LEGENDRE IMMOBILIER

Site GUILLOUARD à Nantes (44)

Analyse des enjeux sanitaires et plan de gestion

Rapport SER19233/PG-2

Novembre 2025

Siège social
26 rue Louis Pasteur
44119 TREILLIERES
Certifié LNE
02 40 54 50 37

Agence Bretagne
8 rue Albert Jacquard
56700 HENNEBONT
Certifiée LNE
02 97 32 65 41

Agence Nouvelle Aquitaine
35 avenue Gustave Eiffel
33600 PESSAC
Certifiée LNE
05 54 07 34 50

Agence Centre-Val de Loire
2 place Anatole France
37000 TOURS
Certifiée LNE
07 63 21 69 44

Agence Grand Est
14 B rue Pierre de Coubertin
21000 DIJON
06 32 93 49 12

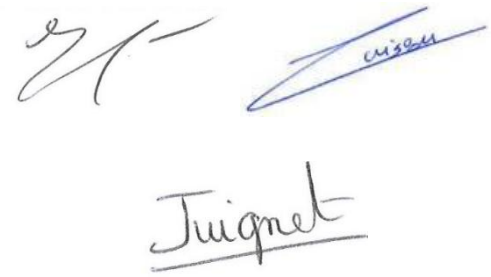
LEGENDRE IMMOBILIER
4 rue Vasco de Gama
44800 SAINT-HERBLAIN

Interlocuteurs : Madame Marie GUILBAUD
Tel : 02 40 40 58 95 85
Portable :
E-mail : marie.guilbaud@groupe-legendre.com

Monsieur Nicolas FONDEMENT
02 40 58 95 85
nicolas.fondement@groupe-legendre.com

Référence du client : vos bon pour accord du 16/12/24
Affaire numéro : SER19233

Trame qualité : version B

	Rédacteurs	**Vérificateur/Approbateur**
NOM Prénom	HERVÉ PIED Glen / LOISEAU Justine / JUIGNET Nathalie	GUEGUEN Hervé / LANDELLE Pauline
Fonction	Chef de projet / Superviseure / Superviseure	Directeur adjoint / Superviseure
Signature		

Historique du document :

Indice	Date d'envoi	Version	Objet
1	17/10/25	Finale	Envoi du rapport
2	03/11/25	Finale	Prise en compte des remarques client

Glossaire

AEP : Alimentation en Eau Potable
AP : Arrêté Préfectoral
AMO : Assistance à Maitrise d'Ouvrage
AFSSA : Agence Française de Sécurité et Sanitaire des Aliments
ANSES : Agence nationale de la sécurité sanitaire en charge de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ARS : Agence Régionale de Santé
ARR : Analyse des Risques Résiduels
AZI : Atlas des Zones Inondables
BASIAS : Base de données des Anciens Sites Industriels et Activités de Service du BRGM
BASOL : Base de données sur les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif, du Ministère de l'Environnement
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSS : Banque de données du Sous-Sol
BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes
CASIAS : Carte des Anciens Sites Industriels et Activités de Service du BRGM
CAV : Composés Aromatiques Volatils dont les BTEX
CLP : Classification, Labelling, Packaging
CMA : Concentration Maximale Admissible
COHV : Composés Organo-Halogénés Volatils
COT : Carbone Organique Total
COV : Composés Organiques Volatils
DICT : Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux
DDRM : Dossier Départemental des Risques Majeurs
DJE : Dose Journalière d'Exposition
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ECHA : European Chemical Agency
EFSA : European Food Safety Authority
EQRS : Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires
ETM : Eléments Traces Métalliques
EPC : Equipements de Protection Collective
EPI : Equipements de Protection Individuelle
ERI : Excès de Risque Individuel
ERU : Excès de Risque Unitaire
FET : Facteur d'Equivalence Toxique
FOD : Fuel domestique
GO : Gazole
GRV : Grand Récipient pour Vrac
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HC : Hydrocarbures
HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique
IARC : International Agency of Research on Cancer
ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IEM : Interprétation de l'Etat des Milieux
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
INCHEM : Institut National de Recherche et de Sécurité
INERIS : 'Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité
IPCS : International Program a Chemical Safety
ISDD : Installation de Stockage de Déchets Dangereux
ISDI : Installation de Stockage de Déchets Inertes
ISDND : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
NGF : Nivellement Général de la France
OEHHA : Office of Environmental Health Hazard Assessment (antenne californienne de l'US EPA)
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
PAPI : Programme d'Actions de Prévention des Inondations
PC : Permis de Construire
PCB : Polychlorobiphényles
PCT : Plan de Conception Travaux
PEHD : Polyéthylène Haute Densité
PID : Détecteur à Photo Ionisation
PLUm : Plan Local d'Urbanisme métropolitain
PPRI : Plan de Prévention des Risques d'Inondation
QD : Quotient de Danger
RIVM : Rijkinstituut voor Volkgazondheid en Milieu (Institut national de la santé publique et de l'environnement aux Pays-Bas)
SIS : Secteur d'Information sur les Sols
TCA : Trivhloroéthane
TCE : Trichloroéthylène
TGAP : Taxe générale sur les activités polluantes
TPH : Total Petroleum Hydrocarbon, répartition des fractions carbonées
TPHCWG : Total Petroleum Hydrocarbon Critera Working Group
TRI : Territoire à Risque important Inondation
US EPA : United States - Environmental Protection Agency
VCI : Valeur de Constat d'Impact
VGAI : Valeur Guide de qualité d'Air Intérieur
VLEP : Valeur Limite d'Exposition Professionnelle
VTR : Valeur Toxicologique de Référence
ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique

Sommaire

Page

1 - Contexte et objectifs 12
2 - Localisation du site et de la zone d'étude 13
3 - Description du projet d'aménagement 15
4 - Données environnementales disponibles au droit et aux abords immédiats du site 17
5 - Identification des pollutions concentrées (A270) 19
5.1. Définition et approche retenue 28
5.2. Analyse des données 30
5.2.1. Analyse statistique 30
5.2.2. Bilan massique des polluants 44
5.2.3. Approche géostatistique 51
5.3. Seuils de coupure retenus 55
6 - Analyse des enjeux sanitaires (A320) 67
6.1. Méthodologie générale 67
6.2. Conclusions du schéma conceptuel 68
6.3. Identification des dangers 68
6.3.1. Sélection des substances à prendre en compte 68
6.3.2. Identification du danger des substances chimiques 69
6.4. Relation dose-réponse des substances chimiques 70
6.5. Estimation des expositions 71
6.5.1. Méthodologie 72
6.5.2. Budget espace-temps et paramètres d'exposition 72
6.5.3. Détermination de la concentration en polluants dans les milieux d'exposition 75
6.5.3.1. Analyses complémentaires 75
6.5.3.2. Concentrations retenues dans le milieu source 76
6.5.3.3. Concentrations en polluants dans les milieux d'exposition 78
6.6. Caractérisation des risques sanitaires 80
6.6.1. Méthodologie 80
6.6.2. Résultats de l'EQRS 81
6.6.3. Etude des incertitudes 83
6.6.4. Proposition de mesures correctives ou compensatoires 88
6.7. Limites et incertitudes de l'EQRS 89
7 - Identification des options de gestion et bilan coûts/ avantages (A330) 90
7.1. Méthodologie 90
7.2. Objectifs de réhabilitation 91

7.3. Synthèse des impacts à gérer 92
7.3.1. Caractéristiques des zones à réhabiliter dans les sols et les gaz du sol 92
7.3.2. Caractéristiques des polluants 100
7.4. Détermination des scénarios de gestion 102
7.4.1. Généralités 102
7.4.2. Techniques de réhabilitation et solutions de gestion sélectionnées 102
7.4.3. Scénarios de gestion retenus 107
7.4.4. Ingénierie des travaux 110
7.4.5. Surveillance post-travaux, servitudes et restrictions associées aux scénarios de gestion 111
7.4.5.1. Surveillance de la qualité des milieux 111
7.4.5.2. Servitudes ou restrictions d'usage 111
7.5. Synthèse des coûts des scénarios de gestion 113
7.6. Bilan coûts/avantages des scénarios de gestion retenus 115
8 - Schéma conceptuel après mise en œuvre du scénario de gestion privilégié 117
9 - Synthèse technique et recommandations 120
9.1. Synthèse technique 120
9.2. Recommandations 125
10 - Discussion des limites et incertitudes 126

FIGURES

Figure 1 : Plan de situation 13
Figure 2 : Vue sur le site GUILLOUARD à Nantes (44) (Géoportail, 2022) 14
Figure 3 : Plan de masse du projet d'aménagement (source : D&A, 29 octobre 2025) 16
Figure 4 : Localisation des carottages bétons déjà réalisés 19
Figure 5 : Localisation des sondages déjà réalisés 20
Figure 6 : Localisation des piézomètres déjà réalisés 21
Figure 7 : Localisation des piézairs déjà réalisés 22
Figure 8 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 0 et 2 m de profondeur 26
Figure 9 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 2 et 6 m de profondeur 27
Figure 10 : Localisation des teneurs en hydrocarbures C_{10}-C_{40} supérieures à 6 200 mg/kg MS 52
Figure 11 : Localisation des teneurs en HAP supérieures à 170 mg/kg MS 52
Figure 12 : Localisation des teneurs pour la somme du trichloréthylène et du 1,1,1-trichloroéthane supérieures à 10 mg/kg MS 53
Figure 13 : Localisation des teneurs en zinc supérieures à 21 000 mg/kg MS 53
Figure 14 : Localisation des teneurs en plomb supérieures à 5 300 mg/kg MS 54
Figure 15 : Localisation des teneurs en étain supérieures à 3 600 mg/kg MS 54
Figure 16 : Localisation des zones de pollution de concentrée - Entre 0 et 1 m de profondeur 61
Figure 17 : Localisation des zones de pollution de concentrée - Entre 1 et 2 m de profondeur 62
Figure 18 : Localisation des zones de pollution de concentrée - Entre 2 et 3 m de profondeur 63

Figure 19 : Localisation des zones de pollution de concentrée - Entre 3 et 4 m de profondeur 64
Figure 20 : Localisation des zones de pollution de concentrée - Entre 4 et 5 m de profondeur 65
Figure 21 : Localisation des zones de pollution de concentrée - Entre 5 et 6 m de profondeur 66
Figure 22 : Plan masse du projet du 29/10/2025 avec usages et superposition des piézairs 73
Figure 23 : Localisation des bâtiments conservés (source : LEGENDRE IMMOBILIER, sans échelle) 92
Figure 24 : Schéma conceptuel après mise en œuvre du scénario de gestion privilégié 119

TABLEAUX

Tableau 1 : Distribution des concentrations (mg/kg MS) 30
Tableau 2 : Synthèse des seuils définis par méthode et seuils retenus 55
Tableau 3 : Mise à jour de la distribution des concentrations dans les sols après traitement des pollutions concentrées (mg/kg MS) 56
Tableau 4 : Zones de pollution concentrée 58
Tableau 5 : VTR des substances retenues 71
Tableau 2 : Budget espace-temps et paramètres d'exposition 74
Tableau 7 : Résultats d'analyses sur les sols (%) - Granulométrie 75
Tableau 8 : Concentrations des substances retenues dans le milieu source (mg/m^3) 77
Tableau 9 : Résultats de l'EQRS 82
Tableau 10 : Concentrations maximales des substances retenues dans le milieu source (mg/m^3) - Etude des incertitudes 84
Tableau 11 : Résultats de l'EQRS - Etude des incertitudes - Teneurs maximales 85
Tableau 12 : CMA par aménagement (mg/m^3) - Etude des incertitudes 86
Tableau 13 : Résultats de l'EQRS - Etude des incertitudes - Dégradation du trichloroéthylène en chlorure de vinyle 87
Tableau 14 : Résultats de l'EQRS - Etude des incertitudes - Augmentation de l'exposition des étudiants 88
Tableau 15 : Caractéristiques des zones à réhabiliter 93
Tableau 16 : Synthèse des techniques de réhabilitation et solutions de gestion sélectionnées 103
Tableau 17 : Filières d'élimination hors site pressenties 104
Tableau 18 : Synthèse des coûts des scénarios de gestion des sols 114
Tableau 19 : Bilan coûts/avantages des scénarios de gestion des zones à réhabiliter dans les sols 115
Tableau 20 : Données du schéma conceptuel après mise en œuvre du scénario de gestion privilégié 118

ANNEXES

Annexe 1 : Etudes antérieures réalisées sur ou aux abords immédiats du site (2016 à 2025)
- Annexe 1-1 : Abords du site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution (Réf. SER16145-1)
- Annexe 1-2 : Etablissement GUILLOUARD - Diagnostic environnemental du milieu souterrain (Réf. RESILB06125-03)
- Annexe 1-3 : Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution des milieux (Réf. SER19233/DIAG-1)
- Annexe 1-4 : Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux (Réf. SER19233/COMPL-1)
- Annexe 1-5 : Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux (Réf. SER19233/COMPL2-1)
- Annexe 1-6 : Site GUILLOUARD à Nantes (44) – Investigations complémentaires sur les milieux (Réf. SER19233/COMPL3-1)

Annexe 2 : Résultats d'analyses de sols des études (2016 à 2025)

Annexe 3 : Approche géostatistique des pollutions concentrées

Annexe 4 : Annexes de l'analyse des enjeux sanitaires
- Annexe 4-1 : Choix des substances retenues dans l'étude
- Annexe 4-2 : Dangers des substances retenues dans l'étude
- Annexe 4-3 : Equations utilisées pour la modélisation sanitaire
- Annexe 4-4 : Rapport d'essai d'analyses du laboratoire - Granulométrie
- Annexe 4-5 : Paramètres physico-chimiques des substances retenues dans l'étude
- Annexe 4-6 : Paramètres retenus pour la modélisation du transfert des polluants
- Annexe 4-7 : Résultats détaillés de l'EQRS
- Annexe 4-8 : Limites et incertitudes de l'EQRS
- Annexe 4-9 : Références bibliographiques

Présentation du site

Client : LEGENDRE IMMOBILIER
Contexte de l'étude : Requalification urbaine
Propriétaire : LEGENDRE IMMOBILIER
Ancien exploitant : Etablissements GUILLOUARD
Usage actuel du site : Aucun (anciennement industriel)
Usage futur du site : Résidentiel, tertiaire at activités
Adresse : 15 boulevard des Martyrs Nantais de la Résistance - 44200 NANTES

Objectifs de l'étude

Les objectifs de cette étude sont de :

- Définir des seuils de pollution concentrée ;
- Définir des mesures de gestion des pollutions avec une approche technique, sanitaire et économique raisonnée, accompagné d'une analyse des enjeux sanitaires assurant la comptabilité sanitaire entre la qualité des milieux et l'usage défini au droit du site.

Etudes antérieures

Six diagnostics de pollution des milieux ont été réalisés au droit ou à proximité immédiate du site :

- « Abords du site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution » (Réf. SER16145-1) réalisé par SEREA en octobre 2016 ;
- « Etablissement GUILLOUARD - Diagnostic environnemental du milieu souterrain » (Réf. RESILB06125-03) réalisé par BURGEAP en novembre 2016 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution des milieux » (Réf. SER19233/DIAG-1) réalisé SEREA en décembre 2020 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL-1) réalisé par SEREA en septembre 2021 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL2-1) réalisé par SEREA en avril 2022 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) – Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL3-1) réalisé par SEREA en octobre 2025.

Ont ainsi été réalisés, plus de 200 sondages sols et l'analyse de 445 échantillons, 5 campagnes de prélèvements des eaux souterraines sur tout ou partie des 21 ouvrages piézométriques mis en œuvre sur et hors site, et 6 campagnes de prélèvements des gaz du sol sur tout ou partie des 35 piézairs mis en œuvre entre 2019 et 2025.
Ces études ont mis en évidence le début des activités du site Guillouard à partir du début des années 1920 jusqu'à 2016. Le site a été aménagé sur d'anciens îlots de l'Ile de Nantes entrecoupés par des chenaux (boires) qui ont été progressivement remblayés par des matériaux divers tels que des remblais de qualité médiocre, des sables de fonderies, des gravats de démolition etc…
Le site produisait des ustensiles et outils en fer étamé et zingué (bassine, lampe tempête, presse purée, outil de jardinage, ….). Plusieurs process industriels de découpe, pliage, forge, usinage mécanique et chimique, dégraissage et peinture ont été mis en œuvre sur le site. Celui-ci s'est étendu vers l'Est au fur et à mesure de son histoire, jusqu'à atteindre l'emprise actuelle d'environ 2 ha. A noter que le site a été ponctuellement bombardé pendant la seconde guerre mondiale et qu'il a également été utilisé pour la production de corps d'obus.
Les principaux polluants rencontrés dans les sols sont les métaux issus des remblais ou du process de production, les hydrocarbures ayant pour sources les cuves de fioul des chaufferies, les solvants chlorés utilisés pour le dégraissage et les BTEX issus des activités de peintures. Il est à noter qu'aucun indice visuel

de la présence de matériaux amiantés de type fibrociment n'a été observé lors de la réalisation des sondages à la pelle mécanique.
Concernant les eaux souterraines, le sens d'écoulement est globalement orienté du Nord-Ouest vers le Sud Est avec un niveau globalement situé au-delà de 5 m de profondeur par rapport au terrain actuel (en moyenne 1,25 m NGF). Hors site les eaux souterraines sont faiblement à modérément impactées et à l'intérieur du site on note un impact significatif en hydrocarbure dans l'angle Nord-Est du site au droit de l'ancienne cuve de fioul, et des teneurs notables en COHV, mais n'excédant pas 100 µg/l, en partie Est et Sud Est du site pour la somme des composés COHV.
Concernant les gaz du sol, les polluants identifiés sont les COHV, en lien avec les impacts en COHV déjà observés dans les sols.

- **Identification des pollutions concentrées (A270)**

Des seuils de pollution concentrée ont été définis dans les sols pour les polluants jugés pertinents.
Les seuils de coupure retenus sont les suivants :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40} : 6 000 mg/kg MS ;
- HAP : 170 mg/kg MS ;
- Somme du trichloroéthylène et du 1,1,1-trichloroéthane : 10 mg/kg MS ;
- Etain sur brut : 3 600 mg/kg MS ;
- Plomb sur brut : 5 400 mg/kg MS ;
- Zinc sur brut : 21 000 mg/kg MS.

29 zones de pollution concentrées comprises entre 0 et 6 m de profondeur ont ainsi été identifiées représentant un volume d'environ 10 250 m^3 soit 17 950 tonnes.

- **Schéma conceptuel (A270) et analyse des enjeux sanitaires (A320)**

Le schéma conceptuel a été établi selon le projet d'aménagement envisagé (usages mixtes comprenant logements, bureaux et activités) et sur la base de l'ensemble des résultats d'analyses obtenus.
Les mesures de gestion suivantes sont considérées dans le cadre du projet, afin de limiter les risques pour les futurs usagers :

- Recouvrement de l'ensemble de la zone d'étude (bâti, béton, enrobé, pavés, terre végétale, …) ;
- Absence d'usage des eaux souterraines ;
- Protection des canalisations d'Alimentation en Eau Potable (AEP) vis-à-vis de la diffusion des polluants volatils ;
- Absence d'eaux superficielles ;
- Absence de potager et de verger.

Le schéma conceptuel a mis en évidence des risques potentiels pour les futurs usagers du site dans le cadre du projet par inhalation de substances volatiles dans l'air ambiant, en intérieur et en extérieur.
Les risques liés à cette voie d'exposition ont été quantifiés dans une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS). Cette EQRS a été réalisée au droit du site, en tenant compte de l'ensemble des résultats d'analyses de sols, d'eaux souterraines et de gaz du sol et des conclusions du schéma conceptuel. Les risques ont donc été quantifiés pour la voie d'exposition par inhalation de substances volatiles en intérieur et en extérieur.
Les calculs ont mis en évidence des risques acceptables (inférieurs aux valeurs de référence de la méthodologie nationale) pour les futurs usagers du site, pour les scénarios retenus et avec les hypothèses et les dispositions constructives énoncées. Le projet envisagé est donc compatible sur le plan sanitaire avec la qualité résiduelle des milieux après réhabilitation. Il n'y a pas de purge complémentaire à prévoir

pour garantir la compatibilité sanitaire du projet en plus des travaux prévu pour la gestion des pollutions concentrées.

- **Identification des options de gestion et bilan coûts/avantages (A330)**

L'objectif de réhabilitation est l'atténuation des pollutions concentrées dans les sols. Les seuils de réhabilitation considérés pour les sols correspondent aux seuils de pollution concentrée pré-identifiés.
Au regard de la médiocre qualité des remblais et des impacts diffus en métaux sur l'ensemble du site, ces seuils de réhabilitation permettent la suppression des spots hautement concentrés.
Au regard des contraintes liées à la conservation du fronton et une partie des sheds du site, le maintien en place d'une partie de la pollution concentrée a été considéré (PC4, PC27 et une partie de PC5).
Les zones à réhabiliter correspondent donc aux zones de pollution concentrée accessibles (hors emprise des bâtiments conservés dans le cadre du projet d'aménagement), dans les limites techniques possibles.

Le volume de sols à réhabiliter est estimé à 10 250 m^3, soit environ 17 950 tonnes.

Deux scénarios de gestion ont été envisagés pour répondre à cet objectif :

- **Scénario 1** : Purge et évacuation hors site en filières adaptées de la totalité des sols issus des zones de pollution concentrée (17 950 tonnes), maintien du recouvrement au droit du fronton et des sheds conservés et comblement des fouilles par apport de matériaux (coût estimé scénario 1 entre 3 429 K€ HT et 4 193 € HT) ;
- **Scénario 2** : Excaver les sols issus des zones de pollution concentrée, évacuation hors site d'une partie (environ 6 850 tonnes), maintien du recouvrement au droit du fronton et des sheds conservés et traitement de l'autre partie (environ 11 100 tonnes) sur site par lavage, avant réutilisation des terres traitées en remblais en comblement des fouilles et évacuation de la fraction fine concentrant les polluants en filières adapté hors site (coût estimé scénario 2 entre 3 115 K€ HT et 4 966 K€ HT).

Le scénario qui présente le meilleur bilan coûts/avantages est le scénario n°2.

Les seuils de réhabilitation pour ce scénario correspondraient aux seuils de pollution concentrée. Le montant global est estimé entre **3 115 et 4 966 k€ HT**, pour un délai de 12 mois, y compris frais de Plan de Conception de Travaux et études préalables.
Ce montant intègre :

- La gestion des enrobés et des dallages (non traités dans la phase démolition) ;
- Les coûts d'approvisionnement et de mis en œuvre des remblais de comblement des fouilles et de mise à la côte du projet d'aménagement ;
- Les terrassements suivis par un prestataire spécialisé en risques pyrotechniques.

Quel que soit le scénario retenu, des essais en laboratoire et essais pilotes de traitement seront nécessaires pour préciser la faisabilité des mesures de gestion et en affiner le coût.
A ce coût doit s'ajouter les frais de Maitrise d'Œuvre par un prestataire spécialisé en sites et sols polluées et certifié par le LNE pour les prestations d'ingénierie et de maitrise d'œuvre. Les honoraires de MOE sont estimés à ce stade entre 200 et 250 K€ HT.

- **Recommandations**

Le plan de gestion considère en base les restrictions d'usages et servitudes suivantes :

- Recouvrement de l'ensemble de la zone d'étude (bâti, béton, enrobé, pavés, terre végétale, …) ;
- Absence d'usage des eaux souterraines ;
- Protection des canalisations d'Alimentation en Eau Potable (AEP) vis-à-vis de la diffusion des polluants volatils ;
- Absence d'eaux superficielles ;
- Absence de potager et de verger
- Mise en œuvre de géotextile à l'interface entre les sols en place qui conservent des pollutions résiduelles et les remblais d'apport
- Au droit des fosses d'arbres, mise en œuvre d'un géotextile sous l'emprise du houppier à -0,40 m sous la surface finie et d'un grillage avertisseur en profondeur à l'interface entre les sols en place qui conservent des pollutions résiduelles et les remblais d'apport ;
- Réalisation de 2 campagnes de prélèvement et analyses des gaz du sol après travaux et réalisation d'une Analyse des Risques Résiduels (ARR) afin de confirmer l'absence de risque sanitaire inacceptable pour les futurs usagers ;
- Mise place d'une surveillance semestrielle de la qualité des eaux souterraines après travaux (sur une durée minimale de 4 ans), avec bilan quadriennal permettant de décider l'arrêt ou la prorogation de cette surveillance ;
- Classement du site en SIS, pour conserver la mémoire des travaux, de la présence de pollution résiduelle et des restrictions d'usage.

Les travaux de réhabilitation devront être suivis et contrôlés par une société spécialisée et certifiée dans le domaine des sites et sols pollués. Des réceptions permettront de s'assurer de la qualité résiduelle des sols et des gaz du sol et de valider l'atteinte des objectifs de réhabilitation.

En amont de la phase de consultation et conformément à la méthodologie nationale en vigueur un Plan de Conception des Travaux (PCT) sera à réaliser pour détailler la faisabilité et le coût du lavage avec essais labo et essais pilotes en grandeur nature. Ce PCT devra également intégrer des essais géotechniques, afin de valider la faisabilité des terrassement profonds et le pompage traitement des eaux souterraines associé.

Dans la phase travaux, des mesures de réduction et de contrôle des nuisances (bruit, vibrations, émanations de poussières et gazeuses, …) devront être mises en place. Ces mesures intégreront un suivi de la qualité des eaux souterraines, ainsi que des mesures de la qualité de l'air ambiant (poussières et gaz), sur et en proche périphérie du chantier. Des moyens tels qu'extracteur et filtration en pied de pelle et brumisation seront à prévoir.

Enfin, une ATTES ALLUR sera à établir et à annexer à la demande de PC/PA.

1 - Contexte et objectifs

Les Etablissements GUILLOUARD exploitaient un site industriel spécialisé dans la fabrication d'ustensiles ménagers en acier galvanisé ou étamé sur l'Ile de Nantes (44). Cette société, classée ICPE soumise à autorisation, a notifié sa cessation définitive d'activité à la préfecture le 7 mars 2016 et a vendu son terrain le 15 septembre 2020 à la société LEGENDRE IMMOBILIER, laquelle y envisage un projet de requalification urbaine.

Dans ce contexte, la société LEGENDRE IMMOBILIER a mandaté SEREA pour l'accompagner sur l'ensemble du processus de reconversion urbaine notamment pour le volet Sites et Sols Pollués, avec pour cette étude la réalisation d'une étude sanitaire et d'un plan de gestion.

Le projet d'aménagement comprend la réalisation d'un projet urbain comprenant la démolition d'une partie des bâtiments, l'aménagement de nouveaux de R+1 à R+9 sans niveau de sous-sol avec une mixité d'usage (logements collectifs, bureaux, activités et parking) et des aménagements paysagers.

Plusieurs études environnementales ont déjà été réalisées au droit ou à proximité immédiate du site. Des impacts en produits hydrocarburés (hydrocarbures C_5-C_{10}, hydrocarbures C_{10}-C_{40}, CAV, HAP et PCB), COHV, métaux sur brut et les chlorures.

Les objectifs de cette étude complémentaires sont de :

- La définition de seuils de pollution concentrée ;
- Un plan de gestion permettant de définir des mesures de gestion des pollutions avec une approche technique, sanitaire et économique raisonnée, accompagné d'une analyse des enjeux sanitaires assurant la comptabilité sanitaire entre la qualité des milieux et l'usage défini au droit du site.

Cette étude est réalisée conformément aux textes ministériels de février 2007 et d'avril 2017 en matière de sites et sols pollués et au guide des diagnostics des sites et sols pollués du Ministère d'avril 2023 et en application de la norme NF X 31-620 « Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués » en vigueur.

Missions		Objectifs
A270	**Interprétation des résultats**	Présenter, synthétiser et interpréter les résultats des investigations sur les milieux
	Schéma conceptuel	Identifier les sources de pollution, voies de transferts et enjeux à protéger
A320	**Analyse des enjeux sanitaires (de type EQRS)**	Evaluer les risques sanitaires
A330	**Identification des options de gestion possibles et réalisation d'un bilan coûts/avantages**	Proposer les options de gestion présentant le bilan coûts/avantages le plus adapté

2 - Localisation du site et de la zone d'étude

Le site est localisé au 15 boulevard des Martyrs Nantais de la Résistance sur l'Ile de Nantes (44). Il se trouve à environ 1,5 km au Sud/Sud-Est de la mairie centrale de Nantes, à une altitude moyenne d'environ + 8 m NGF (figure 1).

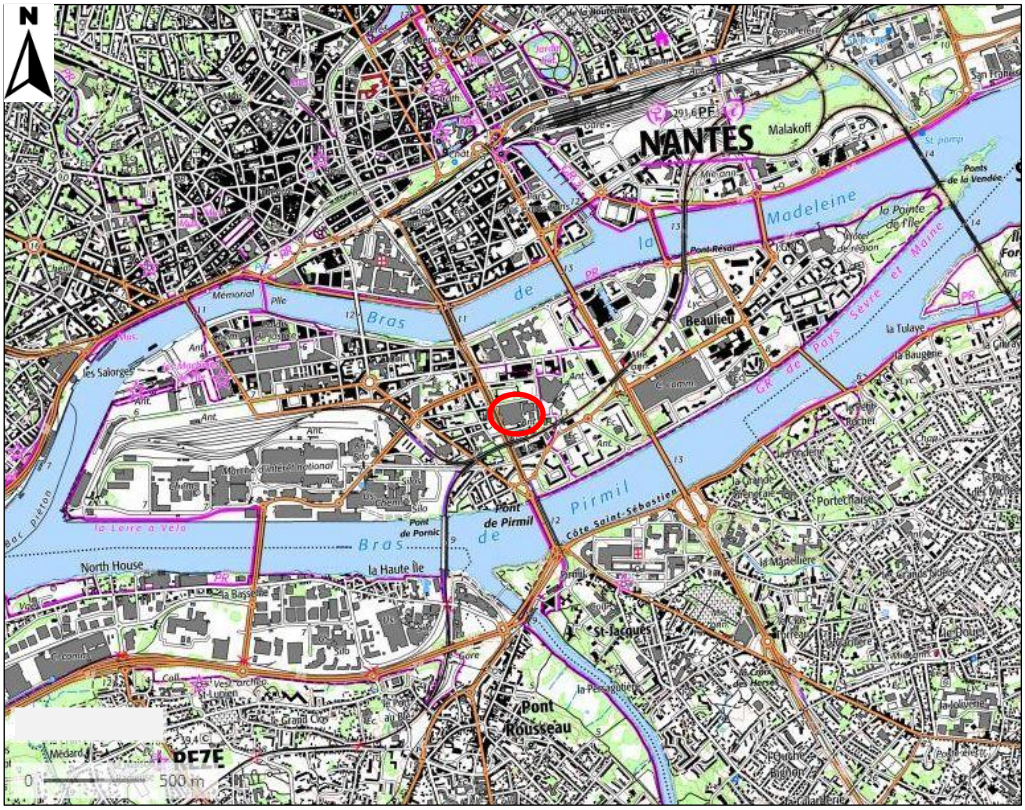


Figure 1 : Plan de situation

Il correspond à la parcelle cadastrale n°14 de la section DT.

D'après le PLUm[1] de Nantes Métropole le site se trouve en zone UMb2 qui « *correspond aux quartiers de grands ensembles ou de projets urbains à la morphologie spécifique de l'Île de Nantes à l'exception de la pointe Beaulieu, du faubourg et du secteur d'aménagement situé au Sud-Ouest* ».

[1] PLU : Plan Local d'Urbanisme métropolitain

Le règlement de cette zone stipule que :

- Les constructions, ouvrages et travaux destinés aux activités industrielles, de commerce de gros, entreposage et à l'exploitation forestières sont interdits ;

- Les constructions et extensions relevant de la sous-destination industrie sont admises à condition qu'elles soient compatibles avec le fonctionnement du quartier (activités industrielles de type artisanat de production).

La zone d'étude correspond à l'ensemble du site (figure 2).



Figure 2 : Vue sur le site GUILLOUARD à Nantes (44) (Géoportail, 2022)

3 - Description du projet d'aménagement

L'usage futur défini dans le cadre de la reconversion du site correspond à la conception des grands projets urbains porteurs de renouvellement des quartiers (logements, bureaux, équipements et services) avec un usage résidentiel et tertiaire, conformément au PLUm du 05/04/2019.

LEGENDRE IMMOBILIER projette l'aménagement futur du site suivant (figure 3), en conformité avec le plan guide de Nantes Métropole :

- La démolition des bâtiments actuels à l'exception du maintien du fronton et des Sheds (1A, 1B et 2) pour réhabilitation au Sud-Ouest et Sud du site ;

- L'aménagement de nouveaux bâtiments allant de R+1 à R+9 sans niveau de sous-sol avec une mixité d'usage :
  - Logements collectifs ;
  - Bureaux ;
  - Activités ;
  - Parking.

- Des espaces extérieurs occupés par :
  - Des voies de circulation (voirie, chemin piéton et terrasse) ;
  - Des espaces végétalisés ;
  - Des noues et tranchées drainantes d'infiltration des eaux pluviales.



Figure 3 : Plan de masse du projet d'aménagement (source : D&A, 29 octobre 2025)

4 - Données environnementales disponibles au droit et aux abords immédiats du site

Six diagnostics de pollution des milieux ont été réalisés au droit ou à proximité immédiate du site :

- Diagnostic de pollution des milieux réalisé aux abords du site GUILLOUARD par SEREA en octobre 2016 et intitulé « *Abords du site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution* » (Réf. SER16145-1), comprenant la réalisation de :
  - 11 sondages ;
  - 7 piézomètres et le prélèvement de 8 ouvrages (les 7 nouveaux et 1 installé dans le cadre d'une étude d'ICF Environnement sur le parking des Fonderies au Nord du site) ;

- Diagnostic de pollution des milieux réalisé au droit du site GUILLOUARD par BURGEAP en novembre 2016 et intitulé « *Etablissement GUILLOUARD - Diagnostic environnemental du milieu souterrain* » (Réf. RESILB06125-03), comprenant la réalisation de :
  - 33 sondages ;
  - 3 piézomètres et leur prélèvement ;

- Diagnostic de pollution des milieux réalisé au droit du site GUILLOUARD par SEREA en décembre 2020 et intitulé « *Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution des milieux* » (Réf. SER19233/DIAG-1), comprenant la réalisation de :
  - 14 carottages de dalles bétons ;
  - 111 sondages ;
  - 7 piézomètres et 2 campagnes de prélèvements (14 ouvrages en janvier 2020 et 17 ouvrages en octobre/novembre 2020) ;
  - 11 piézairs et 2 campagnes de prélèvements (10 ouvrages en décembre 2019 et 11 ouvrages en octobre/novembre 2020) ;

- Investigations complémentaires sur les milieux réalisées au droit du site GUILLOUARD par SEREA en septembre 2021 et intitulé « *Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux* » (Réf. SER19233/COMPL-1), comprenant la réalisation de :
  - 31 sondages ;
  - 2 piézomètres et une campagne de prélèvements (2 ouvrages en juillet 2021) ;
  - 4 piézairs et une campagne de prélèvements (4 ouvrages en juillet 2021) ;

- Investigations complémentaires sur les milieux réalisées au droit du site GUILLOUARD par SEREA en avril 2022 et intitulé « *Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux* » (Réf. SER19233/COMPL2-1), comprenant la réalisation de :
  - 5 sondages ;
  - Une campagne de prélèvements des eaux souterraines (2 ouvrages en janvier 2022) ;
  - Une campagne de prélèvements des gaz du sol (4 ouvrages en janvier 2022) ;

- Investigations complémentaires sur les milieux réalisées au droit du site GUILLOUARD par SEREA en octobre 2025 et intitulé « Site GUILLOUARD à Nantes (44) – Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL3-1), comprenant la réalisation de :
  - 25 sondages ;
  - 24 piézairs et une campagne de prélèvements (31 ouvrages en janvier 2025).

