

Document public



Site de la « *Place à gaz* », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55). Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

Rapport final

BRGM/RP-65376-FR

Décembre 2015



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Site de la « *Place à gaz* », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55). Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

Rapport final

BRGM/RP-65376-FR
Décembre 2015

D. Hubé, P. Bâlon,
Avec la collaboration de
F. Bodénan

Vérificateur :

Nom : L. Rouvreau
Fonction : Responsable d'unité DEV/RE
Date : 18/04/2016
Signature :



Approbateur :

Nom : D. Midot
Fonction : Directeur territorial Lorraine
Date : 13/05/2016
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Avertissement

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire.

Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 Juillet 1978. Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le BRGM ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : Meuse, Grémilly, Spincourt, Grande Guerre, Obus, Brûlage, Arsenic, Pollution, IEM, Plan de Gestion.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Hubé D., Bâlon P. avec la collaboration **de Bodénan F.** (2015) - Site de la « *Place à gaz* », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55) - Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux. Rapport final. BRGM/RP-65376-FR, 203 p., 69 fig., 42 tabl., 5 ann.

Synthèse

Le site dit de la « Place à gaz » en forêt de Spincourt, sur le territoire de la commune de Gremilly (Meuse), occupe une clairière, dont le sol noirci est dépourvu de végétation. Cet endroit est réputé avoir accueilli des opérations d'élimination d'obus chimiques allemands à arsenic au terme de la Grande Guerre. Les premières mesures portant sur la qualité des sols de surface de la clairière ont été réalisées par le BRGM en 2004. En 2006, un universitaire allemand de la faculté de Mayence a élargi le spectre des analyses aux composés pyrotechniques et aux toxiques de guerre.

L'accès à la clairière de la « Place à gaz » est interdit par Arrêté Préfectoral, le site étant ceinturé par une barrière de barbelés militaires (*Anti-Intrusion type Réseau Défensif Concertina*).

Le BRGM a réalisé entre avril 2014 et mars 2015, sous le pilotage de la Préfecture de la Meuse (et sur un financement Agence de l'Eau Rhin-Meuse, ARS lorraine et BRGM), un diagnostic scientifique et technique du site et de son proche environnement, en couplant des approches archivistiques, pyrotechniques (identification d'éléments de munitions), et analytiques (mesures sur des échantillons de sols, d'eaux, etc.). Le diagnostic, réalisé de façon progressive en 4 phases, a porté sur la qualité des sols de surface et de subsurface au droit et aux abords de la clairière, ainsi que sur la qualité des eaux de surface (et les sédiments) drainant la zone étudiée.

Les résultats ont été partagés à chacune des phases avec les services de la Préfecture et les donneurs d'ordre.

Le contexte réglementaire et méthodologique de gestion des sites et sols pollués en France (textes du Ministère de l'Écologie du 08 février 2007) se base sur une approche spécifique au cas par cas, en tenant compte des usages) et non pas sur des valeurs réglementaires et génériques. Les teneurs en polluants mesurées dans les sols au droit et aux abords de la « Place à gaz » ont ainsi été comparées au fond géochimique local (déjà constitué pour les métaux et métalloïdes, les dioxines et les furannes) et à des échantillons témoins prélevés hors de la zone d'étude pour les autres paramètres. Dans les cas où la qualité des sols s'écarte du référentiel de fond géochimique local, les textes du Ministère en charge de l'Écologie prévoient que la compatibilité environnementale du milieu avec les usages actuels constatés, doit être vérifiée *via* une Interprétation de l'État des Milieux (IEM).

Le diagnostic réalisé montre que les zones de pollution concentrées identifiées au droit et aux abords du site désigné par la « Place à gaz » se répartissent en 3 ensembles :

- la « **tache centrale** » formant la clairière de la « Place à gaz », de 80 x 80 m environ (pour une épaisseur des résidus de 5 à 20 cm environ) , à laquelle peuvent être rattachés 2 dépôts de résidus pollués : l'un, de quelques dizaines de mètres carrés à 5 m à l'est de la lisière de la clairière (périmètre clôturé), l'autre à l'extrême sud du périmètre clos, sur une superficie d'environ 5 * 15 m. Le premier dépôt (de 5 cm d'épaisseur environ) est probablement issu d'un déblaiement / déplacement de matériaux initialement localisés sur la tache centrale. Le second (de 5 à 15 cm d'épaisseur environ) a possiblement été généré de la même manière (il est localisé à l'emplacement de la voie ferrée d'amenée des obus) et/ou par l'entraînement des résidus depuis la tache centrale par ruissellement. Ces résidus, noir à brun noir, sont riches en éléments métalliques de munitions, en scories d'aspect gras, et en fragments charbonneux, localement associés à du laitier de haut fourneau constitutif du ballast de l'ancienne voie de chemin de fer d'amené des obus et des tessons de verre vert appartenant aux munitions ;

