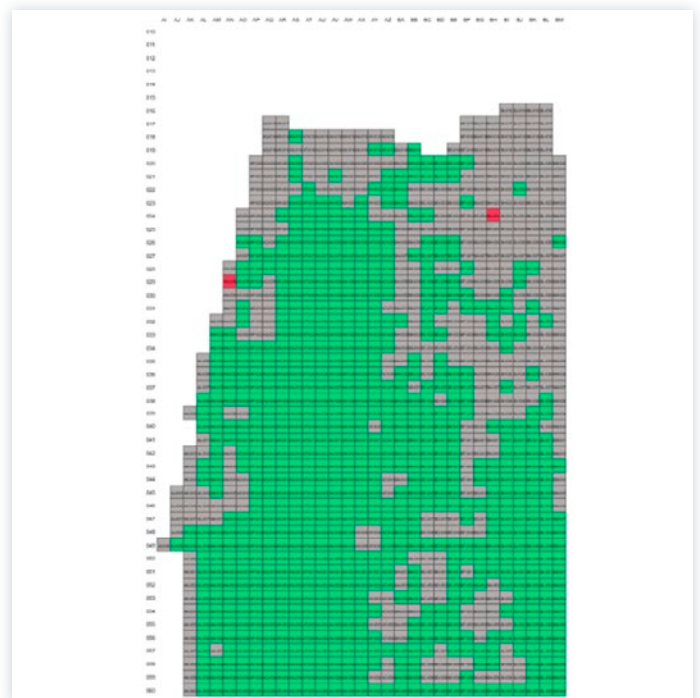


Figure 4 : Visualisation 2D de l'avancement des excavations

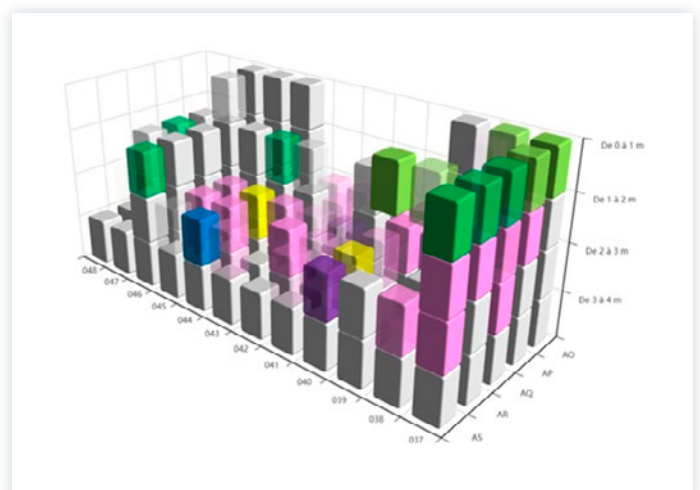


Figure 5 : Visualisation 3D de l'avancement des excavation

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

VOLUMES DE TERRES À DÉPOLLUER : UNE APPROCHE NOVATRICE PAR MODÉLISATION ANALYTIQUE INVERSE

L'estimation et la localisation précise des volumes de sols contaminés est un défi majeur, pour toutes les parties impliquées dans la gestion de sites pollués. Cela peut s'avérer complexe compte tenu de l'hétérogénéité du sous-sol, et générer des impacts financiers, opérationnels, sanitaires et environnementaux considérables. Cet article présente une nouvelle méthode pour estimer le volume total de sol impacté, qui s'appuie sur une modélisation inverse utilisant une solution analytique de l'écoulement et du transport en zone non saturée. Cette méthode a été validée sur des cas virtuels et 32 cas réels.

LA COMPLEXITÉ DE LA POLLUTION DES SOLS

Depuis les années 1990, l'étalement urbain en France a confronté les professionnels de l'urbanisme et de la construction à des problématiques de pollution des sols et des eaux souterraines. Ces pollutions sont souvent liées à d'anciennes activités industrielles qui se sont succédé pendant des décennies. La méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués de 2017 définit la notion de «pollution concentrée», dont la suppression est prioritaire, comme un volume de milieu souterrain avec des concentrations significativement supérieures aux environs.

La quantification des volumes de terres affectés par des polluants représente un défi scientifique complexe. Actuellement, les deux approches les plus utilisées dans la littérature scientifique et/ou par les professionnels sont :

- les interpolations spatiales déterministes (méthode des plus proches voisins, radial basis fonction, triangulation...),
- et la géostatistique par krigeage dont les simulations géostatistiques.

Ces méthodes peuvent donner des résultats satisfaisants mais comportent des limites telles que l'absence de quantification de l'incertitude pour les méthodes déterministes ou un effet de lissage assez récurrent pour la plupart des autres méthodes. Le choix de la méthode est primordial, il dépend notamment du contexte, des polluants. Un nombre

d'observations minimum est en outre nécessaire pour la géostatistique...

Un état de l'art a permis de recenser d'autres outils tels que :

- la modélisation numérique (modèle maillé avec élément fini) ; peu utilisée en zone non saturée en raison du travail important de calibration et d'obtention de données représentatives du milieu,
- la modélisation analytique qui offre une alternative d'application plus aisée, mais ne peut être employée efficacement pour des cas complexes présentant une hétérogénéité marquée.

L'objectif de ce travail est d'identifier un nouvel outil permettant de dimensionner une pollution dans les sols avec des limites moins contraignantes.

QU'EST-CE QU'UN MODÈLE ANALYTIQUE ?

Un modèle analytique est une formule mathématique exacte qui décrit un ou plusieurs phénomènes, comme la façon dont l'eau s'écoule, la façon dont les polluants se déplacent (advection, dispersion), s'attachent au sol (sorption) ou se dégradent... Elle est obtenue en résolvant des équations sous des conditions simplifiées, offrant une compréhension directe des relations entre les variables. Elle est rapide à calculer et sert souvent de référence pour valider des modèles plus complexes. Les modèles analytiques étant simplifiés, ils ne peuvent cependant pas reproduire des cas complexes présentant une hétérogénéité marquée.

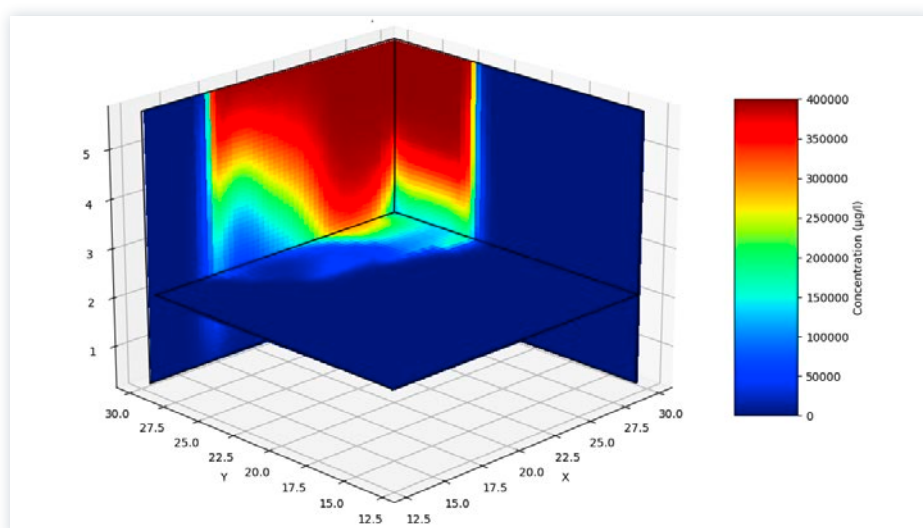


Figure 1 : Vue en plans du panache de pollution après deux ans pour le cas hétérogène n°3

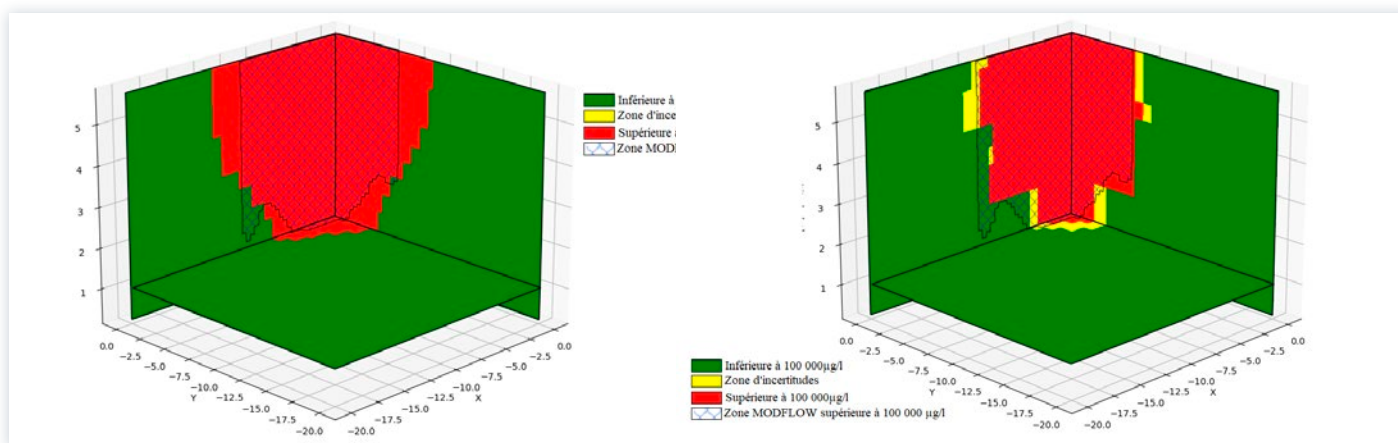


Figure 2a – 2b : Comparaison entre l'interpolation (à droite) et la modélisation analytique inverse (à gauche) avec un seuil de 100 000 µg/l pour le cas hétérogène n°3

SOLUTION RETENUE : L'INVERSION ET LA SEGMENTATION

Cette nouvelle approche propose de résoudre ce problème en appliquant la solution analytique séquentiellement sur de petits groupes de points de données. Les données sont triées selon la triangulation de Delaunay. Il en résulte plusieurs modèles locaux, qui sont ensuite combinés pour représenter l'hétérogénéité globale du milieu. Cette approche s'appuie aussi sur une étape d'inversion : les données observées servent à remonter aux paramètres (du modèle) qui en sont à l'origine. Le résultat final correspond à une carte de probabilité de dépassement de seuil obtenu à l'aide de l'ensemble des modèles inversés.

VALIDATION DE L'APPROCHE SUR DES CAS VIRTUELS

L'approche a été testée sur des scénarios virtuels de pollution (créés informatiquement), d'abord en milieu homogène, puis hétérogène, afin de comparer ses performances avec les méthodes d'interpolation classiques (Radial Basis Function, Modified Quadratic Shepard's, krigeage). Le volume réel de pollution étant connu dans ces cas, cela a permis une comparaison directe.

Dix échantillonnages différents ont été testés sur un cas hétérogène spécifique, et quatre autres cas synthétiques avec des hétérogénéités variées ont également été mis en œuvre (cf. **Figure 1**). Les résultats ont montré que la performance du modèle analytique

inverse est majoritairement supérieure aux méthodes d'interpolation. L'exception se produit uniquement dans des scénarios de très haute densité d'échantillonnage (81 points au total), où les interpolations classiques permettent d'affiner la caractérisation spatiale. Cependant, pour des raisons budgétaires, de telles densités sont rarement rencontrées en situation réelle. Un avantage notable de l'approche inverse est la stabilisation de l'erreur à partir d'un faible nombre de points de mesure (8 points).

La méthode proposée a montré une performance globalement meilleure que l'interpolation, avec une diminution significative de l'erreur moyenne d'estimation du volume pollué (de 47 % à 75 %). Sur 48 configurations comparatives, la méthodologie a fourni des résultats plus précis dans 45 de ces comparaisons. Un exemple de comparaison avec l'interpolation est fourni en **Figures 2a et 2b**.

DES RÉSULTATS PROBANTS SUR UN CAS RÉEL

Ce cas d'étude réel concerne un ancien site industriel contaminé par des hydrocarbures dont toutes les installations ont été démantelées. Le volume et l'étendue des contaminations ont été évalués au travers d'un diagnostic initial et approfondi.

Le diagnostic initial a combiné une étude historique (révélant une ancienne cuve de fioul aérienne ou semi enterrée de 7 000 litres) et des investigations de terrain. Deux sondages initiaux ont mis en évidence des concentrations d'hydrocarbures C10-C40

allant de 1 790 mg/kg MS à 4 860 mg/kg MS, entre 1 et 2 mètres de profondeur. Des observations organoleptiques et des mesures au PID ont confirmé la contamination. Les lithologies étaient dominées par des argiles sableuses, avec une nappe phréatique à environ 2 mètres. Des investigations complémentaires ont caractérisé un transfert des contaminations vers les eaux souterraines (4 200 µg/l en HCT C10-C40) et les gaz du sol. La **figure 3** présente les teneurs en hydrocarbures C10-C40, entre 1 et 2 m de profondeur à l'issue du diagnostic approfondi.



Figure 3 : Cartographie des résultats pour l'horizon 1-2 m

Un plan de gestion a été établi, fixant un seuil de pollution concentrée à 500 mg/kg MS pour les hydrocarbures C10-C40. Ce seuil a été déterminé par la convergence de plusieurs méthodes issues du guide UPDS¹. Les données statistiques initiales provenant de la zone (comportant un faible nombre de valeurs (13)) ont montré une forte asymétrie des concentrations (moyenne 1 865 mg/kg MS, médiane 108 mg/kg MS).

Des interpolations déterministes (plus proches voisins et polygones de Voronoï) ont été utilisées pour cartographier la pollution sur l'horizon 1-2 m, estimant des volumes de 645 m³ et 993 m³ respectivement à cette profondeur pour les deux interpolations. Ces méthodes ont révélé des incertitudes dues au manque de points de mesure dans certaines zones. La géostatistique n'a pas été appliquée en raison d'un nombre insuffisant d'observations.

La stratégie de réhabilitation retenue fut l'excavation avec tri et traitement hors site. Une caractérisation affinée par maillage a été réalisée avant les travaux. Un volume plus précis de 730 m³ de sol à excaver (concentrations > 500 mg/kg MS entre 0 et 2 m) a été déterminé.

La modélisation analytique inverse, réalisée a posteriori des travaux, aurait pu être mise en œuvre dès l'élaboration du plan de gestion. La calibration des sous modèles locaux a été menée avec succès pour les zones concernées. L'estimation du volume total de sol contaminé par la modélisation analytique inverse s'est située entre 867 m³ et 1332 m³ (médiane de 1093 m³). La **figure 4** présente la cartographie obtenue entre 1 et 2 m de profondeur.

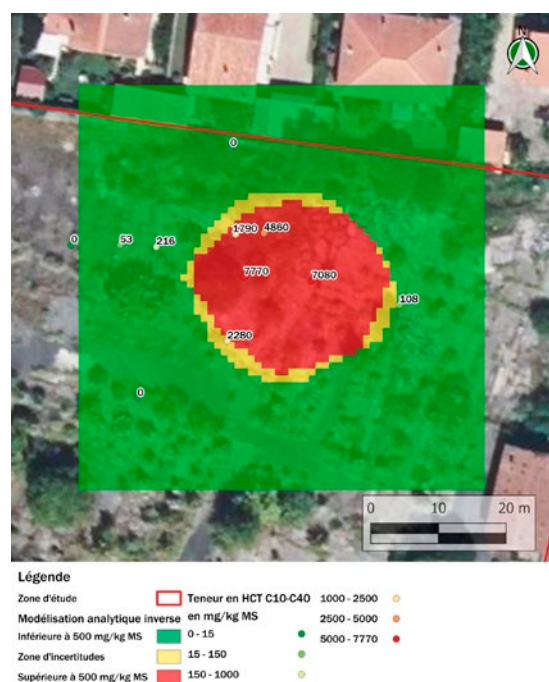


Figure 4 : Vue 2D à 1,5m de profondeur de l'estimation des concentrations en hydrocarbures C10-C40 supérieures à 500 mg/kg MS avec la modélisation analytique inverse

Les travaux de dépollution ont été réalisés et ont nécessité 3 reprises supplémentaires de la fouille initialement prévue. Le volume final terrassé a été de 1040 m³. Malgré les reprises, des dépassements étaient toujours relevés sur les parties nord et ouest de la fouille. La comparaison des méthodes d'estimation des volumes avec les excavations réelles a démontré la plus grande fiabilité de la modélisation analytique inverse. Cette dernière a présenté le pourcentage d'erreur le plus faible (34 %) par rapport au volume réellement terrassé et pollué. Les méthodes d'interpolation traditionnelles ont montré des erreurs significativement plus élevées (48,1 % à 99,8 %). La caractérisation par maillage pré-travaux affichait une erreur similaire (34 %) alors qu'elle comportait des informations supplémentaires.

CONFIRMATION DE LA MÉTHODE ET APPLICATION À DIVERS CAS RÉELS

Dans l'objectif de conforter les résultats acquis précédemment, la méthode a été testée sur différents jeux de données réelles. À cette fin, une base de données a été spécialement conçue à partir de 32 sites en France métropolitaine. Les polluants majoritaires sont les hydrocarbures. En moyenne, 9,8 sondages et 14,2 prélèvements ont été effectués par site pour dimensionner la fouille à terrasser. Les lithologies dominantes sont des sables et des remblais hétérogènes. Les fouilles ont une surface moyenne de 275 m² et une profondeur moyenne de 2,8 m, avec un volume moyen de 787 m³, témoignant d'une grande diversité d'opérations. 41 des 195 bords de fouille n'ont pas atteint l'objectif de réhabilitation. Aucune corrélation significative n'a été déterminée entre le nombre de prélèvements réalisés et la conformité en bord de fouille.