Les deux premiers rapports ont été réalisés pour le compte de la société GUILLOUARD et de la SAMOA, qui nous ont autorisés à les utiliser pour la présente étude. Ils nous ont été transmis par LEGENDRE IMMOBILIER.

L'ensemble de ces études est présenté en annexe 1.

La localisation des investigations réalisées sont présentées les figures suivantes avec :

- Les carottages bétons en figure 3.
- Les sondages en figure 4 ;
- Les piézomètres en figure 5 ;
- Les piézairs en figure 6.



Légende :

- Bâti actuel
- Carottage béton
- Dalle béton souillée aux hydrocarbures
- Surface non bétonnée (enrobé ou gravier)
- Emprise du site d'étude
- Dalle béton attaquée par des produits chimiques

Figure 4 : Localisation des carottages béton déjà réalisés

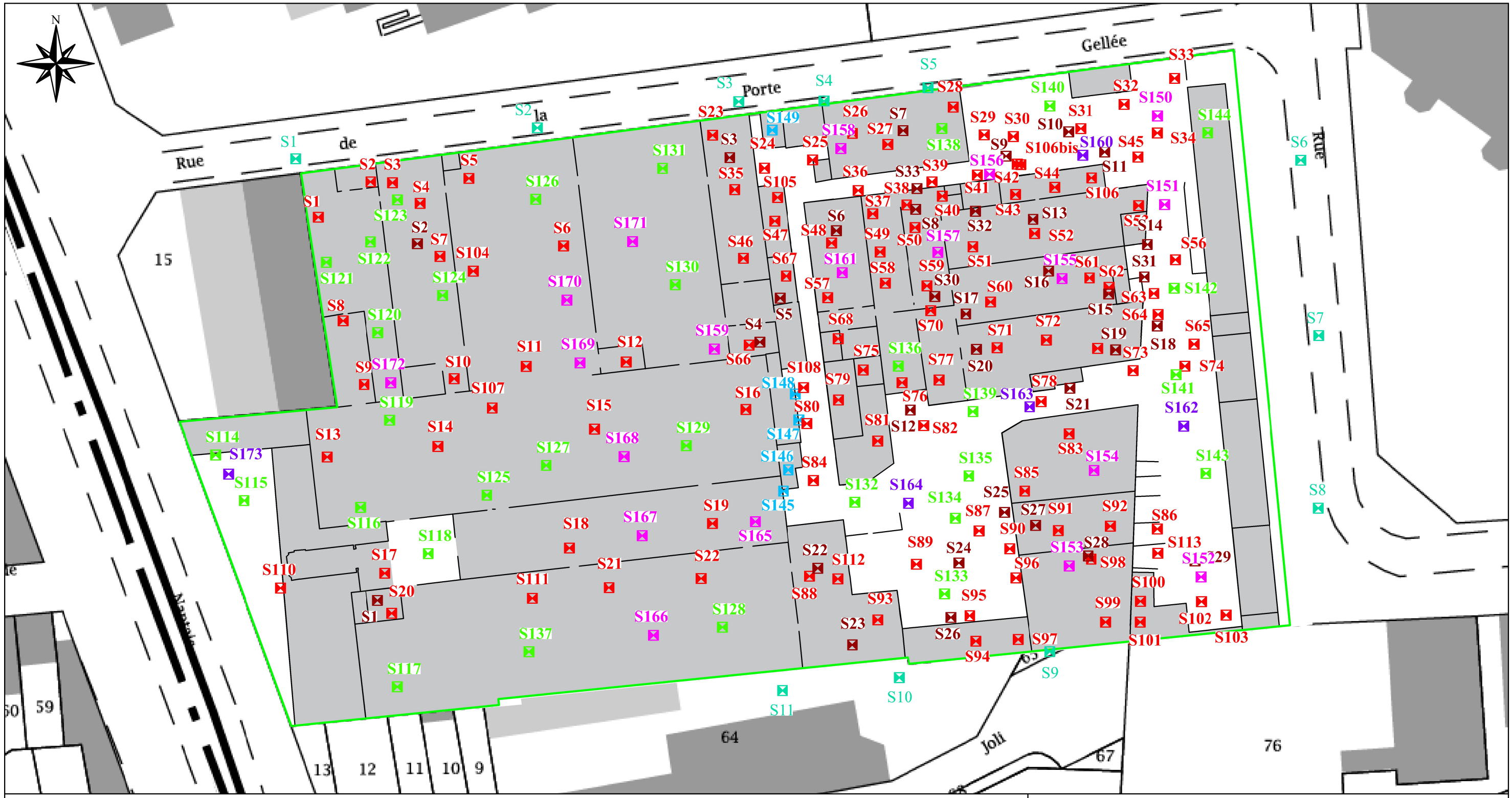
Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA en 2016
- Sondage réalisé par SEREA en 2019
- Sondage réalisé par SEREA en 2021
- Sondage réalisé par SEREA en 2022
- Sondage réalisé par SEREA en 2025
- Sondage réalisé par SEREA en 2025 (repérage amiante)

Figure 5 : Localisation des sondages déjà réalisés

Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Piézomètre réalisé par BURGEAP en 2016
- Piézomètre réalisé par SEREA en 2016
- Piézomètre réalisé par ICF Environnement en 2016
- Piézomètre réalisé par SEREA en 2019
- Piézomètre réalisé par SEREA en 2020
- Piézomètre réalisé par SEREA en 2021

Figure 6 : Localisation des piézomètres déjà réalisés

Echelle : 1/1 000
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA
Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Piézair réalisé en 2019
- Piézair réalisé en 2021
- Piézair réalisé en 2025
- Piézair inutilisable

Figure 7 : Localisation des piézairs déjà réalisés

Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières

Les résultats des différentes investigations ont mis en évidence :

- Sur les bétons, la possibilité d'évacuation, après concassage et sous réserve d'acceptation préalable par le centre de traitement :
  - En ISDI au droit des zones des carottages S6-béton, S21-béton, S60-béton et S76-béton ;
  - En ISDI+ au droit de la zone du carottage S50-béton ;
  - En ISDND au droit des zones des carottages S35-béton, S51-béton, S54-béton, S71b-béton, S72-béton et S91-béton ;
  - En ISDD après stabilisation au droit des zones des carottages S7-béton, S66-béton, S83-béton ;
  - En incinération au droit de la zone du carottage S71a-béton ;

- Sur les sols :
  - La présence dans les remblais du site de déchets de démolition et/ou mâchefers sur la majorité des sondages réalisés ;
  - L'absence d'amiante lors de la réalisation des sondages à la pelle mécanique ;
  - Un impact généralisé en métaux sur échantillon brut dans les remblais du site (antimoine, arsenic, baryum, cadmium, cuivre, mercure, plomb, molybdène, étain, fer et zinc) avec de forts dépassements des valeurs observées dans le cas d'anomalies naturelles modérées et/ou de la valeur du fond géochimique européen ;
  - De nombreuses zones d'impact en produits hydrocarburés et en COHV sur l'ensemble du site, principalement dans sa partie Est. La majorité des impacts sont localisés entre 0 et 2 m de profondeur, mais certaines zones se prolongent jusqu'à 6 m de profondeur ;
  - Des teneurs remarquables en phosphore, chlorures, sulfates et soufre total au droit la partie Ouest du site ;
  - Concernant la caractérisation des sols, la non-admissibilité de 50 % des échantillons analysés, liées à des dépassements des seuils ISDI sur échantillon brut (hydrocarbures C_{10}-C_{40} et/ou HAP) et ou sur lixiviat (antimoine, arsenic, zinc, sulfates, fluorures, chlorures et /ou fraction soluble). Il est rappelé également que certains constats organoleptiques de pollution (remblais avec déchets démolition et/ou mâchefers) peuvent également être un critère discriminant d'acceptation en filière ISDI pour les matériaux à priori inertes ;

- Sur les eaux souterraines :
  - Un sens d'écoulement local des eaux souterraines orienté globalement de l'Ouest vers l'Est avec un dôme piézométrique au droit de l'ouvrage Pz5 influençant le sens d'écoulement sur toute la partie Est du site. Ce sens découlement n'est pas influencé par le phénomène de marnage mais le gradient hydraulique faible au droit du site induit des faibles variations du sens d'écoulement local ;
  - Des impacts sur les eaux souterraines avec :

- Une zone au droit des piézomètres Pz1 et Pz5 (Nord-Est du site) localisés respectivement en latéral-amont hydraulique et au centre du site, avec un impact en hydrocarbures C_{10}-C_{40} ;
- Une zone d'impact en COHV au droit des piézomètres Pz2, Pz5, Pz6, Pz8 et P4 (Sud/Sud-Est du site) localisés au centre ou en aval hydraulique du site.

Ces impacts sur les eaux souterraines restent modérés au regard des constats réalisés sur le milieu sol, mais ils sont constatés en aval hydraulique aux abords du site ;

- Des anomalies modérées en métaux, chlorures et sulfates, sauf ponctuellement pour le manganèse, le fer et le zinc ;

➢ Sur les gaz du sol, des impacts en COHV au droit de 4 zones :
- Une au Nord-Est du site (Pa1, Pa2 et Pa12) ;
- Une en partie centrale Nord-Est du site (Pa5 à Pa7) ;
- Une au Sud/Sud-Est du site (Pa8) ;
- Une au Nord-Ouest du site (Pa10 et Pa13).

A partir des résultats des investigations sur les sols des trois premiers diagnostics des seuils de pollutions concentrées ont été déterminés pour plusieurs paramètres :

➢ 6 000 mg/kg MS pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40} ;
➢ 150 mg/kg MS pour les HAP ;
➢ 20 mg/kg MS pour la somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane ;
➢ 30 000 mg/kg MS pour le zinc ;
➢ 6 000 mg/kg MS pour le plomb ;
➢ 6 000 mg/kg MS pour l'étain.

Selon les seuils retenus et les teneurs en chlorures, plusieurs zones de pollution concentrée ont été identifiées (figure 7) :

➢ Entre 0 et 2 m de profondeur :
- **Zone PC1** : HAP de 0 à 1 m de profondeur environ au droit des sondages S1 et S8, dans l'angle Nord-Ouest du site ;
- **Zone PC2** : plomb de 0 à 2 m de profondeur environ au droit du sondage S4, au Nord-Ouest du site ;
- **Zone PC3** : hydrocarbures C_{10}-C_{40} de 0 à 0,5 m de profondeur environ au droit du sondage S13, à l'Ouest du site ;
- **Zone PC4** : étain de 0 à 2 m de profondeur environ au droit du sondage S14, à l'Ouest du site ;
- **Zone PC5** : zinc de 1 à 2 m de profondeur environ au droit du sondage S48, en partie centrale Nord du site ;
- **Zone PC6** : étain de 0 à 1 m de profondeur environ au droit du sondage S27, au Nord du site ;

- **Zone PC7** : hydrocarbures C_{10}-C_{40}, HAP, somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane et zinc de 0 à 2 m de profondeur environ au droit des sondages S8 et S30 de l'étude BURGEAP ainsi que S37, S38, S39, S40, S50 et S59 de l'étude SEREA, en partie centrale Nord du site ;
- **Zone PC8** : plomb et étain de 0 à 2 m de profondeur environ au droit du sondage S29, au Nord/Nord-Est du site ;
- **Zone PC9** : zinc de 0 à 1 m de profondeur environ au droit du sondage S52, au Nord-Est du site ;
- **Zone PC10** : HAP et zinc de 0 à 1 m de profondeur environ au droit des sondages S18 de l'étude de BURGEAP et S64 de l'étude SEREA, à l'Est du site ;
- **Zone PC11 :** zinc et chlorures de 0 à 2 m de profondeur environ au droit des sondages S71, S72 et S78, en partie centrale Est du site ;
- **Zone PC12** : zinc et plomb de 0 à 2 m de profondeur environ au droit du sondage S89, au Sud/Sud-Est du site ;
- **Zone PC13** : zinc de 0 à 2 m de profondeur environ au droit des sondages S100 et S113, à l'angle Sud-Est du site ;

➢ Entre 2 et 6 m de profondeur :

- **Zone PC14** : hydrocarbures C_{10}-C_{40}, plomb et étain de 3 à 6 m de profondeur environ au droit du piézomètre Pz1 et des sondages S29, S30, S31, S32, S33, S34, S42 et S43 au Nord-Est du site ;
- **Zone PC15** : chlorures de 2 à 4 m de profondeur environ au droit des sondages S71 et S72, en partie centrale Est du site ;
- **Zone PC16** : hydrocarbures C_{10}-C_{40} et étain de 3 à 5 m de profondeur environ au droit du sondage S87, au Sud/Sud-Est du site.

Une mise à jour de ces seuils sera réalisée dans ce rapport avec l'intégration des résultats des investigations complémentaires dont ceux de cette campagne.



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 8 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 0 et 2 m de profondeur

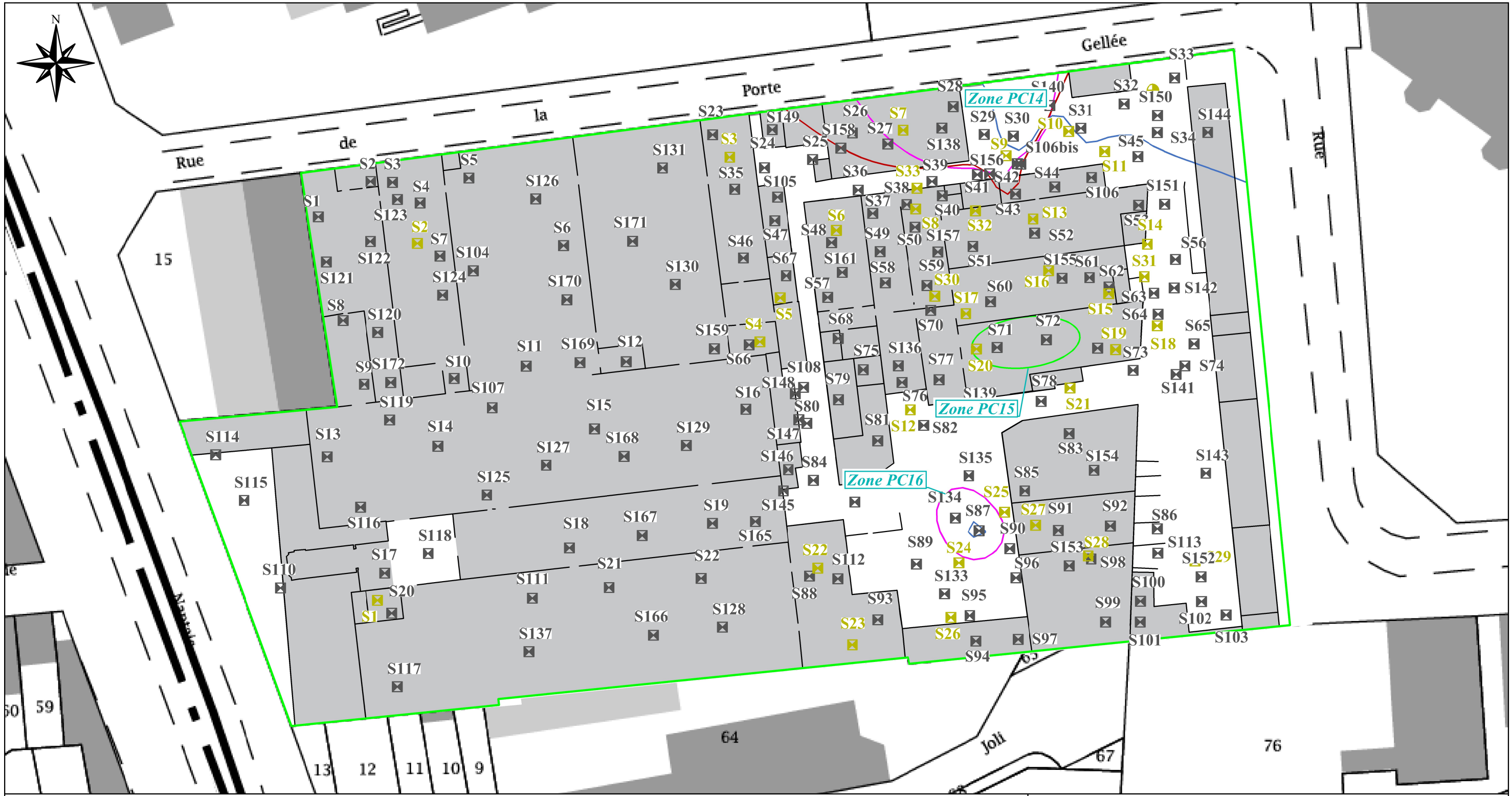
Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 9 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 2 et 6 m de profondeur

Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières

5 - Identification des pollutions concentrées (A270)

5.1. Définition et approche retenue

Une pollution concentrée correspond à une zone limitée dans l'espace présentant des teneurs en polluants significativement supérieures à celles mesurées à proximité immédiate.

D'après les textes ministériels de février 2007 et d'avril 2017 en matière de sites et sols pollués, « *lorsque des pollutions concentrées sont identifiées […], la priorité consiste d'abord à extraire ces pollutions concentrées, généralement circonscrites à des zones limitées, et non pas à engager des études pour justifier leur maintien en place* ».

L'objectif de ce chapitre est de déterminer des seuils de coupure, correspondant à la concentration au-delà de laquelle les pollutions sont considérées concentrées.

Pour valider un seuil de coupure, au moins deux méthodes d'analyse des données doivent présenter des résultats convergents. Dans le cadre de cette étude, les données prises en compte correspondent à l'ensemble des données collectées.

Trois méthodes d'analyses sont utilisées dans le cadre de cette étude pour une comparaison des résultats :

- Analyse statistique ;
- Bilan massique des polluants ;
- Géostatique.

Dans le cas présent, la notion de pollution concentrée peut être définie uniquement pour le milieu sols. Pour les milieux eaux souterraines et gaz du sol, les données sont jugées insuffisantes. Le nombre et la disposition des piézomètres et des piézairs ne permettent pas d'avoir une vision de l'ensemble du site, nécessaire pour définir des seuils de pollutions concentrées et les étendues associées.

Parmi les composés organiques recherchés, les polluants identifiés à des teneurs notables sont les hydrocarbures C_5-C_{10} et C_{10}-C_{40}, les HAP, les CAV, les PCB et les COHV.

Pour les hydrocarbures C_5-C_{10}, les CAV et les PCB, les teneurs obtenues sont faibles ou inférieures aux limites de quantification du laboratoire pour la majorité des échantillons analysés. Les teneurs les plus importantes sont associées à des teneurs élevées en hydrocarbures C_{10}-C_{40}, en HAP ou en COHV. Dans ce cadre, l'analyse des données n'est pas jugée pertinente pour ces familles de polluants car les teneurs notables seront donc prises en compte dans celles réalisées pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40}, les HAP ou les COHV.

Concernant les COHV, le trichloroéthylène et le 1,1,1-trichloroéthane sont nettement majoritaires pour l'ensemble des échantillons analysés. Seule la somme de ces deux paramètres a donc été étudiée pour caractériser cette famille de polluants.

Il a également été mis en évidence de fortes anomalies en métaux et autres éléments (potassium, manganèse et sodium) sur échantillon brut. Parmi les éléments recherchés, le zinc, le plomb et l'étain peuvent être considérés comme les traceurs de la pollution métallique. En effet, la localisation des anomalies les plus marquées pour ces métaux coïncide globalement avec celles obtenues pour les autres éléments.

Concernant les chlorures, l'analyse des données n'est pas jugée pertinente : les concentrations obtenues pour les échantillons S71-1 à S71-4 et S72-1 à S72-3 sont largement supérieures à celles des autres échantillons analysés. Il est considéré une pollution concentrée dans le secteur de ces deux sondages.

Bien que des teneurs élevées en phosphore, sulfates et soufre total aient été identifiées, le nombre d'analyses est insuffisant pour définir des seuils de coupure pour ces paramètres.

La définition des pollutions concentrées porte donc sur les paramètres suivants :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40} ;
- HAP ;
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane (COHV) ;
- Zinc ;
- Plomb ;
- Etain.

Les paragraphes suivants intègrent l'ensemble des données obtenues par BURGEAP et SEREA sur le site. L'ensemble des résultats sols des différentes études est présenté en annexe 2.

<u>Remarque :</u> une première approche de définition des seuils de coupures a été présentée à la DREAL en avril 2025, faisant suite à une réunion d'échange le 5 mars 2025 dans les locaux de la DREAL. La DREAL a fait un retour par mail le 19 mai 2025 sur cette première approche en demandant à SEREA de préciser et revoir les seuils de coupures pour les paramètres TCE-TCA, HAP et plomb. Le travail présenté ci-après prend en compte les remarques de la DREAL et abouti à la définition de seuils actualisés pour les paramètres concernés.

5.2. Analyse des données

5.2.1. Analyse statistique

L'analyse statistique des concentrations obtenues pour un polluant (ou famille de polluants) permet de caractériser la présence d'un éventuel bruit de fond et de valeurs significatives.

- **Distribution des concentrations**

Une première étape consiste à appréhender la distribution des concentrations.

Tableau 1 : Distribution des concentrations (mg/kg MS)

	HC C_{10}-C_{40}	HAP	∑ TCE[2] + 1,1,1-TCA[3]	Zinc	Plomb	Etain
Teneur moyenne	1 879	22	3	4 635	899	557
Teneur maximale	510 000	460	60	250 000	22 000	23 000
Percentile 25[4]	65	2	0,0	290	120	14
Médiane[5]	180	6	0,2	830	330	59
Percentile 75	450	17	1	2 700	860	230
Percentile 80	604	21	2	3 700	1 100	370
Percentile 85	816	31	3	5 710	1 400	636
Percentile 90	1 200	50	5	9 580	1 800	1 100
Percentile 95	2 685	100	16	18 400	3 400	2 085

[2] TCE : Trichloroéthylène
[3] TCA : Trichloroéthane
[4] Percentile X : concentration à laquelle X % de la série d'échantillons sont inférieurs
[5] Médiane : concentration qui sépare la série d'échantillons en deux groupes de même effectif (correspond au percentile 50)

Les résultats mettent en évidence :

- **Hydrocarbures C_{10}-C_{40} :**
  - Une augmentation régulière des concentrations jusqu'au percentile 90, indiquant une répartition homogène des concentrations ;
  - Une rupture dans la distribution des concentrations entre les percentiles 90 (1 200 mg/kg MS) et 95 (2 685 mg/kg MS) ;

- **HAP :**
  - Une augmentation régulière des concentrations jusqu'au percentile 90, indiquant une répartition homogène des concentrations ;
  - Une rupture dans la distribution des concentrations entre les percentiles 90 (50 mg/kg MS) et 95 (100 mg/kg MS) ;

- **Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane :**
  - Une augmentation régulière des concentrations jusqu'au percentile 90, indiquant une répartition homogène des concentrations ;
  - Une rupture dans la distribution des concentrations entre les percentiles 90 (5 mg/kg MS) et 95 (16 mg/kg MS) ;

- **Zinc :**
  - Une augmentation régulière des concentrations jusqu'au percentile 90, indiquant une répartition homogène des concentrations ;
  - Une rupture dans la distribution des concentrations entre les percentiles 90 (9 580 mg/kg MS) et 95 (18 400 mg/kg MS) ;

- **Plomb :**
  - Une augmentation régulière des concentrations jusqu'au percentile 90, indiquant une répartition homogène des concentrations ;
  - Une rupture dans la distribution des concentrations entre les percentiles 90 (1 800 mg/kg MS) et 95 (3 400 mg/kg MS) ;

- **Etain :**
  - Une augmentation régulière des concentrations jusqu'au percentile 90, indiquant une répartition homogène des concentrations ;
  - Une rupture dans la distribution des concentrations entre les percentiles 90 (1 100 mg/kg MS) et 95 (2 085 mg/kg MS).

■ Représentation graphique

Afin de déterminer des seuils de coupure, il convient ensuite de représenter graphiquement la distribution des concentrations :

- En terme de fréquence (relative et cumulée) ;
- En terme d'échantillon unitaire.

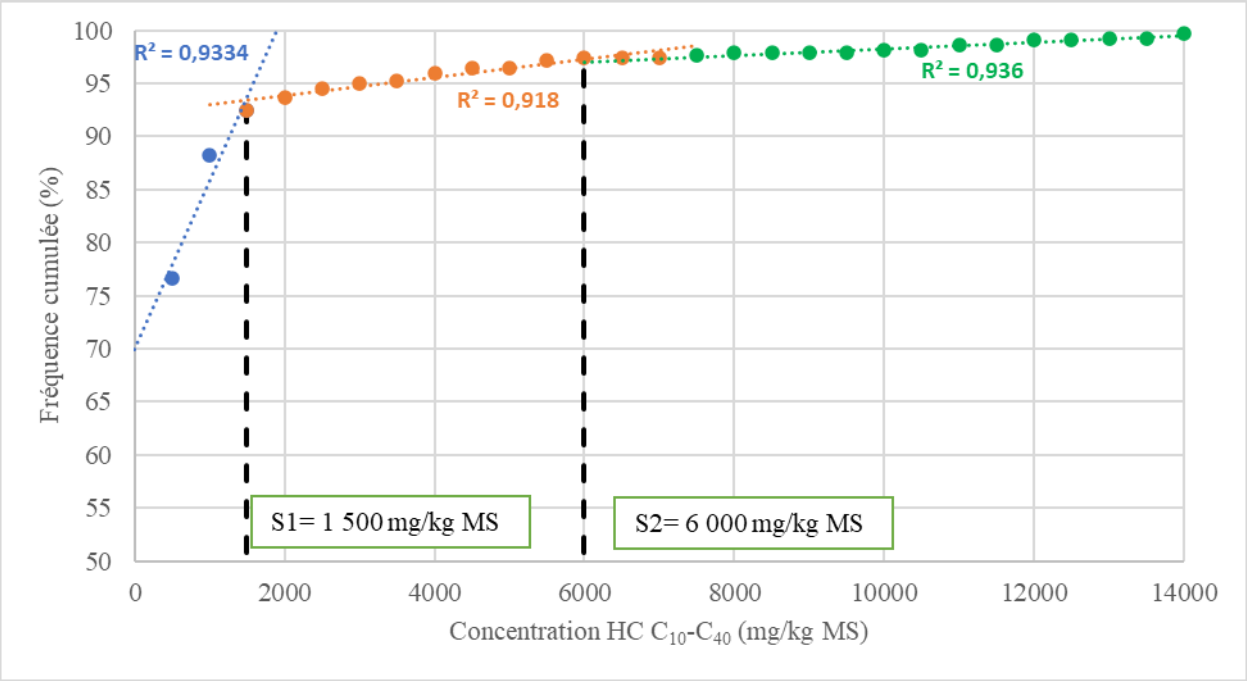
L'objectif est de déterminer des intervalles de concentrations dont la droite de tendance présente un coefficient de corrélation (R^2) proche de 1 (valeur qui correspondrait à 100 % des teneurs de l'intervalle défini sur la droite de tendance) [6].

1. Hydrocarbures C_{10}-C_{40} :

Pour l'étude des fréquences des teneurs en hydrocarbures C_{10}-C_{40}, des pas de 500 mg/kg MS ont été pris en compte.

L'échantillon S138-3 (étude SEREA) entre 2 et 3 m de profondeur, présente une teneur bien supérieure à la gamme de valeurs obtenue pour le reste des échantillons (510 000 mg/kg MS). Il a été exclu de la représentation graphique pour plus de lisibilité. Il est toutefois pris en compte dans l'analyse statistique.

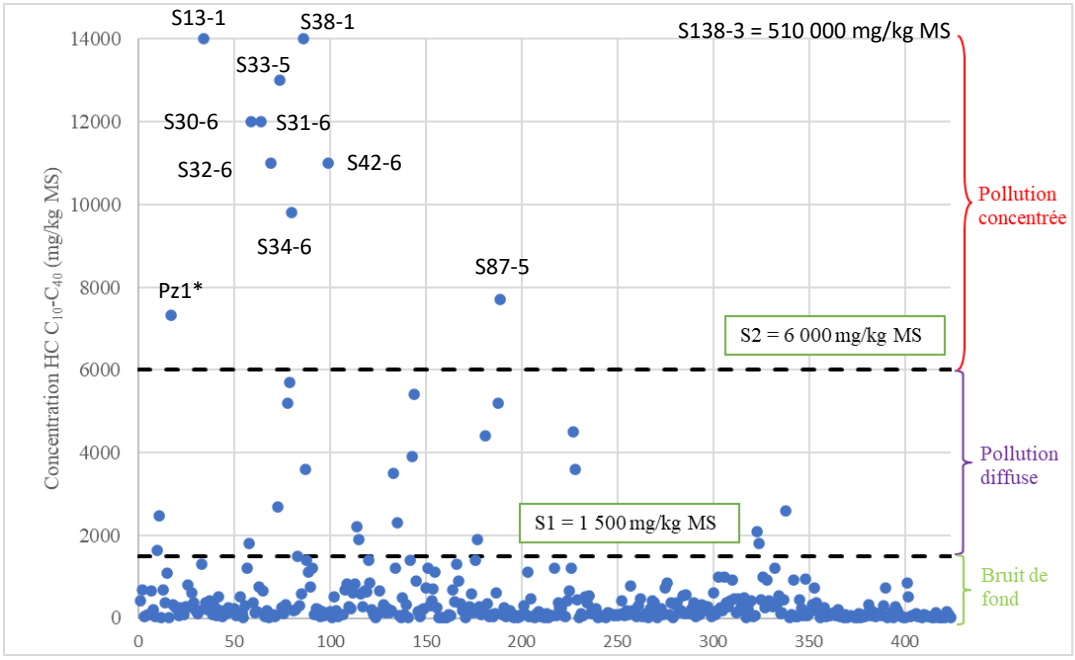
Graphique 1 : Fréquence cumulée des concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{40}



Le graphique fait apparaître deux ruptures de pente, la première à 1 500 mg/kg MS et la seconde à 6 000 mg/kg MS.

[6] Pour la dernière droite de tendance, un coefficient de corrélation plus faible peut être obtenu du fait des concentrations maximales très élevées

Graphique 2 : Concentrations en hydrocarbures C_{10}-C_{40} par échantillon



** : Echantillon réalisé dans le cadre de l'étude BURGEAP*

Le graphique fait apparaître trois populations d'échantillons :

- Teneurs inférieures à 1 500 mg/kg MS : bruit de fond du site ;
- Teneurs comprises entre 1 500 et 6 000 mg/kg MS : pollution diffuse ;
- Teneurs supérieures à 6 000 mg/kg MS : pollution concentrée.

Ces seuils sont globalement cohérents avec :

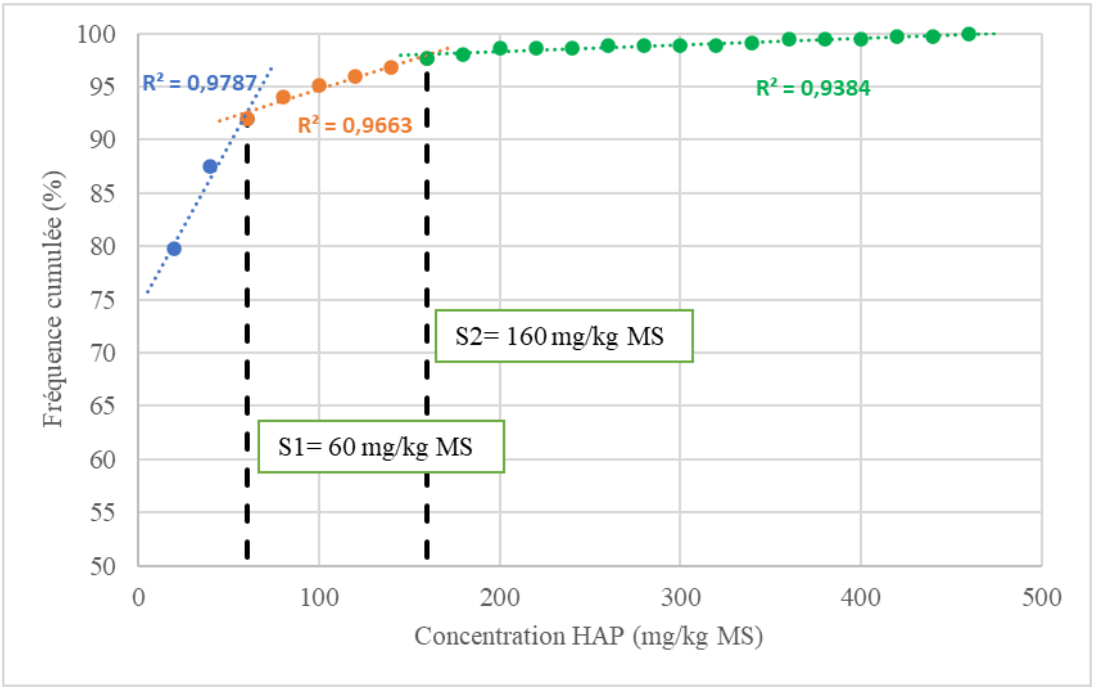
- Les ruptures de pente du graphique 1 à 1 500 et 6 000 mg/kg MS ;
- La rupture dans la répartition des concentrations entre les percentiles 90 (1 200 mg/kg MS) et 95 (2 685 mg/kg MS). Il existe vraisemblablement une seconde rupture pour un percentile supérieur à 95 (2 685 mg/kg MS).

Sur la base de cette analyse statistique, le seuil de coupure lié aux pollutions concentrées pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40} serait de 6 000 mg/kg MS.

2. HAP :

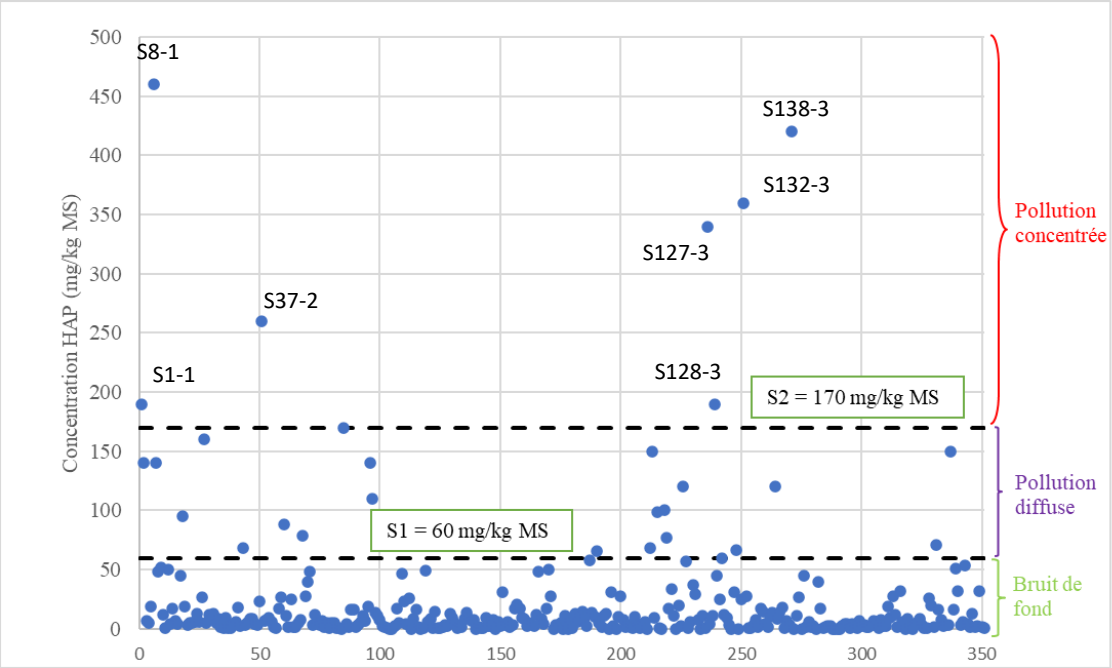
Pour l'étude des fréquences des teneurs en HAP, des pas de 20 mg/kg MS ont été pris en compte.