- **une fosse (appelée « fosse nord-est »)** de 50 à 60 cm de profondeur et de 5 x 5 m de superficie environ, située à 5 m au nord-est de la clairière (périmètre clos), aménagée avec des linteaux de bois, qui renferme des résidus noirs, parfois d'aspect gras et charbonneux, très riches en éléments métalliques et en fioles, bouchons et tessons de fioles d'arsines ;
- **le « Dépôt nord »** situé à 50 m au nord de la clairière, qui couvre une superficie d'environ 15 x 30 m, pour une épaisseur variant de 5 à 15 cm. Ces résidus brun à noir sont riches en éléments métalliques ; ils reposent sur un lit de concassé calcaire.

L'ensemble des informations historiques et documentaires, ainsi que les données collectées dans le cadre du diagnostic mené sur le site éclairent sur l'historique du site et sur les fonctions probables des 3 zones décrites ci-dessus.

La « *Place à gaz* »

La pollution identifiée au droit de la « *Place à gaz* » (clairière) correspond à un **dépôt de déchets/résidus industriels issus d'opérations de brûlage d'obus chimiques arséniés sternutatoires, allemands**, de calibre 77 mm, 77 mm allongé et 105 mm de type « *Croix bleue* » typiques de la fin de la Grande Guerre. Ces obus étaient chargés de TNT et d'une fiole en verre renfermant des cyanures et/ou chlorures de diphénylarsine (à effets émétisants et sternutatoires). D'autres obus chimiques allemands étaient potentiellement associés aux obus à Croix bleue.

Ces obus sont issus d'un **dépôt de munitions** d'abord établi près de l'étang des Haut-fourneaux, de la ferme de la Gélinerie, puis dans le bois (du Blanc Etoc), à quelques 1 500 m à l'ouest du site de la « *Place à gaz* ». Ces projectiles sont issus d'un dépôt initial, dont la création a été ordonnée par l'Armée française en 1919, et qui aurait accueilli environ 400 000 engins. Ce dépôt a été formé par le rassemblement des munitions chimiques de la Meuse et de la Meurthe-et-Moselle :

- un premier chantier de destruction de munitions a été exploité (par éclatement et vidage) à proximité de la Ferme de la Gélinerie avant 1926 ;
- **entre 1926 et 1928, la société civile et britannique F.N. Pickett & Fils a collecté au moins 200 000 obus chimiques pour les détruire par brûlage sur le site qui deviendra la « *Place à gaz* »,** selon des procédés développés dès 1920 au sein de cette entreprise par l'ingénieur militaire russe M. Kostevitch. Ce site est le seul aujourd'hui connu comme ayant été exploité par Pickett & Fils en Lorraine (l'activité en France de cette entreprise a débuté en 1920 à Trélon-Liessie dans le département du Nord) ;
- le brûlage s'effectuait en utilisant du bois aspergé d'explosif, disposé devant et sur des obus ouverts à l'œil (dépourvus de la fusée et du détonateur), organisés en rangées. La sécurité et le contrôle de l'efficacité des opérations étaient assurés grâce à un protocole opératoire strict.

Ces brûlages ont laissé sur le sol naturel des déchets industriels de combustion formés par les produits de décomposition thermique des explosifs et toxiques de guerre (arsenic, HAP arséniés, triphénylarsine, dioxines et furannes), des traces des composés chargeant les projectiles (TNT et ses sous-produits de transformation environnementale, tels que l'acide diphénylarsinique issu de l'oxydation des arsines initiales, etc.) et les métaux constituant les engins (zinc, cuivre, plomb, cadmium, etc.). Les teneurs en arsenic mesurées localement au droit de la « *Place à gaz* » sont particulièrement élevées (> 100 g As/kg MS), tout comme celles en dioxines et furannes (> 100 000 ng/kg MS). L'arsenic est essentiellement présent sous sa forme oxydée (As⁵⁺), dans des phases minérales cristallisées (arsénates de cuivre, de fer) pendant le refroidissement des résidus.

Après brûlage, les restes d'obus étaient évacués, possiblement en vue de la revente des métaux, de même que les fioles et le verre résiduels. La position des installations où étaient préparés les obus (déceinturage, dévissage des ensembles fusées-gaine (détonateur), etc.) n'a pas été clairement identifiée lors de l'étude (on peut supposer que cette étape de préparation était réalisée à proximité de la ferme de la Gélinerie).