L'approche par inversion et segmentation a été mise en œuvre sur les 32 cas réels. La modélisation analytique inverse montre une correspondance moyenne de 80 % avec les prélèvements des bords de fouille (82 % par site). Concernant la

conformité aux seuils de dépollution, la méthode a sous-estimé la concentration dans 7 des 41 bords de fouille non conformes (17,1 % d'erreur). Inversement, elle a surestimé la concentration dans 33 des 154 prélèvements initialement conformes (21 % d'erreur).

L'analyse de la correspondance entre la modélisation et les lithologies suggère une influence de la nature géologique. Les limons affichent les taux de correspondance les plus élevés (90 %), tandis que les argiles ont les plus faibles (74,3 %), indiquant une complexité accrue pour les milieux plus fins.

De manière contre-intuitive, aucune corrélation significative n'a été rencontrée entre la densité de sondage et l'efficacité de la méthode. Les sites avec un maillage d'échantillonnage plus serré n'ont pas montré de meilleures performances, voire parfois des résultats moins bons.

UN AVANTAGE SIGNIFICATIF POUR ESTIMER LES VOLUMES DE TERRES POLLUÉES

La modélisation analytique inverse a montré un intérêt important sur les cas fictifs et réels. Elle s'est avérée plus robuste que les autres méthodes d'interpolation, pour lesquelles les erreurs d'estimation variaient fortement en fonction du nombre de points de mesure. Le pourcentage d'erreur est resté beaucoup plus stable avec l'approche de modélisation inverse qu'avec les trois méthodes d'interpolation traditionnelles, dont les erreurs variaient fortement en fonction du nombre et de l'emplacement des points. Son application sur des cas réels montrent également une corrélation importante des données acquises sur le terrain avec la méthode (80 % de corrélation). Cette approche novatrice offre donc une estimation plus précise et optimisée des volumes de terres polluées, essentielle pour la maîtrise des coûts et l'efficacité des opérations de dépollution. Compte tenu de ces résultats encourageants, il est prévu de développer un logiciel en 2026.

Alexis GRIS, APAVE

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

TRANSITION NUMÉRIQUE ET GÉOSTATISTIQUE PROBABILISTE EN SITES ET SOLS POLLUÉS

APPORT MÉTHODOLOGIQUE À L'ÉVALUATION DES PASSIFS ET À L'AIDE À LA DÉCISION - RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR UN SITE INDUSTRIEL À ROUEN

Les études de sites et sols pollués reposent historiquement sur des campagnes d'investigation ponctuelles visant à caractériser la présence, la nature et l'extension des contaminations dans les milieux. Si ces approches ont permis de structurer les pratiques, elles montrent aujourd'hui leurs limites lorsque l'hétérogénéité spatiale est marquée et que les enjeux de gestion nécessitent une quantification fine des volumes et des masses de polluants.

Les approches déterministes, fondées sur des représentations bidimensionnelles et des raisonnements par dépassement ponctuel de seuils, peinent à intégrer explicitement l'incertitude liée à l'échantillonnage discret. Cette limite se traduit fréquemment par des sous-estimations ou des surestimations des passifs environnementaux, avec des conséquences directes sur la conception des scénarios de gestion et le dialogue avec les autorités.

Dans ce contexte, la transition numérique appliquée aux études SSP constitue un levier méthodologique permettant de structurer la donnée, de quantifier l'incertitude et d'objectiver la décision.

STRUCTURATION DE LA DONNÉE TERRAIN : APPORT DE TERRAINDEX

La qualité d'une analyse spatiale repose sur la cohérence et la traçabilité des données d'entrée. En SSP, la donnée terrain est par nature hétérogène : campagnes multiples, profondeurs variables, méthodes de prélèvement différentes.

Dans les études menées par RSK Environnement, la structuration de la donnée est assurée dès la phase terrain à l'aide de l'outil TerraIndex. Cet outil permet de digitaliser les journaux de sondage, d'associer de manière fiable les résultats analytiques aux profondeurs et aux lithologies, et de garantir la cohérence spatiale des jeux de données. De mise en œuvre simple, il permet à nos opérateurs sur site de mettre en valeur leur savoir-faire dès la phase terrain (cf. figure 1). Les retours d'expérience montrent que cette structuration amont permet non seulement de réduire les temps de consolidation, mais

surtout de disposer de données immédiatement exploitables pour des traitements géostatistiques avancés. Elle constitue un prérequis indispensable à l'évaluation volumétrique et massique des pollutions.

APPORT DE LA GÉOSTATISTIQUE PROBABILISTE ET MISE EN ŒUVRE AVEC KARTOTRAK

Les traitements géostatistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Kartotrak, permettant la mise en œuvre opérationnelle du krigeage tridimensionnel et le calcul de probabilités de dépassement de seuils.

Contrairement aux approches déterministes, la géostatistique probabiliste permet d'estimer, en tout point du domaine étudié, une concentration moyenne associée à une variance. Elle offre ainsi la possibilité de raisonner en termes de probabilité de dépassement et non plus uniquement en termes

de dépassement observé.

L'un des apports majeurs de Kartotrak réside dans la capacité à raisonner directement en volumes et en masses de polluants, en intégrant explicitement l'incertitude et la distribution tridimensionnelle des concentrations.

CAS D'APPLICATION – SITE INDUSTRIEL À ROUEN

Le cas étudié concerne un site industriel de type station-service en exploitation, localisé dans l'agglomération de Rouen. Des investigations antérieures avaient mis en évidence une pollution résiduelle en hydrocarbures totaux (HCT), sans permettre une estimation robuste de son extension latérale et verticale. Les données disponibles présentaient une hétérogénéité marquée en termes de densité d'échantillonnage et de profondeurs investiguées, limitant la capacité à évaluer de manière fiable les volumes et les masses de polluants concernés.



Figure 1 : mise en œuvre de l'outil TerraIndex sur le terrain (RSK Environnement)

MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DES VOLUMES ET BILANS DE MASSE

L'ensemble des données analytiques a été intégré dans Kartotrak afin de produire un modèle géostatistique tridimensionnel. Un seuil de concentration en HCT de 500 mg/kg de matière sèche a été retenu, en cohérence avec les critères d'orientation vers une filière de type ISDI.

Pour chaque voxel du modèle, la probabilité de dépassement du seuil ainsi que la concentration moyenne estimée ont été calculées. Les volumes de sols impactés ont ensuite été déterminés selon différents niveaux de probabilité (30 %, 50 % et 70 %) et peuvent être ainsi visualisés au travers des différentes vues applicatives 2D/3D (cf. Figure 2).

Les bilans de masse ont été calculés en intégrant la densité apparente des sols et l'ensemble du domaine modélisé, permettant d'estimer les masses totales de polluants associées à chaque scénario.

RÉSULTATS CHIFFRÉS ET DISCUSSION

Les résultats mettent en évidence une forte sensibilité des bilans de masse à la densité de données et au niveau de probabilité retenu. L'intégration des données issues de la campagne complémentaire conduit à une augmentation significative des masses de polluants estimées, avec des écarts pouvant atteindre un ordre de grandeur entre les scénarios initiaux et enrichis.

Ces différences ont un impact direct sur les stratégies de gestion envisageables, notamment en termes de volumes à traiter, de coûts et de choix de filières.

APPORTS ET LIMITES DE L'APPROCHE

L'approche géostatistique probabiliste permet de rendre explicite l'incertitude et de la traduire en indicateurs opérationnels pour la décision. Elle ne supprime pas l'incertitude

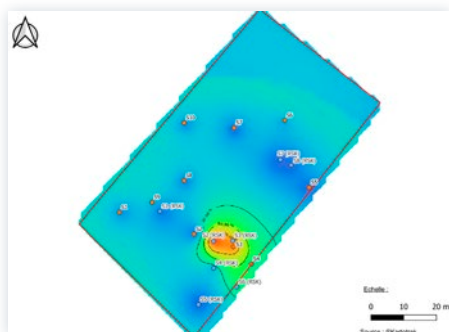
inhérente aux données ponctuelles, mais la rend intégrable au raisonnement technique. Cette méthode reste néanmoins dépendante de la qualité des données d'entrée, des hypothèses de modélisation et de la représentativité des campagnes d'investigation. Elle constitue un outil d'aide à la décision nécessitant une interprétation critique par l'ingénieur SSP.

CONCLUSION

Ce retour d'expérience illustre l'apport d'une chaîne de valeur numérique intégrée, depuis la structuration de la donnée terrain avec TerraIndex jusqu'à l'analyse géostatistique probabiliste mise en œuvre avec Kartotrak. Ces outils constituent des leviers méthodologiques au service de l'ingénieur SSP, en renforçant la robustesse et la transparence de l'évaluation des passifs environnementaux.

Julien Breton, RSK Environnement

Figure 2 : cartographie 2D/3D des taux de probabilité de dépassement de seuil en HCT C10-C40



// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

UNE DÉPOLLUTION TOUJOURS PLUS POINTUE GRÂCE À LA TECHNOLOGIE NUMÉRIQUE

Être à la pointe de la technologie est aujourd'hui indispensable pour perdurer sur le marché de la dépollution. Terminés les petits chantiers ne nécessitant ni dimensionnement poussé, ni procédures délicates, ni accréditations... Le métier de la dépollution a évolué en une trentaine d'années.

À ce jour, il est impensable de ne pas réfléchir un projet en amont, et ce jusque dans les moindres détails. Pourquoi ? Parce que les acteurs du métier ont développé une multitude d'outils, techniques et numériques permettant d'appréhender un projet dans son ensemble avec le meilleur ratio technico-économique. Parce que les problématiques sont de plus en plus complexes, et que sans ces outils, il n'est pas possible d'y remédier. Qu'il s'agisse de gestion de terres hors site ou de dépollution in situ ou sur site, ces outils permettent d'atteindre l'objectif, de respecter les engagements, à un coût toujours plus compétitif, en choisissant les meilleures stratégies, en dimensionnant correctement, en effectuant un suivi précis, le tout avec un impact environnemental minimal !

LES BASIQUES DU MÉTIER

Quel que soit le domaine d'activité, les premiers outils sont généralement créés pour se prémunir contre la redondance de procédures chronophages ou remédier aux lacunes, dans les protocoles de réalisation, qui révèlent un besoin de suivi accru. Optimiser la mise en œuvre, assurer une traçabilité, économiser l'énergie, gagner du temps et donc de l'argent !

Chez ORTEC SOLEO, comme chez tous nos confrères, avec un bon vieux tableur Excel®, nous avons fait des miracles, et généralement tout part de là : fichiers de dimensionnement par technique, fiches d'identification de déchets, analyses des risques, fiches de monitoring... nous permettent déjà de faire le job ! Avec un outil comme Surfer®, il est possible

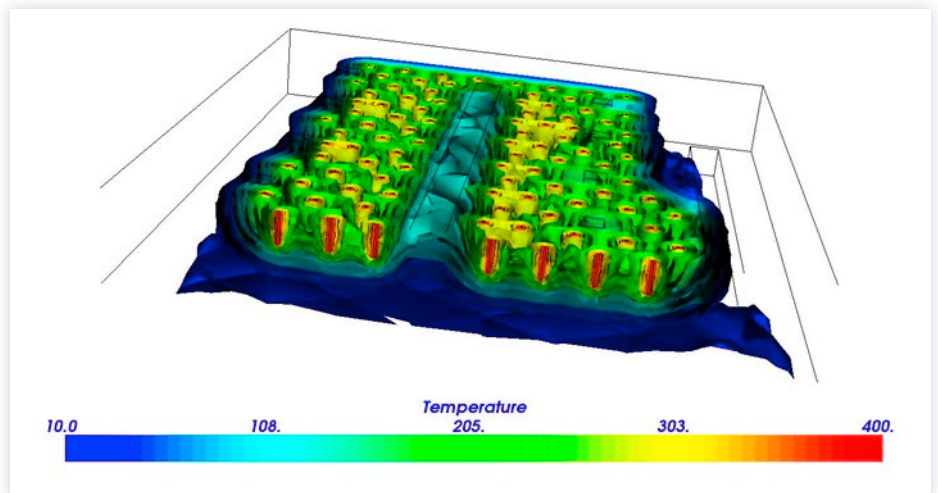


Figure 1. Exemple de simulation de chauffage des sols par désorption thermique (logiciel ELMER GUI)

de simuler et de suivre nos traitements, que ce soient les cartes d'isoconcentrations en polluants, la piézométrie, ou encore la température de chauffage des sols en désorption thermique (cf. Figure 1). Le logiciel Autocad est également un allié précieux pour la réalisation de nos plans de chantier et PID (Piping and Instrumentation Diagram). Ce sont certes des outils généralistes mais qui permettent de visualiser et diffuser plus efficacement les données.

Il y a plusieurs années, ORTEC SOLEO a également créé une application interne, le «**dossier de suivi de chantier**» : à partir d'un questionnaire qui permet de déterminer les particularités d'un chantier de dépollution, l'application sort tous les éléments essentiels à la préparation et au suivi de chantier, en particulier pour être conforme aux référentiels MASE et LNE SSP :

- Une check-list des tâches à réaliser et documents à compléter ;

- Une liste des documents qui doivent être consultables sur chantier ;
- Les procédures/ instructions ;
- Une check-list du matériel pour ne rien oublier ;
- Une trame pour les instructions d'évacuation et d'alerte en cas d'accident, à afficher sur le chantier.

Cette application est désormais utilisée systématiquement en amont et pendant toute la durée des projets et nous permet de gagner en performance tout en sécurisant nos opérations !

Enfin, afin d'assurer la bonne réalisation des audits internes de chantiers, ORTEC SOLEO utilise les applications APIA® : audits, vigimutes, causeries, visites de sites, remontées d'évènements, ou KIZEO® : documents d'exploitation, journaux de chantier, fichiers de monitoring... l'ensemble est réalisé par les opérateurs directement sur le terrain via leur smartphone ou tablette.

LES TERRES POLLUÉES : GESTION ET TRAÇABILITÉ

Qui dit dépollution, dit forcément gestion de terres polluées. Au travers de son réseau de plateformes de traitement de terres, VALORTERRE et BIOGENIE, le groupe ORTEC utilise l'application «**HESTIA DEPOL**», un outil de gestion globale de nos plateformes de traitement de terres polluées :

- Gestion de la traçabilité : FID, CAP, pesées des entrées et sorties de matériaux, déclarations administratives automatisées (TRACKDECHETS, RNDTS, GEREP) ;
- Gestion de l'exploitation : planification des opérations de traitement, suivi des lots, gestion automatisée des résultats d'analyses ;
- Gestion commerciale (portail client, devis, CRM).

Pour apporter plus de fluidité sur le terrain, l'application «**GAIA**» offre une gestion connectée des mouvements de terres au travers d'un outil de cartographie et de monitoring des différents volumes de terres impactées. Il permet ainsi de gérer et optimiser en temps réel les mouvements de terres sur les sites en reconversion (cf. figure 2).

DES UNITÉS DE TRAITEMENT À LA POINTE DE LA TECHNOLOGIE

Avec ses deux Centres Techniques à Meyzieu et Rennes, ORTEC SOLEO figure parmi les spécialistes reconnus en traitements in situ et ce, au travers de ses unités de traitement spécialement dimensionnées et fabriquées au cas par cas pour chaque chantier. Une équipe dédiée est en charge de ce secteur d'activité, avec physicienne, électromécanicien, automaticien, chefs de chantier et conducteurs de travaux. Les outils numériques sont au cœur de notre activité au travers des opérations de :

- Conception et ingénierie process (automatisme, programmation, armoires électriques, hydraulique process, ...) ;
- Construction et revamping des unités de traitement ;
- Assistance à la mise en service et à l'exploitation des unités ;
- Aide au dimensionnement.

Depuis de nombreuses années, ORTEC SOLEO adapte sa réponse à la demande du

client et propose des unités allant des plus basiques aux plus élaborées avec **automate de télégestion**, permettant un contrôle à distance des différents organes (pompes, turbines, électrovannes, débitmètres électroniques...) et l'optimisation intégrée de la consommation énergétique des installations. L'ensemble des systèmes sont développés avec des fournisseurs spécialisés tel que PL SYSTEMS ou IFM ELECTRONIC...

Aujourd'hui les chefs de projets peuvent intervenir à distance pour régler un débit, diagnostiquer une panne, redémarrer une unité. Les alertes en cas de dépassement de seuils sont gérées en temps réel. Les clients peuvent également avoir accès au

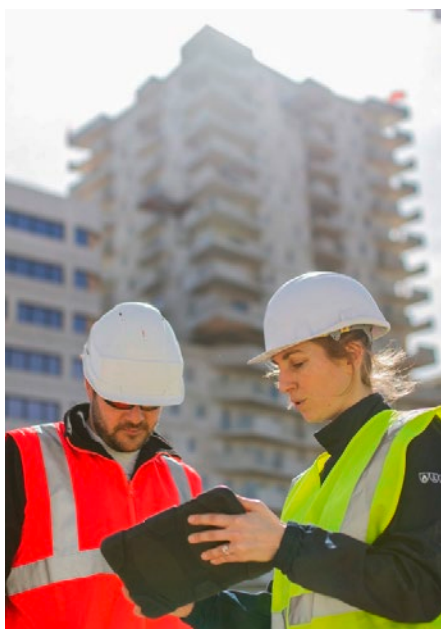


Figure 2. Exemple de chantier de gestion de terres

synoptique de traitement indiquant précisément les débits d'exploitation, volumes d'effluents pompés, températures de chauffage, concentrations semi-quantitatives en COV en entrée / sortie de traitement...