Graphique 3 : Fréquence cumulée des concentrations en HAP



Le graphique fait apparaître deux ruptures de pente, la première à 60 mg/kg MS et la seconde à 160 mg/kg MS.

Graphique 4 : Concentrations en HAP par échantillon



Le graphique fait apparaître trois populations d'échantillons :

- Teneurs inférieures à 60 mg/kg MS : bruit de fond du site ;
- Teneurs comprises entre 60 et 170 mg/kg MS : pollution diffuse ;
- Teneurs supérieures à 170 mg/kg MS : pollution concentrée.

Ces seuils sont globalement cohérents avec :

- Les ruptures de pente du graphique 3 à 60 et 160 mg/kg MS ;
- La rupture dans la répartition des concentrations entre les percentiles 90 (50 mg/kg MS) et 95 (100 mg/kg MS). Il existe vraisemblablement une seconde rupture pour un percentile supérieur à 95 (100 mg/kg MS).

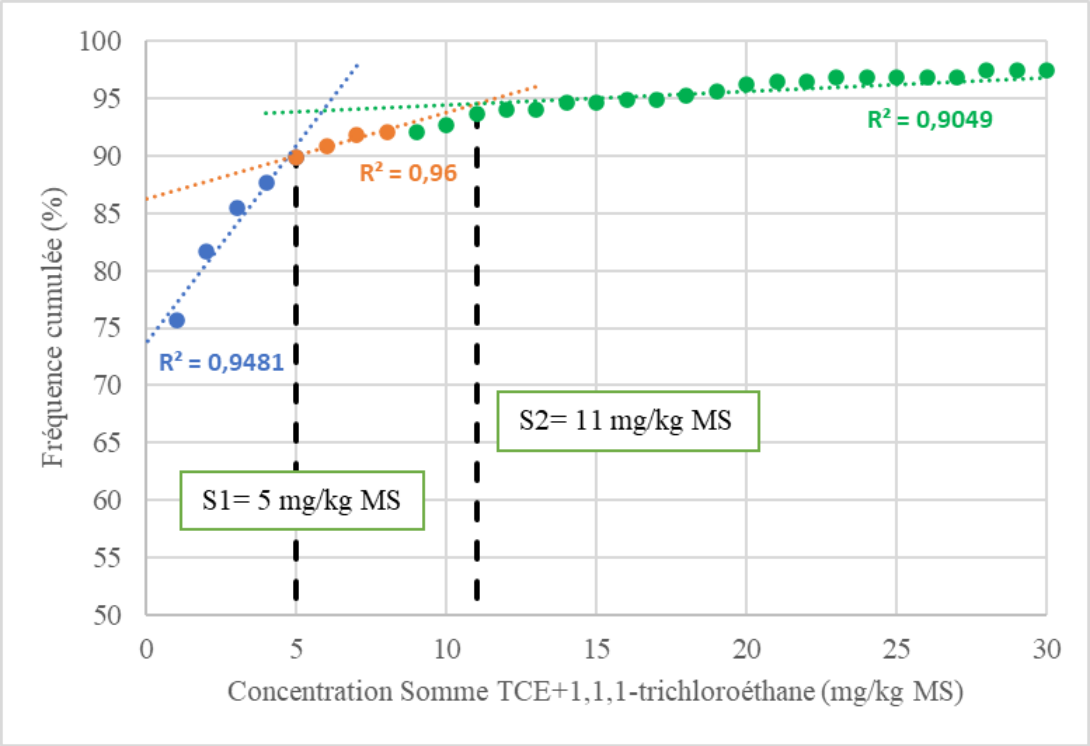
Sur la base de cette analyse statistique, le seuil de coupure lié aux pollutions concentrées pour les HAP serait de 170 mg/kg MS.

3. Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane :

Pour l'étude des fréquences des teneurs en somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane, des pas de 1 mg/kg MS ont été pris en compte.

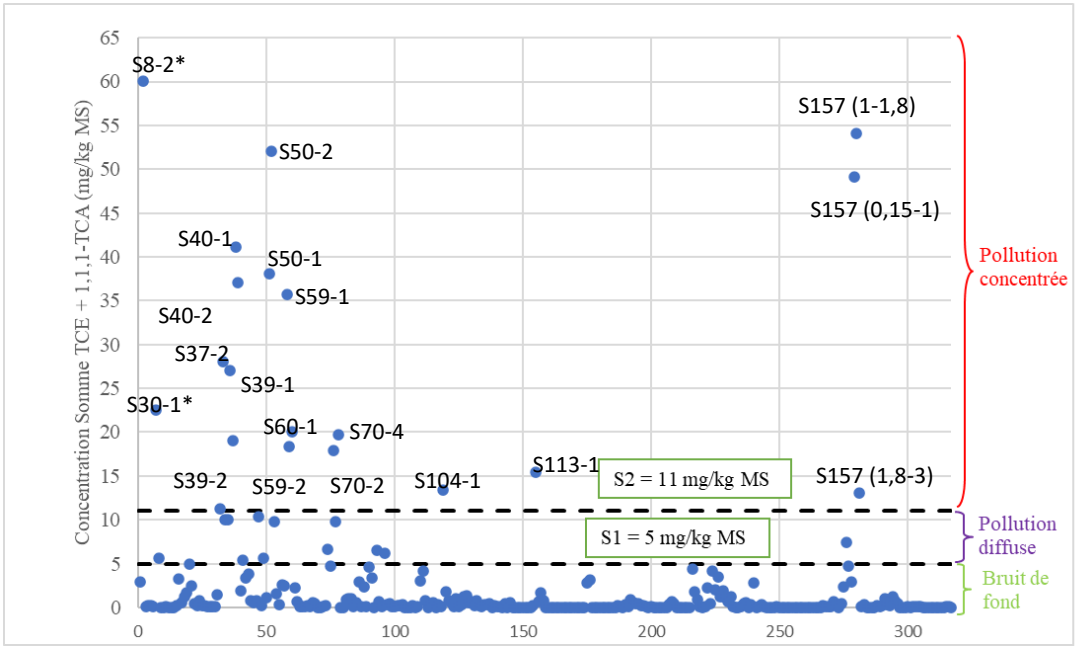
Les échantillons supérieurs à 30 mg/kg MS ne permettant pas lisibilité sur l'intersection des droites de tendances ils ont été exclus de la représentation graphique. Ils sont toutefois pris en compte dans l'analyse statistique.

Graphique 5 : Fréquence cumulée des concentrations en somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane



Le graphique fait apparaître deux ruptures de pente, la première à 5 mg/kg MS et la seconde à 11 mg/kg MS.

Graphique 6 : Concentrations en somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane par échantillon



** : Echantillon réalisé dans le cadre de l'étude BURGEAP*

Le graphique fait apparaître trois populations d'échantillons :

- Teneurs inférieures à 5 mg/kg MS : bruit de fond du site ;
- Teneurs comprises entre 5 et 11 mg/kg MS : pollution diffuse ;
- Teneurs supérieures à 11 mg/kg MS : pollution concentrée.

Ces seuils sont globalement cohérents avec :

- Les ruptures de pente du graphique 5 à 5 et 11 mg/kg MS ;
- La rupture dans la répartition des concentrations entre les percentiles 90 (5 mg/kg MS) et 95 (16 mg/kg MS).

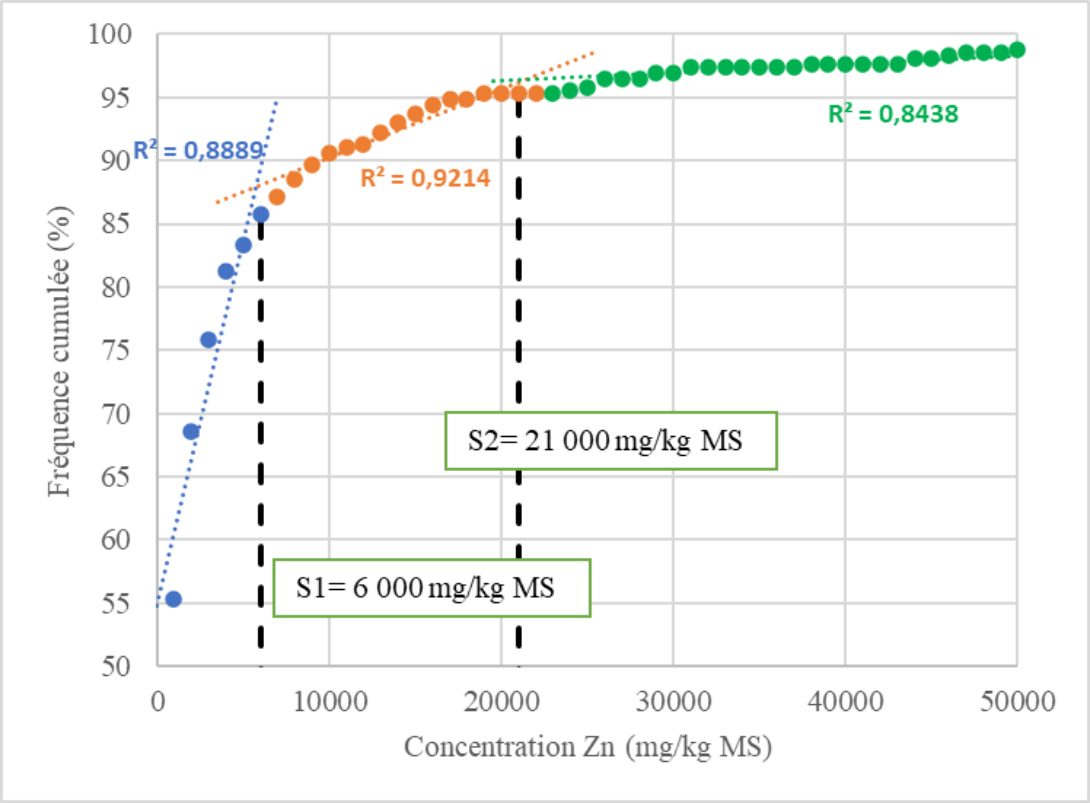
Sur la base de cette analyse statistique, le seuil de coupure lié aux pollutions concentrées pour la somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane serait de 11 mg/kg MS.

4. Zinc :

Pour l'étude des fréquences des teneurs en zinc, des pas de 1 000 mg/kg MS ont été pris en compte.

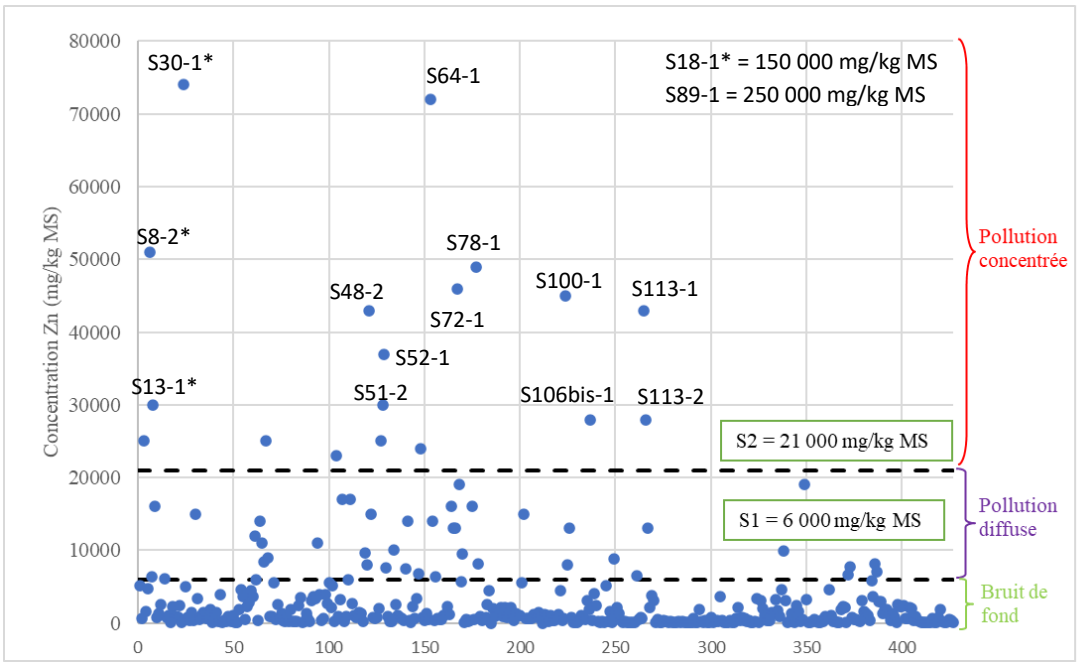
Les échantillons supérieurs à 50 000 mg/kg MS ne permettant pas lisibilité sur l'intersection des droites de tendances ils ont été exclus de la représentation graphique. Ils sont toutefois pris en compte dans l'analyse statistique.

Graphique 7 : Fréquence cumulée des concentrations en zinc



Le graphique fait apparaître deux ruptures de pente, la première à 6 000 mg/kg MS et la seconde à 21 000 mg/kg MS.

Graphique 8 : Concentrations en zinc par échantillon



** : Echantillon réalisé dans le cadre de l'étude BURGEAP*

Le graphique fait apparaître trois populations d'échantillons :

- Teneurs inférieures à 6 000 mg/kg MS : bruit de fond du site ;
- Teneurs comprises entre 6 000 et 21 000 mg/kg MS : pollution diffuse ;
- Teneurs supérieures à 21 000 mg/kg MS : pollution concentrée.

Ces seuils sont globalement cohérents avec les ruptures de pente du graphique 7 à 6 000 et 21 000 mg/kg MS.

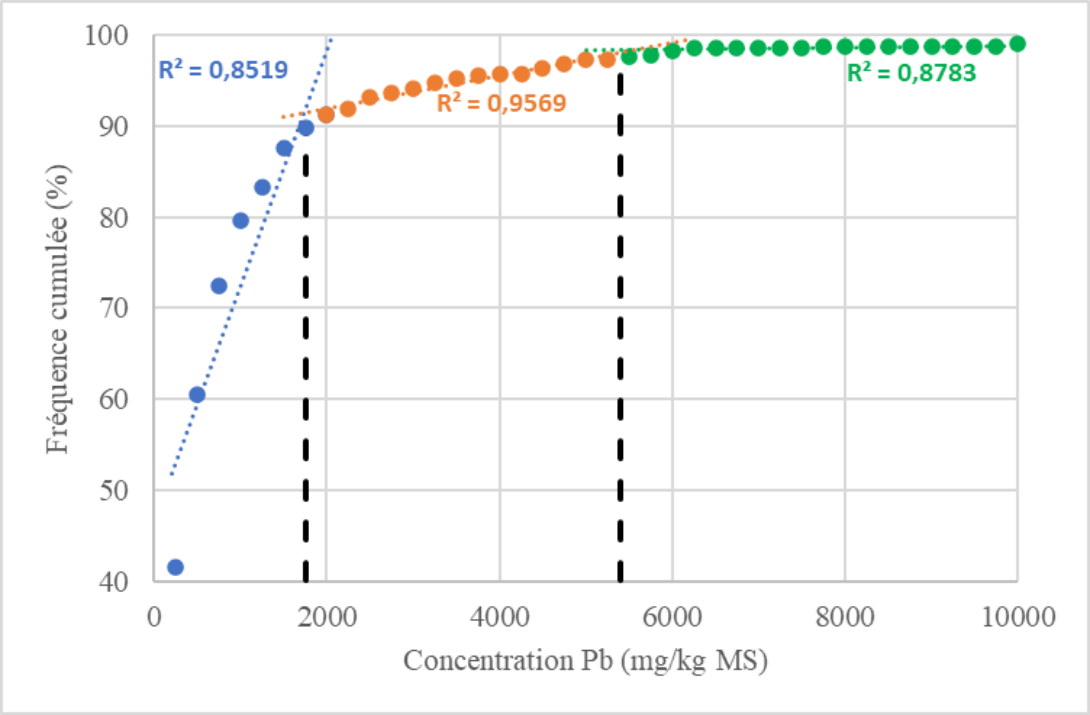
Sur la base de cette analyse statistique, le seuil de coupure lié aux pollutions concentrées pour le zinc serait de 21 000 mg/kg MS.

5. Plomb :

Pour l'étude des fréquences des teneurs en plomb, des pas de 250 mg/kg MS ont été pris en compte.

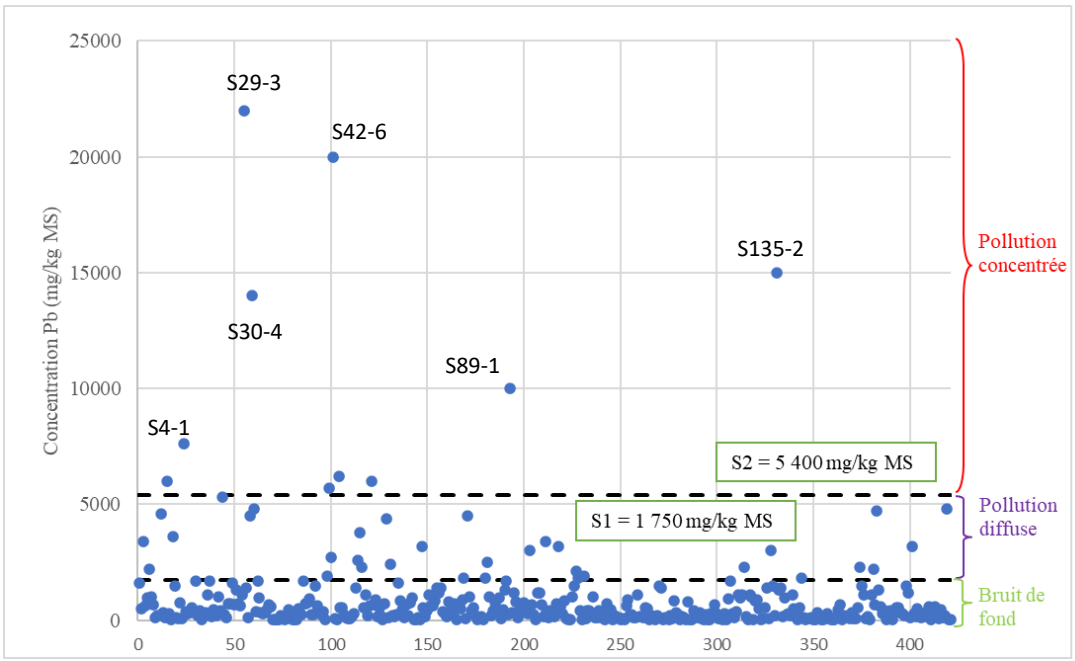
Les échantillons supérieurs à 10 000 mg/kg MS ne permettant pas lisibilité sur l'intersection des droites de tendances ils ont été exclus de la représentation graphique. Ils sont toutefois pris en compte dans l'analyse statistique.

Graphique 9 : Fréquence cumulée des concentrations en plomb



Le graphique fait apparaître deux ruptures de pente, la première à 1 750 mg/kg MS et la seconde à 5 400 mg/kg MS.

Graphique 10 : Concentrations en plomb par échantillon



Le graphique fait apparaître trois populations d'échantillons :

- Teneurs inférieures à 1 750 mg/kg MS : bruit de fond du site ;
- Teneurs comprises entre 1 750 et 5 400 mg/kg MS : pollution diffuse ;
- Teneurs supérieures à 5 400 mg/kg MS : pollution concentrée.

Ces seuils sont globalement cohérents avec :

- Les ruptures de pente du graphique 9 à 1 750 et 5 400 mg/kg MS ;
- La rupture dans la répartition des concentrations entre les percentiles 90 (1 800 mg/kg MS) et 95 (3 400 mg/kg MS). Il existe vraisemblablement une seconde rupture pour un percentile supérieur à 95 (3 400 mg/kg MS).

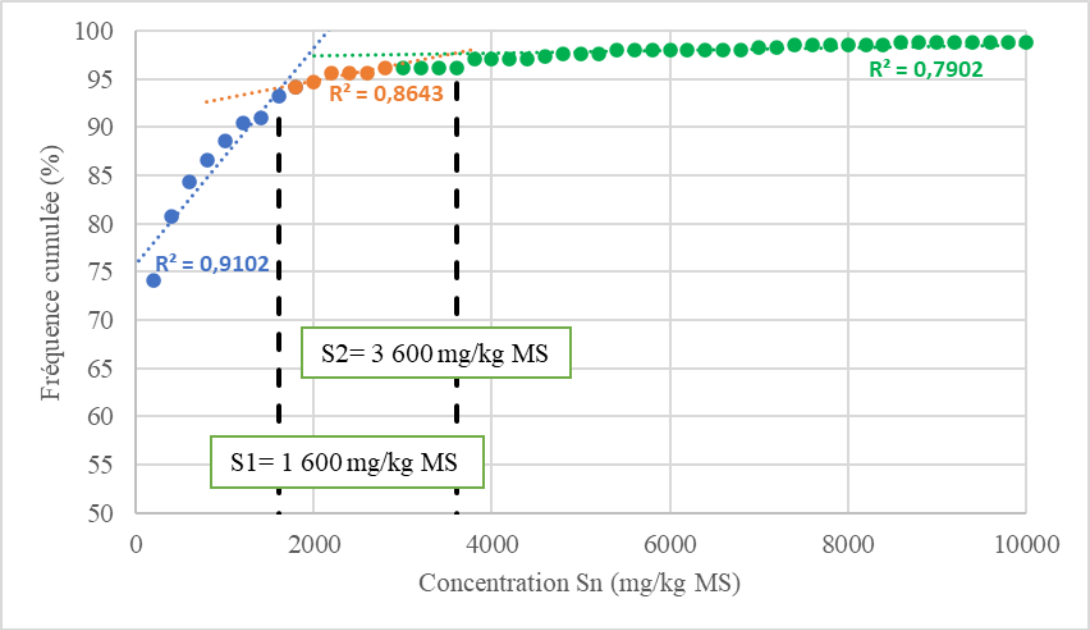
Sur la base de cette analyse statistique, le seuil de coupure lié aux pollutions concentrées pour le plomb serait de 5 400 mg/kg MS.

6. Etain :

Pour l'étude des fréquences des teneurs en étain, des intervalles de 200 mg/kg MS ont été pris en compte.

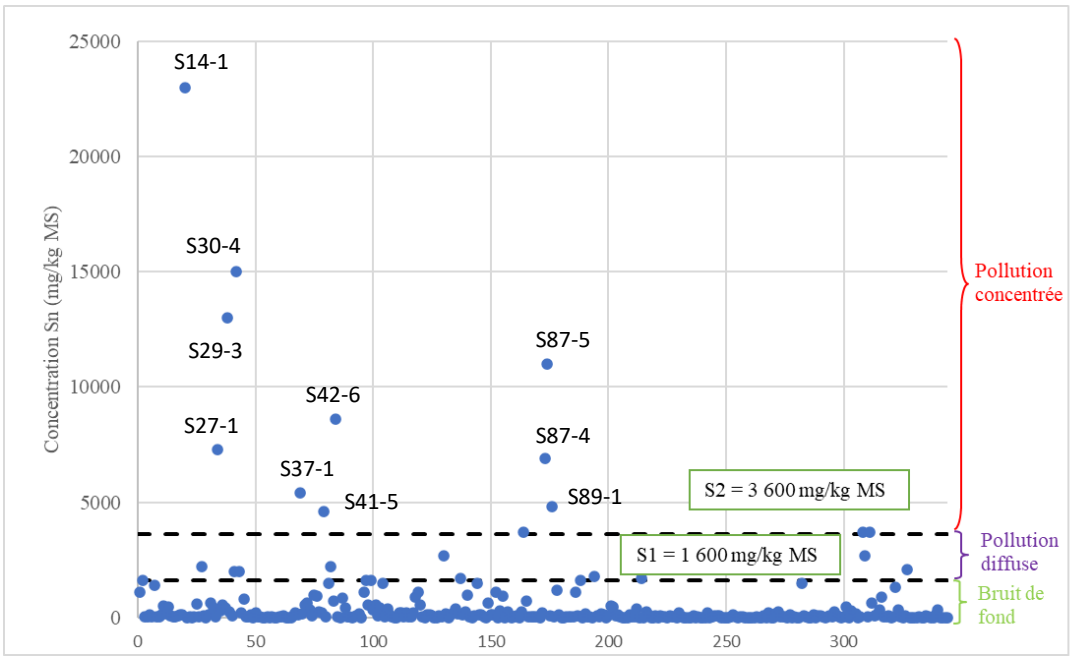
Les échantillons supérieurs à 10 000 mg/kg MS ne permettant pas lisibilité sur l'intersection des droites de tendances ils ont été exclus de la représentation graphique. Ils sont toutefois pris en compte dans l'analyse statistique.

Graphique 11 : Fréquence cumulée des concentrations en étain



Le graphique fait apparaître deux ruptures de pente, la première à 1 600 mg/kg MS et la seconde à 3 600 mg/kg MS.

Graphique 12 : Concentrations en étain par échantillon



Le graphique fait apparaître trois populations d'échantillons :

- Teneurs inférieures à 1 600 mg/kg MS : bruit de fond du site ;
- Teneurs comprises entre 1 600 et 3 600 mg/kg MS : pollution diffuse ;
- Teneurs supérieures à 3 600 mg/kg MS : pollution concentrée.

Ces seuils sont globalement cohérents avec :

- Les ruptures de pente du graphique 11 à 1 600 et 3 600 mg/kg MS ;
- La rupture dans la répartition des concentrations entre les percentiles 90 (1 100 mg/kg MS) et 95 (2 085 mg/kg MS). Il existe vraisemblablement une seconde rupture pour un percentile supérieur à 95 (2 085 mg/kg MS).

Sur la base de cette analyse statistique, le seuil de coupure lié aux pollutions concentrées pour l'étain serait de 3 600 mg/kg MS.

5.2.2. Bilan massique des polluants

Le bilan massique permet d'appréhender la masse présente de polluant (ou famille de polluants) et la masse de sols associée.

Il permet également de confirmer un seuil de coupure. Il correspond graphiquement à la concentration au-delà de laquelle le pourcentage de la masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols.

Les surfaces des mailles ont été définies selon la méthode des polygones de Thiessen[7] pour chacun des paramètres étudiés. Afin de ne pas sous-estimer la masse de polluants dans le bilan massique, une extrapolation des résultats analytiques a été réalisée sur certaines épaisseurs non caractérisées en fonction des constats de terrains (lithologie, odeur et indice PID). Au regard des différents types de polluants étudiés nous distinguons deux cas de figures :

- Pour les paramètres organiques (hydrocarbures C_{10}-C_{40}, HAP et somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane), nous notons une hétérogénéité des résultats analytiques au droit d'une même lithologie. Par conséquent, seuls les critères d'odeurs et/ou d'indices PID ont été considérés pour l'extrapolation. Les résultats analytiques ont été extrapolés à des épaisseurs non caractérisées d'un même sondage uniquement, et lorsque celles-ci remplissent l'ensemble des critères suivants :
  - Elles ont une frontière commune avec l'échantillon caractérisé ;
  - Elles ont des constats d'odeurs et/ou des indices PID similaires à l'échantillon caractérisé ;

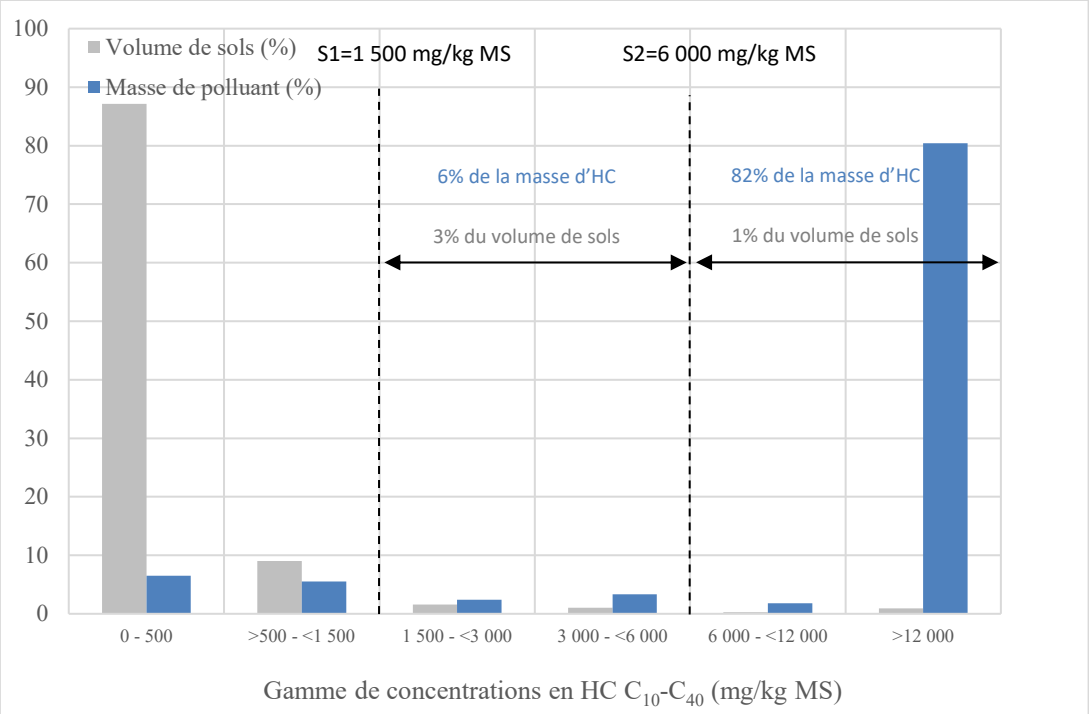
- Pour les métaux étudiés (zinc, plomb et étain), les constats d'odeur et/ou d'indices PID n'étant pas caractéristiques d'impact, seuls des critères lithologiques (géologie et couleur) ont été considérés pour l'extrapolation. Les résultats analytiques ont été extrapolés à des épaisseurs non caractérisées d'un même sondage uniquement, et lorsque celles-ci remplissent l'ensemble des critères suivants :
  - Elles ont une frontière commune avec l'échantillon caractérisé ;
  - Elles ont une lithologie identique (géologie et couleur) à l'échantillon caractérisé.

Dans le cas d'une épaisseur non caractérisée comprise entre deux échantillons analysés jugés similaires, selon les règles explicitées ci-dessus, la teneur maximale est extrapolée.

[7] Détermination d'une maille à partir de la mi-distance entre chaque point de sondage

1. Hydrocarbures C_{10}-C_{40} :

Graphique 13 : Bilan massique pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40}



Le graphique fait apparaître deux seuils pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40} :

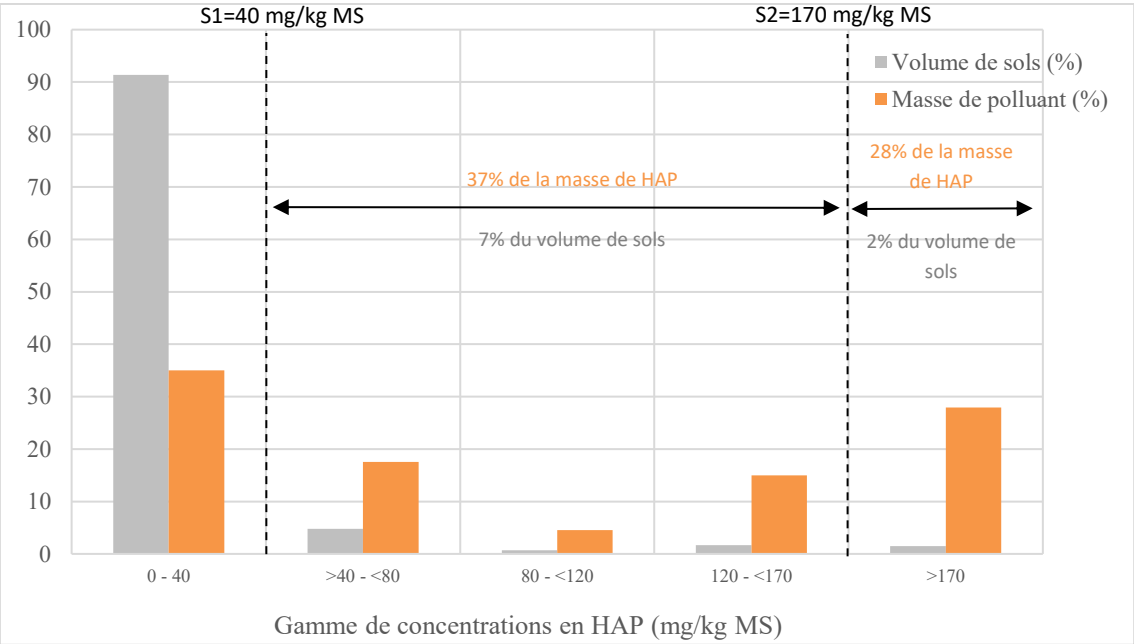
- Le premier à 1 500 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution diffuse. En deçà, il s'agirait du bruit de fond du site ;

- Le second à 6 000 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de volume de sols est plus faible (environ 1). Il correspondrait au seuil de pollution concentrée (seuil de coupure).

Le bilan massique confirme donc les seuils de pollution identifiés précédemment dans l'analyse statistique.

2. HAP :

Graphique 14 : Bilan massique pour les HAP



Le graphique fait apparaître deux seuils pour les HAP :

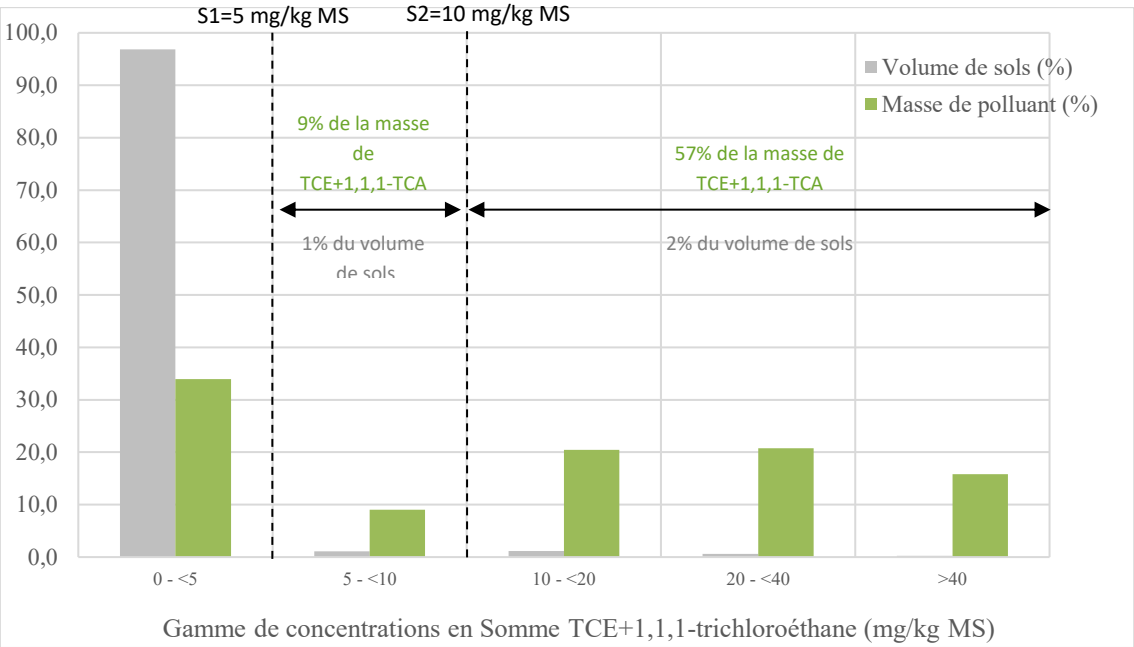
- Le premier à 40 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution diffuse. En deçà, il s'agirait du bruit de fond du site ;

- Le second à 170 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de volume de sols est plus faible (proche de 1). Il correspondrait au seuil de pollution concentrée (seuil de coupure).