La « fosse nord-est »

Les terrains formant l'assise de la fosse nord-est montrent un aspect rubéfié (rouge ocre, à brun-rouge) attestant que du brûlage a été réalisé dans la fosse, et/ou que cette fosse a réceptionné des matériaux chauds, issus du brûlage opéré sur la tache centrale ; toutefois, la singularité du chimisme des matériaux de la fosse (présence de fortes teneurs en plomb, brome lixiviable et composés organo-bromés) par rapport aux résidus identifiés ailleurs tend à montrer que cette fosse avait une fonction particulière : puits de brûlage et/ou de vidage d'obus autres que les obus à Croix bleue, et/ou puits de brûlage des imbrûlés collectés après les opérations sur la tache centrale.

Le « Dépôt nord » La richesse des résidus en éléments de gaines, d'amorces, de fusées, la présence de nombreuses charnières, ainsi que de fortes teneurs en zinc, plomb et cadmium (avec une corrélation entre les teneurs en zinc et celles en cadmium), mais aussi l'absence de tessons de fioles d'arsine et la présence de teneurs élevées en dioxines et furannes militent en faveur d'une aire de brûlage dédiée à la destruction des fusées et détonateurs. Elle aurait pu être exploitée parallèlement à la « Place à gaz », plus spécifiquement consacrée au brûlage des corps des projectiles.

Contexte géologique

Les 3 dépôts reposent sur une épaisse couche d'argile compacte (du callovo oxfordien) d'extension régionale, particulièrement protectrice en ce qui concerne les potentialités de migration des polluants vers la profondeur. L'arsenic et le zinc présents dans les résidus de combustion sont les métaux les plus mobiles. Les analyses réalisées sur des verticales montrent que l'impact du dépôt de résidus se mesure encore à 4 m de profondeur (fin des sondages), mais :

- plus de 90 % de la masse en arsenic est concentrée dans le premier mètre de terrain (résidus + sols pollués au contact du dépôt). Malgré la présence d'argile compacte au droit des résidus de combustion, une migration (modérée) est constatée en profondeur. Celle-ci s'explique par les teneurs exceptionnellement élevées en métaux dans les résidus. La migration par diffusion et/ou lixiviation des métaux mobiles renfermés dans ces résidus au sein de la partie la plus superficielle des argiles ont saturé les capacités d'adsorption des sols en surface permettant aux métaux mobiles de migrer plus profondément dans les argiles ;
- la mobilité des composés organiques est très faible compte tenu des faibles solubilités (PCDD & PCDF) et de la richesse des résidus en fractions charbonneuses qui sorbent efficacement les composés.

Contexte hydrogéologique local

Environ 100 m d'argile compacte du Callovien isolent les dépôts des premières couches de terrains potentiellement aquifères. Aucune venue d'eau significative n'a été observée en 2014 dans les 4 premiers mètres de terrain (fin des sondages).

Les ressources en eau sont protégées des polluants renfermés dans les résidus de combustion par cette couche d'argile au droit du site de la « Place à gaz ».

Les eaux superficielles

Les eaux superficielles drainant le site (ruisseaux en période de forte pluviométrie) ne font l'objet d'aucun usage connu.

Ces eaux et leurs sédiments sont marquées par des traces en arsenic et en zinc au moment des épisodes pluvieux, mais ces concentrations se dispersent et s'atténuent très rapidement vers l'aval.

Compatibilité avec les usages

La masse estimée d'arsenic dans les dépôts de surface est de 15 à 16 tonnes (dont 800-900 kg dans le « Dépôt nord ») pour un volume de résidus d'environ 1 500 -1 600 m³ (dont 60 - 70 m³ dans le « Dépôt nord »), volume auquel on peut ajouter environ 700 m³ correspondant aux 20 premiers centimètres de terrain naturel fortement pollués (concentration > 1 gAs/kg MS, totalisant 1,2 tonnes d'arsenic).

La pollution par les métaux lourds et les dioxines & furannes est circonscrite à l'environnement immédiat des dépôts.

Les différents résultats sur les sols obtenus au droit de la « Place à gaz », des fosses satellites et du « Dépôt nord », pour :

- les métaux et métalloïdes recherchés (arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb et zinc) ;
- les dioxines et furannes (PCDD, PCDF, PBDD, PBDF, PCB-*dioxin like*).

indiquent que les teneurs mesurées sont supérieures au fond géochimique local.

Conformément aux textes de la méthodologie du 8 février 2007, il convient de réaliser, sur la base du diagnostic effectué, une **Interprétation de l'État des Milieux** dans le but de vérifier la compatibilité environnementale du site avec les usages actuels constatés et connus.