ORTEC SOLEO a également développé l'outil **SMART SH®**, solution de pilotage pour chauffage. Le but de cet outil est de pouvoir utiliser le maximum de la puissance électrique installée. Cet outil a été développé pour le traitement par désorption thermique où la demande énergétique est grande et où la répartition du chauffage est une des clés de la réussite du traitement (cf. Figure 3).

UNE CALCULETTE CARBONE ET DES PROJETS COLLABORATIFS ENGAGÉS

À l'heure où la profession systématise la comptabilité carbone de ses chantiers, ORTEC SOLEO met en œuvre au travers du Plan Climat du groupe ORTEC, tous les engagements de sa Charte chantier bas carbone afin de limiter les émissions au niveau énergie (cf. Figure 4), mobilité, achats, déchets, numérique et préservation de la biodiversité.

Notre outil **CALCULETTE CARBONE** (cf. Figure 5) permet d'évaluer la part des différents modules de traitement dans le bilan global du chantier.

ORTEC SOLEO est également porteur du projet **CO2POL** mené en partenariat avec TAUW, avec le concours de l'ensemble de la profession SSP (EPIC et organismes, Maîtres



Figure 3 - Armoire de régulation de chauffage pour désorption thermique avec automate de télégestion



Figure 4 - Unité de traitement solaire connectée pour pompage / traitement d'effluents

d'ouvrages, Bureaux d'études, Laboratoires, Sociétés de travaux de dépollution via l'UPDS). L'objectif est de faire du bilan carbone un des critères objectifs de comparaison pour les donneurs d'ordre dès le Plan de Gestion et jusqu'à la mise en œuvre des travaux :

- En définissant une méthodologie et un périmètre commun au secteur SSP, utilisable par tous, fiable et comparable, pour calculer les bilans d'émissions de GES ;
- En donnant des facteurs d'émission de référence couvrant les principales techniques de dépollution et basés sur l'étude de chantiers réels et finalisés.

Le projet intègre le calcul du bilan carbone de 51 chantiers cas réels avec établissement des valeurs de référence. Un guide méthodologique public est à venir en 2026 comprenant :

- Périmètre du calcul des bilans GES en SSP avec une table de référence par technique ;
- Méthodes, outils, hypothèses, décisions-REX du groupe d'experts (résultats en $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$ ou tonnes ou m^2 de terres traitées ou par k€ de traitement...);
- Identification des postes les plus

émissifs et voies d'optimisation (sobriété énergétique, économies d'énergies, énergie bas-carbone...).

La comptabilité carbone officielle d'ORTEC SOLEO est effectuée via l'outil **TENNAXIA** au travers duquel sont identifiées et comptabilisées nos actions "vertueuses", ou émissions évitées au niveau d'actions phares sur les thèmes suivants :

- Engins de chantier, manutention ;
- Énergie ;
- Transport de marchandises / terres ;
- Déplacements de personnels ;
- Toute autre action bénéfique

L'IA PEUT-ELLE VRAIMENT NOUS « MÂCHER LE TRAVAIL »

Il est certain que oui ! De là à remplacer l'homme et son « flair » pour sentir ou pas une stratégie, non, mais les plus rétrogrades doivent se rendre à l'évidence : aujourd'hui l'IA utilisée à bon escient est une alliée précieuse pour nous aider à dépouiller les dossiers et aider à la rédaction.

La solution IA **MAISTR'O** est en cours de développement par ORTEC SOLEO. Cet assistant entraîné spécifiquement pour la dépollution et sur nos bases de connaissances internes permet :

- De synthétiser rapidement un dossier d'Appel d'Offre et de l'interroger pour rechercher les infos utiles ;
- De rédiger des paragraphes techniques pour nos offres sur la base d'une bibliothèque constituée de nos mémoires techniques ;
- De rédiger des paragraphes pour les procédures techniques.

Le tout vérifié, amendé et validé par la main et « l'intelligence humaine ».

ET APRÈS ?

Qui sait, nous sommes constamment à la recherche de nouvelles solutions techniques pour dégrader de nouvelles molécules, terrasser plus vite, économiser notre temps, notre argent... Chez ORTEC tous les ans, le challenge **INNOVO** récompense les meilleures idées des salariés proposant des solutions concrètes, créatives et réalisables pour transformer nos façons de travailler, améliorer nos services et faire évoluer notre quotidien sur le terrain. Et bon nombre des outils précités sont issus du cerveau humain d'un salarié... pour l'instant !

Carole MARCON, ORTEC SOLEO

ÉMISSIONS TOTALES DU CHANTIER: 19 946 kg CO₂e
± 12 505 kg CO₂ (i.e = 62,69 %)

Soit,
Par tonne de terres traitées: 8,52 kg CO₂e/t
Par mètre carré de sols traités: 39,89 kg CO₂e/m²
Par keuro dépensé: 113,33 kg CO₂e/k€

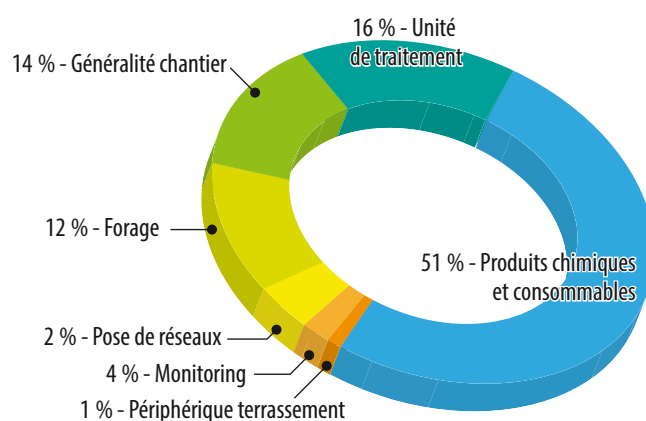


Figure 5 - Part des différents modules dans le bilan carbone du chantier

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

LE NUMÉRIQUE AU CŒUR D'UN GRAND PROJET DE DÉPOLLUTION

Lorsqu'un très grand site industriel cesse son activité, la gestion de son empreinte environnementale, tant en phase diagnostic qu'en phase travaux, entraîne la production d'un nombre considérable de données. L'utilisation des outils numériques permet une meilleure capitalisation de la donnée, un suivi quasi en temps réel de l'avancement des travaux et une meilleure communication au niveau de l'équipe projet et des parties prenantes. Voici un panorama des usages numériques pour un grand projet de remédiation.



INTRODUCTION

VEOLIA | Remédiation est intervenu depuis 2008 sur un très grand site industriel dont les sols et les eaux souterraines étaient pollués par des hydrocarbures et des COHV. Après un traitement in-situ initial, lorsque le site était encore en activité, la cessation d'activité a entraîné des travaux de dépollution d'une ampleur particulière : 212 000 m³ de sols excavés, 519 m³ d'HC écrémés, 108 000 m³ de sols traités en biopiles, 24 000 m³ de sols traités par lavage, le tout sur une période de 4 ans. Face à des dizaines de milliers de données analytiques générées par ces opérations, le recours aux outils numériques s'est avéré indispensable. Voici une exploration de l'intégration de ces technologies depuis la phase d'appel d'offres jusqu'à la réception des travaux.

AU STADE DE L'APPEL D'OFFRES, UN INVESTISSEMENT QUI PEUT PAYER.

La caractérisation d'un site XXL, dont l'activité a perduré près d'un demi-siècle, doit s'accompagner naturellement d'un plan d'investigations hors norme. Dès le stade de l'appel d'offres, le plan d'échantillonnage transmis par le maître d'ouvrage a révélé un maillage rigoureux de 1 104 sondages sur l'ensemble du site avec une densification dans les zones d'intérêt. Au total, 6 833 échantillons de sols ont été analysés lors des investigations pour caractériser le site (cf. figure 1).

Devant une telle profusion de données, l'usage d'outils numériques adaptés à la gestion de données spatiales est apparu comme une évidence. Pour ce faire, un SIG (Système d'Information Géographique) a été spécialement développé sous "ArcGis Pro" pour gérer les données environnementales du projet. Cette approche permet de :

- Centraliser et organiser les informations géospatiales et alphanumériques,

- Assurer la continuité et la pérennité des données environnementales,
- Interroger la base de données via des requêtes spatiales et attributaires,
- Obtenir une discrétisation spatiales des données.

Pour parfaire et compléter l'analyse exploratoire des données, une visualisation en 3D de la qualité des sols a été réalisée via le logiciel «Kartotrak» (cf. figure 2).

En complément, la transposition des investigations en profondeur relative vers un système altimétrique en m NGF a permis l'élaboration du plan de terrassement prévisionnel (cf. figure 3). Les volumes de sols à excaver ont ainsi été estimés. Chaque maille à terrasser a été classifiée grâce à la caractérisation analytique précise et rigoureuse de la phase d'investigations, permettant l'identification du traitement adapté, en l'occurrence,



Figure 1 : Distribution spatiale des 1104 sondages à l'échelle du site

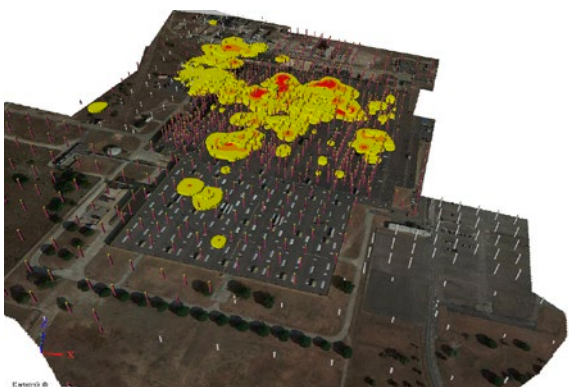


Figure 2 : Visualisation 3D de la contamination dans les sols



Figure 3 : Définition de plan de terrassement

par biotraitement ou lavage des sols avec hydrocyclone. Cette méthodologie peut être appliquée quel que soit le type de traitement des sols prévu : in-situ, on site, hors site ou mixte.

L'utilisation de ces outils numériques dès le stade de l'offre représente un investissement important pour nos entreprises de travaux de dépollution. Cela permet toutefois de mieux s'engager sur les volumes qui seront à traiter ainsi que sur la répartition de ces volumes vers les différentes techniques de dépollution retenues. Les outils de visualisation permettent également une meilleure communication avec l'ensemble des parties prenantes du projet et apportent de la pédagogie dans notre métier à un stade où la pollution est encore invisible.

EN PHASE RÉALISATION, LE SUIVI EN (QUASI) TEMPS RÉEL DE L'AVANCEMENT DES TRAVAUX

La transcription du projet prévisionnel vers le chantier en réalisation doit s'appuyer sur des outils et des technologies numériques pour planifier, suivre et contrôler les travaux réalisés.

L'élaboration du plan de terrassement en 3D sous le logiciel "Mensura" a permis de fiabiliser le phasage des excavations dans un repère XY avec une altitude Z en m NGF calée sur la topographie réelle du site. Ce plan de terrassement a été intégré directement dans les engins d'excavation assistés par GPS. Cela a permis un positionnement dans l'espace très précis, notamment en altitude, ce qui était nécessaire puisqu'une partie des sols excavés se situait sous le niveau des eaux souterraines (cf. Figure 4). Le contrôle du terrassement a été assuré ponctuellement par des relevés de géomètres et à l'aide de drones (cf. Figure 5). Pour les excavations sous eau, le contrôle a été réalisé par bathymétrie. Toutes ces mesures ont permis de valider les volumes excavés et l'atteinte des objectifs spécifiques à chaque fouille. Chaque lot terrassé a été ensuite orienté vers la technique de dépollution adaptée et sa traçabilité assurée par un tableur numérique.

Mémoire du site

Au-delà de la réponse à un besoin immédiat, les outils numériques assurent également une continuité et une pérennité de l'information via les services de stockage dématérialisés.

Un site de taille XXL présente un historique à la mesure de ses dimensions avec de nombreuses investigations, la mise en œuvre de mesures de gestion locales (écrémage d'huile, pompage de solvant, confinement hydraulique), la réalisation d'études environnementales comme une évaluation du risque. Ces données, une fois intégrées dans le même SIG, offrent un accès capitalisé à l'information sous forme de couches. Par exemple, il est possible de superposer le plan de terrassement réalisé, avec les investigations historiques tout en identifiant les machines et les réseaux en place lorsque l'usine fonctionnait plusieurs décennies avant (cf. Figure 6).

AU-DELÀ DE LA TECHNIQUE, LE NUMÉRIQUE AU SERVICE DU TRAVAIL EN ÉQUIPE

Avec la prolifération des solutions dématérialisées, nous assistons à la consolidation d'un écosystème entièrement numérique. Ce changement de paradigme a transformé la manière dont les entreprises opèrent, interagissent avec leurs clients et gèrent leurs processus internes. La digitalisation chez VEOLIA | Remédiation a permis une efficacité accrue, une réduction des coûts et une meilleure accessibilité à l'information et aux services. Les outils numériques ont facilité le travail d'équipe grâce à un ensemble d'outils bureautiques interconnectés qui associent la productivité, l'échange et la communication. Le partage avec le client et ses conseils est également facilité.

L'application des outils numériques est multiple : SIG, logiciels Mensura, Kartotrak, Feflow, pelles équipées de GPS, outils collaboratifs, ... Ils ont permis une meilleure appréhension du sujet, de meilleures visualisations des travaux à réaliser mais aussi des travaux en cours de réalisation et une collaboration accrue de l'ensemble de l'équipe travaillant sur le projet. Tous ces outils numériques impliquent une expertise développée par les collaborateurs de notre secteur d'activité.

Aujourd'hui, l'adoption de l'intelligence artificielle est un axe majeur de cette

transformation. Les outils IA, Veolia Secure GPT lancés dès 2023 et récemment Google Gemini, illustrent l'engagement de VEOLIA à exploiter les dernières avancées technologiques pour améliorer ses services et développer de nouvelles capacités. L'IA constitue un assistant complémentaire par exemple pour automatiser des tâches répétitives, analyser des données et offrir des interactions plus intuitives et personnalisées. Ces technologies sont en plein développement et leur application dans le domaine des sites et sols pollués permettra certainement de nouvelles avancées.

Philippe BOTELLA, VEOLIA | Remédiation
Françoise MANIGUET,
VEOLIA | Remédiation



Figure 4 : Excavation à la pelle long bras avec guidage GPS

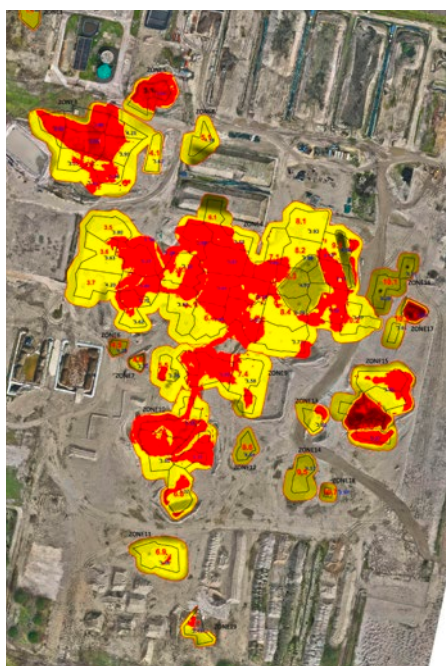


Figure 5 : Contrôle de l'emprise des excavations par drone

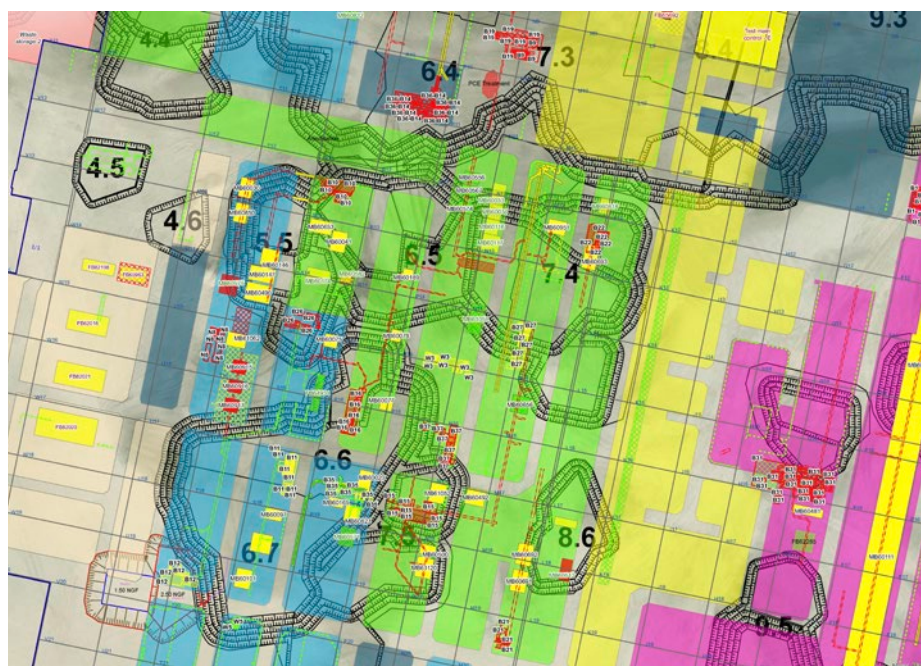


Figure 6 : Exemple de capitalisation des données numériques

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

L'INFORMATIQUE : COMMENT CONVERTIR UNE CONTRAINTE EN UTILITÉ

QUAND LES OUTILS NUMÉRIQUES DEVIENNENT DES ALLIÉS DE L'EXPLOITATION

Les outils informatiques sont souvent perçus comme une contrainte supplémentaire dans le quotidien des exploitants. Pourtant, bien conçus et bien intégrés, ils peuvent devenir de véritables leviers de performance, capables de guider les équipes, de sécuriser les processus et d'optimiser l'exploitation des plateformes de transit, de traitement de déchets et terres excavées.