Le bilan massique confirme donc les seuils de pollution identifiés précédemment dans l'analyse statistique.

3. Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane :

Graphique 15 : Bilan massique pour la somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane



Le graphique fait apparaître deux seuils pour la somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane :

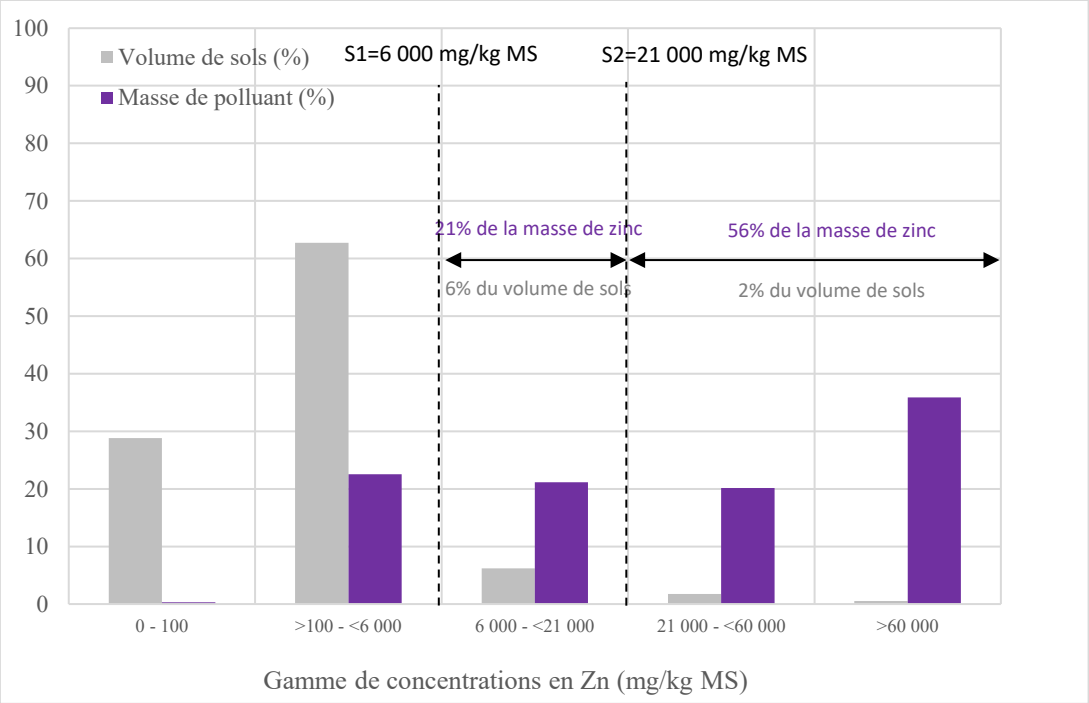
- Le premier à 5 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution diffuse. En deçà, il s'agirait du bruit de fond du site ;

- Le second à 10 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est plus nettement supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution concentrée (seuil de coupure).

Le bilan massique confirme donc les seuils de pollution identifiés précédemment dans l'analyse statistique.

4. Zinc :

Graphique 16 : Bilan massique pour le zinc



Le graphique fait apparaître deux seuils pour le zinc :

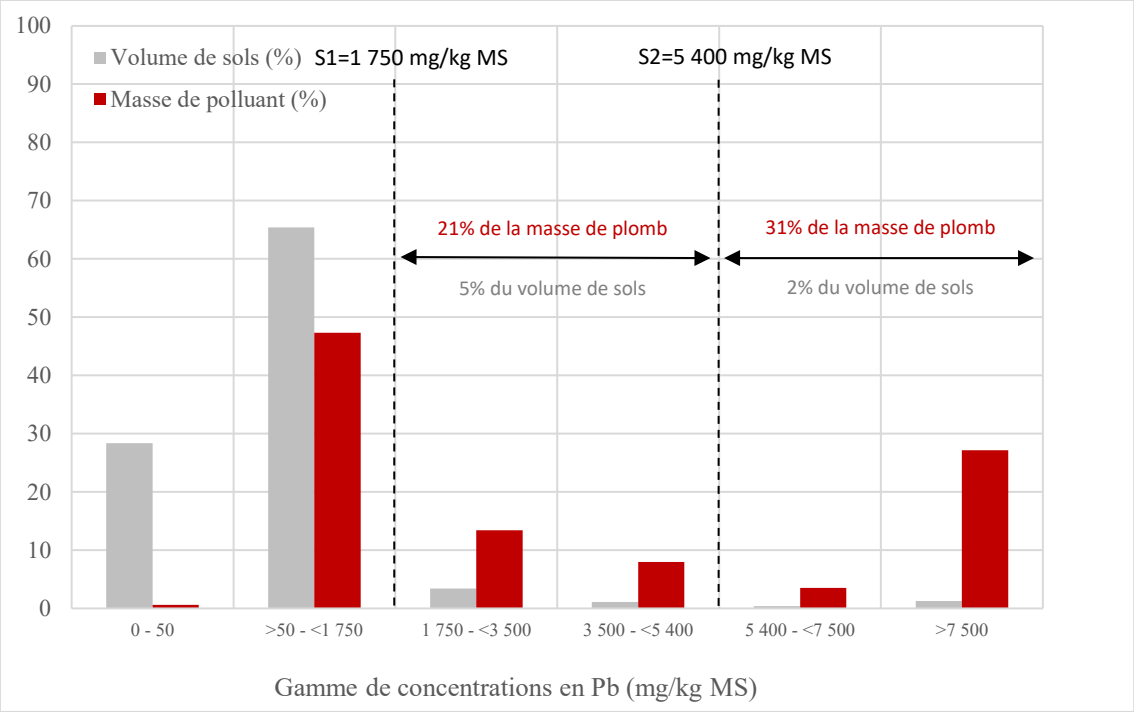
- Le premier à 6 000 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution diffuse. En deçà, il s'agirait du bruit de fond du site ;

- Le second à 21 000 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluant est plus nettement supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution concentrée (seuil de coupure).

Le bilan massique confirme donc les seuils de pollution identifiés précédemment dans l'analyse statistique.

5. Plomb :

Graphique 26 : Bilan massique pour le plomb



Le graphique fait apparaître deux seuils pour le plomb :

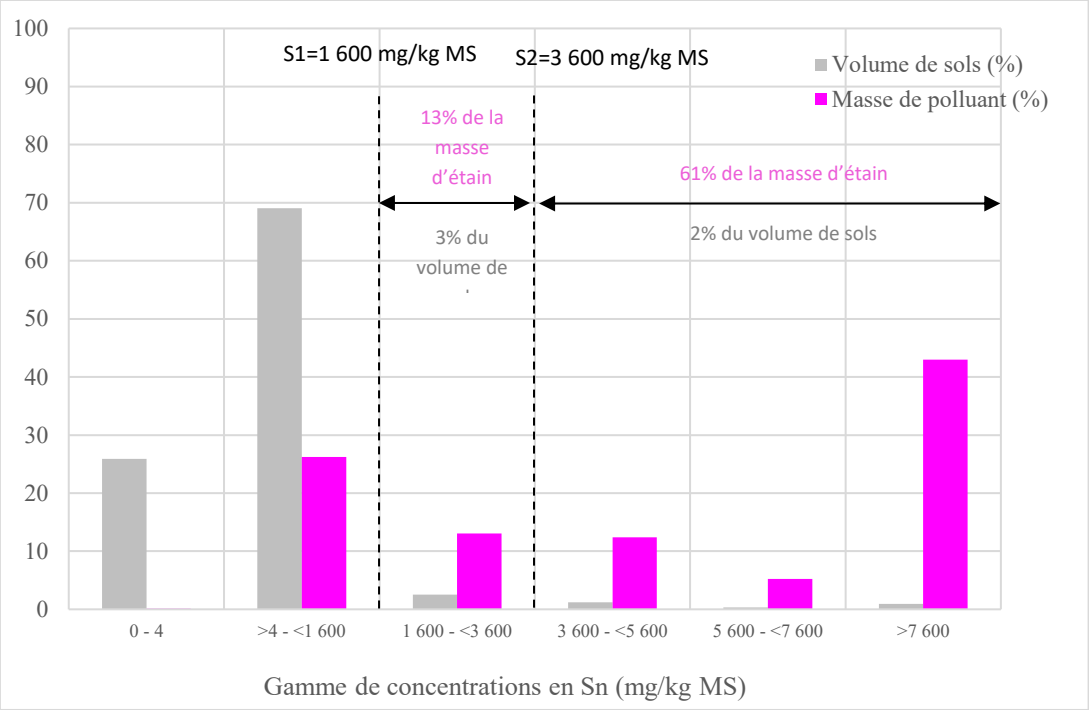
- Le premier à 1 750 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution diffuse. En deçà, il s'agirait du bruit de fond du site ;

- Le second à 5 400 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de volume de sols est plus faible (proche de 1) ou le pourcentage de masse de polluant est plus nettement supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution concentrée (seuil de coupure).

Le bilan massique confirme donc les seuils de pollution identifiés précédemment dans l'analyse statistique.

6. Etain

Graphique 29 : Bilan massique pour l'étain



Le graphique fait apparaître deux seuils pour l'étain :

- Le premier à 1 600 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de masse de polluants est supérieur au pourcentage de volume de sols. Il correspondrait au seuil de pollution diffuse. En deçà, il s'agirait du bruit de fond du site ;

- Le second à 3 600 mg/kg MS, au-delà duquel le pourcentage de volume de sols est plus faible (inférieur à 1). Il correspondrait au seuil de pollution concentrée (seuil de coupure).

Le bilan massique confirme donc les seuils de pollution identifiés précédemment dans l'analyse statistique.

5.2.3. Approche géostatistique

L'approche géostatistique permet de répondre à différents objectifs :

- Cartographier la distribution des polluants dans l'espace ainsi que les incertitudes associées ;
- Déterminer un seuil de coupure ;
- Calculer et positionner dans l'espace les volumes de sols dont la concentration estimée en polluants se situe au-dessus du seuil de coupure. Les volumes de sols contaminés seront calculés à partir de modélisation par krigeage. Il est possible d'y estimer la masse de polluants correspondante ainsi que les incertitudes associées ;
- Optimiser l'acquisition de données complémentaires afin de réduire les incertitudes associées aux objectifs fixés du plan de gestion.

Pour cela, l'ensemble des données de terrain (indices de pollution, lithologie et résultats analytiques) a été renseigné dans le logiciel de modélisation géostatistique KARTOTRAK. Cette dernière a été réalisée avec la société Géovariances.

Les différentes étapes pour cartographier la distribution des polluants dans l'espace sont disponibles en annexe 3.

Les cartographies obtenues sont présentées ci-dessous, par polluant ou famille de polluants. Elles permettent de définir des seuils de coupure, correspondant à la concentration à partir de laquelle la continuité spatiale des pollutions n'est plus observée. Cette méthode ne permet pas de définir de pollution diffuse.

Les seuils de coupure déterminés par cette méthode sont les suivants :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40} :6 200 mg/kg MS ;
- HAP : 170 mg/kg MS ;
- Trichloréthylène et 1,1,1-trichloroéthane : 10 mg/kg MS ;
- Zinc sur brut : 21 000 mg/kg MS ;
- Plomb sur brut : 5 300 mg/kg MS ;
- Etain sur brut : 3 600 mg/kg MS.

Les figures permettant la définition de ces seuils pour chacun des composés sont présentées ci-dessous.

- **Hydrocarbures C_{10}-C_{40}**

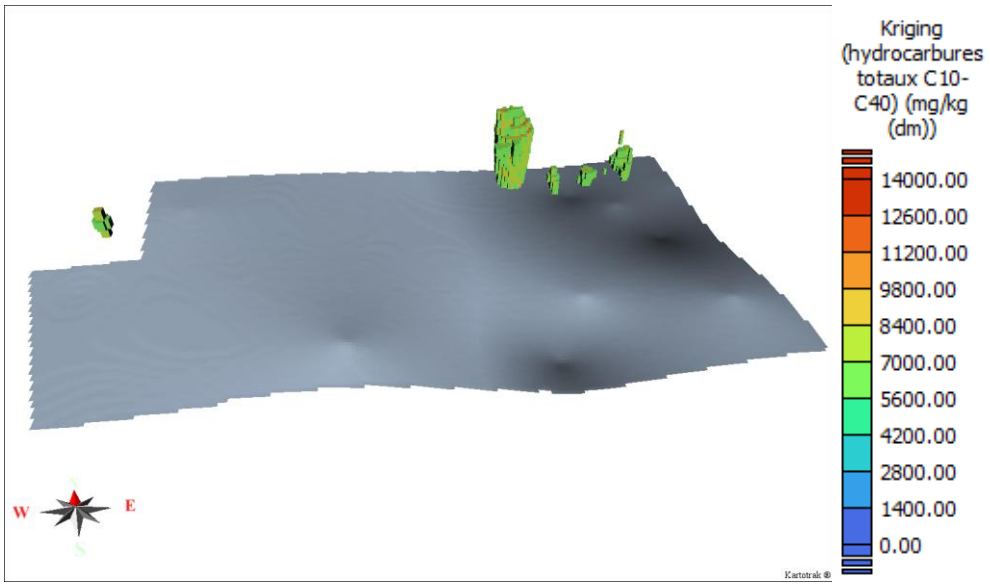


Figure 10 : Localisation des teneurs en hydrocarbures C_{10}-C_{40} supérieures à 6 200 mg/kg MS

- **HAP**

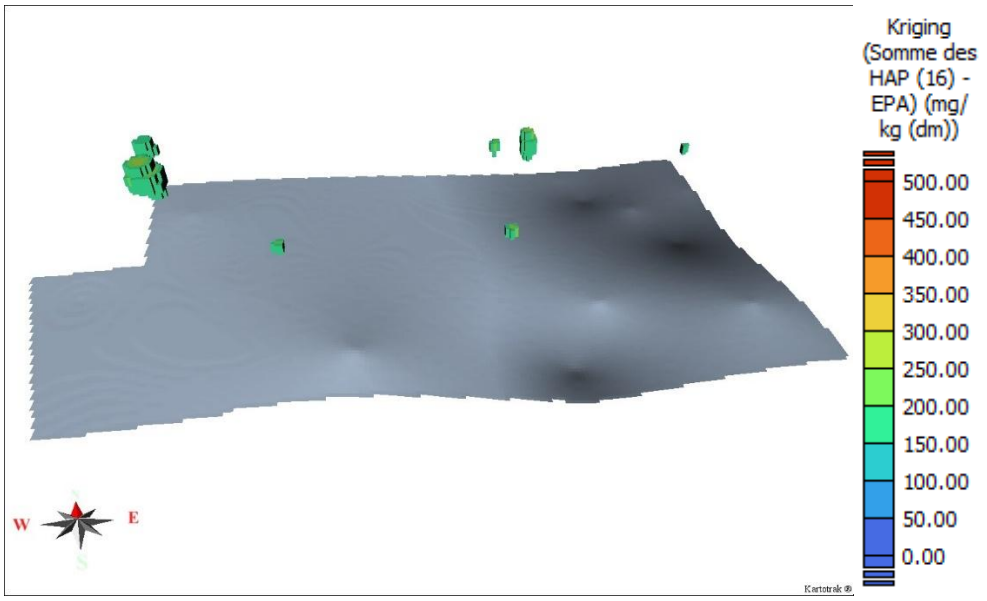


Figure 11 : Localisation des teneurs en HAP supérieures à 170 mg/kg MS

- **Somme du trichloroéthylène et du 1,1,1-trichloroéthane**

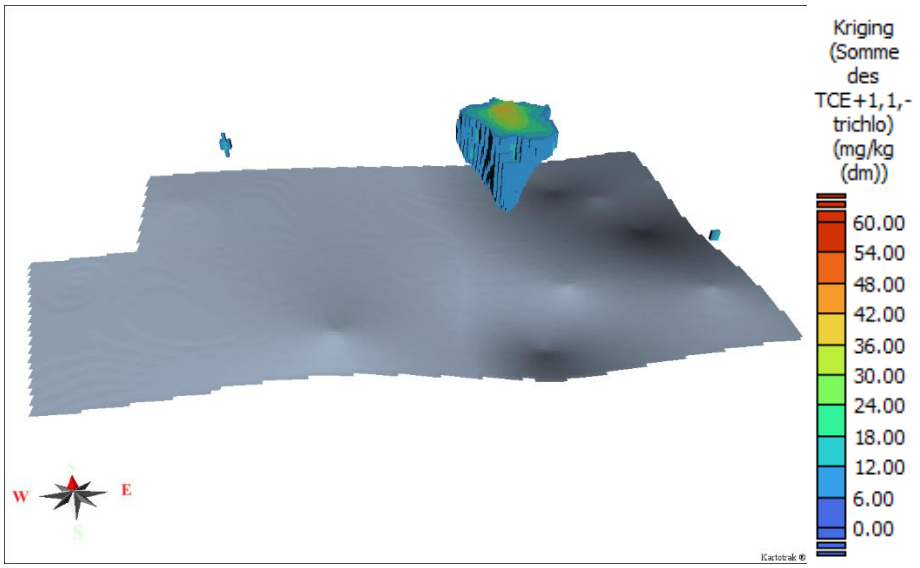


Figure 12 : Localisation des teneurs pour la somme du trichloréthylène et du 1,1,1-trichloroéthane supérieures à 10 mg/kg MS

- **Zinc sur brut**

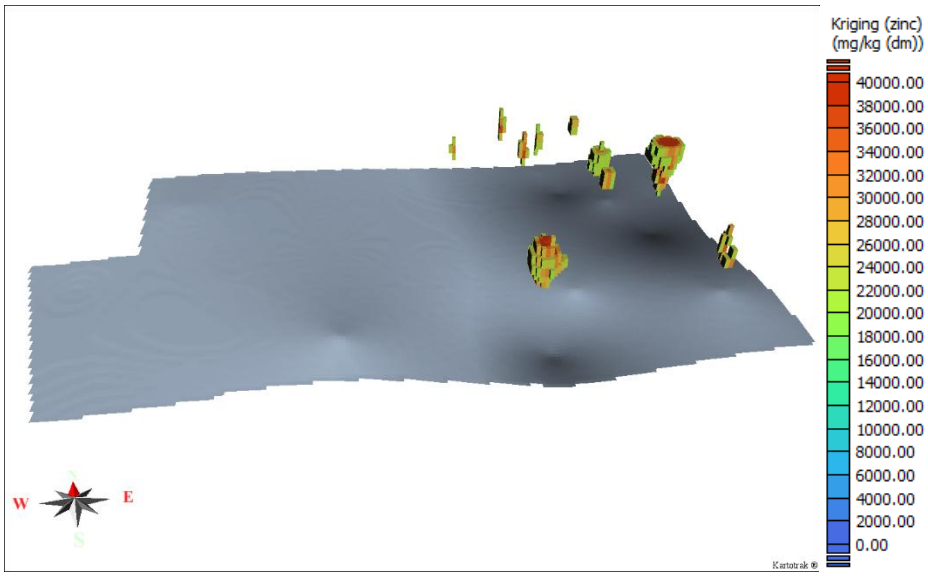


Figure 13 : Localisation des teneurs en zinc supérieures à 21 000 mg/kg MS

- **Plomb sur brut**

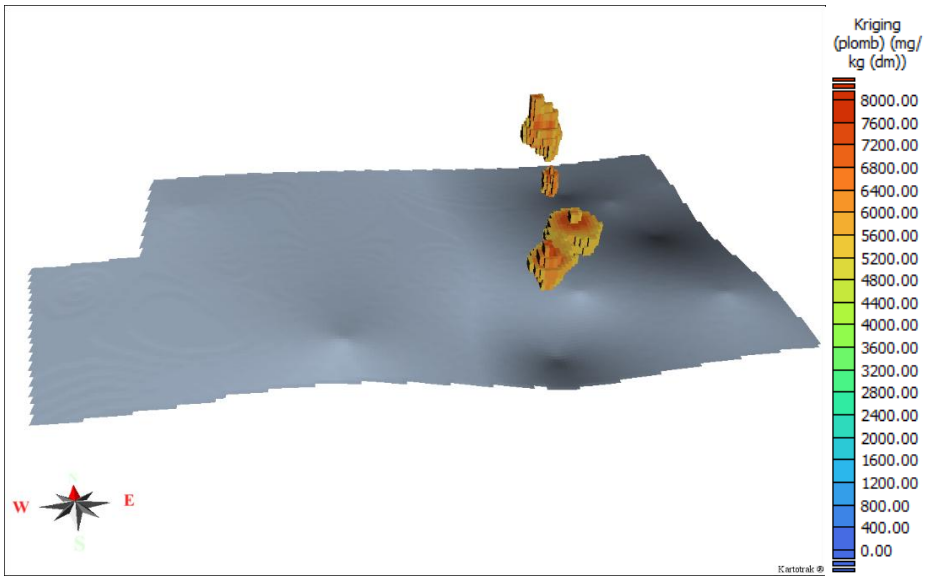


Figure 14 : Localisation des teneurs en plomb supérieures à 5 300 mg/kg MS

- **Etain sur brut**

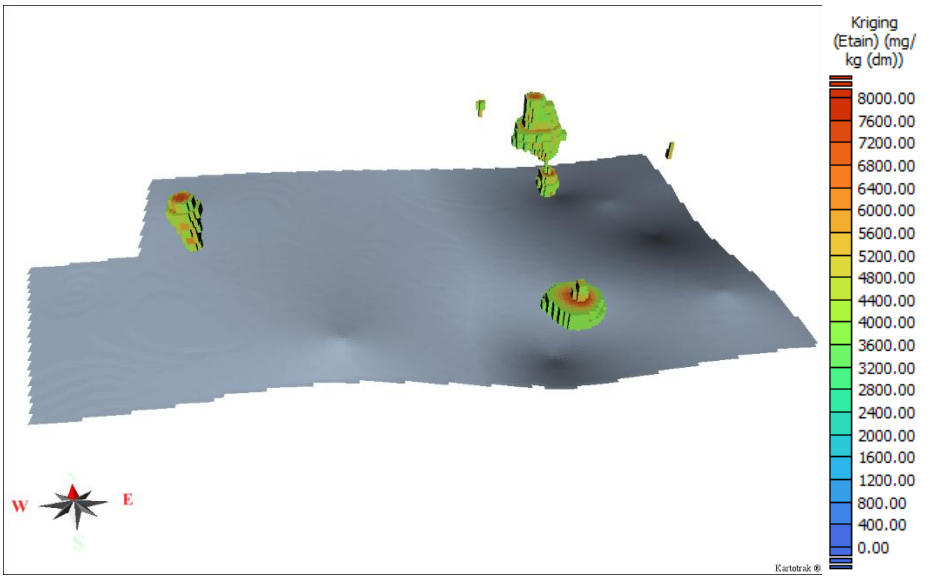


Figure 15 : Localisation des teneurs en étain supérieures à 3 600 mg/kg MS

5.3. Seuils de coupure retenus

Les seuils de coupure et de pollution diffuse déterminés par l'analyse statistique, le bilan massique et la géostatistique sont donc globalement cohérents pour tous les paramètres. Ils sont synthétisés dans le tableau suivant et les seuils retenus y sont présentés.

Tableau 2 : Synthèse des seuils définis par méthode et seuils retenus

Paramètre	Pollution diffuse		Pollution concentrée			Seuils retenus		
	Etude statistique	Bilan massique	Etude statistique	Bilan massique	Géostatistique	Pollution diffuse	Pollution concentrée	Justification de la pollution concentrée
HC C_{10}-C_{40}	1 500	1 500	6 000	6 000	6 200	1 500	6 000	Valeur confirmée par 2 méthodes et cohérent avec la troisième
HAP	60	40	170	170	170	50*	170	Valeur confirmée par les 3 méthodes Le pourcentage massique de polluant relativement faible est lié à l'importance du bruit du fond du site correspondant à la pollution diffuse
∑ TCE + 1,1,1-TCA	5	5	11	10	10	5	10	Valeur confirmée par 2 méthodes et cohérent avec la troisième
Zinc	6 000	6 000	21 000	21 000	21 000	6 000	21 000	Valeur confirmée par les 3 méthodes
Plomb	1 750	1 750	5 400	5 400	5 300	1 750	5 400	Valeur confirmée par 2 méthodes et cohérent avec la troisième Le pourcentage massique de polluant relativement faible est lié à l'importance du bruit du fond du site correspondant à la pollution diffuse
Etain	1 600	1 600	3 600	3 600	3 600	1 600	3 600	Valeur confirmée par les 3 méthodes

* Valeur définie au seuil ISDI en raison de l'incohérence de définir un seuil à 40 mg/kg MS (pollution diffuse pour des sols inertes)

En deçà des seuils de pollution diffuse retenus, il s'agit du bruit de fond du site.

Concernant les chlorures, nous rappelons la zone de pollution concentrée identifiée représentée par deux sondages :

- Sondage 71 entre 0,24 et 4 m de profondeur avec des teneurs comprises entre 18 000 et 38 000 mg/kg MS ;

- Sondage 72 entre 0,18 et 3 m de profondeur avec des teneurs comprises entre 20 000 et 51 000 mg/kg MS.

La distribution des concentrations dans les sols (tableau 3) a été réétudiée en considérant le traitement des pollutions concentrées, avec les seuils de coupure retenus.

Tableau 3 : Mise à jour de la distribution des concentrations dans les sols après traitement des pollutions concentrées (mg/kg MS)

	HC C_{10}-C_{40}		HAP		∑ TCE + 1,1,1-TCA		Zinc		Plomb		Etain	
	Données initiales	Après traitement des pollutions concentrées	Données initiales	Après traitement des pollutions concentrées	Données initiales	Après traitement des pollutions concentrées	Données initiales	Après traitement des pollutions concentrées	Données initiales	Après traitement des pollutions concentrées	Données initiales	Après traitement des pollutions concentrées
Teneur moyenne	1 879	401	22	16	3	1	4 635	2 065	899	542	557	201
Teneur maximale	510 000	5 700	460	160	60	10	250 000	19 000	22 000	5 300	23 000	2 700
Percentile 25	65	57	2	2	0,04	0,04	290	238	120	100	14	12
Médiane	180	140	6	5	0,2	0,1	830	710	330	280	59	42
Percentile 75	450	365	17	15	1	1	2 700	2 200	860	655	230	140
Percentile 80	604	456	21	18	2	1	3 700	2 640	1 100	774	370	200
Percentile 85	816	617	31	28	3	1	5 710	3 700	1 400	1 000	636	308
Percentile 90	1 200	908	50	47	5	2	9 580	5 870	1 800	1 400	1 100	562
Percentile 95	2 685	1 626	100	68	16	3	18 400	9 410	3 400	1 800	2 085	1 100

Les résultats mettent en évidence, après retrait des pollutions concentrées :

- Pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40} : une nette diminution de la moyenne (facteur 4,5) et du percentile 95 (facteur 1,7) ;

- Pour les HAP : une moyenne et des percentiles plus faibles mais moins nettement que pour les autres polluants. Cela est lié à l'importance du bruit du fond de la zone d'étude. Le percentile 95 est toutefois en nette diminution (facteur 1,5). De plus, il n'est plus observé de rupture dans la répartition des concentrations dans les derniers percentiles ;

- Pour la somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane : une nette diminution de la moyenne (facteur 3) et des percentiles à partir du 80 (facteur 2 à 5). De plus, il n'est plus observé de rupture dans la répartition des concentrations dans les derniers percentiles ;

- Pour le zinc : une nette diminution de la moyenne (facteur 2,3) et des percentiles à partir de 80 (facteur 1,4 à 2) ;

- Pour le plomb : une moyenne et des percentiles plus faibles mais moins nettement que pour les autres polluants. Cela est lié à l'importance du bruit du fond de la zone d'étude. La moyenne et le percentile 95 sont toutefois en nette diminution (facteur 1,7 à 1,9) ;

- Pour l'étain : une nette diminution de la moyenne (facteur 2,8) et des percentiles à partir du 85 (facteur 2). De plus, il n'est plus observé de rupture dans la répartition des concentrations dans les derniers percentiles.

Cela confirme que les seuils de coupure retenus sont cohérents et que les teneurs résiduelles sont acceptables au vu des forts niveaux des pollutions initialement identifiées.

Il sera vérifié dans la suite du présent rapport que ces seuils de coupures sont compatibles sanitairement avec le projet d'aménagement et les usages futurs envisagés.

Les zones de pollution concentrée ainsi définies sont présentées sur les figures 11 à 16.

Tableau 4 : Zones de pollution concentrée

Zone	Pollution concentrée identifiée	Autres polluants	Sondages/piézairs concernés	Profondeur estimée (m)
PC1	HAP	HC C_{10}-C_{40} et paramètres sur éluât (fraction soluble et sulfates)	S1, S8, S121, Pa9	0 - 1
PC2	Plomb sur brut	Zinc et cuivre sur brut	S4, Pa10bis	0 - 1
PC3	COHV	-	S104, Pa13	0 - 1
PC4	HC C_{10}-C_{40}	Arsenic sur brut	S13	0 - 0,5
PC5	Etain sur brut	Zinc et cuivre sur brut	S14	0 - 1
PC6	HAP	HC C_{10}-C_{40} et paramètres sur éluât (fraction soluble, fluorures et sulfates)	S127, Pa15	1 - 2
PC7	Zinc sur brut	Plomb sur brut	S5-BGP	0 - 1
PC8	Zinc sur brut	HC C_{10}-C_{40} et plomb sur brut	S48	1 - 2
PC9	COHV, zinc sur brut et HAP	HC C_{10}-C_{40}, cuivre et plomb sur brut et paramètres sur éluât (fraction soluble, fluorures, chlorures, sulfates et zinc, nickel, plomb, antimoine et cadmium)	S8-BGP, S30-BGP, S37 à S40, S50, S59, S60, S70, S157, Pa5, Pa6, Pa7	0 - 4
PC10	HC C_{10}-C_{40}, zinc sur brut et COHV	-	S38	0 - 1
PC11	Etain sur brut	-	S27	0 - 1
PC12	Plomb et étain sur brut	HC C_{10}-C_{40} et zinc sur brut	S29, S42, Pa1bis	0 - 2
PC13	Zinc sur brut	-	S42, S106bis	0 - 1
PC14	Zinc et plomb sur brut	HC C_{10}-C_{40}	S13-BGP, S30-BGP, S51, S52	0 - 2
PC15	Chlorures et zinc sur brut	-	S71, S72	0 - 4
PC16	Zinc sur brut et HAP	HC C_{10}-C_{40} et plomb sur brut	S18-BGP, S63, S64, Pa3	0 - 1
PC17	Zinc et chlorures sur brut	-	S72, S78, Pa28	0 - 1

Zone	Pollution concentrée identifiée	Autres polluants	Sondages/piézairs concernés	Profondeur estimée (m)
PC18	Etain sur brut	-	S82	1 - 3
PC19	HAP sur brut	-	S132	1 - 2
PC20	Plomb sur brut	Zinc sur brut et paramètres sur éluât (fraction soluble et sulfates)	S135	1 - 2
PC21	Plomb sur brut	-	S27-BGP	0 - 1
PC22	Zinc, plomb et étain sur brut	-	S89, Pa35	0 - 1
PC23	Zinc sur brut	HC C_{10}-C_{40}, HAP, plomb sur brut et paramètres sur éluât (zinc)	S100, S113, Pa4	0 - 2
PC24	HC C_{10}-C_{40} et HAP	BTEX et paramètres sur éluât (COT, fraction soluble, sulfates, indice phénol, arsenic et antimoine)	S138, Pa12	2 - 4
PC25	Plomb et étain sur brut	Zinc sur brut	S29, S30, S42, S43, Pa1bis	2 - 6
PC26	COHV	HC C_{10}-C_{40} et BTEX	S45	2 - 3
PC27	HAP	-	S128	2 - 3
PC28	Etain sur brut et HC C_{10}-C_{40}	Plomb et zinc sur brut et paramètres sur éluât (fraction soluble et sulfates)	S87, S134, Pa8, Pa34	2 - 5
PC29	HC C_{10}-C_{40}, plomb, zinc et étain sur brut	-	Pz1, S30 à S34 et S42, Pa1bis, Pa2, Pa30, Pa31	3 - 6

A noter que pour les seuils de pollution concentrée retenus, les masses de polluants correspondantes estimées par le bilan massique sont les suivantes :

- Pour les hydrocarbures C_{10}-C_{40} : environ 114 tonnes, soit 82 % de la masse totale, contenues dans 1 % de volume de sols du site ;

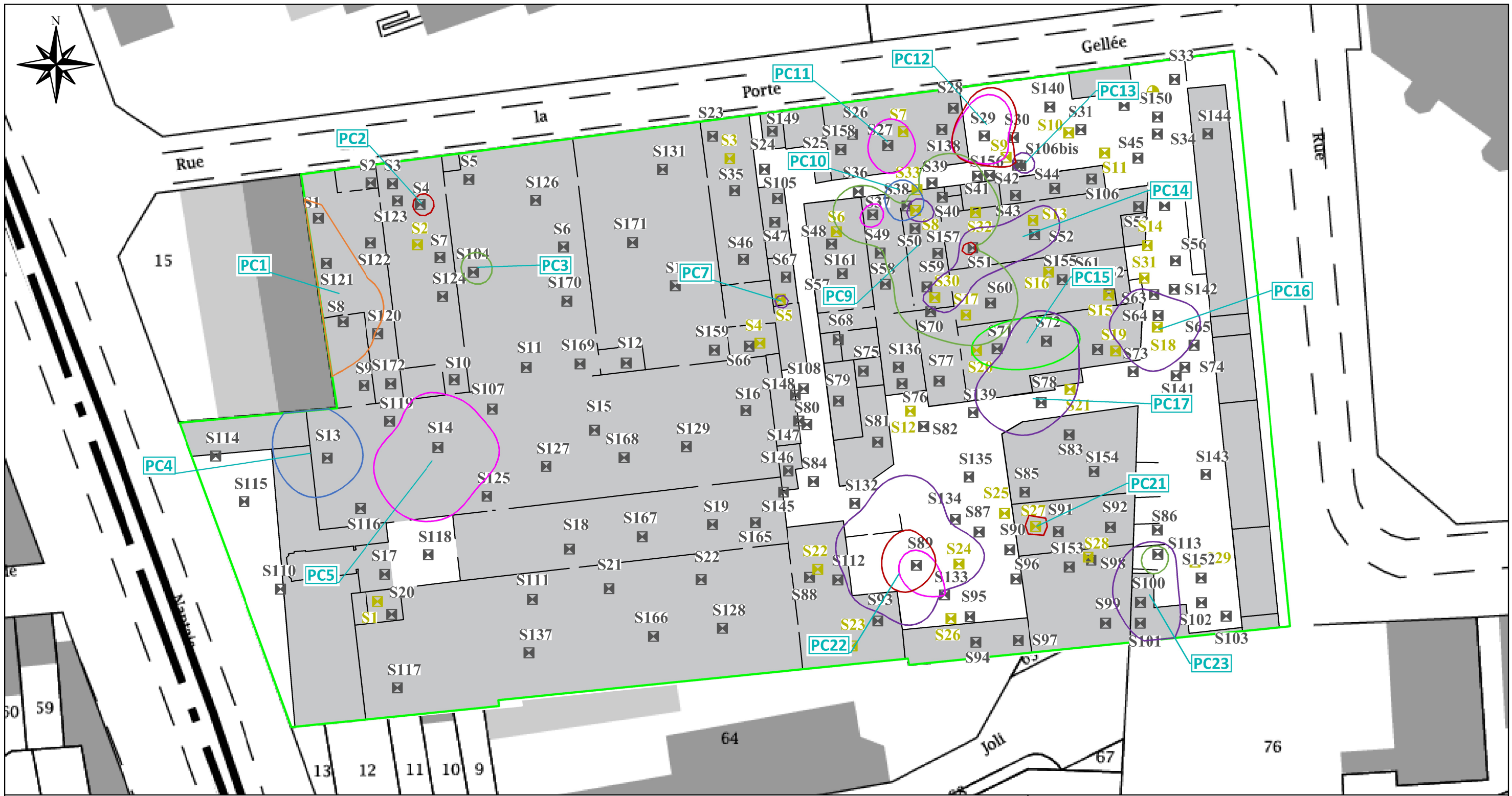
- Pour les HAP : environ 0,46 tonne, soit 28 % de la masse totale, contenues dans 2 % de volume de sols du site. Ce pourcentage massique de polluant relativement faible est lié à l'importance du bruit du fond du site ;

- Pour la somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane : environ 50 kilogrammes, soit 57 % de la masse totale, contenues dans 2 % du volume de sols du site ;

- Pour le zinc : environ 177 tonnes, soit 56 % de la masse totale, contenues dans 2 % de volume de sols du site ;

- Pour le plomb : environ 20 tonnes, soit 31 % de la masse totale, contenues dans 2 % de volume de sols du site. Ce pourcentage massique de polluant relativement faible est lié à l'importance du bruit du fond du site ;

- Pour l'étain : environ 25 tonnes, soir 61 % de la masse totale, contenues dans 2 % de volume de sols du site.