La gestion d'une plateforme de traitement est un métier complexe, reposant sur une multitude de processus d'exploitation, de contraintes réglementaires et d'enjeux économiques.

Dans ce contexte, l'informatique est encore trop souvent considéré comme une charge additionnelle : saisies multiples, contrôles chronophages, obligations déclaratives lourdes.

Pourtant, les solutions numériques ont largement évolué. Lorsqu'elles sont pensées au service des métiers, elles permettent de transformer cette contrainte en avantage opérationnel, en facilitant le travail des équipes, en fiabilisant les données et en améliorant la performance globale de la plateforme.

LA NUMÉRISATION DES FLUX : LA BASE D'UNE EXPLOITATION MAÎTRISÉE

Le fonctionnement d'une plateforme peut être résumé à une succession de flux produits (cf. **Figure 1**) : pesée d'entrée, contrôle produit, stockage en attente de traitement, acceptation, traitement et valorisation, sortie de produit et vente de la valorisation. Comme tout édifice, la bonne gestion de ces flux repose sur des bases solides. L'outil informatique joue ici un rôle central.

De la réception à l'acceptation du produit

Dès la réception, l'application de pesée doit avant tout faciliter le travail de l'opérateur. Elle doit permettre : l'identification du CAP correspondant au produit reçu, l'indication de la destination du produit sur la plateforme, l'émission d'alertes (dépassement de quantités prévues, informations client, informations transporteur, contrôles visuels requis, vérifications administratives et financières) et l'enregistrement des quantités facturables.

Dans le cas d'un BSD TrackDéchets (obligatoire pour les déchets dangereux et pouvant aussi être utilisés pour les déchets non dangereux), l'outil doit également simplifier le contrôle du BSD et la déclaration de la réception dès la pesée. Dans les autres cas (Registres chronologiques ou Registre TrackDéchets), l'outil de pesée doit permettre de stocker toutes les informations utiles pour un usage ultérieur la déclaration au registre national.

Si un planning a été établi en amont, la réception doit pouvoir être automatiquement associée à ce planning. L'ensemble de ces informations doit ensuite être transmis à l'ERP, qui devient la source de référence.

Au moment du déchargement, certaines plateformes complètent la pesée par un contrôle visuel, parfois assisté par la prise de photos ou par des caméras de contenu de benne (ex : Depaul). Cette étape permet de refuser un produit ou de l'orienter immédiatement vers un stockage spécifique dès la réception.

Traçabilité et pilotage du traitement

L'étape suivante concerne l'acceptation du produit. L'outil informatique doit indiquer clairement à l'exploitation si le produit est conforme aux critères de la plateforme (tel que détaillé dans l'arrêté préfectoral) et si les concentrations en polluant respectent les seuils définis commercialement. Pour ce faire, les résultats des analyses effectuées sur échantillons doivent se charger et s'associer automatiquement au CAP. Au moment de l'acceptation des produits apportés par rapport à un CAP et en cas de non-conformité, des alertes doivent permettre au chargé d'exploitation de solliciter le service commercial pour une requalification ou un refus. Ces analyses peuvent servir aussi à qualifier la dangerosité du produit en utilisant les critères de l'exploitant.

Pendant la phase de traitement, l'outil doit : guider l'exploitation sur les étapes réalisées ou à venir, assurer une traçabilité complète des produits, gérer les opérations de traitement biologique ou mécanique et suivre les opérations de valorisation.

Enfin, la sortie vers les exutoires ou, si possible, la vente de produits valorisés (terre fertilisée, sous-produits de lavage ou criblage or fines, revalorisation des produits de déconstruction par concassage) vient clore le flux, garantissant une vision complète et maîtrisée du cycle produit.

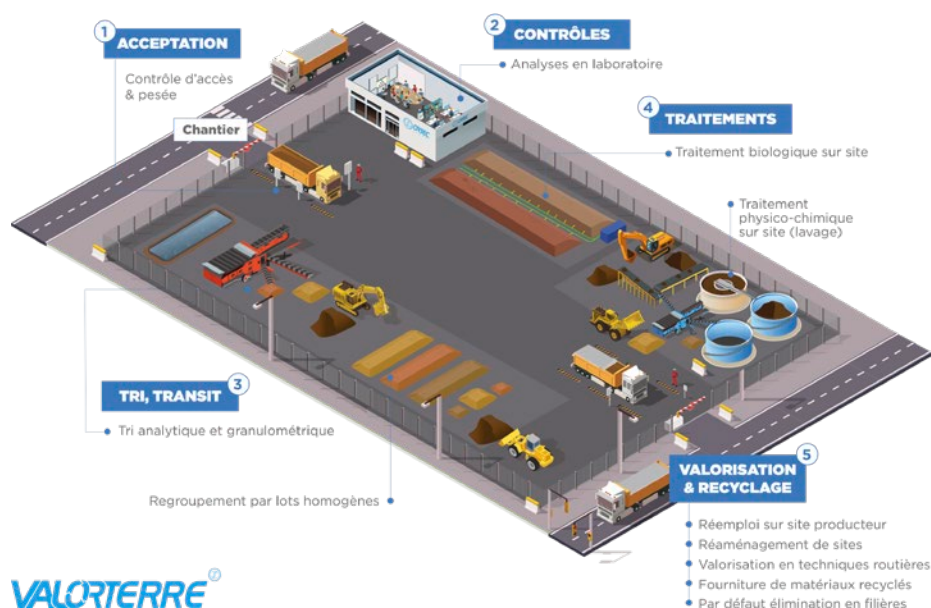


Figure 1 : Représentation schématique d'un centre de traitement par Ortec

UNE AIDE PRÉCIEUSE À L'OPTIMISATION DE L'EXPLOITATION

Une fois les produits reçus acceptés, le responsable d'exploitation s'appuie régulièrement sur des analyses de laboratoire pour suivre ses lots et leur évolution.

Au-delà du seul contrôle du produit pour respect des seuils réglementaires de la plateforme et des seuils commerciaux, ces données orientent également les choix de traitement (comme par exemple chez Biogénie et Valorterre) : traitement mécanique ou biologique, réduction de certains polluants sans en générer d'autres, optimisation des performances de traitement.

Si l'interprétation humaine reste aujourd'hui indispensable, l'intégration directe des outils numériques avec les laboratoires constitue un gain majeur : réduction des délais de commande d'analyses, affectation automatique des résultats au bon lot et alertes à destination de l'exploitation pour analyser les résultats et planifier les actions à venir.

Lorsque l'ensemble de ces étapes est correctement pris en charge par l'outil informatique, le responsable d'exploitation peut optimiser le fonctionnement de la plateforme, réduire la durée moyenne de stockage (et donc les coûts) et valoriser les produits bruts. L'équipe commerciale pourra quant à elle vérifier les accords commerciaux et renégocier en cas de seuil d'acceptation non respectés.

L'OUTIL NUMÉRIQUE : L'ALLIÉ DE VOS DÉCLARATIONS ET VOS CONTRÔLES

L'une des principales difficultés de la gestion d'une plateforme réside dans les obligations déclaratives et la fiabilité des informations transmises et présentées à la DREAL. Aujourd'hui, les outils informatiques peuvent s'interfacer avec : TrackDéchets, l'API SIRENE (vérification des informations à partir d'un SIRET), l'API Adresse (géolocalisation) et l'API Cadastre (récupération des parcelles).



Figure 2 : L'intelligence artificielle – l'aide à l'optimisation de gestion de plateforme de traitement

Ces interconnexions facilitent considérablement la préparation des registres réglementaires et des BSD TrackDéchets. L'outil doit également alerter sur les informations manquantes (CAP, chantier, données administratives), afin d'éviter toute perte de

temps lors des déclarations. Grâce à une bonne intégration de l'API TrackDéchets, il devient possible de consulter ou transmettre des informations sans passer par la plateforme TrackDéchets.

Enfin, la DREAL exige une connaissance précise des stocks, des entrées, des sorties et des transits pour fournir une traçabilité complète. Seul un outil informatique fiable permet de répondre efficacement à ces exigences. La qualité et la rapidité d'accès à l'information sont alors les meilleurs gages de crédibilité lors des contrôles.

ET DEMAIN : L'INTÉGRATION DE L'IA COMME SOURCE DE CONSEIL

L'intelligence artificielle s'intègre progressivement aux outils métiers. Aujourd'hui, certains modules sont déjà opérationnels : reconnaissance de plaques d'immatriculation, détection du contenu des bennes et aussi l'optimisation des trajets.

Pour l'instant, l'IA agit principalement comme un complément à la gestion humaine. Demain, en interconnectant les applications métiers avec des équipements tels que caméras thermographiques, capteurs de température, capteurs chromatiques ou même dispositifs d'odorat numérique, les outils pourront devenir de véritables sources de conseil et d'alerte pour l'exploitation.

Notre expérience montre qu'il n'existe pratiquement aucune limite aux besoins de gestion exprimés par les exploitants. Même en cherchant à être précurseurs et innovants dans nos applications HestiaDepol et FiPesée, ce sont souvent les utilisateurs eux-mêmes qui repoussent les frontières de l'imagerie numérique.

Philippe NOEL, The Fi Organization

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

APPORT DES Jumeaux Numériques de Sol

À LA CONCEPTION ET À LA RÉALISATION DES TRAVAUX DE DÉPOLLUTION

De la donnée brute à la décision opérationnelle

La gestion des sites et sols pollués repose historiquement sur une succession d'études environnementales, de campagnes de sondages, de rapports d'interprétation et de plans de gestion, souvent produits dans des environnements logiciels hétérogènes. Si la qualité scientifique de ces études n'est plus à démontrer, leur traduction opérationnelle sur les chantiers demeure un point de fragilité : incertitudes sur les volumes, difficultés d'appropriation par les équipes travaux, itérations longues entre études et exécution, et gestion complexe des aléas en phase chantier.

Dans ce contexte, les outils numériques offrent aujourd'hui une opportunité majeure : structurer, fiabiliser et rendre exploitable la donnée sol sur l'ensemble du cycle de vie d'un projet de dépollution, depuis l'étude jusqu'à la réalisation des travaux. C'est précisément l'ambition portée par la solution GROUND2IN, développée par BIMbyCO en

partenariat avec COLAS Environnement pour répondre aux besoins concrets des projets de réhabilitation de sites pollués.

L'exemple sur un chantier situé à Dunkerque illustre de manière particulièrement probante les bénéfices opérationnels de cette approche numérique, tant pour les traitements in situ que pour la gestion des excavations et des filières hors site.

GROUND2IN repose sur un principe fondamental : transformer les données ponctuelles issues des sondages en un modèle numérique continu du sous-sol, exploitable directement dans un environnement BIM (**cf. Figure 1**). Contrairement aux approches purement cartographiques, l'outil s'appuie sur un découpage du terrain en éléments finis tridimensionnels, intégrant la topographie, la stratigraphie et la nappe phréatique.

Les données d'entrée – coordonnées, lithologies, résultats analytiques – sont structurées

dans des formats standards (Excel, CSV, DWG) puis importées dans un modèle Revit dédié à la dépollution. À partir de cette base, différentes méthodes d'interpolation peuvent être mises en œuvre : interpolations linéaires (1/d, 1/d², plus proche voisin) ou géostatistiques par krigeage, avec définition explicite des lois de variogramme.

Cette transparence méthodologique constitue un point clé : les choix d'interpolation ne sont pas «boîtes noires», mais paramétrables, traçables et discutables, conformément aux attentes des autorités et des bureaux d'études spécialisés. Le modèle obtenu permet ainsi de représenter la répartition spatiale des polluants, couche par couche, tout en conservant un lien direct avec les données sources.

Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique qui permet d'estimer, entre les points de sondage, la distribution la plus probable d'un paramètre (par exemple une concentration en polluant), en tenant compte à la fois de la distance entre les mesures et de leur organisation spatiale.

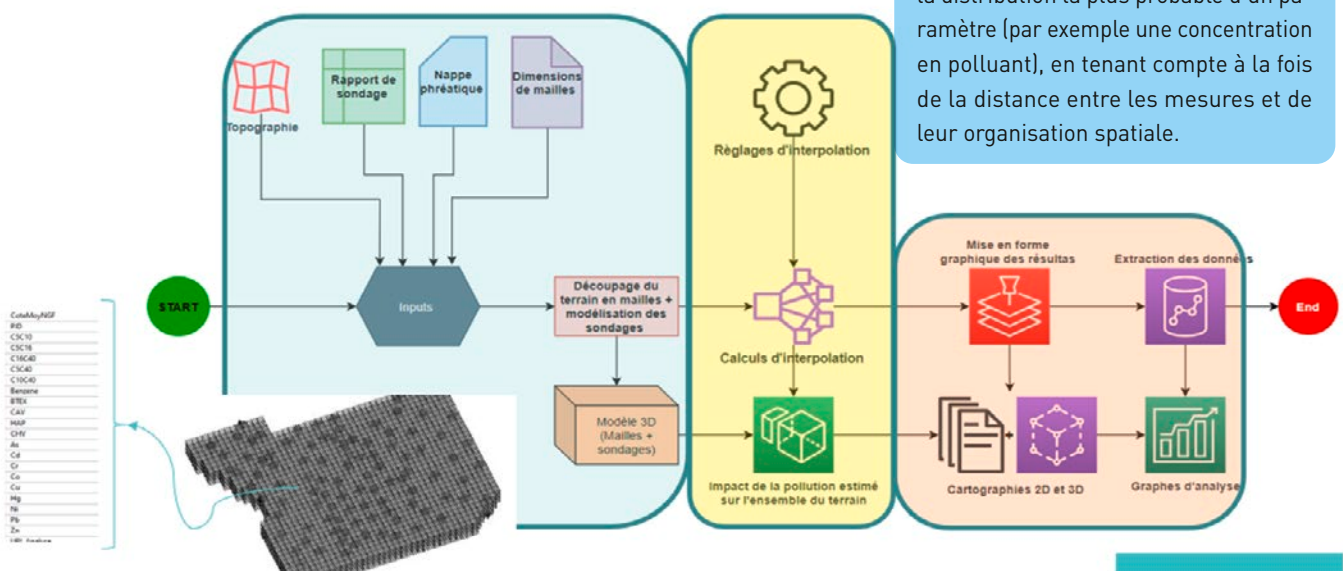


Figure 1 : GROUND2IN : un socle scientifique au cœur du BIM sol

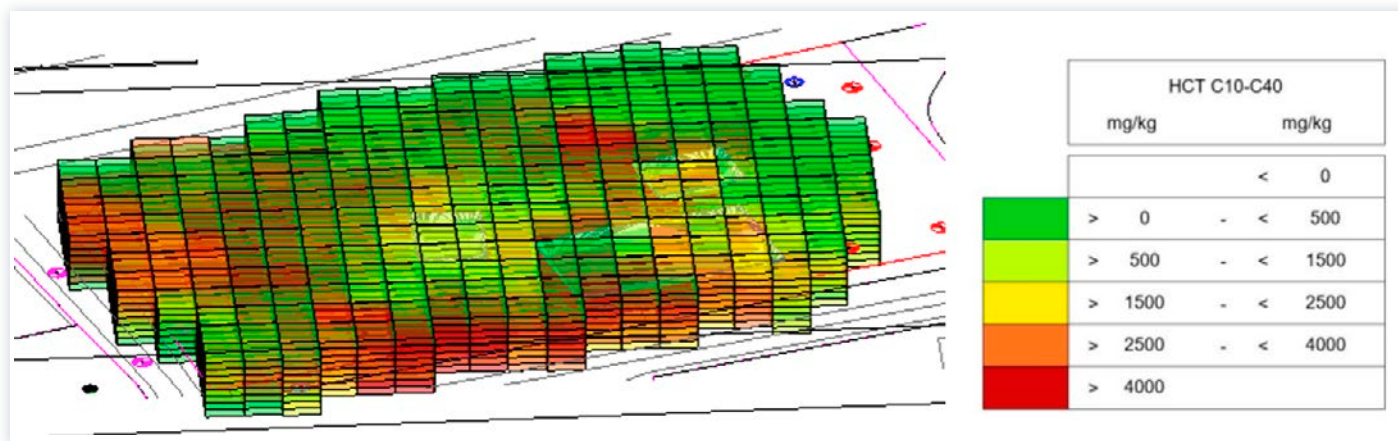


Figure 2 : Modélisation 3D des concentrations en HCT (C10-C40) – Site de Dunkerque (maquette GROUND2IN) - Représentation volumique des concentrations interpolées, par classes de teneur (mg/kg), intégrées dans le modèle numérique de sol et exploitées pour le dimensionnement des traitements in situ.

DU MODÈLE NUMÉRIQUE AU PILOTAGE DES TRAVAUX IN SITU

L'un des apports majeurs de GROUND2IN réside dans sa capacité à faire le lien entre l'étude de pollution et la phase travaux, en particulier pour les traitements in situ. Sur le chantier de Dunkerque, le modèle numérique de sol a permis de spatialiser précisément les zones à traiter, en tenant compte à la fois des concentrations, de la profondeur, de la géologie et des interactions avec la nappe. Cette spatialisation volumique, illustrée par la maquette 3D issue du projet (Cf. Figure 2), permet une lecture continue des concentrations dans l'espace et non plus une juxtaposition de plans par tranche de profondeur.

Cette approche a plusieurs effets structurants. D'abord, elle facilite la définition de scénarios de traitement ciblés : injection de réactifs, bioremédiation stimulée ou traitements thermiques peuvent être dimensionnés à partir de volumes réellement impactés, et non de périmètres surdimensionnés par précaution. Ensuite, elle améliore la lisibilité des projets pour les équipes travaux : les zones de traitement ne sont plus des polygones abstraits sur plan 2D, mais des volumes clairement identifiés dans l'espace.

Enfin, le modèle BIM devient un véritable support de suivi : les phases pré- et post-travaux peuvent être comparées, les résultats de contrôles intégrés, et l'efficacité des traitements évaluée de manière quantitative. Cette continuité numérique contribue à sécuriser les décisions techniques et à objectiver les performances des solutions mises en œuvre.

LA GESTION DES EXCAVATIONS : UN ENJEU CENTRAL MAÎTRISÉ PAR LE NUMÉRIQUE

Au-delà des traitements in situ, la gestion des excavations représente un enjeu technique, économique et environnemental majeur pour les opérations de dépollution. L'estimation des volumes à excaver, leur caractérisation, leur traçabilité et leur orientation vers les filières adaptées conditionnent à la fois les coûts et l'acceptabilité globale des projets. Dans le cas de Dunkerque, GROUND2IN a permis de raisonner les excavations à partir de volumes pollués modélisés, et non à partir de surfaces ou de profondeurs forfaitaires. Chaque maille du modèle est associée à des concentrations et à une lithologie, ce qui autorise une segmentation fine des terres en fonction des seuils de gestion retenus.

Cette approche ouvre la voie à une gestion différenciée des terres excavées : réemploi sur site lorsque cela est possible, évacuation vers des filières de traitement adaptées, ou élimination en installation spécialisée. Les nomenclatures générées automatiquement à partir du modèle BIM fournissent des quantités consolidées, cohérentes entre études, marchés et exécution.

En phase chantier, cette précision se traduit par une réduction significative des aléas : moins de découvertes imprévues, une meilleure anticipation des flux de camions, et une maîtrise accrue des coûts liés aux filières hors site. Pour les maîtres d'ouvrage comme pour les entreprises de travaux, le modèle numérique devient ainsi un outil de pilotage économique autant que technique.

CONCLUSION – LE NUMÉRIQUE COMME OUTIL DE PILOTAGE DES PROJETS SSP

L'intégration d'outils numériques tels que GROUND2IN dans les projets de sites et sols pollués marque une étape importante dans l'évolution des pratiques de la filière SSP vers des approches plus quantitatives et traçables. En s'appuyant sur des fondements scientifiques solides – interpolation, géostatistique, bilans volumétriques – et en les rendant opérationnels via le BIM, ces outils contribuent à sécuriser les décisions, à optimiser les travaux et à renforcer la maîtrise des risques.

L'exemple du chantier de Dunkerque montre que le numérique n'est pas une surcouche technologique, mais bien un levier concret d'amélioration de la performance environnementale, économique et opérationnelle des projets de dépollution. Pour COLAS Environnement, cette démarche s'inscrit dans une volonté plus large : mettre l'ingénierie numérique au service de solutions de dépollution robustes, transparentes et adaptées aux enjeux des territoires.

FOCUS CHANTIER – SITE D'UNE RÉNOVATION URBAINE À DUNKERQUE

Sur un chantier de réhabilitation mené à Dunkerque, l'un des enjeux majeurs concernait la conception et le dimensionnement d'un traitement in situ, de type venting / extraction multiphase, sur un site présentant une pollution hétérogène en plan comme en profondeur.

Classiquement, ce type de projet repose sur une lecture stratifiée en 2D des données : des planches de cartographies par tranches de profondeur (souvent métriques), issues d'outils SIG. Cette approche, bien que largement répandue, présente des limites opérationnelles connues :

- difficulté à appréhender la continuité verticale réelle des pollutions ;
- superposition mentale complexe de multiples cartes 2D ;
- tendance à homogénéiser les solutions techniques par précaution, au détriment de l'optimisation.

Dans le cas de Dunkerque, GROUND2IN a permis de changer de paradigme en s'appuyant sur une spatialisation tridimensionnelle continue de la pollution, intégrée directement dans un modèle numérique de sol. Les concentrations issues des sondages ont été interpolées dans l'espace, en tenant compte de la géologie et de la nappe, offrant une lecture volumique et non plus plane des impacts.

Cette représentation 3D a apporté plusieurs bénéfices déterminants pour la phase travaux :

- Une meilleure compréhension de la diffusion spatiale de la pollution, notamment de sa variabilité verticale, impossible à percevoir de manière fiable via des planches 2D successives ;
- L'identification de zones ne nécessitant pas de traitement en profondeur, malgré des impacts superficiels, évitant ainsi des ouvrages inutiles ;
- L'adaptation fine de l'implantation des puits de traitement, en fonction des niveaux de concentration réellement modélisés dans le volume, et non sur la base d'un maillage uniforme.

Initialement, le marché prévoyait la mise en œuvre d'environ 80 puits de traitement, répartis de manière régulière sur l'ensemble du



Modélisation 3D du site,
analyse des données, ...

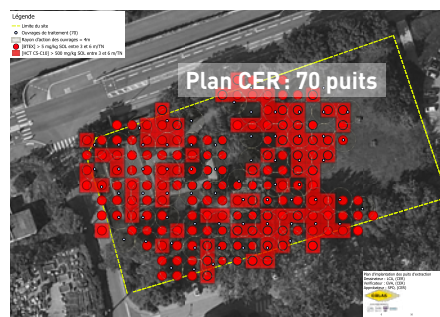
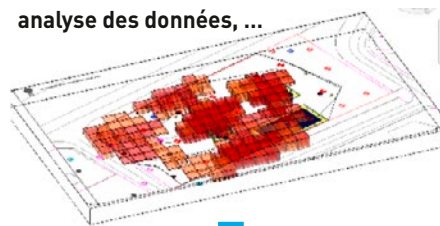
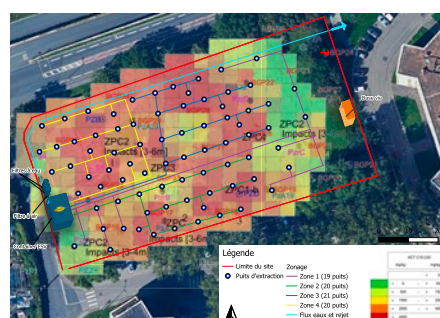


Figure 3 : Évolution du dimensionnement des puits de traitement : du plan initial du CTP à l'implantation optimisée issue de la modélisation 3D (site de Dunkerque) - De haut en bas :

- (1) implantation initiale de 80 puits prévue au CTP ;
- (2) modélisation 3D des concentrations et phase d'analyse volumique ;
- (3) plan optimisé proposant 70 puits, avec adaptation locale des profondeurs et des espacements.



site. L'analyse issue du modèle GROUND2IN a démontré que :

- certaines zones pouvaient être exclues du traitement profond sans dégrader la performance globale ;
- l'espacement entre puits pouvait être modulé localement, en cohérence avec les concentrations rencontrées et les volumes réellement impactés.

Cette approche n'a pas conduit à une diminution de l'objectif environnemental du projet, mais à une optimisation du dispositif de traitement, fondée sur une meilleure adéquation entre pollution réelle et moyens mis en œuvre.

Au final, cette démarche a permis de réduire d'environ 13 % le nombre de puits de traitement, générant une économie significative pour le maître d'ouvrage public, tout en conservant l'efficacité attendue du traitement in situ. Cette évolution du dimensionnement, depuis le schéma initial du CTP jusqu'à la configuration optimisée issue du modèle numérique, est illustrée en **Figure 3**.

Ce retour d'expérience illustre de manière concrète l'intérêt des jumeaux numériques de sol : dépasser une logique de précaution uniforme pour entrer dans une logique de traitement ciblé, proportionné et scientifiquement argumenté, directement exploitable par les équipes travaux.

Cette traduction opérationnelle du modèle, depuis l'analyse volumique des concentrations jusqu'à l'implantation validée des ouvrages et à leur raccordement à l'unité de traitement, est présentée en **Figure 4**.

Pierre-Antoine FOURRIER,
COLAS Environnement

Figure 4 : Carte opérationnelle issue du modèle numérique : concentrations interpolées, implantation validée des puits et plan de raccordement à l'unité de traitement – Site de Dunkerque - Visualisation intégrée des mailles interpolées, des puits retenus après optimisation et validés par l'AMO, ainsi que du schéma de raccordement des ouvrages à l'unité de traitement en phase travaux.

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

MIEUX PRÉDIRE L'ÉVOLUTION DES SOURCES DE POLLUTION NAPL

COMMENT RENDRE LES MODÈLES NUMÉRIQUES PLUS FIABLES ET PLUS EFFICACES ?

Gérer un site pollué est un exercice délicat : entre données parcellaires, mécanismes complexes et incertitudes, les décisions reposent parfois sur des hypothèses fortes et sont souvent entachées d'approximations. Pourtant, les enjeux sont colossaux : santé publique, coûts de dépollution, délais de réhabilitation... Face à ce constat, le projet QUASPER (QUantification des incertitudes et Analyse de Sensibilité des modèles de Prédiction d'Épuisement et de Rémédiation) a été lancé pour démocratiser l'usage des modèles prédictifs, tout en les rendant plus accessibles et plus fiables.

Financé par l'ADEME et piloté par GINGER BURGEAP avec l'appui d'un consortium d'experts (Laboratoires GeoRessources et IMFT, et PHIMECA), QUASPER s'est attaqué à un problème récurrent : comment prédire l'évolution des pollutions de type NAPL (hydrocarbures, solvants chlorés...), sans se perdre dans des modèles trop complexes ou trop coûteux ? Comment fiabiliser les résultats malgré le nombre de paramètres et les incertitudes associées ?

SPÉCIFICITÉS DES SOURCES NAPL

Parmi les formes les plus complexes de contamination figurent les NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids), c'est-à-dire des substances liquides faiblement miscibles à l'eau. Ces polluants, souvent issus de l'industrie chimique ou pétrolière, migrent dans le milieu souterrain et s'accumulent à différentes profondeurs, engendrant ainsi des panaches de polluants dissous dans les eaux souterraines et gazeux qui impactent fortement et durablement l'environnement.

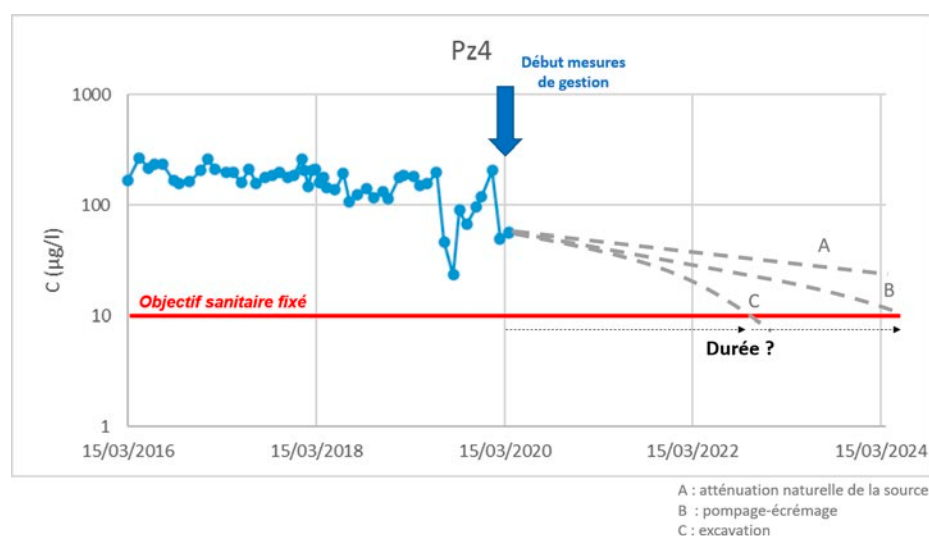


Figure 1 : Évolution potentielle de la concentration dans les eaux souterraines pour différentes solutions de gestion

INTÉRÊTS ET LIMITES DES MODÈLES NUMÉRIQUES

Dans le cadre des études visant à définir les modalités de gestion d'un site présentant une source de pollution de type NAPL, il est nécessaire d'estimer le coût et l'efficacité des solutions envisagées. Ces dernières peuvent être évaluées à travers le calcul de la durée de vie de la source qui peut être définie de différentes façons :

- durée nécessaire pour réduire significativement la masse de NAPL dans la zone source ;
- durée pour réduire significativement le flux émis par la source ;
- durée pour que les concentrations passent en dessous du seuil d'acceptabilité (e.g. potabilité ou valeur guide pour la qualité de l'air intérieur).

Suivant la méthodologie actuelle, le Plan de Gestion (PG) doit ainsi comparer les différents scénarios pour identifier les solutions techniques les plus pertinentes. Généralement, le choix d'un mode de gestion repose sur le bilan coûts-avantages et la conduite d'un Plan de Conception des Travaux (PCT), ce dernier visant à «sécuriser les scénarios de gestion identifiés et aider au dimensionnement des travaux de réhabilitation et des installations de traitements en limitant les incertitudes» (DGPR, 2017).

Dans ce cadre, la modélisation numérique est un outil d'aide à la décision reconnu qui permet de prendre en compte l'ensemble des mécanismes qui pilotent l'évolution des sources de pollutions (dissolution, volatilisation, adsorption...) tout en intégrant les hétérogénéités du domaine étudié. Ainsi, les modèles peuvent être utilisés pour prédire les concentrations attendues (ou, par exemple, la réduction de masse ou flux attendu) et comparer l'efficacité des solutions de dépollution envisageables (cf. Figure 1). Ces informations sont précieuses tant pour

le choix de la solution de gestion que pour son dimensionnement technique et financier (élaboration du dispositif et du protocole de surveillance post-traitement).

Cependant la mise en œuvre des modèles n'est pas systématique car l'exercice est complexe et leurs prédictions sont souvent incertaines : quelles sont les marges d'erreur ? Peut-on simplifier un modèle complexe sans compromettre la décision ? Dans ce contexte, le projet QUASPER visait à faciliter et sécuriser la mise en œuvre des modèles numériques à travers deux axes principaux :

1. Étudier les possibilités de simplification des modèles pour faciliter leur usage ;
2. Proposer une méthode d'analyse de sensibilité et de quantification des incertitudes qui permette de prendre compte les effets combinés des différents paramètres.

SIMPLIFIER SANS PERDRE L'ESSENTIEL

La simplification d'un modèle de site réel n'est pas une chose simple faisant appel à une théorie unique. Pour un site réel, la structure des champs (flux de concentration de polluant dissous, évolution de la saturation en NAPL, ...) est marquée par l'impact des diverses hétérogénéités, au niveau des propriétés de transport, des conditions initiales et aux limites. Plusieurs niveaux de simplification du modèle peuvent être envisagés (cf. Figure 2) comme la simplification de la description (géométrie, choix des mécanismes bio-physico-chimiques à prendre en compte...) ou la réduction des dimensions.

Le projet QUASPER vise à étudier le comportement du système NAPL-EAU à différentes échelles ainsi que les possibilités de simplification des modèles (passage d'un modèle 3D en un modèle 2D ou 1D). Des simulations ont tout d'abord été réalisées à l'échelle du pore afin de caractériser l'évolution des cinétiques d'atténuation des sources de pollution multiconstituants et de préciser l'expression du coefficient de transfert qui pilote cette atténuation et joue un rôle clé dans la modélisation. Dans un deuxième temps, nous avons analysé la capacité de modèles moyennés 1D à capturer la dynamique des processus d'atténuation de zones sources en NAPL spatialement hétérogènes.

Les résultats obtenus indiquent qu'il est possible de simplifier le terme d'échange de dissolution, mécanisme principal contrôlant la dynamique des échanges NAPL-Eau et la cinétique d'atténuation naturelle de la source, dans le cas de source multicomposés (par exemple un mélange TCE/PCE ou une phase hydrocarbure). En effet, nous avons pu démontrer que ce coefficient évolue de manière similaire pour tous les composés dans certaines conditions, ouvrant ainsi la voie à de potentielles simplifications dans la paramétrisation des modèles.