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 16 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 0 et 1 m de profondeur

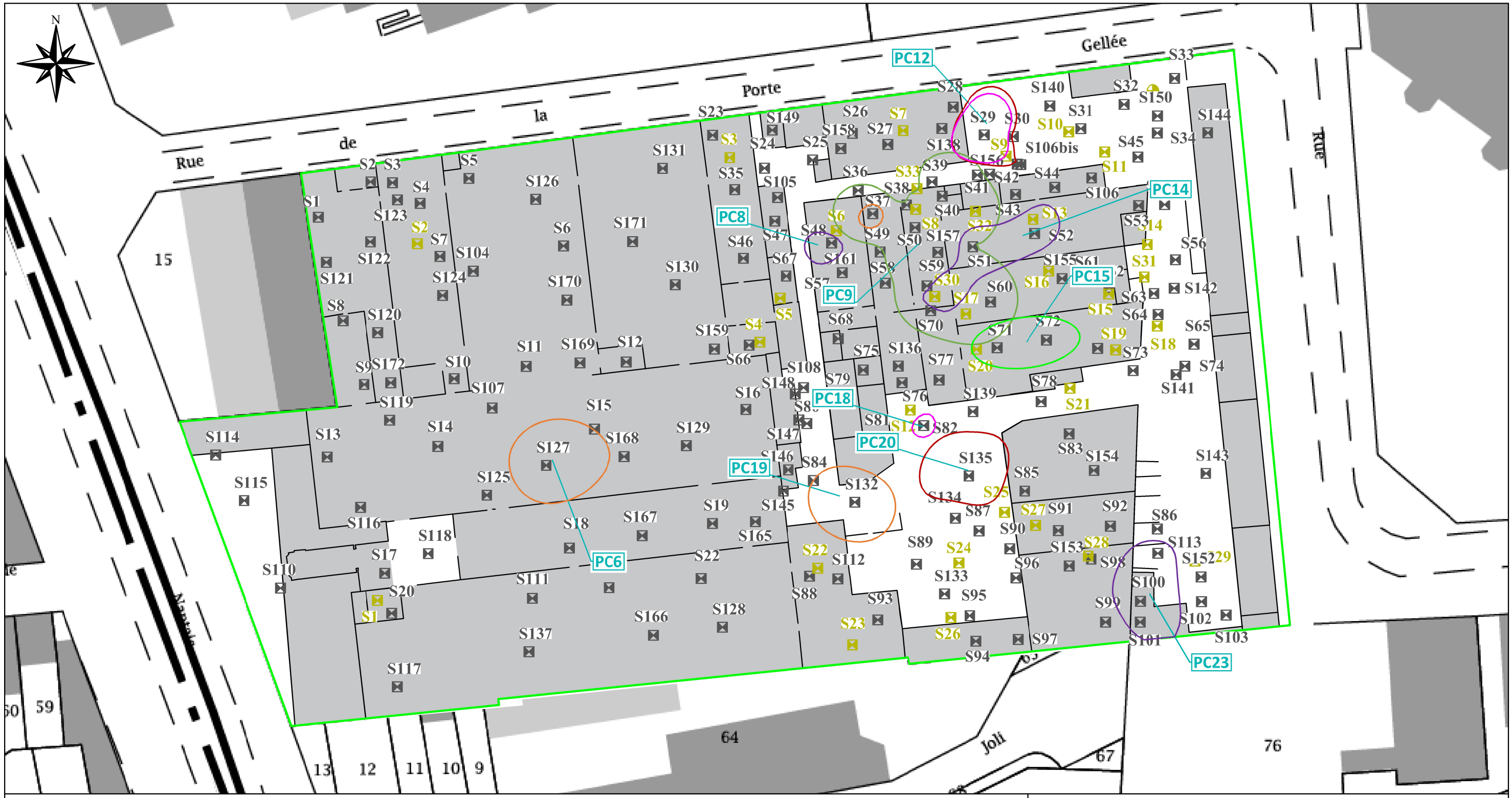
Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 17 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 1 et 2 m de profondeur

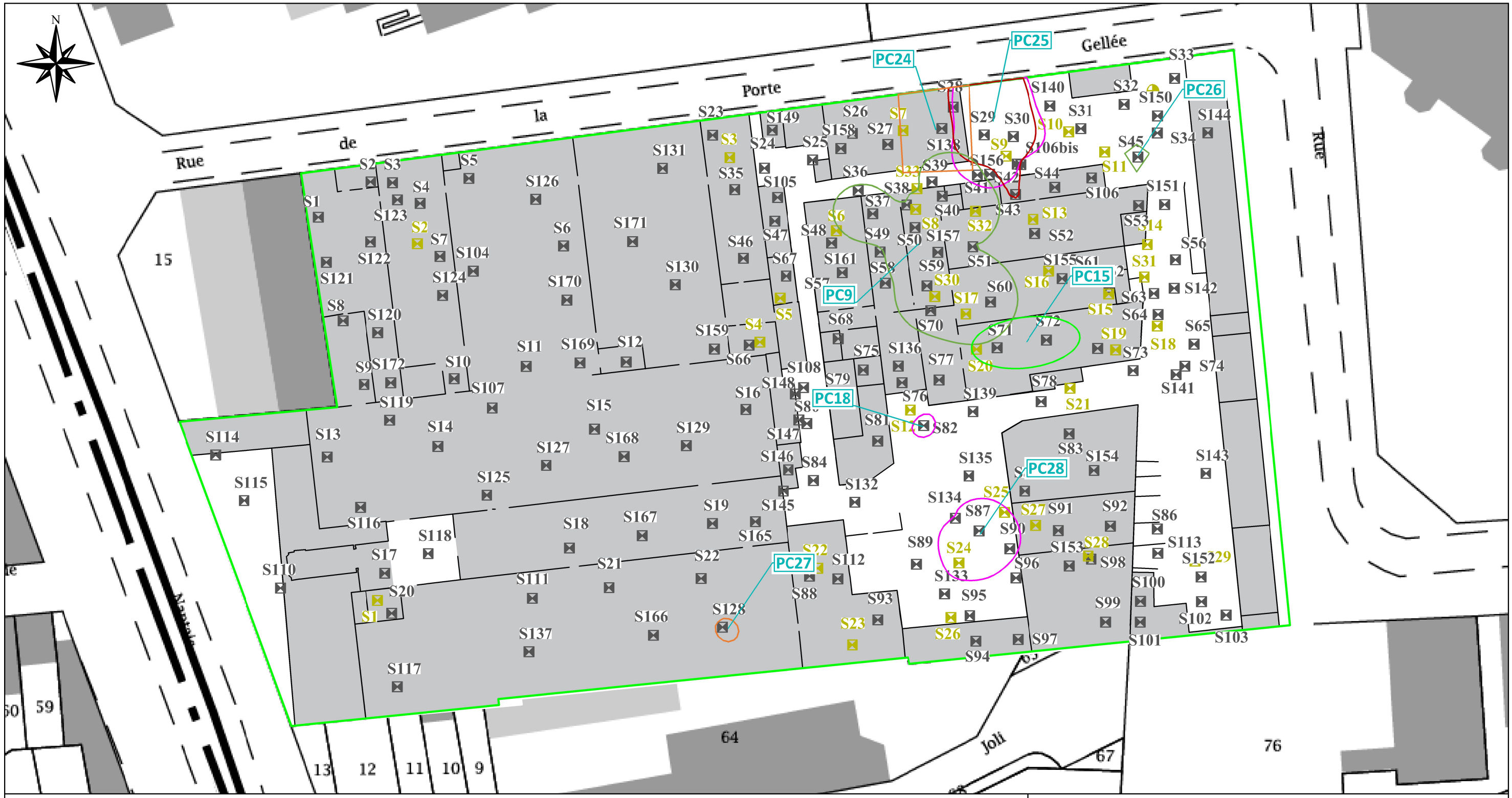
Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 18 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 2 et 3 m de profondeur

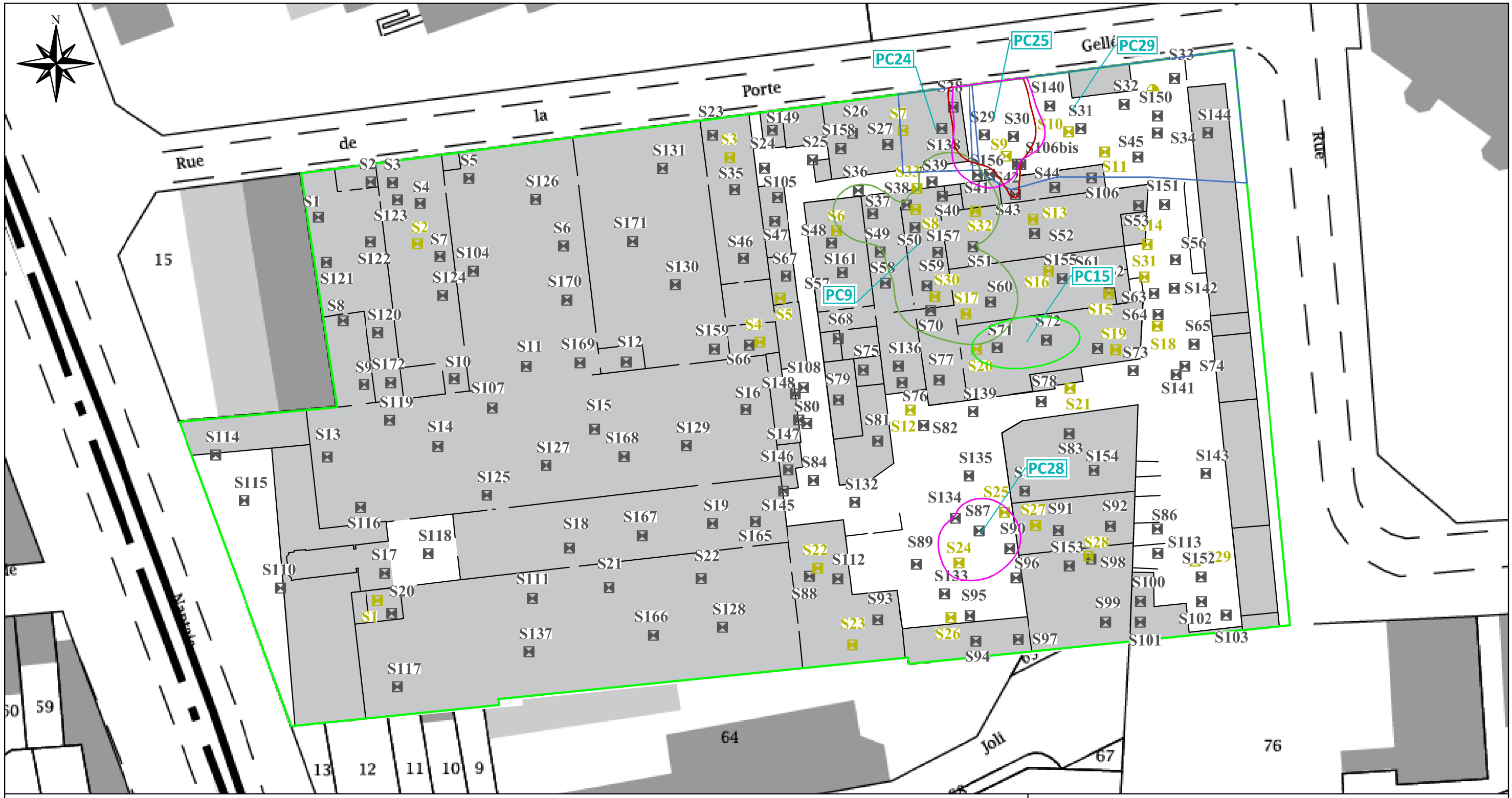
Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 19 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 3 et 4 m de profondeur

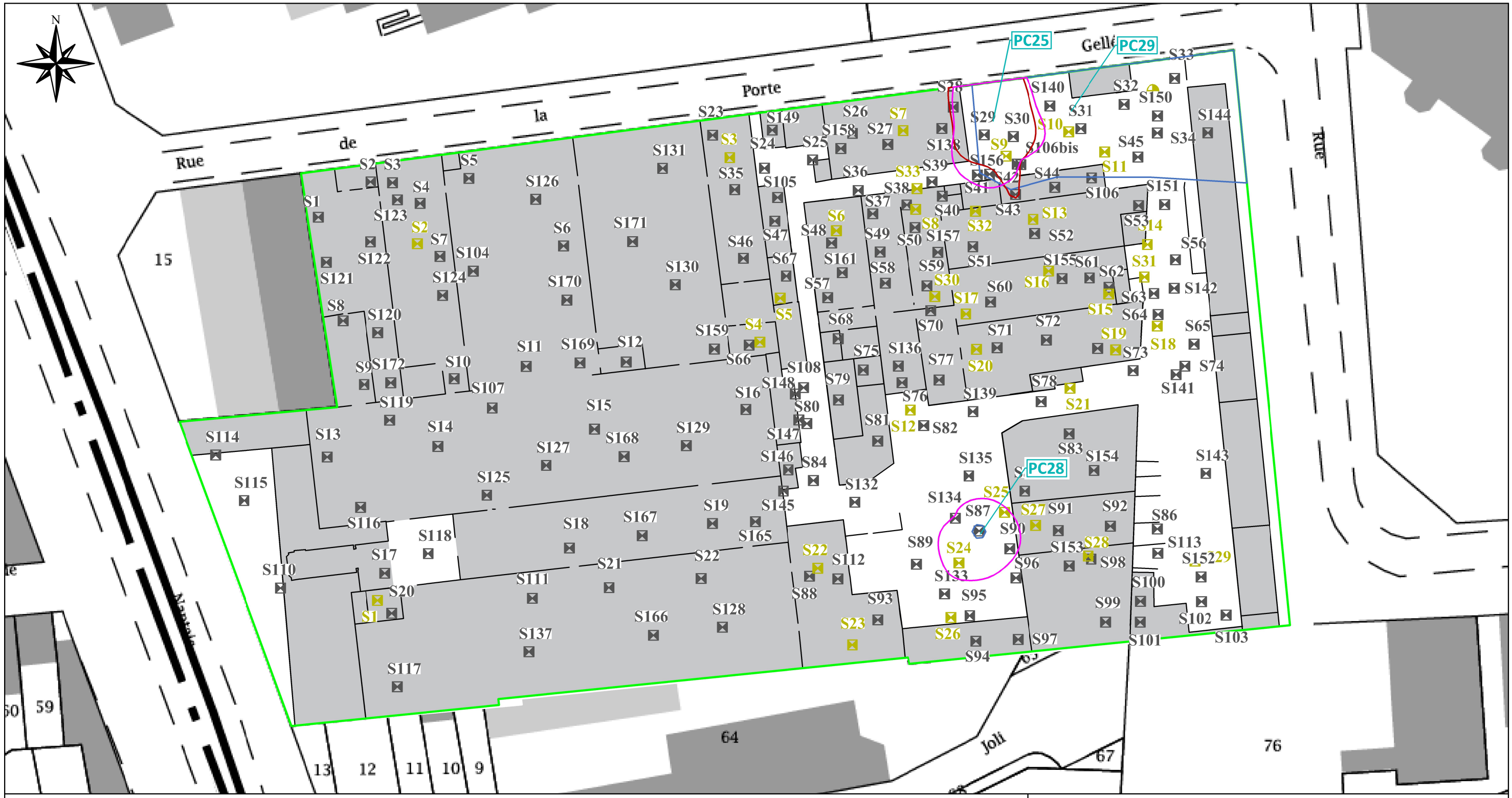
Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 20 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 4 et 5 m de profondeur

Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières



Légende :

- Bâti actuel
- Emprise du site d'étude
- Sondage réalisé par BURGEAP en 2016
- Sondage réalisé par SEREA entre 2019 et 2025

Pollution concentrée (limites déterminées par krigeage) :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40}
- HAP
- Somme des trichloroéthylène et 1,1,1-trichloroéthane
- Zinc
- Plomb
- Etain
- Chlorures

Figure 21 : Localisation des zones de pollution concentrée - Entre 5 et 6 m de profondeur

Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières

6 - Analyse des enjeux sanitaires (A320)

6.1. Méthodologie générale

L'évaluation des risques sanitaires est une démarche qui vise à collecter, structurer et analyser les éléments de connaissance, tout en les assortissant des incertitudes correspondantes. Elle a pour but de déterminer si la qualité des milieux est compatible avec l'usage du site, c'est-à-dire si les teneurs en polluants mesurées présentent un niveau de risque acceptable ou non pour les usagers. Il s'agit ainsi d'un outil d'aide à la décision quant à la réhabilitation du site et/ou la mise en place de mesures de gestion spécifiques.

Quatre grands principes sont à respecter lors d'une démarche d'évaluation des risques sanitaires :

- Le principe de prudence scientifique ;
- Le principe de proportionnalité ;
- Le principe de spécificité ;
- Le principe de transparence.

La démarche d'analyse des enjeux sanitaires se compose conventionnellement de quatre étapes :

- **L'identification des dangers** : détermination des effets indésirables que les substances chimiques sont intrinsèquement capables de provoquer chez l'homme ;

- **L'estimation des relations dose-réponse** : estimation du rapport entre le niveau ou la dose d'exposition et l'incidence et la gravité des effets ;

- **L'estimation des expositions** : évaluation du transfert des substances depuis le milieu source vers le milieu d'exposition et détermination de la fréquence et de la durée de l'exposition des populations ;

- **La caractérisation des risques sanitaires** : synthèse des données obtenues permettant d'aboutir à une quantification du risque.

Dans le cadre de cette étude, et conformément à la méthodologie nationale, l'EQRS est réalisée au droit du site. Les usages hors site ne sont pas considérés.

Par mesure conservatoire et sans signifier que des pollutions concentrées puissent rester en place, SEREA réalise des EQRS sur la base des teneurs maximales identifiées dans les milieux et non sur la base des teneurs résiduelles supposées dans les terrains après mesures de gestion théoriques (définies dans le cadre du plan de gestion, ARR prédictive). Les ARR fin de travaux, sont quant à elles réalisées sur la base des teneurs résiduelles obtenues après travaux de réhabilitation.

6.2. Conclusions du schéma conceptuel

Le schéma conceptuel a mis en évidence des risques potentiels pour les futurs usagers du site dans le cadre du projet par inhalation de substances volatiles dans l'air ambiant, en intérieur et en extérieur.

Les risques liés à cette voie d'exposition sont quantifiés dans la présente EQRS.

6.3. Identification des dangers

6.3.1. Sélection des substances à prendre en compte

D'une manière générale, dans le cadre d'une analyse des risques sanitaires, s'il ne peut être pris en compte l'ensemble des polluants présents au droit du site, faute de données suffisantes, il convient d'adopter une démarche transparente et réfléchie de sélection des substances.

Conformément à la méthodologie, les substances sont prises en compte en fonction des critères liés à :

- Leur toxicité ;
- Leur potentiel cancérogène ;
- La connaissance des effets principaux et secondaires associés ;
- La connaissance de la relation dose-effet et du degré de confiance associé ;
- La présence constatée de la substance dans l'environnement et la quantité émise ;
- La spécificité de la substance par rapport à la source étudiée ;
- Le comportement de la substance dans l'environnement.

La liste des substances retenues est la suivante :

- Certains CAV : benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes, mésitylène, pseudocumène ;
- Le naphtalène (HAP) ;
- Certains COHV : tétrachloroéthylène, trichloroéthylène, trans-1,2-dichloroéthylène, cis-1,2-dichloroéthylène, 1,1-dichloroéthylène, tétrachlorométhane, trichlorométhane (chloroforme), 1,1,1-trichloroéthane, 1,2-dichloroéthane ;
- Le mercure.

La justification du choix des substances retenues est présentée en annexe 4-1.

6.3.2. Identification du danger des substances chimiques

L'identification du potentiel danger consiste à identifier des effets indésirables que les substances sont intrinsèquement capables de provoquer chez l'homme.

Les substances chimiques sont susceptibles de provoquer des effets aigus liés à une exposition courte à des doses généralement assez élevées[8] et des effets subchroniques ou chroniques susceptibles d'apparaître suite à une exposition prolongée à des doses plus faibles. Dans le cadre de l'évaluation des risques sanitaires liés à des sites pollués, c'est essentiellement la toxicité chronique qui est préoccupante.

Il est distingué les toxiques présentant un effet à seuil et les toxiques sans seuil :

- Effet à seuil : effet qui survient au-delà d'une dose administrée, pour une durée d'exposition déterminée à une substance isolée. L'intensité des effets croît alors avec l'augmentation de la dose administrée. En deçà de cette dose il est considéré que l'effet ne survient pas. Ce sont généralement les effets non cancérogènes, voire les cancérogènes non génotoxiques, qui sont classés dans cette famille ;

- Effet sans seuil : effet qui peut apparaître quelle que soit la dose reçue. La probabilité de survenue croît avec la dose et la durée d'exposition, mais l'intensité de l'effet n'en dépend pas. Cette famille concerne principalement les effets cancérogènes génotoxiques.

Pour les substances retenues dans l'étude, leurs dangers sont présentés en annexe 4-2.

[8] Notamment l'ingestion directe de terres par les enfants

6.4. Relation dose-réponse des substances chimiques

L'évaluation de la relation dose-réponse a pour but de définir une relation quantitative entre la dose administrée ou absorbée et l'effet sur la santé. Cette relation se traduit par l'élaboration des VTR.

Une VTR est un indice toxicologique qui établit un lien entre une dose et un effet (effet à seuil) ou entre une dose et une probabilité d'effet (effet sans seuil). Les VTR sont spécifiques d'une substance, d'une durée d'exposition (aiguë, subchronique ou chronique), d'une voie d'exposition (orale, respiratoire, …) et d'un type d'effet (reprotoxique, cancérogène, …).

Ces VTR sont établies principalement à partir d'études expérimentales chez l'animal mais également à partir d'enquêtes épidémiologiques chez l'homme.

Afin de sélectionner les VTR pour les substances considérées, le Ministère de l'Environnement recommande de s'appuyer sur les préconisations de la note d'information du Ministère de la Santé du 31 octobre 2014.

Les VTR retenues pour l'évaluation des risques sanitaires sont présentées ci-après.

Tableau 5 : VTR des substances retenues

Substances	Effet chronique à seuil		Effet chronique sans seuil	
	VTR inhalation (mg/m^3)	Organisme (date de révision)	ERU inhalation $(mg/m^3)^{-1}$	Organisme (date de révision)
Composés Aromatiques Volatils (CAV)				
Benzène	0,0097	ANSES (2024) INERIS (2021) ATSDR (2007)	0,0016	ANSES (2024)
Toluène	19	INERIS (2022) ANSES (2017)	-	-
Ethylbenzène	1,5	INERIS (2021) ANSES (2016)	0,0025	OEHHA (2007)
Xylènes	0,1	INERIS (2022) ANSES (2020) US EPA (2003)	-	-
1,3,5-Triméthylbenzène (Mésitylène)	0,06	US EPA (2016)	-	-
1,2,4-Triméthylbenzène (Pseudocumène)	0,06	US EPA (2016)	-	-
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)				
Naphtalène	0,037	INERIS (2014) ANSES (2013)	0,0056	INERIS (2014) ANSES (2013)
Composés Organo-Halogénés Volatils (COHV)				
cis-1,2-Dichloroéthylène	0,06	RIVM (2009)	-	-
Trichloroéthylène	3,2	INERIS (2022) ANSES (2018)	0,001	INERIS (2022) ANSES (2018)
Tétrachloroéthylène	0,4	INERIS (2022) ANSES (2018)	0,00026	INERIS (2022) ANSES (2018) US EPA (2012)
Trichlorométhane (Chloroforme)	0,063	INERIS (2020) ANSES (2008)	0,023	US EPA (2001)
Tétrachlorométhane (Tétrachlorure de carbone)	0,11	ANSES (2017)	0,006	US EPA (2010)
1,1,1-Trichloroéthane	1	INERIS (2014) OEHHA (2008)	-	-
trans 1,2-Dichloroéthylène	0,06	RIVM (2009)	-	-
1,2-Dichloroéthane	3	ATSDR (2001)	0,0034	ANSES (2009)
1,1-Dichloroéthylène	0,004	INERIS (/) ATSDR (2022)	-	-
Métaux				
Mercure	0,00003	INERIS (2023) OEHHA (2008)	-	-

- : absence de VTR

6.5. Estimation des expositions

L'estimation de l'exposition des usagers aux polluants dépend de plusieurs paramètres :

- Données liées à la qualité du sous-sol et à la configuration des pollutions ;
- Données liées à l'aménagement du site (bâtiments et espaces extérieurs) ;
- Données liées aux habitudes des usagers.

6.5.1. Méthodologie

L'estimation des expositions a pour but d'évaluer la quantité de polluants absorbée par les cibles pour le scénario retenu. Pour cela, il convient de déterminer :

- Le budget espace-temps de la population concernée, correspondant à sa fréquence et à sa durée d'exposition ;

- Les teneurs en polluants dans les milieux d'exposition, par le biais d'équations de transfert des substances à partir du milieu source.

Cette quantité de polluants absorbée est appelée DJE.

La formule du calcul de la DJE est présentée en annexe 4-3.

6.5.2. Budget espace-temps et paramètres d'exposition

Dans le cadre du projet, il est prévu la construction de bâtiments de logements et de bureaux, avec également des locaux d'activité et une école d'enseignement supérieur.

Conformément au décret du 19 décembre 2022, il s'agit d'usages de types résidentiel et tertiaire.

D'après le plan masse daté du 12/06/2025, annoté par LEGENDRE IMMOBILIER et transmis le 13/06/2025, les usages sont répartis de la manière suivante, par bâtiment ou ensemble de bâtiments (figure 22) :

- Bâtiment 1 (Les Peignes 2 et 3 et le parking) : parking en RDC, R+1 et R+2, logements et bureaux aux étages supérieurs ;
- Bâtiment 2 (Porte Nord 1) : locaux d'activité et logements en RDC, logements aux étages ;
- Bâtiments 3 (Vestiaires 1 et 2) et 4 (Porte Sud 1 et 2) : logements en RDC et aux étages ;
- Bâtiment 5 (Fronton, Les Sheds (1A, 1B et 2)) : bureaux et locaux d'activité en RDC et à l'étage ;
- Bâtiment 6 (Les Peignes 1) : bureaux en RDC et aux étages ;
- Bâtiment 7 (Les Sheds (3A et 3B) et Halle de la Boire) : bureaux ou école d'enseignement supérieur.

Les cibles considérées sont des « résidents » (adultes, enfants et nourrissons), des « travailleurs » (adultes) et des « étudiants » (adultes).

Des visiteurs peuvent également évoluer sur le site. Ce scénario « visiteurs » est minorant par rapport aux autres et n'est donc pas détaillé dans la suite de l'étude. Les budgets espace-temps et les paramètres d'exposition sont présentés dans le tableau ci-après.



Légende :

- Logements
- Bureaux
- Activités
- Parking
- Aménagement paysager
- Chemin/terrasse
- Voirie
- Noue
- Tranchée drainante
- Canalisation EU/EP
- Emprise du site d'étude
- Piézair réalisé en 2019
- Piézair réalisé en 2021
- Piézair réalisé en 2025
- Piézair inutilisable

Figure 22 : Plan masse du projet du 29/10/2025 avec usages et superposition des piézairs

Echelle : 1/700
Format A3

Affaire : SER19233

Date : 29/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières

Tableau 6 : Budget espace-temps et paramètres d'exposition

Paramètre	Valeur	Source
Scénario "Résidents"		
1) Adulte [16 - 36 ans[		
Nombre d'heures passées dans le parking du bâtiment 1 par jour (h/j)	0,5	Scénario retenu
Nombre d'heures passées à l'intérieur du logement par jour (h/j)	16,4	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Nombre d'heures passées à l'extérieur du logement par jour (h/j)	0,7	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Nombre de jours d'exposition par an (j/an)	365	INERIS, 2001 - *Méthode de calcul des VCI dans les sols*
Nombre d'années d'exposition (an)	20	INERIS, 2001 - *Méthode de calcul des VCI dans les sols* INERIS, 2023 - *Etat de l'art pour l'évaluation des risques de substances à effets sans seuil pour les enfants*
Hauteur d'exposition (cm)	155	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
2) Enfant [2 - 16 ans[		
Nombre d'heures passées dans le parking du bâtiment 1 par jour (h/j)	0,5	Scénario retenu
Nombre d'heures passées à l'intérieur du logement par jour (h/j)	15,3	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Nombre d'heures passées à l'extérieur du logement par jour (h/j)	1,7	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Nombre de jours d'exposition par an (j/an)	365	INERIS, 2001 - *Méthode de calcul des VCI dans les sols*
Nombre d'années d'exposition (an)	14	INERIS, 2023 - *Etat de l'art pour l'évaluation des risques de substances à effets sans seuil pour les enfants*
Hauteur d'exposition (cm)	113	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
3) Nourrisson [0 - 2 ans[		
Nombre d'heures passées dans le parking du bâtiment 1 par jour (h/j)	0,5	Scénario retenu
Nombre d'heures passées à l'intérieur du logement par jour (h/j)	17,5	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Nombre d'heures passées à l'extérieur du logement par jour (h/j)	0,7	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Nombre de jours d'exposition par an (j/an)	365	INERIS, 2001 - *Méthode de calcul des VCI dans les sols*
Nombre d'années d'exposition (an)	2	INERIS, 2023 - *Etat de l'art pour l'évaluation des risques de substances à effets sans seuil pour les enfants*
Hauteur d'exposition (cm)	50	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Scénario "Travailleurs"		
Nombre d'heures passées dans le parking du bâtiment 1 par jour (h/j)	0,5	Scénario retenu
Nombre d'heures passées à l'intérieur d'un bureau, d'un local d'activités ou d'une salle de cours par jour (h/j)	8	Scénario retenu
Nombre d'heures passées en extérieur par jour (h/j)	1	Scénario retenu
Nombre de jours d'exposition par an (j/an)	220	Durée légale du travail
Nombre d'années d'exposition (an)	43	www.service-public.fr Durée moyenne de cotisation pour une retraite à taux plein
Hauteur d'exposition (cm)	155	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*
Scénario "Etudiants"		
Nombre d'heures passées dans le parking du bâtiment 1 par jour (h/j)	0,5	Scénario retenu
Nombre d'heures passées à l'intérieur d'une salle de cours par jour (h/j)	8	Scénario retenu
Nombre d'heures passées en extérieur par jour (h/j)	1	Scénario retenu
Nombre de jours d'exposition par an (j/an)	303	Scénario retenu (année civile complète en cours, hors juillet et août)
Nombre d'années d'exposition (an)	5	Scénario retenu (école d'enseignement supérieur en cinq ans - niveau master)
Hauteur d'exposition (cm)	155	INERIS, 2017 - *Paramètres d'exposition de l'Homme du logiciel MODUL'ERS*

6.5.3. Détermination de la concentration en polluants dans les milieux d'exposition

En l'absence de mesure dans les milieux d'exposition « air intérieur » et « air extérieur », les concentrations en polluants y sont modélisées à partir des teneurs retenues dans le milieu source considéré : les gaz du sol.

Le milieu gaz du sol a été préféré au milieu sols car il permet de s'affranchir d'une étape de modélisation (transfert sols et eaux souterraines - gaz du sol) pour laquelle de nombreux facteurs majorants supplémentaires sont pris en compte.

De plus, le milieu gaz du sol est considéré comme un milieu intégrateur : il permet d'intégrer le dégazage des sols et des eaux souterraines.

6.5.3.1. Analyses complémentaires

Les analyses complémentaires de granulométrie nécessaires à la connaissance du transfert des polluants dans les sols sont présentées ci-après. Le rapport d'essai d'analyses du laboratoire est joint en annexe 4-4. Les normes analytiques du laboratoire y sont présentées.

Tableau 7 : Résultats d'analyses sur les sols (%) - Granulométrie

	Pa2-2	Pa4	Pa6	Pa8	Pa9
Profondeur (m)	*1 - 2*	*0,05 - 2*	*0,15 - 2*	*0,2 - 2*	*0,2 - 2*
Granulométrie					
Parties min. <2 µm	<1	4,2	2,1	<1	7,2
Parties min. <20 µm	7,4	8,1	6,4	3,8	15
Parties min. <50 µm	13	11	12	6,4	15
Parties min. <210 µm	30	29	29	16	31
Parties min. <2 mm	52	72	71	56	87

Commentaires :

D'après le triangle des textures[9], les échantillons de remblais sableux à sablo-limoneux, prélevés lors de l'installation de certains piézairs, mettent en évidence des terrains de type :

- « Sable limoneux » pour Pa2-2, Pa4, Pa6 et Pa8 ;
- « Limon sableux » pour Pa9.

[9] Triangle des textures de l'United States Department of Agriculture (USDA)

6.5.3.2. Concentrations retenues dans le milieu source

Les concentrations prises en compte sont les teneurs maximales mesurées dans les gaz du sol toutes campagnes confondues, par bâtiment ou ensemble de bâtiments et pour les espaces extérieurs, soit parmi les piézairs suivants :

- Bâtiment 1 (Les Peignes 2 et 3 et le parking) : Pa13, Pa20, Pa21, Pa22 et Pa23 ;
- Bâtiment 2 (Porte Nord 1) : Pa1/Pa1bis, Pa12 et Pa26 ;
- Bâtiment 3 (Vestiaires 1 et 2) : Pa2, Pa3, Pa27, Pa31, Pa32 et Pa33 ;
- Bâtiment 4 (Porte Sud 1 et 2) : Pa8, Pa34 et Pa35 ;
- Bâtiment 5 (Fronton, Les Sheds (1A, 1B et 2)) : Pa14, Pa16, Pa17, Pa18, Pa36 et Pa37 ;
- Bâtiment 6 (Les Peignes 1) : Pa9, Pa10/Pa10bis et Pa18 ;
- Bâtiment 7 (Les Sheds (3A et 3B) et Halle de la Boire) : Pa5, Pa15, Pa24, Pa25, Pa28 et Pa29 ;
- Espaces extérieurs : Pa1/Pa1bis, Pa2, Pa3, Pa4, Pa6, Pa7, Pa8, Pa10/Pa10bis, Pa19, Pa30, Pa33, Pa34 et Pa37.

Lorsqu'une limite de quantification est plus élevée que la concentration maximale pour une substance donnée, celle-ci est prise en compte.

La superposition des piézairs sur le dernier plan d'aménagement daté du 13/06/2025 et transmis par LEGENDRE IMMOBILIER le 19/06/2025 est présentée en annexe 4-5.

A noter que les teneurs en COHV sont susceptibles d'évoluer dans le temps. En effet, la dégradation du trichloroéthylène va se poursuivre naturellement et la proportion en chlorure de vinyle pourra augmenter.

La chaîne de dégradation du trichloroéthylène est la suivante :

Tétrachloroéthylène → Trichloroéthylène → cis-1,2-Dichloroéthylène → Chlorure de vinyle
trans-1,2-Dichloroéthylène
1,1-Dichloroéthylène

Tableau 8 : Concentrations des substances retenues dans le milieu source (mg/m³)

Substances	Bâtiment 1 (Les Peignes 2 et 3 et le parking)		Bâtiment 2 (Porte Nord 1)		Bâtiment 3 (Vestiaires 1 et 2)		Bâtiment 4 (Porte Sud 1 et 2)		Bâtiment 5 (Fronton, Les Sheds (1A, 1B et 2))		Bâtiment 6 (Les Peignes 1)		Bâtiment 7 (Les Sheds (3A et 3B) et Halle de la Boire)		Extérieurs	
	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus	Teneurs	Echantillons retenus
Composés Aromatiques Volatils (CAV)																
Benzène	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ
Toluène	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ
Ethylbenzène	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ
Xylènes	0,051	LQ	0,050	LQ	0,050	LQ	0,051	LQ	0,051	LQ	0,051	LQ	0,051	LQ	0,051	LQ
1,3,5-Triméthylbenzène (Mésitylène)	0,009	Pa13, juil-21	0,009	Pa12, juil-21	0,004	LQ	0,004	LQ	0,003	Pa14, juil-21	0,004	LQ	0,004	Pa15, juil-21	0,004	LQ
1,2,4-Triméthylbenzène (Pseudocumène)	0,027	Pa13, juil-21	0,027	Pa12, juil-21	0,004	LQ	0,004	LQ	0,011	Pa14, juil-21	0,004	LQ	0,013	Pa15, juil-21	0,004	LQ
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)																
Naphtalène	0,0003	Pa13, juil-21	0,004	LQ	0,004	LQ	0,004	LQ	0,0004	LQ	0,004	LQ	0,004	LQ	0,004	LQ
Composés Organo-Halogénés Volatils (COHV)																
cis-1,2-Dichloroéthylène	0,085	Pa13, juil-21	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,196	Pa10, oct-20	0,017	LQ	2,059	Pa6, oct-20
Trichloroéthylène	4,234	Pa13, juil-21	1,425	Pa1, oct-20	1,153	Pa27, fév-25	1,765	Pa8, oct-20	0,696	Pa18, fév-25	7,067	Pa10, oct-20	11,934	Pa5, oct-20	82,840	Pa7, oct-20
Tétrachloroéthylène	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,026	Pa5, oct-20	0,230	Pa7, fév-25
Trichlorométhane (Chloroforme)	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,036	Pa10, oct-20	0,082	Pa5, oct-20	0,099	Pa7, oct-20
Tétrachlorométhane (Tétrachlorure de carbone)	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	Pa7, oct-20
1,1,1-Trichloroéthane	2,564	Pa13, juil-21	1,090	Pa1, oct-20	4,161	Pa2, oct-20	0,799	Pa8, oct-20	0,560	Pa18, fév-25	3,337	Pa10, oct-20	8,070	Pa5, oct-20	5,384	Pa6, oct-20
trans 1,2-Dichloroéthylène	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,027	Pa6, oct-20
1,2-Dichloroéthane	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	Pa5, oct-20	0,017	LQ
1,1-Dichloroéthylène	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,017	LQ	0,022	Pa10, déc-19	0,183	Pa5, oct-20	0,022	Pa10, déc-19
Métaux																
Mercure	0,005	Pa13, janv-22	0,003	LQ	0,0008	LQ	0,005	Pa8, déc-19	0,003	LQ	0,007	LQ	0,003	LQ	0,008	LQ

6.5.3.3. Concentrations en polluants dans les milieux d'exposition

Les paramètres physico-chimiques des substances utilisés pour la modélisation des concentrations en polluants dans les différents milieux sont issus, soit des bases de données des modèles utilisés, soit de la bibliographie (fiches de données toxicologiques de l'INERIS, base de données de l'ATSDR, fiches toxicologiques INRS, travaux de TPHCWG, base de données INCHEM, base de données GSI environmental).

Les paramètres physico-chimiques des substances sont présentés en annexe 4-5.

- **Concentration dans l'air intérieur des bâtiments**

La modélisation du transfert des polluants de l'air du sol vers l'air intérieur des bâtiments est réalisée à partir des équations du modèle Johnson & Ettinger (US EPA, 2004). Celles-ci sont précisées en annexe 4-3.

Il a été considéré le transfert d'une source infinie de polluants vers l'air intérieur.

Paramètres et hypothèses :

Pour le transfert air du sol - air intérieur des bâtiments, il a été considéré (justifications en annexe 4-6) :

- Une dalle béton de 15 cm d'épaisseur ;
- Une couche de forme sableuse de 20 cm d'épaisseur ;
- La présence de polluants sous la couche de forme, dans un terrain sablo-limoneux ;
- Des superficies de :
  - 10 m² pour un bureau ;
  - 50 m² pour un local d'activité ;
  - 12 m² pour une pièce de vie d'un logement ;
  - 20 m² à minima pour une salle de cours ;
  - 1 900 m² par niveau pour le parking du bâtiment 1 (Les Peignes 2 et 3 et le parking) sur 3 niveaux ;
- Une hauteur sous plafond de 2,7 m (suivant demande de la SAMOA pour les logements) ;
- Des taux de renouvellement d'air de :
  - 1 volume/heure pour un bureau, un local d'activité et le parking du bâtiment 1 ;
  - 0,25 volume/heure pour un logement ;
- Une atténuation des concentrations en polluants entre les niveaux de parking du bâtiment 1 (RDC, R+1 et R+2) et les étages supérieurs (coefficient de 0,68 par niveau).

■ Concentration dans l'air extérieur

Afin de modéliser les concentrations en polluants dans l'air extérieur, les équations du modèle « boîte » sont utilisées. Celles-ci sont précisées en annexe 4-3.

Il a été considéré le transfert d'une source infinie de polluants vers l'air extérieur.

Paramètres et hypothèses :

Pour le transfert air du sol - air extérieur, plusieurs hypothèses ont été considérées (justifications en annexe 4-6) :

- Espaces verts :
  - Un recouvrement par de la terre végétale sur environ 30 cm d'épaisseur ;
  - La présence de polluants sous la terre végétale, dans un terrain sablo-limoneux ;

- Cheminements :
  - Un recouvrement par du sable sur environ 20 cm d'épaisseur ou un revêtement par une dalle béton de 15 cm d'épaisseur avec une couche de forme sableuse de 30 cm d'épaisseur ;
  - La présence de polluants sous le sable, dans un terrain sablo-limoneux.

La vitesse du vent au droit du site est assimilée à celle mesurée à la station météorologique de Nantes-Atlantique (44), située à environ 7 km.

Les paramètres utiles de transfert sont présentés en annexe 4-6.

En l'absence de dispositions constructives précises à ce stade, il s'agit d'hypothèses jugées raisonnables et cohérentes avec la bibliographie et notre retour d'expérience concernant les opérations immobilières récentes, et validées par LEGENDRE IMMOBILIER.

Les concentrations en polluants modélisées dans les milieux d'exposition sont présentées en annexe 4-7.

6.6. Caractérisation des risques sanitaires

6.6.1. Méthodologie

- **Estimation du risque pour les effets à seuil : Quotient de Danger**

Le niveau de risque ou QD est le rapport entre la DJE et la VTR.

La formule de calcul du QD est présentée en annexe 4-3.

D'après les textes ministériels de février 2007 et d'avril 2017, lorsque le QD est inférieur à 1, la survenue d'un effet toxique apparaît peu probable selon les données utilisées pour le calcul des VTR. Le risque est considéré comme acceptable. Au-delà d'un QD de 1, l'apparition d'un effet toxique ne peut être exclue.

Cette formule s'applique pour chaque substance et ne renseigne pas sur l'effet résultant de l'exposition à un mélange de substances.

Dans un premier niveau d'approche, la pratique consiste à additionner les QD liés aux différentes substances et aux différentes voies d'exposition pour une même durée d'exposition. En seconde approche, en cas de dépassement de la valeur de référence de la méthodologie nationale de 1 de la somme des QD, l'additivité des risques est effectuée voie d'exposition par voie d'exposition pour les substances présentant les mêmes organes cibles (principaux et secondaires).

- **Estimation du risque pour les effets sans seuil : Excès de Risque Individuel**

Pour les effets sans seuil, un ERI est calculé en multipliant la DJE par l'ERU. L'ERI correspond à la probabilité qu'un individu développe l'effet associé à la substance durant sa vie.
La formule de calcul de l'ERI est présentée en annexe 4-3.

Afin de considérer l'ensemble des substances avec effet sans seuil présentes au droit du site, par prudence, l'ensemble des ERI est additionné, toutes substances et toutes voies d'exposition confondues.

Les textes ministériels de février 2007 et d'avril 2017 recommandent que l'ERI toutes voies d'exposition et toutes substances confondues soit inférieur à la valeur de référence de la méthodologie nationale de 10^{-5}. Dans ce cas, le risque est considéré comme acceptable.

6.6.2. Résultats de l'EQRS

Les résultats des calculs de risques sanitaires obtenus à partir des teneurs mesurées dans le milieu source sont présentés en annexe 4-7.

Seuls les résultats majorants sont retenus pour l'exposition par inhalation de substances volatiles :

- En extérieur (cheminement recouvert de sable par rapport au cheminement revêtu et à l'espace vert) ;
- A l'intérieur du parking du bâtiment 1 (en RDC par rapport aux étages) ;
- A l'intérieur des autres bâtiments (logements, bureaux, locaux d'activités, école d'enseignement en RDC par rapports aux étages).

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 9 : Résultats de l'EQRS

Scénarios		Résidents				Travailleurs	Etudiants	Valeurs de référence
		Adultes	Enfants	Nourrissons	Vie entière			
Bâtiment 1 (Les Peignes 2 et 3 et le parking) + parking + extérieur	Somme des QD	0,026	0,026	0,029	-	0,0086	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$3{,}1.10^{-7}$	$3{,}3.10^{-7}$	$4{,}8.10^{-8}$	$6{,}9.10^{-7}$	$3{,}0.10^{-7}$	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☑	☑	☑	☑	☑	n.c.	
Bâtiment 2 (Porte Nord 1) + parking + extérieur	Somme des QD	0,41	0,38	0,44	n.c.	0,024	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$3{,}7.10^{-6}$	$2{,}5.10^{-6}$	$4{,}1.10^{-7}$	$6{,}6.10^{-6}$	$5{,}3.10^{-7}$	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☑	☑	☑	☑	☑	n.c.	
Bâtiment 3 (Vestiaires 1 et 2) + parking + extérieur	Somme des QD	0,17	0,16	0,18	-	n.c.	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$3{,}2.10^{-6}$	$2{,}2.10^{-6}$	$3{,}6.10^{-7}$	$5{,}8.10^{-6}$	n.c.	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☑	☑	☑	☑	n.c.	n.c.	
Bâtiment 4 (Porte Sud 1 et 2) + parking + extérieur	Somme des QD	0,64	0,60	0,68	-	n.c.	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$4{,}3.10^{-6}$	$2{,}9.10^{-6}$	$4{,}7.10^{-7}$	$7{,}6.10^{-6}$	n.c.	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☑	☑	☑	☑	n.c.	n.c.	
Bâtiment 5 (Fronton, Les Sheds (1A, 1B et 2)) + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : 0,033 Local d'activité : 0,024	n.c.	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : $5{,}7.10^{-7}$ Local d'activité : $4{,}0.10^{-7}$	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☑	n.c.	
Bâtiment 6 (Les Peignes 1) + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	0,074	n.c.	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	$2{,}6.10^{-6}$	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☑	n.c.	
Bâtiment 7 (Les Sheds (3A et 3B) et Halle de la Boire) + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : 0,060 Salle de cours : 0,049	0,068	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : $4{,}4.10^{-6}$ Salle de cours : $3{,}4.10^{-6}$	$5{,}5.10^{-7}$	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☑	☑	

n.c. : non concerné

Les résultats mettent en évidence, toutes substances confondues, des sommes des QD et des ERI inférieures aux valeurs de référence de la méthodologie nationale (respectivement 1 et 1.10^{-5}).

A noter toutefois que les sommes des QD et les ERI sont proches des valeurs de référence pour le scénario « résidents » au droit des bâtiments 2, 3 et 4 ainsi que les sommes des ERI pour le scénario « travailleurs » au droit des bâtiments 6 et 7. Le mercure (effets à seuil - QD) et le trichloroéthylène (effets sans seuil - ERI) sont les principaux traceurs des risques.

Remarque : Les concentrations modélisées dans l'air intérieur des bâtiments 2, 4 et 5 pour le trichloroéthylène sont de l'ordre de grandeur de la VGAI définie par l'ANSES pour les logements (10 µg/m^3), ce qui est cohérent avec les ERI proches de la valeur de référence.

En conclusion, les risques liés aux impacts identifiés sont acceptables (inférieurs aux valeurs de référence de la méthodologie nationale) pour les futurs usagers du site dans le cadre du projet, pour les scénarios envisagés et avec les hypothèses et les dispositions énoncées (voir en annexe 4-6), sous réserve d'une confirmation des concentrations en trichloroéthylène par une double campagne de prélèvements de gaz du sol sur l'ensemble des piézairs en post-travaux dont une en période estivale (favorable au dégazage du sous-sol).

Il est également précisé que cette conclusion est valable dans l'état actuel des composés présents. La dégradation du trichloroéthylène va se poursuivre, les teneurs en tétrachloroéthylène, trichloroéthylène, dichloroéthylène et chlorure de vinyle vont évoluer dans les différents milieux et la proportion en chlorure de vinyle pourra augmenter.

6.6.3. Etude des incertitudes

Les calculs de risques ont été repris en considérant :

- Les teneurs maximales mesurées dans les gaz du sol, toutes campagnes et tous piézairs confondus ;
- La dégradation du trichloroéthylène en chlorure de vinyle ;
- Pour le scénario « étudiants », huit années d'exposition (niveau doctorat).

■ **Teneurs maximales mesurées dans les gaz du sol**

Les teneurs maximales mesurées dans les gaz du sol, toutes campagnes et tous piézairs confondus, sont présentées dans le tableau suivant. Lorsqu'une limite de quantification est plus élevée que la concentration maximale pour une substance donnée, celle-ci est prise en compte.

Tableau 10 : Concentrations maximales des substances retenues dans le milieu source (mg/m³) - Etude des incertitudes

Substances	Teneurs	Echantillons retenus
Composés Aromatiques Volatils (CAV)		
Benzène	0,017	LQ
Toluène	0,017	LQ
Ethylbenzène	0,017	LQ
Xylènes	0,051	LQ
1,3,5-Triméthylbenzène (Mésitylène)	0,009	Pa13, juil-21
1,2,4-Triméthylbenzène (Pseudocumène)	0,027	Pa13, juil-21
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)		
Naphtalène	0,004	LQ
Composés Organo-Halogénés Volatils (COHV)		
cis-1,2-Dichloroéthylène	2,059	Pa6, oct-20
Trichloroéthylène	82,840	Pa7, oct-20
Tétrachloroéthylène	0,230	Pa7, fév-25
Trichlorométhane (Chloroforme)	0,099	Pa7, oct-20
Tétrachlorométhane (Tétrachlorure de carbone)	0,017	Pa7, oct-20
1,1,1-Trichloroéthane	8,070	Pa5, oct-20
trans 1,2-Dichloroéthylène	0,027	Pa6, oct-20
1,2-Dichloroéthane	0,017	Pa5, oct-20
1,1-Dichloroéthylène	0,183	Pa5, oct-20
Métaux		
Mercure	0,008	LQ

Elles sont prises en compte pour les aménagements suivants, dont les dispositions constructives sont similaires à celles des calculs de risques initiaux :

- Un bureau en rez-de-chaussée ;
- Un local d'activité en rez-de-chaussée ;
- Un logement en rez-de-chaussée ;
- Une salle de cours en rez-de-chaussée ;
- Un parking en rez-de-chaussée ;
- Un cheminement recouvert de sable.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 11 : Résultats de l'EQRS - Etude des incertitudes - Teneurs maximales

Scénarios		Résidents				Travailleurs	Etudiants	Valeurs de référence
		Adultes	Enfants	Nourrissons	Vie entière			
Bureau + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	0,13	n.c.	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	$2{,}6.10^{-5}$	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☒	n.c.	
Local d'activité + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	0,090	n.c.	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	$1{,}6.10^{-5}$	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☒	n.c.	
Logement + parking + extérieur	Somme des QD	1,30	1,22	1,39	-	n.c.	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$1{,}5.10^{-4}$	$9{,}5.10^{-5}$	$1{,}6.10^{-5}$	$2{,}6.10^{-4}$	n.c.	n.c.	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☒	☒	☒	☒	n.c.	n.c.	
Salle de cours + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	0,11	0,15	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	$2{,}0.10^{-5}$	$3{,}2.10^{-6}$	***$1{,}0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☒	☑	

n.c. : non concerné

Dans ce contexte, les risques sont inacceptables, excepté pour le scénario « étudiants ».
Les dépassements des valeurs de référence de la méthodologie nationale sont liés :

- Pour les ERI :au trichloroéthylène principalement et pour le scénario « résidents », au trichlorométhane ;

- Pour les QD du scénario « résidents » : au mercure principalement et au cis-1,2-dichloroéthylène, au trichloroéthylène et au 1,1-dichloroéthylène.

Les CMA qui permettraient d'obtenir des risques acceptables sont présentées dans le tableau suivant.

Pour le scénario « travailleurs », quels que soient les aménagements, elles ne concernent que le trichloroéthylène. Les autres teneurs sont conservées.

Pour le scénario « résidents », elles ont été déterminées pour les substances à l'origine des risques, excepté le mercure qui n'a pas été identifié comme pollution concentrée, soit pour le trichloroéthylène, le trichlorométhane, le cis-1,2-dichloroéthylène, et le 1,1-dichloroéthylène.

Un pourcentage d'abattement similaire a été considéré pour ces quatre substances. Les autres teneurs sont conservées. A noter que la proportion des substances peut différer selon les piézairs. **Il s'agit ainsi d'ordres de grandeur à respecter dans le cadre des travaux de réhabilitation, par usage**. Des calculs de risques devront toutefois être réalisés à l'issue des travaux par le biais d'une ARR.

Tableau 12 : CMA par aménagement (mg/m^3) - Etude des incertitudes

Aménagements	Substances	Scénarios		Pourcentages d'abattement
		Résidents	Travailleurs	
Bureau + parking + extérieur	Trichloroéthylène	n.c.	29	65
Local d'activité + parking + extérieur	Trichloroéthylène	n.c.	50	40
Logement + parking + extérieur	Trichloréthylène	2,9	n.c.	96,5
	Trichlorométhane	0,003	n.c.	
	cis-1,2-Dichloroéthylène	0,072	n.c.	
	1,1-Dichloroéthylène	0,006	n.c.	
Salle de cours + parking + extérieur	Trichloroéthylène	n.c.	37	55

n.c. : non concerné

- **Dégradation du trichloroéthylène en chlorure de vinyle**

La dégradation totale du trichloroéthylène en chlorure de vinyle a été considérée, ainsi que des autres substances de la chaine de dégradation (tétrachloroéthylène, cis- et trans-1,2-dichloroéthylène, 1,1-dichloroéthylène).

Les concentrations en chlorure de vinyle prises en compte sont les suivantes :

- Bâtiment 1 (Les Peignes 2 et 3 et le parking) : 4,345 mg/m^3 ;
- Bâtiment 2 (Porte Nord 1) : 1,476 mg/m^3 ;
- Bâtiment 3 (Vestiaires 1 et 2) : 1,196 mg/m^3 ;
- Bâtiment 4 (Porte Sud 1 et 2) : 1,831 mg/m^3 ;
- Bâtiment 5 (Fronton, Les Sheds (1A, 1B et 2)) : 0,764 mg/m^3 ;
- Bâtiment 6 (Les Peignes 1) : 7,304 mg/m^3 ;
- Bâtiment 7 (Les Sheds (3A et 3B) et Halle de la Boire) : 12,165 mg/m^3 ;
- Espaces extérieurs : 85,178 mg/m^3.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 13 : Résultats de l'EQRS - Etude des incertitudes - Dégradation du trichloroéthylène en chlorure de vinyle

Scénarios		Résidents				Travailleurs	Etudiants	Valeurs de référence
		Adultes	Enfants	Nourrissons	Vie entière			
Bâtiment 1 + parking + extérieur	Somme des QD	0,043	0,055	0,058	-	0,017	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$1,3.10^{-6}$	$1,5.10^{-6}$	$2,1.10^{-7}$	$2,9.10^{-6}$	$1,3.10^{-6}$	n.c.	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☑	☑	☑	☑	☑	n.c.	
Bâtiment 2 + parking + extérieur	Somme des QD	0,55	0,53	0,60	n.c.	0,036	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$1,2.10^{-5}$	$8,7.10^{-6}$	$1,4.10^{-6}$	$2,2.10^{-5}$	$2,0.10^{-6}$	n.c.	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☒	☑	☑	☒	☑	n.c.	
Bâtiment 3 + parking + extérieur	Somme des QD	0,28	0,27	0,31	-	n.c.	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$1,0.10^{-5}$	$7,3.10^{-6}$	$1,2.10^{-6}$	$1,9.10^{-5}$	n.c.	n.c.	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☒	☑	☑	☒	n.c.	n.c.	
Bâtiment 4 + parking + extérieur	Somme des QD	0,81	0,78	0,88	-	n.c.	n.c.	***1***
	Somme des ERI	$1,5.10^{-5}$	$1,0.10^{-5}$	$1,7.10^{-6}$	$2,7.10^{-5}$	n.c.	n.c.	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	☒	☒	☑	☒	n.c.	n.c.	
Bâtiment 5 + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : 0,043 Local d'activité : 0,032	n.c.	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : $2,0.10^{-6}$ Local d'activité : $1,5.10^{-6}$	n.c.	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☑	n.c.	
Bâtiment 6 + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	0,14	n.c.	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	$1,1.10^{-5}$	n.c.	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☒	n.c.	
Bâtiment 7 + parking + extérieur	Somme des QD	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : 0,15 Salle de cours : 0,12	0,16	***1***
	Somme des ERI	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Bureau : $1,7.10^{-5}$ Salle de cours : $1,3.10^{-5}$	$2,1.10^{-6}$	***$1,0.10^{-5}$***
	Risque acceptable ?	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	☒	☑	

n.c. : non concerné

Dans ce contexte, les risques sont inacceptables pour le scénario « résidents » au droit des bâtiments 2, 3 et 4 et pour le scénario « travailleurs » au droit des bâtiments 6 et 7.

Cette hypothèse de dégradation totale du trichloroéthylène en chlorure de vinyle peut toutefois être excessivement majorante et les dépassements de la valeur de référence de la méthodologie nationale pour les ERI sont limités.

- **Augmentation de l'exposition des étudiants**

Une exposition de huit années d'exposition a été considérée pour le scénario « étudiants » (niveau doctorat).

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14 : Résultats de l'EQRS - Etude des incertitudes - Augmentation de l'exposition des étudiants

Scénarios		Etudiants	Valeurs de référence
Bâtiment 7 + parking + extérieur	Somme des QD	0,068	***1***
	Somme des ERI	$8{,}8.10^{-7}$	***1,0.10^{-5}***
	Risque acceptable ?	☑	

n.c. : non concerné

Dans ce contexte, les risques restent acceptables.

6.6.4. Proposition de mesures correctives ou compensatoires

Les risques étant acceptables, ce chapitre est sans objet.

Toutefois, pour rappel, la compatibilité sanitaire de la qualité des milieux avec le projet envisagé ne signifie pas que les pollutions concentrées peuvent rester en place. Elles doivent être traitées dans le cadre de la cessation d'activité ICPE.

De plus, les conclusions de l'EQRS doivent être confirmées par une campagne de prélèvements de gaz du sol sur l'ensemble des piézairs en période estivale (favorable au dégazage du sous-sol).

Selon les résultats de cette campagne, en cas de teneurs plus importantes, il pourrait être nécessaire d'effectuer une purge complémentaire des sols dans le secteur du piézair Pa27 ou de prévoir un vide sanitaire sous cette partie du bâtiment 3 (somme des ERI proche de la valeur de référence de la méthodologie nationale liée au trichloroéthylène quantifié sur cet ouvrage). Pour les bâtiments 2, 4, 6 et 7, où des sommes des ERI proches de la valeur de référence ont également été calculées, les secteurs des piézairs concernés feront l'objet de travaux de réhabilitation pour le traitement des pollutions concentrées.

6.7. Limites et incertitudes de l'EQRS

Comme il a été précisé tout au long de l'étude, l'analyse des risques sanitaires repose sur des hypothèses et incertitudes prises de manière raisonnablement conservatoire.

En effet, la démarche d'évaluation des risques ne prétend pas être une quantification exhaustive de l'ensemble des risques engendrés par les substances présentes sur le site mais plutôt une estimation de ces risques dans l'état actuel des connaissances.

Dans le cadre de cette étude, les hypothèses et incertitudes les plus conséquentes sont listées en annexe 4-8.

Il est rappelé que l'analyse de risques est basée sur les concentrations maximales mises en évidence dans le milieu considéré (gaz du sol) et pour les scénarios envisagés avec des dispositions constructives précises. En cas de dépassement des concentrations retenues, en cas de changement d'usage ou de dispositions constructives, il conviendra de reprendre les calculs de l'analyse de risques.

De plus, cette étude a été réalisée en s'appuyant sur les connaissances que SEREA a pu collecter, selon la législation environnementale en vigueur et la méthodologie nationale applicable en matière de sites et sols pollués, à la date de rédaction du présent document.

Les références bibliographiques sont citées en annexe 4-9.

7 - Identification des options de gestion et bilan coûts/avantages (A330)

7.1. Méthodologie

Le plan de gestion permet d'agir aussi bien sur l'état du site et des milieux, par des actions sur les sources de pollution ou des aménagements appropriés visant à réduire les possibilités de mise en contact avec les pollutions, que sur les usages.

La mise au point d'un plan de gestion est basée sur un processus progressif et itératif entre :

- La connaissance des milieux et de leur état, des populations concernées et des ressources naturelles à protéger ;
- Les pollutions concentrées, diffuses et le bruit de fond du site ;
- Les conclusions du schéma conceptuel ;
- Les résultats de l'EQRS réalisée en fonction de l'usage futur du site ;
- Les contraintes réglementaires ;
- Les mesures de maîtrise des sources de pollution et des impacts ;
- Le devenir et la gestion des terres excavées ;
- Les différentes mesures de gestion : les actions de réhabilitation, les mesures de confinement, la régénération ou l'atténuation naturelle, les mesures constructives actives ou passives ;
- Les outils de conservation de la mémoire et de restriction d'usage ;
- Le contrôle et le suivi de l'efficacité des mesures de gestion.

Ce processus permet d'identifier les différentes options de gestion pertinentes sur le site.

7.2. Objectifs de réhabilitation

En application des textes ministériels de février 2007 et d'avril 2017, l'objectif est d'atteindre le meilleur niveau de protection de l'environnement humain et naturel, à un coût raisonnable, tout en évitant de mobiliser des ressources inutilement démesurées au regard des intérêts à protéger.

Nous rappelons qu'il convient en priorité d'étudier la possibilité d'éliminer ou, à défaut, d'atténuer les pollutions concentrées, puis de désactiver les voies de transfert. De plus, les mesures de gestion doivent permettre l'usage envisagé dans le cadre du projet sur le plan sanitaire, conforme à celui prescrit au PLUm de Nantes Métropole au droit du site.

Les objectifs de réhabilitation du plan de gestion sont l'élimination ou, à minima, l'atténuation des pollutions concentrées. Selon les techniques de traitement retenues, les seuils de réhabilitation pourraient correspondre aux seuils de pollutions concentrée ou à des objectifs d'abattement des pollutions concentrées, dans les limites techniques possibles.

La gestion des déblais non inertes liés à l'aménagement futur du site n'est pas abordée dans cette partie. En effet, l'ensemble des déblais générés par ce projet, n'étant pas en lien avec les zones de pollution concentrée, sera utilisé pour le remblaiement des fouilles réalisées dans le cadre de la gestion de ces pollutions. A titre indicatif, les déblais, hors zones de pollution concentrée, représentent environ 7 360 m^3.

7.3. Synthèse des impacts à gérer

7.3.1. Caractéristiques des zones à réhabiliter dans les sols et les gaz du sol

Au regard des contraintes liées à la conservation du fronton et une partie des sheds du site, le maintien en place d'une partie de la pollution concentrée a été considéré.

Les pollutions concentrées PC3 et en partie PC4, localisées au droit des bâtiments conservés seront laissées en place du fait de :

- Leur inaccessibilité (bâtiment ou dalle béton conservés, fondations, structures métalliques…) ;
- L'absence de risque sanitaire inacceptable pour les futurs usagers du site en considérant le maintien d'un revêtement de surface (solution de gestion par confinement) supprimant les voies de transfert par contact direct et envol de poussières.

L'emprise des bâtiments conservés est présentée sur la figure ci-dessous.

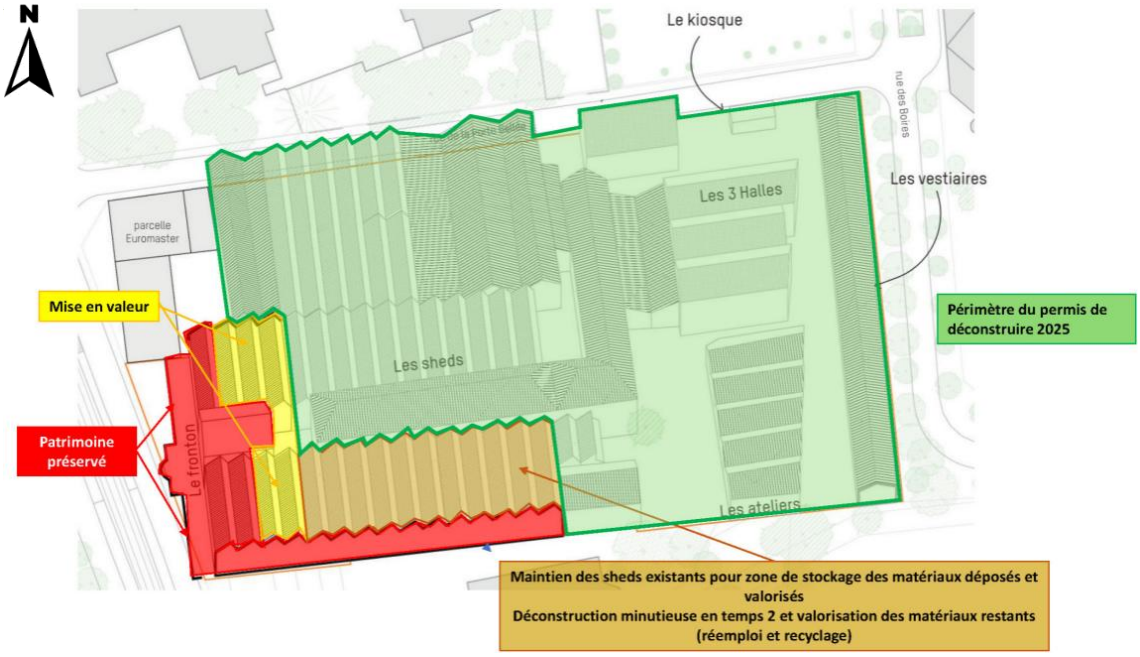


Figure 23 : Localisation des bâtiments conservés (source : LEGENDRE IMMOBILIER, sans échelle)

Le tableau suivant présente les caractéristiques des zones à réhabiliter identifiées. Elles sont localisées sur les figures 11 à 16.