Les travaux ont aussi montré que des modèles 1D, construits à l'aide des principes de mise à l'échelle des mécanismes, pouvaient produire des résultats similaires aux modèles 3D, c'est-à-dire qu'ils sont capables de restituer les concentrations dissoutes et donc déterminer le temps nécessaire pour

appréciation qualitative, elle ne permet pas de considérer les effets couplés entre les paramètres et peut conduire à des conclusions erronées. Elle ne permet pas non plus d'étudier la distribution statistique globale des réponses du modèle se limitant à fournir une gamme de variation entre 2 bornes min et max sans précision sur la probabilité d'occurrence du résultat. Par ailleurs, ce type de test est généralement peu robuste pour hiérarchiser l'influence des paramètres, information pourtant très utile pour orienter les investigations à mener sur le site ou pour identifier les mécanismes d'atténuation naturelle. Pourtant, il existe de nombreuses techniques (Sobol', Morris...) dont l'efficacité a été démontrée dans d'autres domaines mais qui sont peu appliquées à ce jour car elles nécessitent un nombre important de simulation (généralement supérieure à 100) et donc hors champ des coûts requis dans la

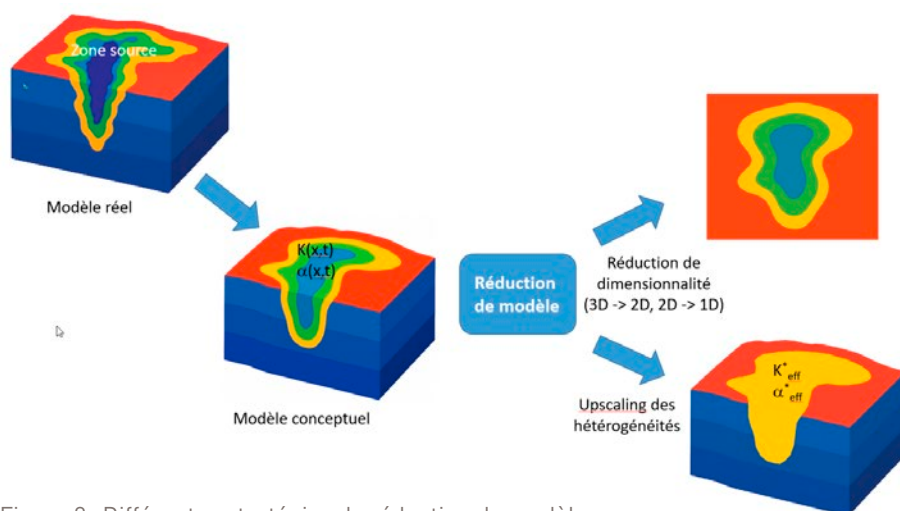


Figure 2 : Différentes stratégies de réduction de modèles

atteindre l'objectif sanitaire acceptable dans bon nombre de situations. La mise en œuvre de ce type d'approche contribue à réduire les temps de calcul de manière significative permettant ainsi d'envisager des modèles plus simples à construire sur lesquels un plus grand nombre de simulations peut être réalisé et de réduire les temps d'étude de modélisation et les coûts associés.

MESURER ET PRIORISER LES INCERTITUDES

Les incertitudes des modèles de prédiction sont traditionnellement évaluées dans les études par des tests dits «unitaires», c'est-à-dire en analysant les variations du résultat en faisant varier un paramètre à la fois. Bien que cette approche soit utile pour une première

plupart des études SSP. Pour rendre ces approches viables, le projet s'est ainsi intéressé à l'utilisation des émulateurs, ou «jumeaux numériques», comme moyen de substitution du modèle original. Pour cela, nous avons exploré plusieurs approches de quantification des incertitudes et de construction des émulateurs sur des cas d'application concrets de sites impactés par des NAPL en s'efforçant d'optimiser les besoins et la précision des résultats. Cette étude a permis de tirer de nombreux enseignements techniques, notamment sur les plus-values apportées par ces méthodes et leurs limites en termes d'applicabilité. Nous avons pu constater, qu'il était possible de générer un émulateur d'un modèle numérique 3D hétérogène dans un budget temps limité, puis d'utiliser cet émulateur pour quantifier les incertitudes à l'aide

des techniques multi paramétriques. Par exemple, la **Figure 3** illustre que dans certains cas un émulateur entraîné sur la base de 50 simulations fournit des résultats similaires à ceux obtenus avec un jeu de données plus conséquent (200 et 1000 simulations).

APPLICATIONS PRATIQUES POUR LES ÉTUDES SSP

Ce type d'approche apporte des plus-values utiles aux différentes phases des études SSP qui peut se traduire simplement de la manière suivante :

- Phase de Diagnostic (DIAG):
 - Simplification des modèles : meilleure accessibilité pour les bureaux d'étude et les maîtres d'œuvre ;
 - Identification des paramètres clés : meilleure stratégie d'investigation terrain ;
 - Hiérarchisation des processus d'atténuation naturelle ;
- Phase Plan de Gestion (PG, PCT):
 - Utilisation d'émulateurs pour tester davantage de scénarios à budget constant ;
 - Quantification précise des incertitudes : prise de décision plus sûre.

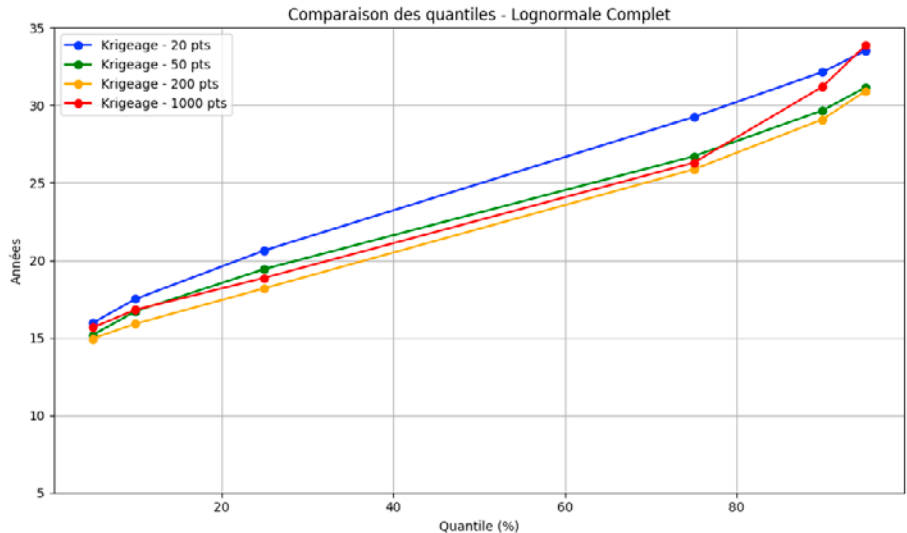


Figure 3 : Courbes de fréquences cumulées des durées de vie de la source NAPL calculées à partir d'un émulateur de type Krigeage construit avec 1000, 200, 50 et 20 points

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

De manière générale, les travaux réalisés dans le cadre du projet QUASPER apportent un cadre pragmatique pour rendre les modèles de prédiction plus abordables et améliorer la fiabilité des résultats à travers la prise en compte des incertitudes. La synthèse des travaux fournit une méthodologie

adaptative qui peut être utilisée pour guider le modélisateur vers les méthodes efficaces applicables pour quantifier les incertitudes selon le type d'étude et les besoins associés (cf. Figure 4).

Plus de détails dans le guide public à paraître.

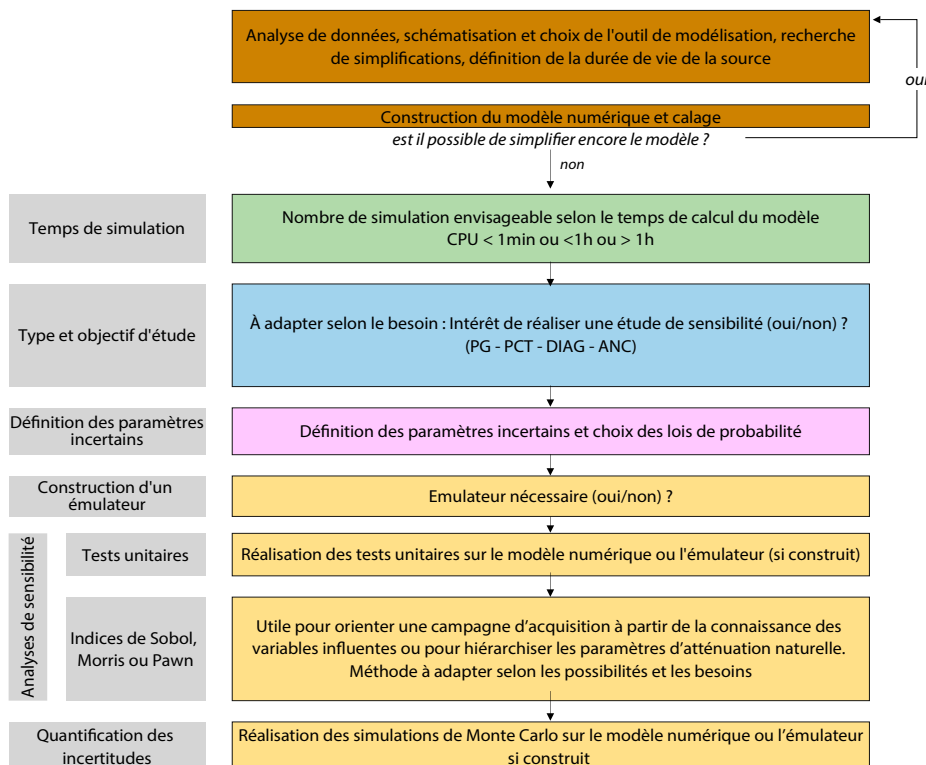


Figure 4 : Extrait de la synthèse des outils mis en œuvre et situations dans lesquelles ils peuvent être utilisés d'après le guide QUASPER (DIAG : diagnostic complémentaire, PG : plan de gestion, PCT : plan de conception de travaux, ANC : atténuation naturelle contrôlée)

David Pitaval, Ginger BURGEAP
 Juliette Chastanet, Ginger BURGEAP
 Jean-Marie Côme, Ginger BURGEAP
 Fabrice Golfier, GeoRessources,
 Université de Lorraine, CNRS
 Raphael Périllat, PHIMECA
 Michel Quintard, IMFT, CNRS

// DOSSIER : OUTILS NUMÉRIQUES

LES OUTILS NUMÉRIQUES AU SERVICE DES SITES ET SOLS POLLUÉS

Les métiers des sites et sols pollués (SSP) reposent sur l'acquisition, le traitement et l'interprétation de données : historiques de sites, mesures de terrain, résultats analytiques, paramètres d'exposition, hypothèses de modélisation... Ce volume d'information constitue une richesse pour la gestion des SSP, mais est également une source de complexité.

Dans ce contexte, la question n'est plus de savoir si les outils numériques sont utiles, mais comment les intégrer de manière la plus pertinente possible dans notre métier. L'enjeu principal n'est pas uniquement le gain de temps, mais la capacité à traiter des données à la fois nombreuses, complexes et hétérogènes, tout en garantissant la fiabilité de leur interprétation.

Chez Tesora, le développement d'outils numériques s'inscrit dans cette logique. Ces outils ne visent pas à standardiser l'expertise, mais à sécuriser le traitement des données, à réduire la pénibilité des tâches répétitives et à libérer du temps pour l'analyse et la réflexion technique, cœur de la valeur ajoutée du métier.

AUTOMATISATION CIBLÉE ET FIABILISATION DES TÂCHES DU QUOTIDIEN

Dans le process de gestion des SSP, une part significative du temps est consacrée à des tâches nécessaires mais peu créatrices de valeur : (re)saisie de données, mise en forme de tableaux, calcul répétitifs et vérifications croisées sur tableurs. Ces opérations mobilisent fortement l'attention des collaborateurs et sont sources d'erreurs, en particulier lorsque les données sont nombreuses ou hétérogènes. L'automatisation ciblée de ces tâches constitue un levier direct de fiabilité et de sécurisation des études. Elle permet également aux collaborateurs, à temps constant, voire moindre (nous sommes

passés à 9 jours de travail sur 2 semaines tout en maintenant notre productivité) de consacrer plus de temps sur la réflexion et l'interprétation. Par exemple, notre outil Parap' (cf. **Figure 1**), dédié à la rédaction des plans de prévention, illustre cette approche. En structurant les données d'entrée (type de site, activités, environnement, co-activités), l'outil génère automatiquement un plan de

pollués, enjeu majeur tant sur le plan de la sécurité que de la conformité réglementaire. Historiquement, ces suivis reposaient largement sur des tableaux Excel, souvent complexes, construits manuellement et difficiles à maintenir dans la durée. Cette approche présentait de nombreuses limites : des temps de « remplissage » important, une pénibilité pour les collaborateurs, un risque accru d'er-

Figure 1 : Interface de notre application Parap'

prévention conforme aux exigences de notre métier tout en garantissant l'exhaustivité de la prise en compte des risques. Le collaborateur conserve la maîtrise du contenu final, mais bénéficie d'un socle documentaire fiable, cohérent et homogène. Le gain est donc double :

- un gain de temps mesurable sur la production du plan de prévention,
- une réduction du risque d'oubli ou d'incohérence, grâce à une systématisation des informations.

De la même manière, notre outil Suiv'Ex (cf. **Figure 2**) permet d'automatiser le suivi des expositions professionnelles sur sites

pollués, enjeu majeur tant sur le plan de la sécurité que de la conformité réglementaire. Historiquement, ces suivis reposaient largement sur des tableaux Excel, souvent complexes, construits manuellement et difficiles à maintenir dans la durée. Cette approche présentait de nombreuses limites : des temps de « remplissage » important, une pénibilité pour les collaborateurs, un risque accru d'er-

reurs de saisie ou de calcul, une difficulté à détecter rapidement les situations à risque. Pour pallier ces contraintes, Suiv'Ex s'appuie directement sur les tableaux de données des teneurs en contaminants mesurés sur les sites et automatise leur exploitation. Concrètement, il intègre les résultats analytiques, renseigne et complète automatiquement les tableaux de suivi des expositions, croise les concentrations mesurées avec les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), identifie les expositions accidentelles ou les situations à risque, et génère des alertes en cas de dépassement ou d'anomalie.

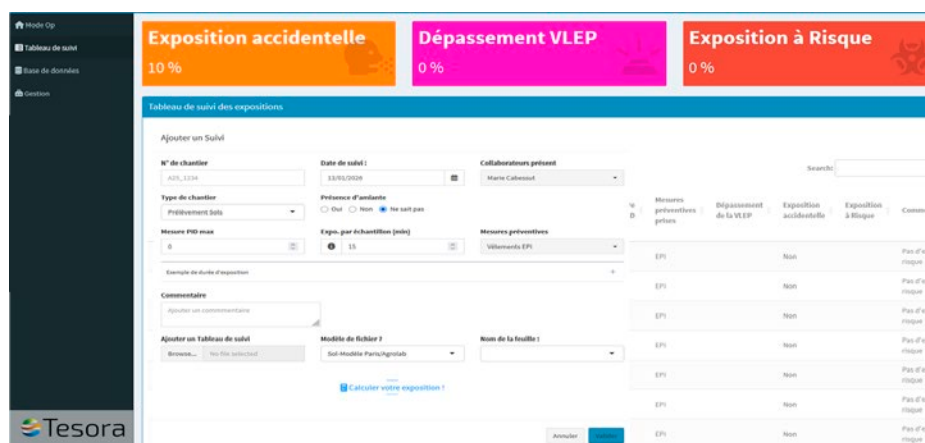


Figure 2 : Interface de notre application Suiv'Ex

STRUCTURER LES CALCULS POUR EXPLORER D'AVANTAGE DE SCÉNARIOS

L'utilisation des outils numériques apporte également un gain en termes de puissance de calcul et de reproductibilité. Par exemple les évaluations des risques sanitaires reposent sur des calculs complexes, intégrant de nombreux paramètres et hypothèses. Réalisés manuellement ou sur tableur, ces calculs sont longs, et limitent souvent le nombre de scénarios étudiés. Nous avons développé un outil qui permet de réaliser des calculs sanitaires rapidement et ainsi de pouvoir tester de nombreux scénarios d'exposition permettant de fournir des ensembles de préconisations d'usage garantissant une maîtrise des risques sanitaires. Le gain de productivité ne se traduit pas seulement en heures économisées, mais en qualité d'analyse accrue. À temps de travail équivalent, les équipes peuvent tester davantage d'hypothèses, affiner leurs scénarios et produire des recommandations plus robustes et mieux argumentées.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET EXPLOITATION FIALE DE LA CONNAISSANCE

La performance d'un bureau d'études SSP ne repose pas uniquement sur ses outils de calcul, mais aussi sur sa capacité à mobiliser efficacement l'information existante. Or, les données sont souvent dispersées entre de multiples supports, rendant leur exploitation fastidieuse et peu fiable. Cette dispersion a un impact direct sur la productivité : temps de recherche élevé, redondance des analyses, difficulté à capitaliser sur les

retours d'expérience. Elle fragilise également la fiabilité des décisions, lorsque certaines informations ne sont pas retrouvées ou correctement interprétées.

UN ASSISTANT IA POUR FIAILISER ET ACCÉLÉRER L'ACCÈS AU SAVOIR

Adossé à notre CRM nous développons grâce au soutien de la région Ile de France et BPI, un assistant métier intégrant de l'intelligence artificielle qui vise à répondre à ces enjeux. En s'appuyant sur un espace documentaire structuré et sur des algorithmes de recherche sémantique, l'assistant permettra un accès rapide et fiable à l'information pertinente, une réduction significative du temps de recherche documentaire et une meilleure homogénéité des pratiques, fondée sur des références communes (Cf. Figure 3).



Figure 3 : Assistant IA

L'IA ne remplacera pas l'expertise de nos collaborateurs, mais elle agit comme un facilitateur de compréhension d'agrégation d'information. En particulier pour les nouveaux collaborateurs, par exemple, l'assistant leur permettra de mettre à leur disposition de manière rapide et fluide l'expertise et les retours d'expérience de Tesora. Elle contribue ainsi à sécuriser la continuité du savoir-faire et à améliorer la productivité collective.

CONCLUSION

L'intégration des outils numériques et de l'intelligence artificielle transforme les pratiques en sites et sols pollués, sans remettre en cause le rôle central de l'expertise humaine. Ces outils constituent pour Tesora des aides puissantes à l'analyse et à la décision, mais ne remplacent ni l'expérience de terrain, ni le raisonnement scientifique, ni le jugement professionnel. La fiabilité des résultats dépend toujours de la qualité des données d'entrée, de la pertinence des hypothèses retenues et de la compréhension fine du contexte environnemental et réglementaire du site. Si les outils numériques permettent de traiter plus rapidement des volumes importants de données et de sécuriser les calculs, ils exigent en retour une maîtrise méthodologique, une vigilance constante et une solide culture de la donnée. L'intelligence artificielle, en particulier, facilite l'accès à l'information et la capitalisation des connaissances, mais peut produire des réponses incomplètes ou approximatives si elle n'est pas correctement paramétrée et contrôlée. Le rôle de l'ingénieur reste donc essentiel pour analyser les résultats, détecter les incohérences et en assurer l'interprétation.