Tableau 15 : Caractéristiques des zones à réhabiliter

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m^2)	Volume* estimé (m^3)	Quantité** estimée de sols (t)
PC1	S1, S8, S121, Pa9	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [810 mg/kg MS] HAP [99 - 460 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [5 400 - 22 800 mg/kg MS] Sulfates [2 800 - 14 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	235	235	412
PC2	S4, Pa10bis	*Paramètres sur brut :* Plomb [7 600 mg/kg MS] Cuivre [7 500 mg/kg MS] Zinc [15 000 mg/kg MS] COHV [2,249 mg/m^3]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	15	15	27
PC3	S104, Pa13	*Paramètres sur brut :* COHV [14 mg/kg MS] COHV [3,733 - 6,908 mg/m^3]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	30	30	53
PC4 (laissé en place)	S13	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [14 000 mg/kg MS] Arsenic [1 300 mg/kg MS]	0 - 0,5	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	0,5	205	-	-
PC5 (moitié laissé en place)	S14	*Paramètres sur brut :* Etain [23 000 mg/kg MS] Cuivre [180 000 mg/kg MS] Zinc [3 900 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	375	190	333

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m²)	Volume* estimé (m³)	Quantité** estimée de sols (t)
PC6	S127, Pa15	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [1 000 mg/kg MS] HAP [340 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [19 700 mg/kg MS] Fluorures [27 mg/kg MS] Sulfates [12 000 mg/kg MS]	1 - 2	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	215	215	377
PC7	S5-BGP	*Paramètres sur brut :* Plomb [3 400 mg/kg MS] Zinc [25 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	5	5	9
PC8	S48	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [830 mg/kg MS] Plomb [3 800 mg/kg MS] Zinc [43 000 mg/kg MS]	1 - 2	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	30	30	53

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m²)	Volume* estimé (m³)	Quantité** estimée de sols (t)
PC9	S8-BGP, S30-BGP, S37 à S40, S50, S59, S60, S70, S157, Pa5, Pa6, Pa7	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [590 - 14 000 mg/kg MS] HAP [260 mg/kg MS] COHV [1 - 60 mg/kg MS] COHV [5,829 - 66,141 mg/m³] Cuivre [3 900 mg/kg MS] Plomb [3 600 - 4 700 mg/kg MS] Zinc [2 700 - 74 000 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [6 780 – 16 400 mg/kg MS] Chlorures [970 - 3 200 mg/kg MS] Fluorures [21 mg/kg MS] Sulfates [1 200 - 7 100 mg/kg MS] Antimoine [0,08 - 0,14 mg/kg MS] Cadmium [0,18 - 0,25 mg/kg MS] Nickel [0,53 mg/kg MS] Plomb [4,1 mg/kg MS] Zinc [290 - 440 mg/kg MS]	0 - 4	Remblais sablo-graveleux à limono-sableux	Zone non saturée	4	690	2 760	4 830
PC10	S38	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [14 000 mg/kg MS] COHV [10 mg/kg MS] Zinc [11 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	20	20	35
PC11	S27	*Paramètres sur brut :* Etain [7 300 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	65	65	114

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m²)	Volume* estimé (m³)	Quantité** estimée de sols (t)
PC12	S29, S42, Pa1bis	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [510 mg/kg MS] Etain [99 - 460 mg/kg MS] Plomb [22 000 mg/kg MS] Zinc [12 000 - 23 000 mg/kg MS] COHV [1,436 mg/m³]	0 - 2	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	2	135	270	473
PC13	S42, S106bis	*Paramètres sur brut :* Zinc [23 000 - 28 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	15	15	27
PC14	S13-BGP, S30-BGP, S51, S52	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [630 - 1 400 mg/kg MS] Plomb [3 600 - 6 000 mg/kg MS] Zinc [7 600 - 74 000 mg/kg MS]	0 - 2	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	2	95	190	333
PC15	S71, S72	*Paramètres sur brut :* Chlorures [18 000 – 51 000 mg/kg MS] Zinc [5 700 - 46 000 mg/kg MS]	0 - 4	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	4	140	560	980
PC16	S18-BGP, S63, S64, Pa3	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [900 mg/kg MS] HAP [170 mg/kg MS] Plomb [3 200 - 4 600 mg/kg MS] Zinc [24 000 - 150 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	175	175	307
PC17	S72, S78, Pa28	*Paramètres sur brut :* Zinc [46 000 - 49 000 mg/kg MS] Chlorures [51 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	195	195	342
PC18	S82	*Paramètres sur brut :* Etain [3 700 mg/kg MS]	1 - 3	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	2	15	30	53
PC19	S132	*Paramètres sur brut :* HAP [360 mg/kg MS]	1 - 2	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	170	170	298

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m²)	Volume* estimé (m³)	Quantité** estimée de sols (t)
PC20	S135	*Paramètres sur brut :* Plomb [15 000 mg/kg MS] Zinc [4 600 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [22 400 mg/kg MS] Sulfates [14 000 mg/kg MS]	1 - 2	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	175	175	307
PC21	S27-BGP	*Paramètres sur brut :* Plomb [6 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	15	15	27
PC22	S89, Pa35	*Paramètres sur brut :* Etain [4 800 mg/kg MS] Plomb [<10 000 mg/kg MS] Zinc [250 000 mg/kg MS]	0 - 1	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	465	465	814
PC23	S100, S113, Pa4	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [780 mg/kg MS] HAP [66 mg/kg MS] Plomb [3 200 mg/kg MS] Zinc [28 000 - 45 000 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Zinc [130 mg/kg MS]	0 - 2	Remblais sablo-graveleux à sablo-graveleux légèrement limoneux	Zone non saturée	2	180	360	630

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m²)	Volume* estimé (m³)	Quantité** estimée de sols (t)
PC24	S138, Pa12	*Paramètres sur brut:* HC C_5-C_{10} [220 mg/kg MS] HC C_{10}-C_{40} [510 000 mg/kg MS] HAP [420 mg/kg MS] BTEX [21 mg/kg MS] COHV [0,187 - 1,147 mg/m³] *Paramètres sur éluât :* COT [1 800 mg/kg MS] Fraction soluble [11 900 mg/kg MS] Sulfates [3 900 mg/kg MS] Indice phénol [35 mg/kg MS] Antimoine [0,26 mg/kg MS] Arsenic [1,7 mg/kg MS]	2 - 4	Argile sableuse	Zone non saturée	2	165	330	578
PC25	S29, S30, S42, S43, Pa1bis	*Paramètres sur brut:* Etain [8 600 - 15 000 mg/kg MS] Plomb [2 700 - 22 000 mg/kg MS] Zinc [3 200 - 25 000 mg/kg MS] COHV [1,436 mg/m³]	2 - 6	Remblais sablo-graveleux à sables argileux	Zone non saturée jusqu'à 5 m Zone saturée entre 5 et 6 m	4	210	840	1 470
PC26	S45	*Paramètres sur brut:* HC C_{10}-C_{40} [820 mg/kg MS] BTEX [7 mg/kg MS] COHV [2 800 - 14 000 mg/kg MS]	2 - 3	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	15	15	27
PC27 (laissé en place)	S128	*Paramètres sur brut:* HAP [190 mg/kg MS]	2 - 3	Remblais sablo-graveleux	Zone non saturée	1	15	-	-

Zone	Sondages/Piézairs concernés	Polluants [gammes de concentrations]	Profondeur (m)	Lithologie	Saturation du milieu	Epaisseur estimée (m)	Surface estimée (m²)	Volume* estimé (m³)	Quantité** estimée de sols (t)
PC28	S87, S134, Pa8, Pa34	*Paramètres sur brut:* HC C_{10}-C_{40} [610 - 7 700 mg/kg MS] Etain [3 700 - 11 000 mg/kg MS] Plomb [3 000 mg/kg MS] Zinc [3 200 mg/kg MS] COHV [0,611 - 2,588 mg/m³] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [4 860 - 12 200 mg/kg MS] Sulfates [2 300 - 7 100 mg/kg MS]	2 - 5	Remblais sablo-graveleux à sablo-limoneux/argileux	Zone non saturée Zone de battement à 5 m	3	170	510	893
PC29	Pz1, S30 à S34 et S42, Pa1bis, Pa2, Pa30, Pa31	*Paramètres sur brut:* HC C_5-C_{10} [95 - 110 mg/kg MS] HC C_{10}-C_{40} [760 - 12 000 mg/kg MS] Etain [99 - 460 mg/kg MS] Plomb [2 700 - 14 000 mg/kg MS] Zinc [3 200 - 25 000 mg/kg MS] COHV [0,04 - 4,557 mg/m³]	3 - 6	Remblais sablo-graveleux à sables argileux	Zone non saturée jusqu'à 5 m Zone saturée entre 5 et 6 m	3	790	2 370	4 148
						TOTAL	**4 820**	**10 265**	**17 977**

** Volume estimé non foisonné*

*** Un facteur de 1,75 a été considéré pour la densité des sols*

De 0 à 5 m de profondeur, le milieu sol est en zone non saturée en eau.

7.3.2. Caractéristiques des polluants

Afin d'adapter au mieux les traitements à envisager pour les zones à réhabiliter dans les sols et les gaz du sol, les caractéristiques des polluants sont détaillées ci-dessous.

- **Les hydrocarbures C_{10}-C_{40}**

Les hydrocarbures sont des composés organiques exclusivement composés d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il peut s'agir de chaînes aromatiques (présence d'un cycle benzénique) ou aliphatiques.

Les hydrocarbures ayant un petit nombre d'atomes de carbone sont plus mobiles dans les sols et plus volatils. Ainsi, seules les fractions C_5-C_{16} sont considérées comme volatiles. Pour celles-ci, la ventilation peut constituer un moyen de traitement efficace.

Il s'agit de composés assez stables dans les sols. Leur dégradation dans l'environnement est lente. Les chaînes suffisamment légères (jusqu'à C_{21}) peuvent toutefois être dégradées dans les sols par voie biologique, dans certaines conditions d'oxygénation et de température.

Dans le cas présent, les fractions majoritaires sont les C_{12}-C_{35} et plus localement sur le PC4 des fractions plus lourdes (uniquement C_{21}-C_{35}).

Les hydrocarbures sont peu solubles dans l'eau. Leur densité varie selon la longueur des chaînes carbonées. La plupart des hydrocarbures s'accumulera en surface de la nappe (densité inférieure à 1, flottant).

- **Les HAP**

Les HAP sont un groupe de composés comportant au moins deux cycles benzéniques fusionnés entre eux et renfermant seulement des atomes d'hydrogène et de carbone.

Ils sont considérés comme semi-volatils. Le naphtalène correspond au composé le plus volatil de la famille des HAP.

Il s'agit de composés assez stables dans les sols et peu mobiles. Leur dégradation dans l'environnement est lente. Les composés suffisamment légers (jusqu'à 4 cycles benzéniques) peuvent toutefois être dégradés dans les sols par voie biologique, dans certaines conditions d'oxygénation et de température.

Dans le cas présent, la proportion de HAP légers (jusqu'à 4 cycles benzéniques) est moyenne (environ 50 %).

Les HAP sont peu solubles dans l'eau et ont une densité généralement supérieure à 1.

- **Les COHV**

Les COHV sont des composés organiques et volatils de la famille des solvants chlorés. Leur volatilité fait que la ventilation peut être un moyen de traitement efficace.

En fonction du nombre d'atomes de chlores, ils seront biodégradables en condition anaérobie (plus de trois atomes) ou en condition aérobie (moins de trois atomes). Leur dégradation créera des produits de dégradation dans l'ordre suivant : tétrachloroéthylène, trichloroéthylène, dichloroéthylène et chlorure de vinyle.

Du fait de leur solubilité, de leur faible viscosité (inférieure à celle de l'eau) et de leur forte densité (supérieure à celle de l'eau), ils migreront rapidement à travers la zone saturée pour s'accumuler au fond de la nappe.

- **Les métaux (étain, plomb, zinc)**

Les métaux, dont l'étain, le plomb et le zinc, sont des composés inorganiques dont la dégradation dans l'environnement est lente. Ils sont présents de façon naturelle dans les sols et proviennent généralement de l'altération du socle rocheux. Dans notre cas, au regard des fortes anomalies détectées dans le sous-sol et de l'ancienne utilisation de certains bains de métaux ainsi que de leur association à des remblais avec déchets de démolition, l'origine de ces métaux est anthropique.

Du fait de leur faible mobilité, ils ont tendance à s'accumuler dans les horizons de surfaces et en particulier dans ceux riches en matières organiques.

Ils sont également peu solubles voir insoluble dans l'eau et non volatils (excepté le mercure).

7.4. Détermination des scénarios de gestion

7.4.1. Généralités

Plusieurs types de traitement existent pour les sols :

- In situ : traitement des sols en place, sans excavation ;
- Sur site : excavation des sols et mise en place d'un système de traitement sur site ;
- Hors site : excavation des sols et évacuation en centre de traitement.

Les principales techniques existantes reposent sur les principes suivants :

- Enfouissement ;
- Ventilation ;
- Biologique ;
- Chimique ;
- Tri granulométrique ;
- Thermique ;
- Phytotechnologie.

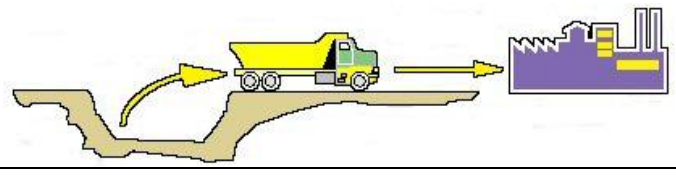
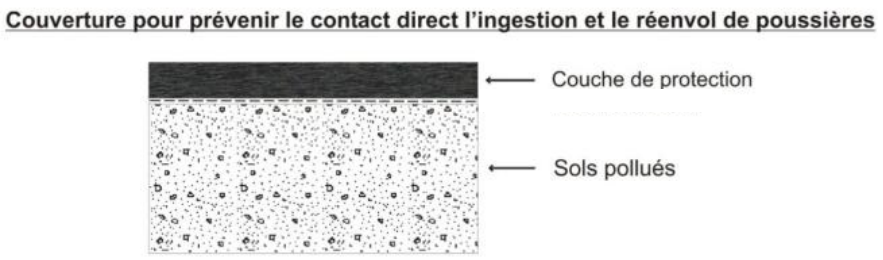
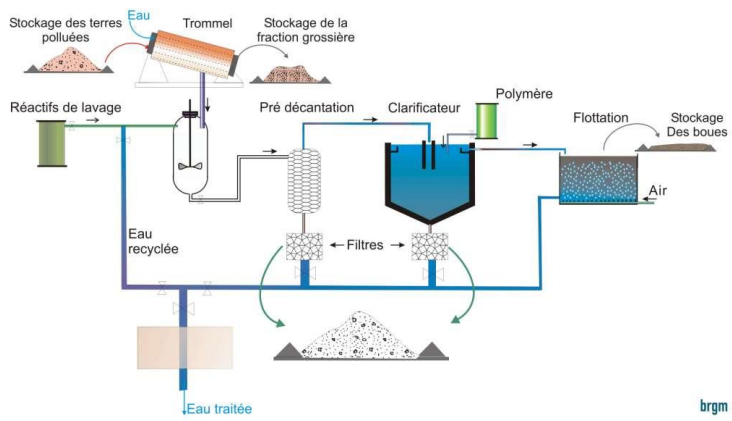
Le confinement peut également constituer une solution de gestion selon le contexte.

7.4.2. Techniques de réhabilitation et solutions de gestion sélectionnées

Après étude approfondie, les techniques de réhabilitation et solutions de gestion les plus adaptées au contexte du site ont été sélectionnées.

Elles sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 16 : Synthèse des techniques de réhabilitation et solutions de gestion sélectionnées

Type	Technique	Description	
SOLS			
Hors site	Elimination en centre agréé	Excavation des sols pollués Evacuation en centre de traitement agréé, sous réserve de l'obtention d'un CAP[10]	
Confinement	Recouvrement	Maintien de la pollution en place Recouvrement pérenne à garantir Suivi semestriel de la qualité des eaux souterraines	
Sur site	Lavage	Excavation des sols pollués Concentration de la pollution dans les fractions fines du sol (< 63 µm), les fractions plus grossières étant réputées inertes (à vérifier par le bais d'analyses) Evacuation des fractions fines en centre de traitement agréé, sous réserve de l'obtention d'un CAP Possibilité d'ajouter un réactif dans l'eau	

[10] CAP : Certificat d'Acceptation Préalable

Pour l'élimination des sols hors site en centre agréé, les filières pressenties (sous réserve d'acceptation) et les quantités associées sont présentées dans le tableau suivant. La réflexion a porté sur la gestion des déblais via les filières classiques de traitement et/ou de stockage hors site et également en considérant l'Ecocentre de l'Ile de Nantes.

Tableau 17 : Filières d'élimination hors site pressenties

Zone	Polluants [gammes de concentrations]	Quantité estimée de sols (t)	Filière classique pressentie	Filière Ecocentre pressentie
PC1	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [810 mg/kg MS] HAP [99 - 460 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [5 400 - 22 800 mg/kg MS] Sulfates [2 800 - 14 000 mg/kg MS]	412	ISDD	C4
PC2	*Paramètres sur brut :* Plomb [7 600 mg/kg MS] Cuivre [7 500 mg/kg MS] Zinc [15 000 mg/kg MS] COHV [2,249 mg/m³]	27	ISDD	NA
PC3	*Paramètres sur brut :* COHV [14 mg/kg MS] COHV [3,733 - 6,908 mg/m³]	53	Biocentre	C2
PC5 (moitié laissé en place)	*Paramètres sur brut :* Etain [23 000 mg/kg MS] Cuivre [180 000 mg/kg MS] Zinc [3 900 mg/kg MS]	333	ISDD	C4
PC6	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [1 000 mg/kg MS] HAP [340 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [19 700 mg/kg MS] Fluorures [27 mg/kg MS] Sulfates [12 000 mg/kg MS]	377	ISDD	NA
PC7	*Paramètres sur brut :* Plomb [3 400 mg/kg MS] Zinc [25 000 mg/kg MS]	9	ISDD	NA
PC8	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [830 mg/kg MS] Plomb [3 800 mg/kg MS] Zinc [43 000 mg/kg MS]	53	ISDD stabilisation	NA

Zone	Polluants [gammes de concentrations]	Quantité estimée de sols (t)	Filière classique pressentie	Filière Ecocentre pressentie
PC9	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [590 - 14 000 mg/kg MS] HAP [260 mg/kg MS] COHV [1 - 60 mg/kg MS] COHV [5,829 - 66,141 mg/m³] Cuivre [3 900 mg/kg MS] Plomb [3 600 - 4 700 mg/kg MS] Zinc [2 700 - 74 000 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [6 780 – 16 400 mg/kg MS] Chlorures [970 - 3 200 mg/kg MS] Fluorures [21 mg/kg MS] Sulfates [1 200 - 7 100 mg/kg MS] Antimoine [0,08 - 0,14 mg/kg MS] Cadmium [0,18 - 0,25 mg/kg MS] Nickel [0,53 mg/kg MS] Plomb [4,1 mg/kg MS] Zinc [290 - 440 mg/kg MS]	4 830	ISDD	NA
PC10	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [14 000 mg/kg MS] COHV [10 mg/kg MS] Zinc [11 000 mg/kg MS]	35	ISDD	NA
PC11	*Paramètres sur brut :* Etain [7 300 mg/kg MS]	114	ISDD	NA
PC12	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [510 mg/kg MS] Etain [99 - 460 mg/kg MS] Plomb [22 000 mg/kg MS] Zinc [12 000 - 23 000 mg/kg MS] COHV [1,436 mg/m³]	473	ISDD	NA
PC13	*Paramètres sur brut :* Zinc [23 000 - 28 000 mg/kg MS]	27	ISDD	NA
PC14	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [630 - 1 400 mg/kg MS] Plomb [3 600 - 6 000 mg/kg MS] Zinc [7 600 - 74 000 mg/kg MS]	333	ISDD	NA
PC15	*Paramètres sur brut :* Chlorures [18 000 – 51 000 mg/kg MS] Zinc [5 700 - 46 000 mg/kg MS]	980	ISDD	NA
PC16	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [900 mg/kg MS] HAP [170 mg/kg MS] Plomb [3 200 - 4 600 mg/kg MS] Zinc [24 000 - 150 000 mg/kg MS]	307	ISDD	NA

Zone	Polluants [gammes de concentrations]	Quantité estimée de sols (t)	Filière classique pressentie	Filière Ecocentre pressentie
PC17	*Paramètres sur brut :* Zinc [46 000 - 49 000 mg/kg MS] Chlorures [51 000 mg/kg MS]	342	ISDD	NA
PC18	*Paramètres sur brut :* Etain [3 700 mg/kg MS]	53	ISDD	C4
PC19	*Paramètres sur brut :* HAP [360 mg/kg MS]	298	ISDD	NA
PC20	*Paramètres sur brut :* Plomb [15 000 mg/kg MS] Zinc [4 600 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [22 400 mg/kg MS] Sulfates [14 000 mg/kg MS]	307	ISDD	NA
PC21	*Paramètres sur brut :* Plomb [6 000 mg/kg MS]	27	ISDD	NA
PC22	*Paramètres sur brut :* Etain [4 800 mg/kg MS] Plomb [<10 000 mg/kg MS] Zinc [250 000 mg/kg MS]	814	ISDD	NA
PC23	*Paramètres sur brut :* HC C_{10}-C_{40} [780 mg/kg MS] HAP [66 mg/kg MS] Plomb [3 200 mg/kg MS] Zinc [28 000 - 45 000 mg/kg MS] *Paramètres sur éluât :* Zinc [130 mg/kg MS]	630	ISDD stabilisation	NA
PC24	*Paramètres sur brut:* HC C_5-C_{10} [220 mg/kg MS] HC C_{10}-C_{40} [510 000 mg/kg MS] HAP [420 mg/kg MS] BTEX [21 mg/kg MS] COHV [0,187 - 1,147 mg/m³] *Paramètres sur éluât :* COT [1 800 mg/kg MS] Fraction soluble [11 900 mg/kg MS] Sulfates [3 900 mg/kg MS] Indice phénol [35 mg/kg MS] Antimoine [0,26 mg/kg MS] Arsenic [1,7 mg/kg MS]	578	ISDD	NA
PC25	*Paramètres sur brut:* Etain [8 600 - 15 000 mg/kg MS] Plomb [2 700 - 22 000 mg/kg MS] Zinc [3 200 - 25 000 mg/kg MS] COHV [1,436 mg/m³]	1 470	Biocentre	C4

Zone	Polluants [gammes de concentrations]	Quantité estimée de sols (t)	Filière classique pressentie	Filière Ecocentre pressentie
PC26	*Paramètres sur brut:* HC C_{10}-C_{40} [820 mg/kg MS] BTEX [7 mg/kg MS] COHV [2 800 - 14 000 mg/kg MS]	27	ISDD	C4
PC28	*Paramètres sur brut:* HC C_{10}-C_{40} [610 - 7 700 mg/kg MS] Etain [3 700 - 11 000 mg/kg MS] Plomb [3 000 mg/kg MS] Zinc [3 200 mg/kg MS] COHV [0,611 - 2,588 mg/m³] *Paramètres sur éluât :* Fraction soluble [4 860 - 12 200 mg/kg MS] Sulfates [2 300 - 7 100 mg/kg MS]	893	ISDD	NA
PC29	*Paramètres sur brut:* HC C_5-C_{10} [95 - 110 mg/kg MS] HC C_{10}-C_{40} [760 - 12 000 mg/kg MS] Etain [99 - 460 mg/kg MS] Plomb [2 700 - 14 000 mg/kg MS] Zinc [3 200 - 25 000 mg/kg MS] COHV [0,04 - 4,557 mg/m³]	4 148	ISDD	C4

NA : Non Admissible

7.4.3. Scénarios de gestion retenus

Selon les techniques de réhabilitation sélectionnées, les scénarios de gestion étudiés sont :

- Scénario 1 : élimination hors site en centre agréé des pollutions concentrées accessibles et maintien du recouvrement au droit du fronton et des sheds conservés ;

- Scénario 2 : élimination hors site en centre agréé d'une partie des pollutions concentrées accessibles, lavage sur site de l'autre partie et maintien du recouvrement au droit du fronton et des sheds conservés.

Ils sont détaillés ci-dessous.

Scénario 1 : Elimination hors site en centre agréé et recouvrement
Objectifs de réhabilitation
Hydrocarbures C_{10}-C_{40} : 6 000 mg/kg MS HAP : 170 mg/kg MS ∑ TCE + 1,1,1-TCA : 10 mg/kg MS Etain : 3 600 mg/kg MS Plomb : 5 400 mg/kg MS Zinc : 21 000 mg/kg MS
Hypothèses et mesures associées
Volumes de revêtement de surface à gérer : 1 380 m³ de béton et 200 m³ d'enrobé soit environ respectivement 3 040 et 440 tonnes dont : ➢ ISDI ou réemploi : 2 475 tonnes de béton ; ➢ ISDI : 440 tonnes d'enrobé ; ➢ ISDI+ : 25 tonnes ; ➢ ISDND : 255 tonnes ; ➢ ISDD stabilisation : 250 tonnes ; ➢ Incinération : 35 tonnes Volumes à excaver avec sécurisation pyrotechnique sur l'Est du site et à éliminer hors site : 10 250 m³ soit environ 17 950 tonnes dont : ➢ En filière classique, 80 tonnes en biocentre, 12 460 tonnes en ISDD et 5 410 tonnes en ISDD stabilisation ; ➢ En filière Ecocentre, 50 tonnes en C2, 1 110 tonnes en C4 et le reste non admissible en Ecocentre à évacuer en filière classique à savoir 11 380 tonnes en ISDD et 5 410 tonnes en ISDD stabilisation Volumes de déblais à déplacer pour atteindre les zones polluées (talus 2/1 et blindage en limite de site Nord-Est) : 10 590 m³. Ce volume sera réutilisé en remblaiement des fouilles (évacuation pollution concentrée et talus) Volumes de remblais sains d'apport jusqu'à la côte de terrassement du projet d'aménagement : 6 010 m³ (apport supplémentaire au volume de déblais hors pollution concentrée lié à l'aménagement futur du site) Pompage des eaux en fond de fouille et traitement si nécessaire au Nord-Est du site (zone PC29) Gestion des nuisances Réception des milieux
Avantages
➢ Elimination hors site : - Solution rapide - Technique fiable et éprouvée - Atténuation de la pollution ➢ Recouvrement (confinement) : - Solution immédiate - D'un point de vue sanitaire, suppression du risque par inhalation/ingestion de poussières pour les usagers
Inconvénients
➢ Elimination hors site : - Absence de revalorisation et déplacement de la pollution - Transport extérieur - Remaniement des sols pouvant favoriser un relargage de pollution vers les eaux souterraines ➢ Recouvrement (confinement) : - Absence d'atténuation de la pollution - Servitudes d'usage - Recouvrement pérenne à garantir - Suivi semestriel de la qualité des eaux souterraines
Délais
Environ 8 mois estimés
Coûts
Les coûts estimés sont détaillés dans le tableau 18. Le montant global est compris entre 3 429 et 4 193 k€ HT.

Scénario 2 : Elimination hors site en centre agréé, lavage sur site et recouvrement
Seuils de réhabilitation
Hydrocarbures C_{10}-C_{40} : 6 000 mg/kg MS HAP : 170 mg/kg MS ∑ TCE + 1,1,1-TCA : 10 mg/kg MS Etain : 3 600 mg/kg MS Plomb : 5 400 mg/kg MS Zinc : 21 000 mg/kg MS Faisabilité à confirmer par des essais via un PCT
Hypothèses et mesures associées
Volumes de revêtement de surface à gérer : 1 380 m³ de béton et 200 m³ d'enrobé soit environ respectivement 3 040 et 440 tonnes dont : ➢ ISDI ou réemploi : 2 475 tonnes de béton ; ➢ ISDI : 440 tonnes d'enrobé ; ➢ ISDI+ : 25 tonnes ; ➢ ISDND : 255 tonnes ; ➢ ISDD stabilisation : 250 tonnes ; ➢ Incinération : 35 tonnes Volumes à excaver avec sécurisation pyrotechnique sur l'Est du site : 10 250 m³ soit environ 17 950 tonnes Volumes à éliminer hors site (pas d'intérêt de lavage avec un volume faible, une filière envisagée à plus faible coût ou 10 % des pollutions concentrées non traitable) : ➢ En filière classique, 270 tonnes en ISDI, 80 tonnes en biocentre, 5 020 tonnes en ISDD et 1 760 en ISDD stabilisation ; ➢ En filière Ecocentre, 270 tonnes en C0, 50 tonnes en C2, 1 110 tonnes en C4 et le reste non admissible en Ecocentre à évacuer en filière classique à savoir 3 940 tonnes en ISDD et 1 760 tonnes en ISDD stabilisation. Volumes de déblais à déplacer pour atteindre les zones polluées (talus 2/1 et blindage en limite de site Nord-Est) : 10 590 m³. Ce volume sera réutilisé en remblaiement des fouilles (évacuation pollution concentrée et talus) Volume des boues déshydratées issues du lavage correspondant à 20 % du volume traité Pompage des eaux en fond de fouille et traitement si nécessaire au Nord-Est du site (zone PC29) Gestion des nuisances Réception des milieux
Avantages
➢ Lavage sur site : - Revalorisation sur site des fractions grossières traitées - Technique adaptée pour le traitement de volume important de terres - Atténuation de la pollution (atteinte des objectifs de réhabilitation) ➢ Recouvrement (confinement) : - Solution immédiate - D'un point de vue sanitaire, suppression du risque par inhalation/ingestion de poussières pour les usagers
Inconvénients
➢ Lavage sur site : - Technique encombrante (unité de lavage sur site, stockage temporaire des terres traitées et à traiter) - Essai pilote à réaliser en amont - Consommation importante d'eau et traitement des eaux résiduelles ➢ Recouvrement (confinement) : - Absence d'atténuation de la pollution - Servitudes d'usage - Recouvrement pérenne à garantir - Suivi semestriel de la qualité des eaux souterraines
Délais
Environ 12 mois estimés
Coûts
Les coûts estimés sont détaillés dans le tableau 18. Le montant global est compris entre 3 115 et 4 966 k€ HT.

7.4.4. Ingénierie des travaux

Les travaux devront être suivis et contrôlés par une société spécialisée dans le domaine des sites et sols pollués.

La mission comprendra :

- Les autorisations préalables éventuelles ;
- La gestion des prestataires ;
- Le suivi des travaux avec notamment la surveillance des terrassements, la réalisation de mesures de terrain, de prélèvements et d'analyses de contrôle en cours de traitement, … ;
- Les réceptions des sols afin de contrôler la qualité résiduelle de ce milieu et de valider l'atteinte des objectifs de réhabilitation ;
- Le rapport de fin de travaux, dans lequel les zones traitées seront cartographiées et les teneurs résiduelles seront présentées. Il sera également accompagné d'une ARR afin de valider l'absence de risque sanitaire inacceptable pour les futurs usagers.

7.4.5. Surveillance post-travaux, servitudes et restrictions associées aux scénarios de gestion

7.4.5.1. Surveillance de la qualité des milieux

Une surveillance semestrielle de la qualité des eaux souterraines devra être mise en place sur une période de quatre ans, quel que soit le scénario de gestion retenu (pollutions résiduelles attendues). Elle permettra de suivre l'évolution des teneurs en polluants dans ce milieu et de s'assurer de l'absence de relargage des sols.

A l'issue de cette période, un bilan quadriennal sera établi afin de statuer sur la poursuite, le renforcement ou l'arrêt de la surveillance. Des travaux de réhabilitation et/ou des mesures de gestion complémentaires pourront également être préconisés en fonction de l'évolution des teneurs.

Un réseau piézométrique de 11 ouvrages est proposé pour la surveillance, correspondant à 5 piézomètres existant hors site et à 5 nouveaux piézomètres à installer sur site.

A l'issue de cette période, un bilan quadriennal sera établi afin de statuer sur la poursuite, le renforcement ou l'arrêt du suivi. Des travaux de réhabilitation et/ou des mesures de gestion complémentaires pourront également être préconisés en fonction de l'évolution des teneurs.

De la même manière, deux campagnes de suivi des gaz du sol devront être mis en place pour la recherche des polluants volatils du site afin d'alimenter l'ARR et valider l'absence de risque sanitaire inacceptable pour les futurs usagers. L'une de ces campagnes aura impérativement lieu en saison estivale, plus favorable au dégazage.

Un réseau de 60 piézairs est retenu pour ces 2 campagnes post-travaux, correspondant à des ouvrages à installer suite aux travaux de dépollution.

7.4.5.2. Servitudes ou restrictions d'usage

Quel que soit le scénario de gestion mis en œuvre, des pollutions résiduelles étant attendues, des servitudes ou des restrictions d'usage devront être instituées. Leurs objectifs sont les suivants :

- L'assurance de la protection de la santé humaine et de l'environnement au cours du temps (dont les éventuelles précautions pour la réalisation de travaux, passage de canalisation, …) ;

- L'assurance qu'une éventuelle modification de l'usage et/ou de l'aménagement ne sera possible que si elle est conforme aux définitions des servitudes/restrictions d'usage ou si elle s'accompagne de nouvelles études et/ou de travaux (à mener par le porteur du projet) garantissant la compatibilité avec cet usage/aménagement ;

- La protection de l'aménageur du site lors d'éventuels changements d'usage des sols qui ne seraient pas de son fait. Ceux-ci pourraient résulter par exemple de modifications de la politique locale d'urbanisme ou de décisions de propriétaires successifs du site ;

- La pérennité de la maintenance ou la surveillance du site.

Un dossier de servitudes sera à mettre en place (intégration au SIS annexé au PLU).

Les servitudes ou les restrictions d'usage peuvent concerner :

- L'utilisation des sols : définition des autorisations et interdictions concernant le type d'activités et de construction ;

- L'utilisation du sous-sol : définition des procédures à respecter en cas d'affouillements et de pose de canalisation ;

- L'usage des eaux souterraines : interdiction de tout usage des eaux souterraines (hors suivi) sans une vérification préalable de leur compatibilité avec l'usage envisagé ;

- L'usage des eaux superficielles : absence d'usage des eaux superficielles sans une vérification préalable de leur compatibilité avec l'usage envisagé ;

- Le revêtement/recouvrement du site : revêtement ou recouvrement de sa totalité (enrobé, béton, terre végétale, pavement, …) ;

- La gestion des eaux pluviales : épaisseur de minimum 1 m de terres saines au droit des zones d'infiltration des eaux pluviales ;

- La culture fruitière et légumière : absence de potager et de verger au droit du site ;

- Les canalisations AEP : en cas de pose d'une canalisation, mise en place de toutes les mesures nécessaires afin d'éviter la diffusion de substances volatiles dans l'eau du réseau. Trois possibilités sont à envisager :
  - Canalisation PEHD au sein de remblais d'apport propre (de type sablon) ;
  - Canalisation PEHD placée dans un caniveau technique béton ;
  - Canalisation métallique ou spécifique anticontamination.

7.5. Synthèse des coûts des scénarios de gestion

Les coûts unitaires des techniques de traitement considérés pour le chiffrage des scénarios de gestion sont les suivants :

- Evacuation hors site en :
  - Filière classique :
    - ISDI+ : 48 à 55 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport ;
    - Biocentre : 70 à 80 € HT/tonne, comprenant le traitement et le transport ;
    - ISDND : 110 à 130 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport,
    - ISDD : 100 à 120 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport ;
    - ISDD stabilisation : 130 à 150 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport ;
    - Incinération : 500 à 750 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport ;
  - Filière Ecocentre :
    - C2°: 9 € HT/tonne, comprenant uniquement le traitement ;
    - C4°: 48,5 € HT/tonne, comprenant uniquement le traitement ;

- Lavage sur site :
  - 150 à 200 k€, pour l'installation sur site et le repli d'une unité de lavage ;
  - 60 à 120 € HT/tonne, pour l'exploitation de l'unité de lavage (y compris l'énergie et le traitement de l'eau (hors coûts de fourniture d'eau et rejet) et la déshydratation des boues (20 % du volume des terres traitées) ;
  - Pour l'élimination hors site des boues déshydratées :
    - ISDD : 100 à 120 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport ;
    - ISDD stabilisation : 130 à 150 € HT/tonne, comprenant le traitement, la TGAP et le transport.

Ces coûts d'évacuation hors site correspondent à des fourchettes de prix du marché actuel susceptibles d'évoluer. Pour les techniques de traitement sur site, ces prix pourront varier selon les résultats du PCT.

La synthèse des coûts associés à chaque scénario est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 18 : Synthèse des coûts des scénarios de gestion des sols

		Scénario 1 : Elimination hors site en centre agréé et recouvrement	Scénario 2 : Elimination hors site en centre agréé, lavage sur site et recouvrement
1	**Préparation, installation et repli de chantier**		
1.1	Etudes préalables (PCT, étude géotechnique, …)	**42 à 45**	**60 à 65**
1.2	Préparation, installation et repli de chantier	**150 à 200**	**300 à 400**
2	**Traitement des pollutions**		
2.1	Gestion des revêtements (enrobés, bétons)	**248 à 269**	**248 à 269**
2.2	Travaux de terrassement avec sécurisation pyrotechnique	**429 à 520**	**429 à 520**
2.3	Transport et élimination hors site (filière classique ou Ecocentre)	**2 030 à 2 490**	**758 à 963**
2.4	Lavage et traitement sur site (traitement uniquement des pollutions concentrées avec de fort volume et une filière envisagée à coût élevée)	**-**	**880 à 2 200**
2.5	Apport de matériaux et travaux de remblaiement	**214 à 288**	**124 à 168**
2.6	Contrôle des nuisances du chantier	**15 à 20**	**15 à 20**
2.7	Ingénierie des travaux (dont suivi, réceptions, rapport et ARR avec investigations sur les gaz du sol)	**81 à 89**	**81 à 89**[11]
2.8.	Gestion des eaux polluées	**165 à 210**	**165 à 210**
3	**Surveillance post-travaux et servitudes/restrictions d'usage**		
3.1	Surveillance de la qualité des milieux	**52 à 57**	**52 à 57**
3.2	Dossier de servitudes ou restrictions d'usage	**3 à 5**	**3 à 5**
TOTAL* (k€ HT)		**~3 429 à ~4 193**	**~3 115 à ~4 966**

** Hors frais de maîtrise d'œuvre éventuelle estimé à entre 200 et 250 k€*

[11] Hors suivi du traitement inclus dans le poste 2.4

7.6. Bilan coûts/avantages des scénarios de gestion retenus

Les scénarios de gestion retenus sont comparés dans le tableau suivant selon six critères principaux afin de déterminer le plus adapté au contexte du site.