PRODUCTIVITÉ ET FIAILITÉ : UN ÉQUILIBRE À MAINTENIR

C'est cet équilibre entre automatisation et expertise humaine qui garantit la robustesse et la fiabilité des études SSP mais également leur reproductibilité. La numérisation des métiers des sites et sols pollués constitue un levier pour l'optimisation du traitement des données. En automatisant les tâches répétitives, en structurant les calculs et en facilitant l'accès à l'information, les outils numériques permettent de traiter davantage de données, plus rapidement et avec un niveau de sécurité renforcé. Loin de déshumaniser les études, ils recentrent les compétences sur ce qui fait la valeur du métier : la réflexion, l'analyse et la compréhension fine des situations, l'interprétation et la prise de décision éclairée. À condition d'être utilisés avec méthode et esprit critique, ces outils ouvrent la voie à une ingénierie SSP plus robuste, plus efficace et mieux armée face à la complexité croissante des projets.

Benjamin Pauget, TESORA

// FICHE OUTIL

KARTOTRAK : LOGICIEL DE CARACTÉRISATION ET DE CARTOGRAPHIE DES SITES CONTAMINÉS PAR DES SUBSTANCES CHIMIQUES OU RADIOACTIVES

Nom de l'outil : Kartotrak

Diffuseur / éditeur : Geovariances

Date de mise sur le marché : 2011.

PUBLIC VISÉ

Kartotrak est destiné aux bureaux d'études et sociétés d'ingénierie environnementale, aux exploitants industriels, aux organismes de recherche ainsi qu'aux acteurs intervenant dans les domaines du nucléaire et des sites et sols pollués. Il est utilisé dans des contextes nécessitant une caractérisation quantitative des contaminations et la production de livrables conformes aux cadres réglementaires en vigueur.

ÉTAPES DE LA CHAÎNE DE VALORISATION DES DONNÉES COUVERTES

Kartotrak intervient sur l'ensemble de la chaîne de traitement des données environnementales. Il permet la préparation et l'optimisation des campagnes d'échantillonnage, l'intégration et le contrôle qualité des données, leur analyse statistique et spatiale, la cartographie bidimensionnelle et tridimensionnelle de la contamination, l'estimation des incertitudes, le calcul des surfaces, volumes et masses de sols contaminés, l'analyse des risques, la comparaison de scénarios de gestion, ainsi que la génération de plans d'excavation (cf. Figure 6) et de rapports.

ATOUTS PRINCIPAUX

Kartotrak est une solution logicielle reposant sur un système d'information géographique, un visualiseur 3D et un moteur géostatistique intégré. Il propose un workflow structuré accompagnant l'utilisateur tout au long de l'étude, depuis l'intégration des données jusqu'à l'exploitation des résultats.

Le logiciel permet l'intégration d'informations

variées relatives à la zone étudiée – photographies aériennes, fonds cartographiques, plans, topographie, interfaces lithologiques, résultats d'analyses, données historiques, données géophysiques – représentées conjointement, en deux et trois dimensions, afin de replacer la contamination dans son contexte environnemental (cf. Figures 1 et 2). Kartotrak intègre un workflow géostatistique simplifié, reposant notamment sur le krigage, pour produire des cartes interpolées de la contamination, associées à des cartes d'incertitude tenant compte de la variabilité du sous-sol et de la qualité des données (cf. Figure 3). Il met également en œuvre les simulations géostatistiques pour produire des cartes de probabilité de dépassement de seuils et des courbes volume-risque. Ces résultats sont utilisés pour l'analyse quantitative des estimations et la comparaison de scénarios de gestion, notamment en termes de volumes à traiter, de filières de traitement associées et de probabilités définies de laisser en place la contamination (cf. Figure 4).

Kartotrak propose également des outils dédiés à la conception de plans d'échantillonnage, fondés sur des maillages réguliers ou des schémas aléatoires. Des tests statistiques, notamment de type MARSSIM, peuvent être utilisés pour vérifier la conformité du site aux objectifs de gestion. À l'issue d'une première interpolation, Kartotrak

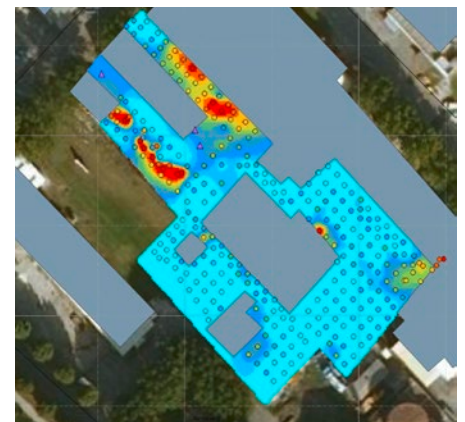


Figure 1 : Échantillonnage et cartographie d'une contamination replacée dans son contexte environnemental

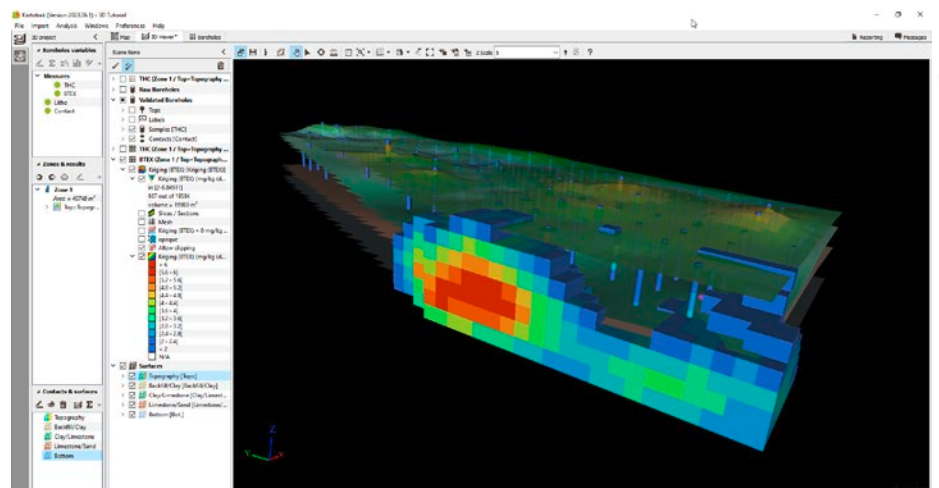


Figure 2 : Représentation tridimensionnelle d'une contamination chimique

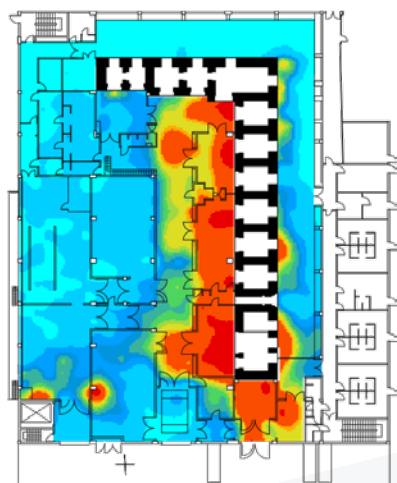


Figure 3 : Cartographie bidimensionnelle d'une contamination radioactive et la carte des incertitudes associée

permet d'identifier les zones associées à un niveau d'incertitude élevé et de définir des implantations complémentaires de points de mesure (cf. Figure 4).

COÛT

Kartotrak est disponible sous licence perpétuelle, abonnement annuel ou location à la semaine, pour un coût de l'ordre de quelques milliers d'euros, selon les modalités choisies.

INTERFACES LOGICIELLES POSSIBLES

Le logiciel prend en charge différents formats de données, notamment des fichiers CSV et Excel, des formats d'images raster (BMP, GIF, JPG, PNG, GeoTIFF), ainsi que des formats vectoriels géographiques tels que Shapefile (ESRI), DXF (AutoCAD) et MapInfo.

RÉFÉRENCES MAJEURES

Kartotrak est utilisé par différents acteurs du secteur, parmi lesquels Antea, ASNR, CEA, Dekra, EDF, Ginger Burgeap, Enresa, IFE, RSK Environnement et Valgo.



Figure 4 : Carte de probabilité de dépassement d'un seuil de contamination. Les résultats sont utilisés pour classer les surfaces et volumes de sol à traiter en fonction du seuil considéré et du niveau de risque associé au maintien de la contamination en place.

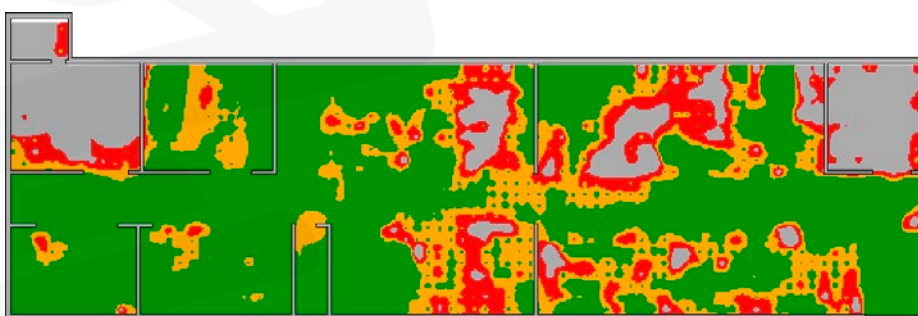


Figure 5 : Carte du risque de déclarer sain à tort (faux négatif). Zone grise = déclarée supérieure au seuil ; rouge = risque élevé, orange = risque modéré, vert = risque faible. Les zones à risque modéré correspondent à des secteurs où des investigations complémentaires peuvent être envisagées afin d'affiner la décision.

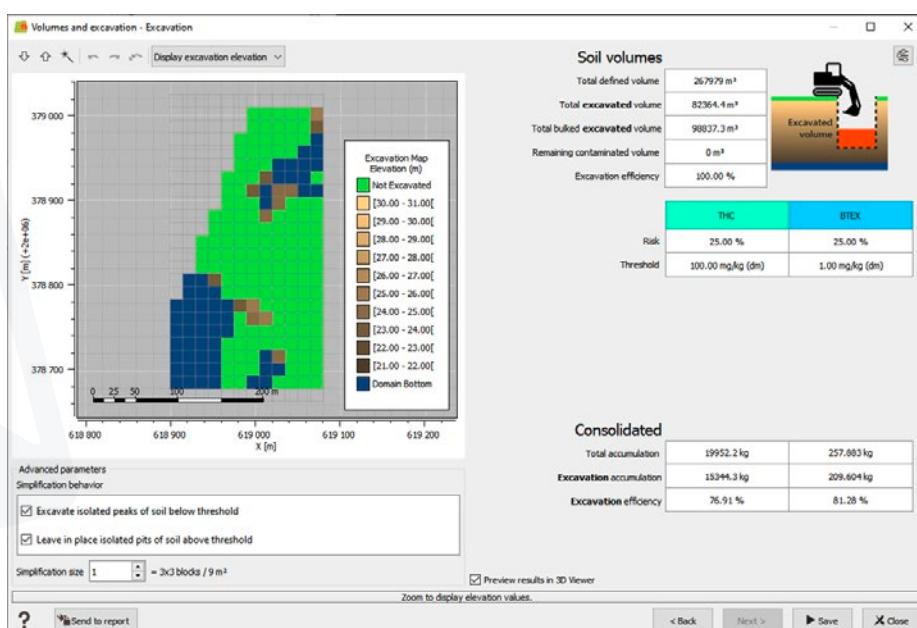


Figure 6 : Plan d'excavation calculé en fonction d'un seuil de gestion et d'une probabilité définie de laisser en place la contamination.

// FICHE OUTIL

SOILREMEDIATION® SUITE

CHANGER DE DIMENSION À COÛTS MAÎTRISÉS POUR GAGNER EN EFFICACITÉ DANS L'ÉTUDE ET LA GESTION DES SSP

Nom de l'outil : SoilRemediation Suite

Diffuseur / éditeur : développé et commercialisé par KIDOVA

Date de mise sur le marché : 2015

PUBLIC VISÉ

Bureaux d'étude dans les SSP et en environnement, sociétés de dépollution, donneurs d'ordre (industriels, aménageurs...).

ÉTAPES DE LA CHAÎNE DE VALORISATION DES DONNÉES COUVERTES

la SoilRemediation Suite se positionne comme une plateforme logicielle dédiée à l'environnement et plus particulièrement aux SSP. Elle vise à apporter des solutions logicielles adaptées et d'utilisation facile sur l'ensemble de la chaîne de valorisation des données (au sens large et incluant les résultats d'étude) en répondant aux différents besoins du public visé (cf. Figure 1 et Figure 2).

Étapes de la chaîne de valorisation des données	Bureaux d'étude	Sociétés de dépollution	Donneurs d'ordre (industriels, aménageurs...)
Gestion, visualisation, archivage & partage de tous types de données et résultats d'étude du sous-sol et de surface	✓	✓	✓
Visualisation (1D à 3D), analyse & interprétation de tous types de données et résultats d'étude	✓	✓	✓
Modélisation : sous-sol, pollution des sols et autres milieux, infrastructures...	✓	✓	✓
Conduite d'investigations	✓		✓
Plan de gestion ou de conception des travaux	✓		✓
Suivi de travaux	✓	✓	✓

Figure 1 : étapes de la chaîne de valorisation des données couvertes par la solution SoilRemediation Suite en fonction du public visé.

ATOUTS PRINCIPAUX

1. **Variété des données du sous-sol et de surface gérées** avec la possibilité de créer facilement et intégralement tout type de données (*particularisé*), quels qu'en soient la nature, le milieu et les variables.
2. **Variété des outils de partage, de visualisation, d'analyse et plus généralement d'utilisation des données**, qu'elles soient spatiales (SIG 3D), temporelles ou spatio-temporelles.
3. **Facilité d'utilisation et convivialité de l'application logicielle** avec des workflows (démarches programmées) pour guider les utilisateurs dans la réalisation de tâches spécialisées.
4. **Intégration de GOCAD™ Environment**, le cœur du modèleur géologique haut de gamme Aspen SKUA™ développé par la société Emerson/AspenTech partenaire de KIDOVA dans le domaine de l'environnement.

INTERFACES LOGICIELLES POSSIBLES

- Nombreuses options d'import et d'export de données et modèles et de liaisons avec des simulateurs numériques.
- SRMobile, application mobile associée à l'application web SRServer, pour la conduite de campagnes d'investigation : collecte de données, échange de données et de plans de sondages ou échantillonnage entre terrain et bureau.

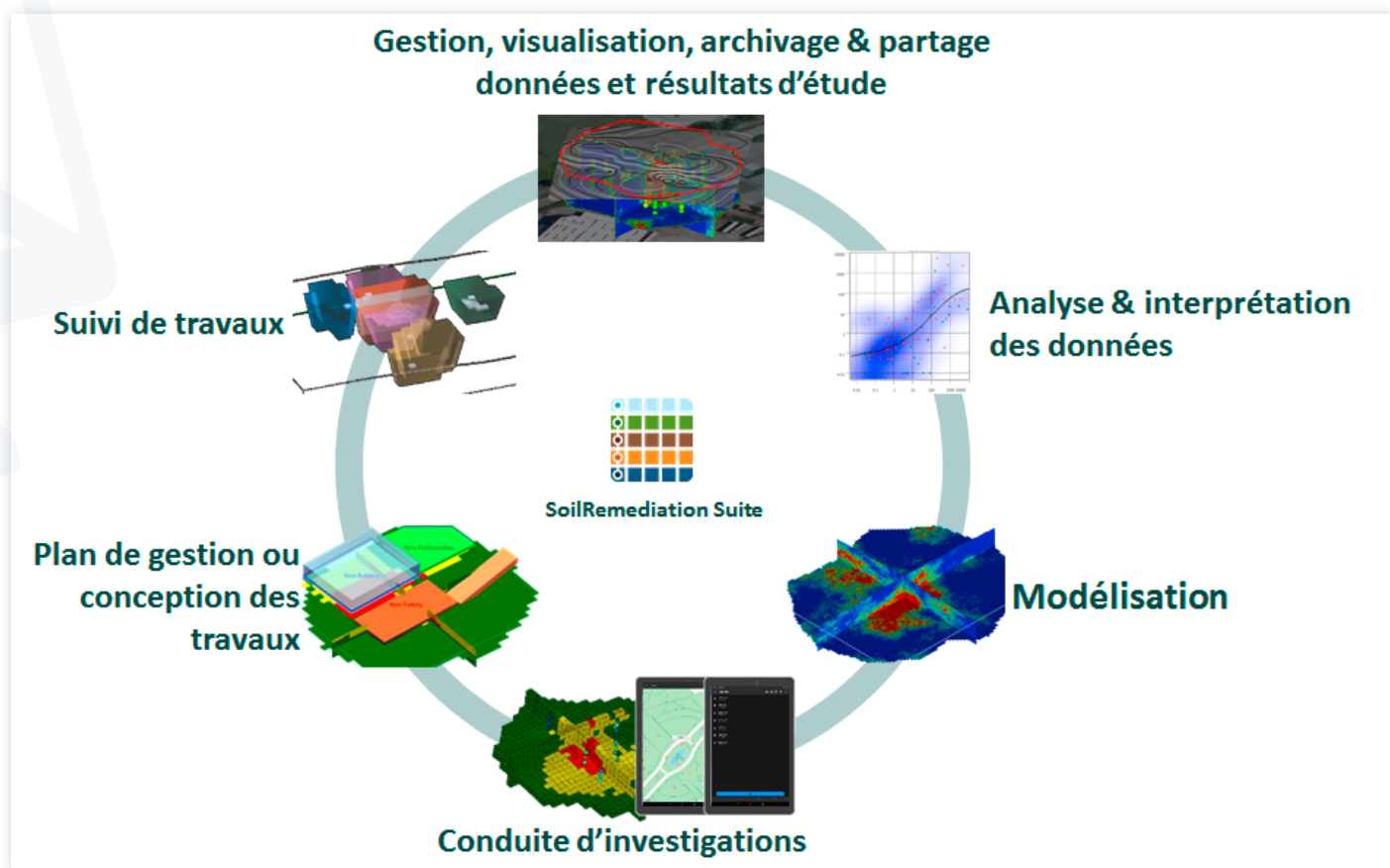


Figure 2 : illustration des étapes de la chaîne de valorisation des données de la SoilRemediation Suite.