Tableau 19 : Bilan coûts/avantages des scénarios de gestion des zones à réhabiliter dans les sols

Critères	Sous-critères	Pondération	Scénario 1 : Elimination hors site en centre agréé et recouvrement			Scénario 2 : Elimination hors site en centre agréé, lavage sur site et recouvrement		
			Avantages	Inconvénients	Note	Avantages	Inconvénients	Note
Technique	Adéquation de la technique avec les caractéristiques des polluants, la lithologie du site et le contexte hydrogéologique	10	Technique adaptée aux mélanges de polluants présents	-	10	Technique adaptée à la nature majoritairement sableuse des terrains Adéquation de la technique vis-à-vis des polluants à traiter	Essai pilote à réaliser afin d'étudier la faisabilité technique	7
	Robustesse et efficacité : - Atteinte des objectifs - Atténuation prévisionnelle des concentrations - Pérennité de la technique (rebonds)	5	Objectif raisonnablement atteignable (élimination des pollutions concentrées)	Sous réserve de l'obtention de CAP Pollution résiduelle attendue (niveau des pollutions diffuses) Remaniement des sols pouvant favoriser un relargage de pollution vers les eaux souterraines Conservation d'une partie de la pollution concentrée sous les bâtiments non démolis (revêtement type dalle béton)	4	Objectif raisonnablement atteignable (élimination des pollutions concentrées)	Sous réserve de l'obtention de CAP dont un pour les fractions fines Pollution résiduelle attendue (niveau des pollutions diffuses) Conservation d'une partie de la pollution concentrée sous les bâtiments non démolis (revêtement type dalle béton)	4
	Adaptabilité au site (accessibilité, espace disponible, accès à l'eau et à l'électricité, maintien de l'activité, …)	15	Site accessible pour des engins de chantier et des camions Espace disponible suffisant pour le stockage temporaire des sols pollués (en attente d'évacuation) à la mise en place d'une UTE Pas de besoin en eau Absence de coactivité pouvant limiter la circulation des engins	Alimentation temporaire en électricité pour l'UTE si besoin	15	Site accessible pour des engins de chantier et des camions Espace disponible suffisant pour l'installation de l'unité de lavage et une UTE Absence de coactivité pouvant limiter la circulation des engins et l'exploitation de l'unité de traitement	Alimentation temporaire en électricité à prévoir Fourniture en eau à prévoir	13
Economique	Coût de mise en œuvre de la technique	10	Maintien du revêtement (dalle béton) au droit des bâtiments non démolis	Coût très élevé	0	Coût plus modéré en fourchette basse Maintien du revêtement (dalle béton) au droit des bâtiments non démolis	Coût plus important en fourchette haute	4
	Coût d'exploitation et de maintenance	5	Absence de coût d'exploitation et de maintenance	-	5	-	Coûts d'exploitation et de maintenance modérés	3
Délai	Durée des travaux et du traitement	10	Solution relativement rapide (estimé à environ huit mois)	-	10	-	Durée de traitement prévisionnelle légèrement plus long (estimé à environ douze mois)	8
Environnement	Dépenses énergétiques et utilisation des ressources (électricité, eau, carburants, …), bilan carbone	10	Pas de besoin en eau ni en électricité	Amené et repli et utilisation d'engins de chantier Transport des sols pollués par camions jusqu'au centre agréé	2	Transport des boues déshydratées par camions jusqu'au centre agréé (20% du volume traité)	Amené et repli et utilisation d'engins de chantier Amené et repli de l'installation de lavage Transport d'une partie des sols pollués par camions jusqu'au centre agréé Consommation d'électricité et d'eau	6
	Déchets générés, revalorisation de la matière	10	-	Sols pollués considérés comme des déchets et évacués en centre agréé Gestion des eaux de fond de fouille à prévoir	0	Revalorisation d'une partie des pollutions concentrées (fractions grossières après traitement)	Une partie des sols pollués et les fractions fines polluées considérées comme des déchets et évacuées en centre agréé Gestion des eaux de fond de fouille et de lavage à prévoir	6
Socio-politique	Acceptabilité sociétale	5	Atténuation des pollutions sur site	Déplacement de la pollution en centre agréé Conservation d'une partie de la pollution concentrée sous les bâtiments non démolis (revêtement type dalle béton)	1	Atténuation des pollutions sur site Revalorisation sur site des fractions grossières traitées	Sous réserve d'essai pilote Conservation d'une partie de la pollution concentrée sous les bâtiments non démolis (revêtement type dalle béton)	4
	Nuisances (bruit, poussières, odeurs, trafic, …)	10	Absence d'odeur hors site	Bruit dans la journée lors des travaux de terrassement, de remblaiement et de (dé)chargement des camions Poussières générées lors des travaux de terrassement et de remblaiement Augmentation du trafic routier	2	Absence d'odeur hors site Bruit faible lors du fonctionnement de l'installation de lavage pour les usagers hors site Augmentation moindre du trafic routier	Bruit dans la journée lors des travaux de terrassement, de remblaiement et de (dé)chargement des camions Poussières générées lors des travaux de terrassement et de remblaiement	5
Juridique	Contraintes résiduelles (servitudes ou restrictions d'usage, surveillance post-travaux, …)	5	Atténuation des pollutions	Dossier de servitudes Surveillance semestrielle des eaux souterraines	2	Atténuation des pollutions	Dossier de servitudes Surveillance semestrielle des eaux souterraines	2
	Autorisation des dossiers administratifs	5	-	CAP à obtenir Dossier de servitudes Convention de rejet des eaux de fond fouille si nécessaire	3	-	CAP à obtenir Dossier de servitudes Convention de rejet des eaux de lavage et de fond de fouille	2
TOTAL	**100**				**54**			**64**

Au regard du bilan coûts/avantages, le scénario 2 serait à privilégier, soit l'élimination hors site en centre agréé, lavage sur site et recouvrement pour un montant global estimé entre 3 115 et 4 966 k€ HT et un délai de 12 mois.

Nous rappelons que le plan de gestion s'inscrit dans une démarche itérative. En cas d'investigations complémentaires et/ou en fonction des résultats du PCT et de l'évolution du suivi de travaux, il sera possible de proposer d'autres techniques de réhabilitation et/ou scénarios de gestion.

De même, en cas de modification de l'usage et/ou de l'aménagement au droit du site, le schéma conceptuel, l'EQRS et le plan de gestion devront être actualisés.

8 - Schéma conceptuel après mise en œuvre du scénario de gestion privilégié

Au regard de la présence de pollutions résiduelles attendues, le schéma conceptuel établi dans la précédente étude (réf. SER19233/COMPL3-1 datant d'octobre 2025) est mis à jour en considérant la mise en œuvre du scénario de gestion privilégié, à savoir (tableau 20 et figure 18) :

- Phase 1 : élimination hors site en centre agrée, lavage sur site et recouvrement ;
- Phase 2 : élimination hors site en centre agréé des boues déshydratée.

Pour rappel, le schéma conceptuel initial considérait, étant donné le contexte du site (ancien site industriel et qualité médiocre des remblais avec la présence diffuse de métaux), les mesures de gestion suivantes pour son réaménagement, afin de limiter le transfert des polluants et les risques sanitaires pour les futurs usagers :

- Un revêtement de surface de l'ensemble du site par une dalle béton, de l'enrobé, … ou un recouvrement par 30 cm de terre végétale (ou remblais sains) au droit des futurs espaces verts[12] ;

- L'absence de jardin potager et verger ;

- L'absence d'usage des eaux souterraines et superficielles ;

- En cas de pose d'une canalisation AEP au droit d'une zone polluée, la mise en place de toutes les mesures nécessaires afin d'éviter la diffusion de substances volatiles dans l'eau du réseau.

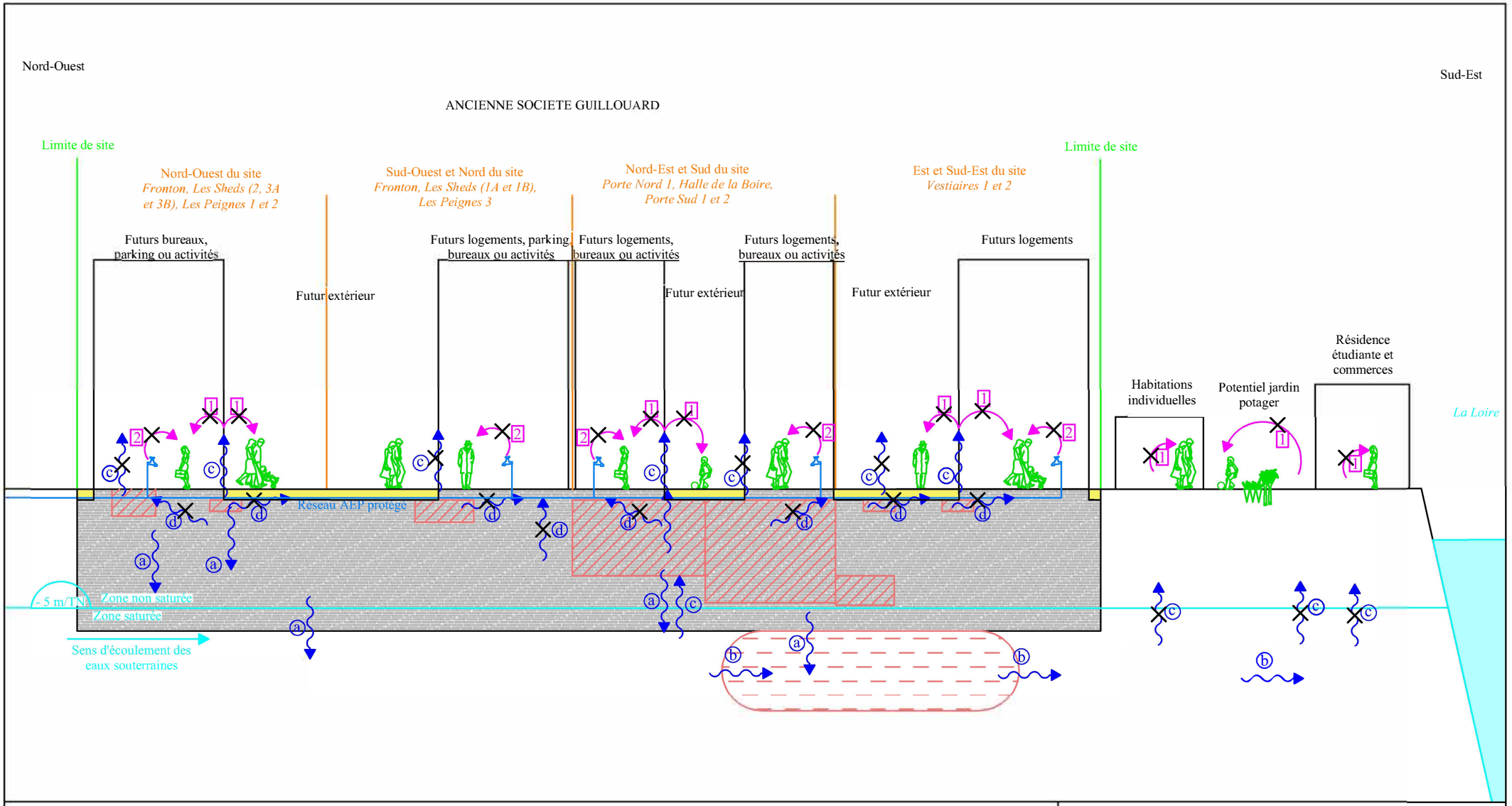
Les risques potentiels pour la population hors site sont définis à partir des résultats de l'étude de vulnérabilité des milieux de l'étude réf. SER19233/DIAG-1 datant de décembre 2020 ainsi que des résultats analytiques hors site.

[12] Selon le Guide INERIS sur les types d'usages définis dans le cadre des cessations d'activité des installations classées pour la protection de l'environnement et de projets d'aménagements de mai 2023

Tableau 20 : Données du schéma conceptuel après mise en œuvre du scénario de gestion privilégié

Source de pollution résiduelle	Enjeu / cible	Voie de transfert	Voie retenue	Justifications	Voie d'exposition	Risque	Justifications
Hydrocarbures, COHV, métaux dans les sols *Hydrocarbures, COHV, métaux dans les eaux souterraines* *COHV, traces de CAV et mercure dans les gaz du sol*	Futurs usagers du site Travailleurs, habitants	Dégazage	Oui	Traitement des pollutions concentrées en hydrocarbures C_{10}-C_{40}, HAP, COHV, étain, plomb et zinc dans les sols au droit des zones accessibles (hors emprise des bâtiments conservés), présence de pollutions résiduelles Traitement par la gestion des sols des teneurs importantes en COHV dans les gaz du sol, présence d'une pollution résiduelle Dégazage résiduel des sols potentiel	Inhalation d'air intérieur *(ateliers, logements et bureaux)* Inhalation d'air extérieur	Acceptable	Risque acceptable selon l'EQRS réalisée en considérant l'état actuel du site Amélioration de la qualité des milieux suite au traitement des pollutions concentrées accessibles
		Envol de poussières	Non	Traitement des pollutions concentrées en hydrocarbures C_{10}-C_{40}, HAP, COHV, étain, plomb et zinc dans les sols au droit des zones accessibles (hors emprise des bâtiments conservés), présence de pollutions résiduelles Revêtement ou recouvrement de surface sur l'ensemble du site considéré dans le projet d'aménagement	Ingestion/inhalation de poussières de sols	Sans objet	
		Contact avec le sol	Non				
		Contamination des végétaux autoproduits	Non	Absence de potager considéré dans le cadre du projet d'aménagement	Consommation de végétaux autoproduits	Sans objet	
		Perméation dans le réseau AEP	Non	Traitement des pollutions concentrées en hydrocarbures C_{10}-C_{40}, HAP, COHV, étain, plomb et zinc dans les sols au droit des zones accessibles (hors emprise des bâtiments conservés), présence de pollutions résiduelles Traitement par la gestion des sols des teneurs importantes en COHV dans les gaz du sol, présence d'une pollution résiduelle Diffusion des substances volatiles écarté Mise en place de toutes les mesures nécessaires afin d'éviter la diffusion de substances volatils dans l'eau du réseau considérée dans le cadre du projet d'aménagement	Consommation d'eau du réseau AEP	Sans objet	
		Infiltration/écoulement vers les eaux souterraines	Oui	Traitement des pollutions concentrées en hydrocarbures C_{10}-C_{40}, HAP, COHV, étain, plomb et zinc dans les sols au droit des zones accessibles (hors emprise des bâtiments conservés), présence de pollutions résiduelles Traitement par la gestion des sols des teneurs importantes en COHV, hydrocarbures C_{10}-C_{40} et métaux dans les eaux souterraines, présence d'une pollution résiduelle	Ingestion/inhalation d'eaux souterraines	Absence d'usage des eaux souterraines considéré dans le projet d'aménagement	
		Ruissellement/écoulement vers les eaux superficielles	Non	Revêtement ou recouvrement de surface sur l'ensemble du site considéré dans le projet d'aménagement	Ingestion/inhalation d'eaux superficielles	Sans objet	
	Population hors site Travailleurs, habitants	Dégazage	Non	Traitement par la gestion des sols des teneurs importantes en COHV, hydrocarbures C_{10}-C_{40} et métaux dans les eaux souterraines, présence d'une pollution résiduelle Faible fraction de polluants volatils dans les sols et eaux souterraines en limite de site Faible impact des eaux souterraines en hydrocarbures volatils et COHV en aval hydraulique du site Présence des eaux souterraines à environ 5 m de profondeur	Inhalation d'air intérieur Inhalation d'air extérieur	Sans objet	
		Perméation dans le réseau AEP	Non	Traitement par la gestion des sols des teneurs importantes en COHV, hydrocarbures C_{10}-C_{40} et métaux dans les eaux souterraines, présence d'une pollution résiduelle Faible fraction de polluants volatils dans les sols et eaux souterraines en limite de site Faible impact des eaux souterraines en hydrocarbures volatils et COHV en aval hydraulique du site Présence des eaux souterraines à environ 5 m de profondeur Absence de réseau AEP public au droit du site	Consommation d'eau du réseau AEP	Sans objet	
		Infiltration/écoulement vers les eaux souterraines	Non	Faible impact des eaux souterraines en hydrocarbures, métaux et COHV en aval hydraulique du site	Ingestion/inhalation d'eaux souterraines	Sans objet	
		Contamination des végétaux autoproduits	Non	Traitement par la gestion des sols des teneurs importantes en COHV, hydrocarbures C_{10}-C_{40} et métaux dans les eaux souterraines, présence d'une pollution résiduelle Faible fraction de polluants volatils dans les sols et eaux souterraines en limite de site Faible impact des eaux souterraines en hydrocarbures volatils et COHV en aval hydraulique du site Présence des eaux souterraines à environ 5 m de profondeur Absence d'usage des eaux souterraines et/ou superficielles recensé pour l'arrosage	Consommation de végétaux autoproduits	Sans objet	
		Ruissellement/écoulement vers les eaux superficielles	Non	Faible impact des eaux souterraines en métaux, hydrocarbures et COHV en aval hydraulique du site Présence de La Loire en aval hydraulique supposé de la zone d'étude, à environ 400 m, potentiellement en relation avec les eaux souterraines Activités récréatives et halieutiques recensées dans La Loire Eloignement de La Loire Phénomène de dilution dans les eaux superficielles	Ingestion/inhalation d'eaux superficielles	Sans objet	
		Contamination d'animaux	Non		Consommation d'animaux	Sans objet	

Aucun risque sanitaire inacceptable ne serait donc mis en évidence pour les futurs usagers du site. Cela devra être confirmé par des réceptions de sols et de gaz du sol à l'issue des travaux de réhabilitation. En fonction des résultats, une ARR pourra être nécessaire.



Légende :

Recouvrement (terre végétale) ou revêtement de surface

Sources de pollution

- Teneur en métaux significative sur les sols
- Impact résiduel en produits hydrocarburés et COHV sur les sols (après traitement ou impact maintenu en place)
- Impact résiduel en métaux, produits hydrocarburés et/ou COHV, métaux sur les eaux souterraines

Voies de transfert

- (a) Infiltration
- (b) Ecoulement
- (c) Dégazage
- (d) Diffusion

Voies d'exposition

- [1] Inhalation
- [2] Ingestion/inhalation d'eau
- Risque à considérer

Cibles

Figure 24 : Schéma conceptuel après mise en oeuvre du scénario de gestion priviligié

Echelle : -
Format A4

Affaire : SER19233

Date : 17/10/2025

SEREA

Parc d'Activités de Ragon
26 rue Louis Pasteur
44119 Treillières

9 - Synthèse technique et recommandations

9.1. Synthèse technique

Les Etablissements GUILLOUARD exploitaient un site industriel spécialisé dans la fabrication d'ustensiles ménagers en acier galvanisé ou étamé sur l'Ile de Nantes (44). Cette société, classée ICPE soumise à autorisation, a notifié sa cessation définitive d'activité à la préfecture le 7 mars 2016 et a vendu son terrain le 15 septembre 2020 à la société LEGENDRE IMMOBILIER, laquelle y envisage un projet de requalification urbaine.

Dans ce contexte, la société LEGENDRE IMMOBILIER a mandaté SEREA pour l'accompagner sur l'ensemble du processus de reconversion urbaine notamment pour le volet Sites et Sols Pollués, avec pour cette étude la réalisation d'une étude sanitaire et d'un plan de gestion.

Le projet d'aménagement comprend la réalisation d'un projet urbain comprenant la démolition d'une partie des bâtiments, l'aménagement de nouveaux de R+1 à R+9 sans niveau de sous-sol avec une mixité d'usage (logements collectifs, bureaux, activités et parking) et des aménagements paysagers.

Plusieurs études environnementales ont déjà été réalisées au droit ou à proximité immédiate du site. Des impacts en produits hydrocarburés (hydrocarbures C_5-C_{10}, hydrocarbures C_{10}-C_{40}, CAV, HAP et PCB), COHV, métaux sur brut et les chlorures.

- **Etudes antérieures**

Six diagnostics de pollution des milieux ont été réalisés au droit ou à proximité immédiate du site :

- « Abords du site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution » (Réf. SER16145-1) réalisé par SEREA en octobre 2016 ;
- « Etablissement GUILLOUARD - Diagnostic environnemental du milieu souterrain » (Réf. RESILB06125-03) réalisé par BURGEAP en novembre 2016 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Diagnostic de pollution des milieux » (Réf. SER19233/DIAG-1) réalisé SEREA en décembre 2020 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL-1) réalisé par SEREA en septembre 2021 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) - Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL2-1) réalisé par SEREA en avril 2022 ;
- « Site GUILLOUARD à Nantes (44) – Investigations complémentaires sur les milieux » (Réf. SER19233/COMPL3-1) réalisé par SEREA en octobre 2025.

Ont ainsi été réalisés, plus de 200 sondages sols et l'analyse de 445 échantillons, 5 campagnes de prélèvements des eaux souterraines sur tout ou partie des 21 ouvrages piézométriques mis en œuvre sur et hors site, et 6 campagnes de prélèvements des gaz du sol sur tout ou partie des 35 piézairs mis en œuvre entre 2019 et 2025.

Ces études ont mis en évidence le début des activités du site Guillouard à partir du début des années 1920 jusqu'à 2016. Le site a été aménagé sur d'anciens îlots de l'Ile de Nantes entrecoupés par des chenaux (boires) qui ont été progressivement remblayés par des matériaux divers tels que des remblais de qualité médiocre, des sables de fonderies, des gravats de démolition etc…

Le site produisait des ustensiles et outils en fer étamé et zingué (bassine, lampe tempête, presse purée, outil de jardinage, ….). Plusieurs process industriels de découpe, pliage, forge, usinage mécanique et chimique, dégraissage et peinture ont été mis en œuvre sur le site. Celui-ci s'est étendu vers l'Est au fur et à mesure de son histoire, jusqu'à atteindre l'emprise actuelle d'environ 2 ha. A noter que le site a été ponctuellement bombardé pendant la seconde guerre mondiale et qu'il a également été utilisé pour la production de corps d'obus.

Les principaux polluants rencontrés dans les sols sont les métaux issus des remblais ou du process de production, les hydrocarbures ayant pour sources les cuves de fioul des chaufferies, les solvants chlorés utilisés pour le dégraissage et les BTEX issus des activités de peintures. Il est à noter qu'aucun indice visuel de la présence de matériaux amiantés de type fibrociment n'a été observé lors de la réalisation des sondages à la pelle mécanique.

Concernant les eaux souterraines, le sens d'écoulement est globalement orienté du Nord-Ouest vers le Sud Est avec un niveau globalement situé au-delà de 5 m de profondeur par rapport au terrain actuel (en moyenne 1,25 m NGF). Hors site les eaux souterraines sont faiblement à modérément impactées et à l'intérieur du site on note un impact significatif en hydrocarbure dans l'angle Nord-Est du site au droit de l'ancienne cuve de fioul, et des teneurs notables en COHV, mais n'excédant pas 100 µg/l, en partie Est et Sud Est du site pour la somme des composés COHV.

Concernant les gaz du sol, les polluants identifiés sont les COHV, en lien avec les impacts en COHV déjà observés dans les sols.

- **Identification des pollution concentrées (A270)**

Des seuils de pollution concentrée (seuils de coupure) ont été déterminés dans les sols pour les polluants jugés pertinents par comparaison de plusieurs méthodes d'analyses :

- Analyse statistique ;
- Bilan massique des polluants ;
- Géostatique.

Les seuils de coupure retenus sont les suivants :

- Hydrocarbures C_{10}-C_{40} : 6 000 mg/kg MS ;
- HAP : 170 mg/kg MS ;
- Somme du trichloroéthylène et du 1,1,1-trichloroéthane : 10 mg/kg MS ;
- Etain sur brut : 3 600 mg/kg MS ;
- Plomb sur brut : 5 400 mg/kg MS ;
- Zinc sur brut : 21 000 mg/kg MS.

Ainsi, 29 zones de pollution concentrée ont été identifiées :

- **Zone 1** : impact par des HAP entre 0 et 1 m de profondeur (235 m^3) ;
- **Zone 2** : impact par du plomb sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (15 m^3) ;
- **Zone 3** : impact par des COHV entre 0 et 0,1 m de profondeur (30 m^3) ;
- **Zone 4** : impact par des hydrocarbures C_{10}-C_{40} entre 0 et 0,5 m de profondeur (105 m^3) ;
- **Zone 5** : impact par de l'étain sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (375 m^3) ;
- **Zone 6** : impact par des HAP entre 1 et 2 m de profondeur (215 m^3) ;
- **Zone 7** : impact par du zinc sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (5 m^3) ;
- **Zone 8** : impact par du zinc sur brut entre 1 et 2 m de profondeur (30 m^3) ;
- **Zone 9** : impact par des COHV, HAP et zinc sur brut entre 0 et 4 m de profondeur (2 760 m^3) ;
- **Zone 10** : impact par des hydrocarbures C_{10}-C_{40}, COHV et zinc sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (20 m^3) ;
- **Zone 11** : impact par de l'étain sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (65 m^3) ;
- **Zone 12** : impact par du plomb et de l'étain sur brut entre 0 et 2 m de profondeur (270 m^3) ;
- **Zone 13** : impact par du zinc sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (15 m^3) ;
- **Zone 14** : impact par du plomb et du zinc sur brut entre 0 et 2 m de profondeur (190 m^3) ;
- **Zone 15** : impact par des chlorures et zinc sur brut entre 0 et 4 m de profondeur (560 m^3) ;
- **Zone 16** : impact par des HAP et zinc sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (175 m^3) ;
- **Zone 17** : impact par des chlorures et zinc sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (195 m^3) ;
- **Zone 18** : impact par de l'étain sur brut entre 1 et 3 m de profondeur (30 m^3) ;
- **Zone 19** : impact par des HAP entre 1 et 2 m de profondeur (170 m^3) ;
- **Zone 20** : impact par du plomb sur brut entre 1 et 2 m de profondeur (175 m^3) ;
- **Zone 21** : impact par du plomb sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (15 m^3) ;
- **Zone 22** : impact par de l'étain, du plomb et du zinc sur brut entre 0 et 1 m de profondeur (465 m^3) ;
- **Zone 23** : impact par du zinc sur brut entre 0 et 2 m de profondeur (360 m^3) ;
- **Zone 24** : impact par des hydrocarbures C_{10}-C_{40} et HAP entre 2 et 4 m de profondeur (330 m^3) ;
- **Zone 25** : impact par de l'étain et du plomb entre 2 et 6 m de profondeur (840 m^3) ;
- **Zone 26** : impact par des COHV entre 2 et 3 m de profondeur (15 m^3) ;
- **Zone 27** : impact par des HAP entre 2 et 3 m de profondeur (15 m^3) ;
- **Zone 28** : impact par des hydrocarbures C_{10}-C_{40} et étain sur brut entre 2 et 5 m de profondeur (510 m^3) ;
- **Zone 29** : impact par des hydrocarbures C_{10}-C_{40}, étain plomb et zinc sur brut entre 3 et 6 m de profondeur (2 370 m^3).

Ces 29 zones de pollution concentrées s représentent un volume d'environ 10 250 m^3, soit 17 950 tonnes.

- **Schéma conceptuel (A270) et analyse des enjeux sanitaires (A320)**

Le schéma conceptuel a été établi selon le projet d'aménagement envisagé (usages mixtes comprenant logements, bureaux et activités) et sur la base de l'ensemble des résultats d'analyses obtenus.

Les mesures de gestion suivantes sont considérées dans le cadre du projet, afin de limiter les risques pour les futurs usagers :

- Recouvrement de l'ensemble de la zone d'étude (bâti, béton, enrobé, pavés, terre végétale, …) ;
- Absence d'usage des eaux souterraines ;
- Protection des canalisations d'Alimentation en Eau Potable (AEP) vis-à-vis de la diffusion des polluants volatils ;
- Absence d'eaux superficielles ;
- Absence de potager et de verger.

Le schéma conceptuel a mis en évidence des risques potentiels pour les futurs usagers du site dans le cadre du projet par inhalation de substances volatiles dans l'air ambiant, en intérieur et en extérieur.

Les risques liés à cette voie d'exposition ont été quantifiés dans une Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS). Cette EQRS a été réalisée au droit du site, en tenant compte de l'ensemble des résultats d'analyses de sols, d'eaux souterraines et de gaz du sol et des conclusions du schéma conceptuel. Les risques ont donc été quantifiés pour la voie d'exposition par inhalation de substances volatiles en intérieur et en extérieur.

Les calculs ont mis en évidence des risques acceptables (inférieurs aux valeurs de référence de la méthodologie nationale) pour les futurs usagers du site, pour les scénarios retenus et avec les hypothèses et les dispositions constructives énoncées. Le projet envisagé est donc compatible sur le plan sanitaire avec la qualité résiduelle des milieux après réhabilitation. Il n'y a pas de purge complémentaire à prévoir pour garantir la compatibilité sanitaire du projet en plus des travaux prévu pour la gestion des pollutions concentrées.

- **Identification des options de gestion et bilan coûts/avantages (A330)**

L'objectif de réhabilitation est l'atténuation des pollutions concentrées dans les sols. Les seuils de réhabilitation considérés pour les sols correspondent aux seuils de pollution concentrée pré-identifiés.

Au regard de la médiocre qualité des remblais et des impacts diffus en métaux sur l'ensemble du site, ces seuils de réhabilitation permettent la suppression des spots hautement concentrés.

Au regard des contraintes liées à la conservation du fronton et une partie des sheds du site, le maintien en place d'une partie de la pollution concentrée a été considéré (PC4, PC27 et une partie de PC5).

Les zones à réhabiliter correspondent donc aux zones de pollution concentrée accessibles (hors emprise des bâtiments conservés dans le cadre du projet d'aménagement), dans les limites techniques possibles.

Le volume de sols à réhabiliter est estimé à 10 250 m^3, soit environ 17 950 tonnes.

Sur la base des techniques de réhabilitation les plus adaptées au contexte du site, plusieurs scénarios de gestion ont été étudiés pour répondre à ces objectifs :

- **Scénario 1 :** Purge et évacuation hors site en filières adaptées de la totalité des sols issus des zones de pollution concentrée (17 950 tonnes), maintien du recouvrement au droit du fronton et des sheds conservés et comblement des fouilles par apport de matériaux (coût estimé scénario 1 entre 3 429 K€ HT et 4 193 € HT) ;

- **Scénario 2 :** Excaver les sols issus des zones de pollution concentrée, évacuation hors site d'une partie (environ 6 850 tonnes), maintien du recouvrement au droit du fronton et des sheds conservés et traitement de l'autre partie (environ 11 100 tonnes) sur site par lavage, avant réutilisation des terres traitées en remblais en comblement des fouilles et évacuation de la fraction fine concentrant les polluants en filières adapté hors site (coût estimé scénario 2 entre 3 115 K€ HT et 4 966 K€ HT).

Le scénario 2 présente le meilleur bilan coûts/avantages et serait à privilégier. Les seuils de réhabilitation pour ce scénario correspondraient aux seuils de pollution concentrée. Le montant global est estimé entre 3 115 et 4 966 k€ HT, pour un délai de 12 mois, y compris frais de Plan de Conception de Travaux et études préalables.
Ce montant intègre :

- La gestion des enrobés et des dallages (non traités dans la phase démolition) ;
- Les coûts d'approvisionnement et de mis en œuvre des remblais de comblement des fouilles et de mise à la côte du projet d'aménagement ;
- Les terrassements suivis par un prestataire spécialisé en risques pyrotechniques.

Quel que soit le scénario retenu, des essais en laboratoire et essais pilotes de traitement seront nécessaires pour préciser la faisabilité des mesures de gestion et en affiner le coût.

A ce coût doit s'ajouter les frais de Maitrise d'Œuvre par un prestataire spécialisé en sites et sols polluées et certifié par le LNE pour les prestations d'ingénierie et de maitrise d'œuvre. Les honoraires de MOE sont estimés à ce stade entre 200 et 250 K€ HT.

A noter qu'en cas d'investigations complémentaires et/ou en fonction des résultats du PCT et de l'évolution du suivi de travaux, il sera possible de proposer d'autres techniques de réhabilitation et/ou scénarios de gestion.

9.2. Recommandations

Le plan de gestion considère en base les restrictions d'usages et servitudes suivantes :

- Recouvrement de l'ensemble de la zone d'étude (bâti, béton, enrobé, pavés, terre végétale, …) ;
- Absence d'usage des eaux souterraines ;
- Protection des canalisations d'Alimentation en Eau Potable (AEP) vis-à-vis de la diffusion des polluants volatils ;
- Absence d'eaux superficielles ;
- Absence de potager et de verger
- Mise en œuvre de géotextile à l'interface entre les sols en place qui conservent des pollutions résiduelles et les remblais d'apport
- Au droit des fosses d'arbres, mise en œuvre d'un géotextile sous l'emprise du houppier à -0,40 m sous la surface finie et d'un grillage avertisseur en profondeur à l'interface entre les sols en place qui conservent des pollutions résiduelles et les remblais d'apport ;
- Réalisation de 2 campagnes de prélèvement et analyses des gaz du sol après travaux et réalisation d'une Analyse des Risques Résiduels (ARR) afin de confirmer l'absence de risque sanitaire inacceptable pour les futurs usagers ;
- Mise place d'une surveillance semestrielle de la qualité des eaux souterraines après travaux (sur une durée minimale de 4 ans), avec bilan quadriennal permettant de décider l'arrêt ou la prorogation de cette surveillance ;
- Classement du site en SIS, pour conserver la mémoire des travaux, de la présence de pollution résiduelle et des restrictions d'usage.

Les travaux de réhabilitation devront être suivis et contrôlés par une société spécialisée et certifiée dans le domaine des sites et sols pollués. Des réceptions permettront de s'assurer de la qualité résiduelle des sols et des gaz du sol et de valider l'atteinte des objectifs de réhabilitation.

En amont de la phase de consultation et conformément à la méthodologie nationale en vigueur un Plan de Conception des Travaux (PCT) sera à réaliser pour détailler la faisabilité et le coût du lavage avec essais labo et essais pilotes en grandeur nature. Ce PCT devra également intégrer des essais géotechniques, afin de valider la faisabilité des terrassement profonds et le pompage traitement des eaux souterraines associé.

Dans la phase travaux, des mesures de réduction et de contrôle des nuisances (bruit, vibrations, émanations de poussières et gazeuses, …) devront être mises en place. Ces mesures intégreront un suivi de la qualité des eaux souterraines, ainsi que des mesures de la qualité de l'air ambiant (poussières et gaz), sur et en proche périphérie du chantier. Des moyens tels qu'extracteur et filtration en pied de pelle et brumisation seront à prévoir.

Enfin, une ATTES ALLUR sera à établir et à annexer à la demande de PC/PA.

10 - Discussion des limites et incertitudes

■ IDENTIFICATION DES POLLUTIONS CONCENTREES

Les données prises en compte correspondent à l'ensemble des données collectées entre 2016 et 2025.

L'analyse des données permettant la définition des seuils de coupure peuvent être influencés par :

- La taille du site ;
- La répartition spatiale des sondages ;
- Les dates d'échantillonnage ;
- La technique d'échantillonnage et d'analyse ;
- Le nombre d'échantillons analysés ;
- La précision du laboratoire ;
- Les gammes de concentrations choisies ;
- La lecture graphique ;
- La densité des sols considérée égale à 1,75 ;
- La définition des surfaces attribuées à chaque sondage par paramètre analysé (méthode des polygones de Thiessen dans une limite de 200 m²), …

■ ANALYSE DES ENJEUX SANITAIRES (A320)

L'analyse des enjeux sanitaires repose sur des hypothèses et des incertitudes prises de manière raisonnablement conservatoire, concernant :

- L'identification des dangers et les concentrations dans les milieux sources ;
- La relation dose/réponse ;
- La modélisation des teneurs dans le milieu d'exposition.

Elle permet d'estimer un risque raisonnablement majorant.

L'ensemble de ces limites et incertitudes est détaillé dans l'analyse des enjeux sanitaires.

■ IDENTIFICATION DES OPTIONS DE GESTION ET BILAN COÛTS/AVANTAGES (A330)

Dans le cadre du bilan coûts-avantages, les limites et incertitudes sont les suivantes :

- Estimation des volumes réalisée sur la base de l'ensemble des investigations réalisées entre 2016 et 2025 et selon les objectifs de réhabilitation définis et les limites techniques identifiées à ce stade ;

- Hypothèses prises en compte pour la réalisation des calculs de volumes et de quantités (voir paragraphe 7.3) ;

- Absence d'étude hydrogéologique permettant d'appréhender notamment la vitesse d'écoulement de la nappe et l'hétérogénéité du milieu souterrain ;

- Faisabilité des terrassements à proximité des limites de site le bâtiment à confirmer par une étude géotechnique ;

- Proposition de scénarios de gestion des pollutions sur la base des résultats d'analyses actuellement disponibles. Un PCT devra être réalisé pour confirmer la faisabilité et les coûts du scénario retenu ;

- Coûts présentés correspondant à des fourchettes du marché actuel et pouvant être amenés à évoluer (TGAP, coût de transport, filières, remblais d'apport, terrassement, blindage, …) ;

- Notation des scénarios de gestion selon les connaissances actuelles et les retours d'expérience disponibles et en fonction de l'importance attribuée aux critères et sous-critères.

Le plan de gestion ne constitue pas un CCTP.