COÛT

- Solution logicielle d'étude à partir de 340 €/mois en fonction des options choisies et de la durée d'engagement.
- SRMobile associée à SRServer : mise à disposition sans coût supplémentaire et sans limitation d'utilisateurs.
- Solutions 3D de visualisation et partage de données et modèles : SRViewer (coût réduit) & Geoscience Analyst distribué par Mira Geoscience (gratuit).

MODE DE COMMERCIALISATION

- Abonnement annuel.
- Licence flottante (partagée) ou affectée à un ordinateur.

RÉFÉRENCES MAJEURES

- Projets R&D et méthodologiques liés à la SoilRemediation Suite : MATRICE (financement FUI), OUTRAGE & REPERAGE (financement ADEME), manuel méthodologique et démonstrations GeoSiPol (financements ADEME et INERIS).
- Cas d'étude sur aspects gestion et partage de données nombreuses et variées et diagnostic complémentaire : site orphelin RODANET avec l'ADEME (plus de 30 ans d'études et données).
- Cas d'étude sur aspects modélisation de pollutions des sols, plan de gestion et plan de conception des travaux : site d'une ancienne usine de la métallurgie au Luxembourg (réaménagement planifié sur 20 ans).
- Cas d'étude sur aspects gestion environnementale de sites industriels : ensemble des sites miniers actuels et anciens en France et à l'internationale d'une grande compagnie minière.

// FICHE OUTIL

TERRAINDEX

LE FIL CONDUCTEUR INVISIBLE DES PROJETS SSP

Nom de l'outil et diffuseur / éditeur : TERRA INDEX

DATE DE MISE SUR LE MARCHÉ ET PUBLIC VISÉ

Sur un chantier d'investigations environnementales, les données naissent en quelques secondes : un sondage s'ouvre, une mesure s'enregistre, un prélèvement s'étiquette. Pourtant, leur chemin vers le rapport final reste souvent long, fragmenté et parfois fragile. Les erreurs n'apparaissent bien souvent qu'au moment où les corrections deviennent coûteuses et où les délais sont déjà sous tension. Depuis 1996, TerraIndex s'attaque précisément à ce défi. Déployé en France depuis 2020, cet outil néerlandais est utilisé par les bureaux d'études, laboratoires, foreurs, collectivités et exploitants industriels impliqués dans la gestion des sites et sols pollués.

ÉTAPES DE LA CHAÎNE DE VALORISATION DES DONNÉES COUVERTES

Tout commence par la construction du plan de sondages. Les équipes configurent leurs ouvrages, types de mesures et besoins analytiques, puis basculent sur l'application terrain pour enregistrer observations, profondeurs et échantillons. La saisie est guidée, contrôlée, structurée : un appui numérique qui réduit les erreurs sans alourdir le travail.

La suite se joue en coulisses. D'un clic, les commandes d'analyse sont envoyées vers les laboratoires partenaires – Agrolab, ALS-Wessling, Eurofins, SGS. Les résultats reviennent automatiquement dans la plateforme, alignés sur les échantillons, prêts à

être comparés aux valeurs seuil. Cette interface facilite les échanges d'informations en limitant les transferts de fichiers, les ressaisies et les suivis par e-mail.

Lors de la phase d'analyse, TerraIndex génère tableaux de synthèse, fiches de forage, formulaires terrain et exports standardisés. La comparaison automatique aux valeurs de référence et la cohérence des livrables permettent aux chefs de projet de gagner du temps et d'aborder plus sereinement contrôles internes, audits et échanges avec clients ou autorités compétentes.

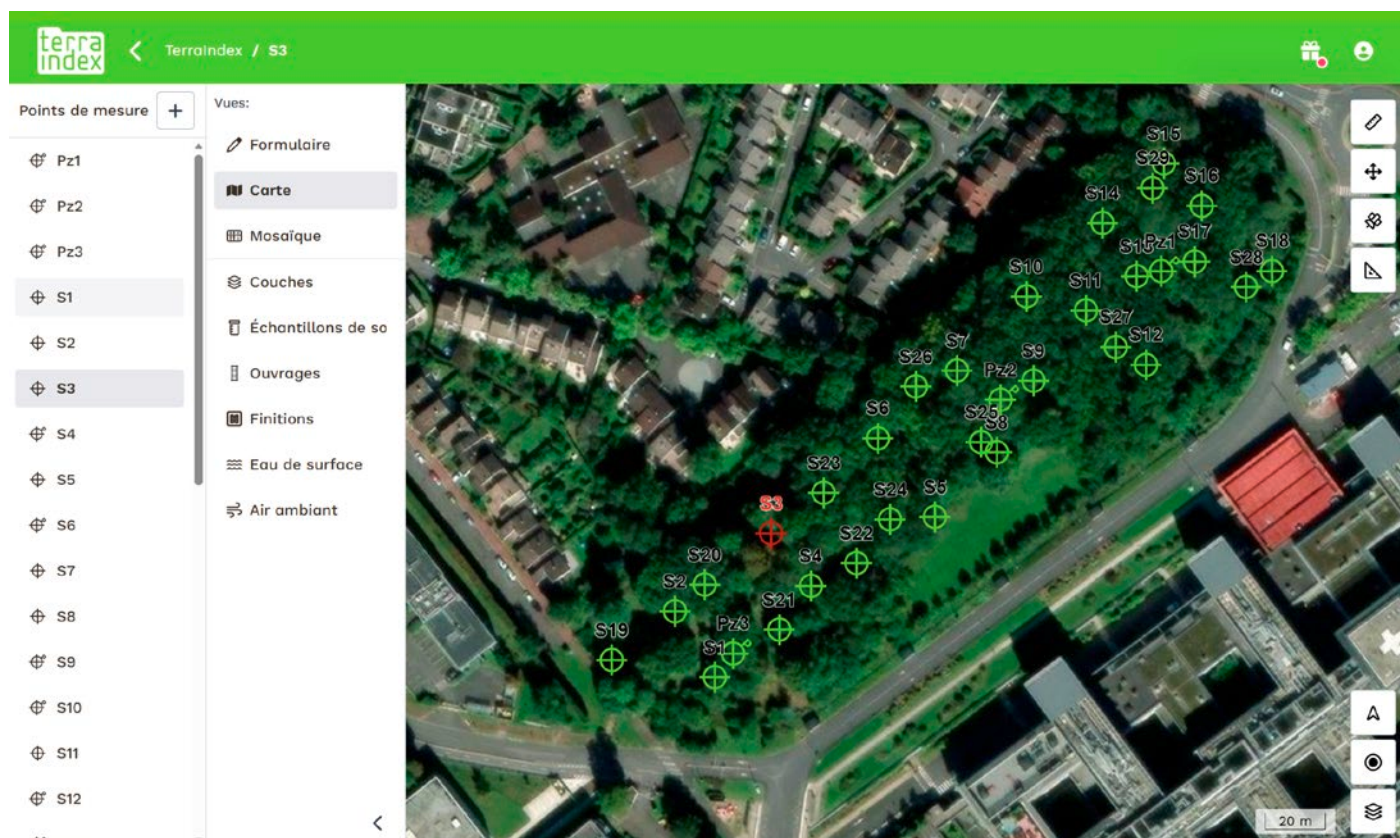


Figure 1. «Placer les points de mesure directement sur site»

ATOUTS PRINCIPAUX

Le principe est simple : une donnée ne doit être saisie qu'une seule fois. TerraIndex orchestre ainsi l'ensemble du cycle de valorisation, de la préparation des campagnes à l'exploitation cartographique. Cette continuité numérique, alliée à une interface pensée pour les professionnels SSP, accélère la production, harmonise les méthodes et renforce la traçabilité.

INTERFACES LOGICIELLES POSSIBLES

Les données peuvent également être projetées dans un SIG via WMS/WFS pour visualiser concentrations, profils verticaux et cohérence spatiale des forages. Grâce à son API, l'outil s'intègre facilement aux systèmes internes, facilitant la centralisation des données environnementales historiques.

COÛT ET RÉFÉRENCES MAJEURES

Proposé sous forme d'abonnement ajusté au nombre d'utilisateurs et aux modules activés, TerraIndex équipe aujourd'hui plus de 250 bureaux d'études européens, parmi lesquels Antea Group, ERM, Ramboll, Burgeap, Tauw, Dekra Industrial, Serpol et le groupe Sémofi. Les municipalités et les acteurs industriels peuvent utiliser également cet outil pour recevoir et enregistrer des données sur les sols via un processus de recherche numérique standardisé, ce qui évite que les informations ne soient dispersées dans des rapports séparés et des archives analogiques.

TerraIndex apporte sens, cohérence et fiabilité aux données, dans un domaine où la fiabilité d'un diagnostic repose à la fois sur la précision des mesures et sur la gestion des informations.

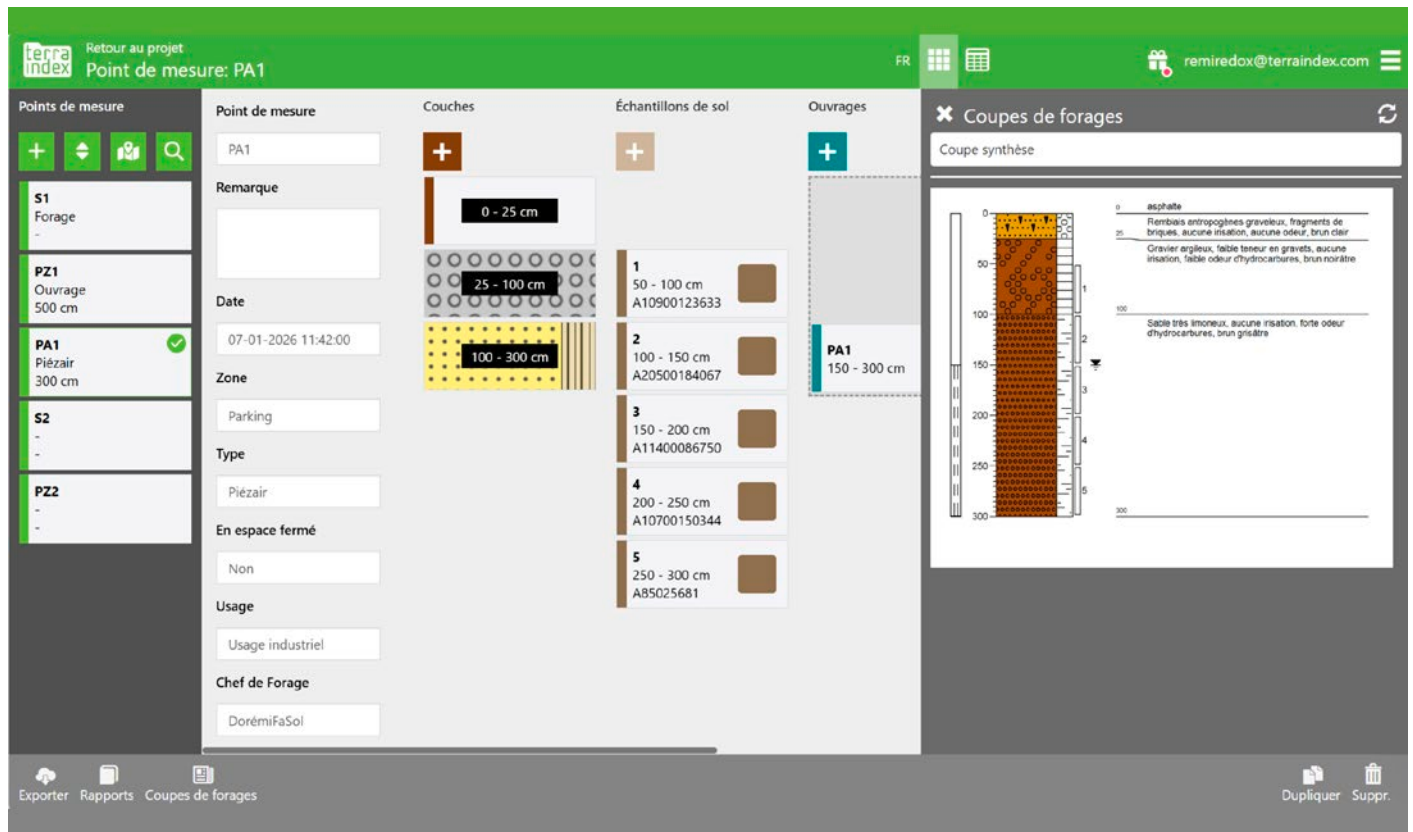


Figure 2. «les données prennent forme dans l'environnement bureau TerraIndex».

// ACTUALITÉ

LES DERNIÈRES PUBLICATIONS
SITES ET SOLS POLLUÉS

RÉGLEMENTATION



- [Arrêté du 03/09/25](#) relatif à l'analyse de substances per- et polyfluoroalkylées dans les eaux en entrée et sortie de stations de traitement des eaux usées urbaines
- [Instruction du 07/09/25](#) relative aux diagnostics des établissements accueillant des enfants et des adolescents situés sur ou à proximité d'anciens sites industriels
- [Décret du 28/12/2025](#) relatif à la prévention des risques résultant de l'exposition aux substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées

GUIDES ET RAPPORTS



- [La bioaccessibilité orale : un outil en santé environnement](#) – 19/09/25
- [Bioaccessibilité orale de l'arsenic sur les sols du RMQS](#) – 23/09/25
- [Feuille de route 2025-2027 "Gestion durable des sols"](#) – 28/09/25
- [5^e rencontres nationales de la recherche sur les SSP \(synthèse et résumés des interventions\)](#) – 4/11/25
- [REX : expérimentation de l'étude des sols selon la méthodologie DESTISOL](#) – 21/11/25
- [Projet BRAINSOL : Evaluation de la toxicité pour le cerveau des mélanges de polluants retrouvés au niveau de sites et sols pollués](#) – 04/12/2025
- [Sites pollués et friches : bilan des projets R&D \(2013-2024\)](#) – 10/12/2025



- [Difficultés rencontrées par les collectivités face aux pollutions d'origine industrielle et sa synthèse](#) – 17/10/25



- [Guide sur la conservation de la mémoire et les restrictions d'usage en contexte SSP](#) – 4/11/25
- [Guide sur l'étude hydrogéologique préalable](#) – 4/11/25
- [Guide Fiches Sites et Sols Pollués - Techniques Innovantes et Éprouvées](#) – 04/12/2025
- [Actions nationales 2026 de l'inspection des installations classées](#) – 23/12/25



- [Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols](#) – 17/10/25
- [Guide pour la préparation des végétaux destinés à la consommation humaine dans le contexte des SSP – Seconde édition](#) – 28/11/25
- [Valeurs de fond des PFAS dans les sols européens et cadre de gestion des sols contaminés par les PFAS sur le territoire flamand](#) – 02/12/2025
- [Diaporamas de la journée technique SSP 2025](#) – 04/12/2025



- [Avis de l'ANSES relatif aux composés per et poly-fluoroalkylés dans différents compartiments : bilan de la contamination et catégorisation en vue de leur surveillance](#) – 22/10/25
- [Résultats de la campagne nationale de mesure dans l'eau destinée à la consommation](#) – 3/12/25



- [Valorisation de matériaux alternatifs en infrastructures linéaires de transport terrestre - Les matériaux de déconstruction du BTP](#) – 2025 (annule et remplace la version de 2016)
- [Aide à la mise en oeuvre du niveau 2 de caractérisation environnementale : Volet n° 1 : les essais lysimétriques et plots expérimentaux](#) – 2025 (annule et remplace la version de 2015)
- [Valorisation de matériaux alternatifs dans les aménagements : étude environnementale et sanitaire](#) – 2025



- [Cahiers des charges et contrats pour les SSP](#) – 7/10/25

SAVE THE DATE



Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites.

COLLOQUE DU
19 NOVEMBRE 2026
9H-17H30

MAITRISER LES PASSIFS
ENVIRONNEMENTAUX :
SÉCURISER LES PROJETS
À L'AUNE DE LA DIRECTIVE SOL



AVEC



INSCRIPTION
prochainement



MAISON DE LA RATP
Paris 12e - Espace Centenaire

intersol'2026

Congrès-Exposition International sur les Sols, les Sédiments et l'Eau
International Conference-Exhibition on Soils, Sediments and Water

24-25-26 mars 2026 - Lille, France
www.intersol.fr

upds **MAG**
LE MAGAZINE DES PROFESSIONNELS
DE LA DÉPOLLUTION DES SITES

 **upds**
Union des Professionnels
de la Dépollution des Sites

183 Av. Georges Clémenceau
92000 Nanterre
T:01 47 24 78 54
www.upds.org