Une Évaluation Qualitative des Risques Sanitaires (EQRS) a été réalisée afin d'évaluer, par le calcul et la comparaison avec les critères d'évaluation en vigueur, l'acceptabilité des risques sur des populations usagères. Le scénario retenu comme le plus plausible est celui de promenades occasionnelles auxquelles participent systématiquement le même enfant pendant les 6 premières années de sa vie (l'hypothèse d'une fréquentation du site sur la base de 1 jour par mois) avec une exposition aux sols de surface par ingestion non intentionnelle de particules de sols (porté main-bouche qui concerne les enfants en bas âge). Les composés considérés dans le calcul sont ceux d'effet connu sur la Santé et dont la présence anormale a été attestée dans les sols de surface de la « Place à gaz » (et de ses abords) : il s'agit de l'arsenic total (toxique et cancérigène par ingestion), du plomb, du zinc, du cadmium, du mercure et des PCDD & PCDF (cancérigènes). Les teneurs retenues sont les concentrations moyennes sur la zone d'étude (personne en déplacement). Ce calcul ne prend pas en compte, de façon volontairement conservatoire, la clôture présente autour de la clairière, qui empêche tout accès involontaire au site. Le calcul d'EQRS a été réalisé en considérant les Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) correspondant aux connaissances toxicologiques du moment. Les résultats ont été comparés aux critères d'évaluation des risques recommandés par le Ministère de l'Écologie dans la Note aux Préfets (et ses Annexes) du 08 février 2007. Au regard de ces critères et éléments de calcul, les risques calculés ne sont pas acceptables. Le risque est « porté » par l'arsenic et ses effets cancérigènes (VTR très basse), en lien avec les teneurs élevées des sols du site en arsenic.

Différents éléments doivent être mis en avant pour éclairer l'utilisation des résultats du calcul, parmi lesquels (liste non exhaustive) :

- le fait que l'Arsenic est considéré dans le calcul (ce qui est sécuritaire) comme totalement assimilable (biodisponible et bioaccessible) par l'organisme ;
- le fait que les teneurs à l'origine du dépassement du critère d'acceptabilité du risque sont celles des sols localisés au sein du périmètre clos (en date de janvier 2016). Le calcul valide et justifie le périmètre d'interdiction d'accès ;

- les teneurs résiduelles des sols de surface hors du périmètre clos (100 - 1 000 mg As/kg MS) sont compatibles avec les usages recensés ou pris en compte, ou conduisent à des risques résiduels calculés acceptables ou entachés d'incertitudes (qui ne permettent pas de conclure) ;
- de nombreuses substances et composés présents dans les sols n'ont pu être pris en compte dans les calculs, leurs effets sur la santé humaine n'étant pas connus.

Au vu des résultats de l'évaluation des risques, de l'impact, même modéré et intermittent du site sur le milieu aquatique de surface et de la présence de substances et éléments dont les effets potentiels ne sont pas connus à ce jour, la réalisation de mesures de gestion visant à réduire ou supprimer les risques et améliorer la situation environnementale globale du site et de ses abords apparaît pertinente.

Les mesures de gestion envisagées ici doivent permettre de supprimer les possibilités de contact avec les matériaux hautement pollués (concentrations supérieures à 1 000 mg/kg MS en As), de réduire ou supprimer les possibilités de ruissellement et d'entraînement des polluants vers les eaux superficielles et leurs sédiments, et s'inscrire globalement dans une approche d'amélioration de l'état des milieux.

Les informations collectées tendent à démontrer que :

- dans le contexte du site, les risques sanitaires sont principalement liés à une exposition aux sols de surface par ingestion non intentionnelle de particules de sols (porté main-bouche qui concerne les enfants en bas âge) ;
- les composés identifiés au droit du site ont peu migré en profondeur sur une période d'un siècle, et que les concentrations décroissent très vite avec la profondeur ;
- la nappe est protégée par une épaisseur de matériau argileux de l'ordre de 100 m vis-à-vis de tout risque de migration depuis la zone de la « Place à gaz » ;
- la présence de résidus pyrotechniques est retrouvée (bien qu'en faibles concentrations et de façon épisodique) dans le réseau hydrographique proche.

À partir de ces considérations, plusieurs scénarios de gestion peuvent être envisagés :

- rassembler au droit de la clairière centrale l'essentiel des dépôts périphériques et des franges de la clairière (90 % du tonnage d'arsenic du site), puis recouvrir le dôme ainsi créé par une couverture similaire à celle mise en place pour les centres d'enfouissement de déchets qui permettrait de les confiner. Une clôture pérenne associée à une servitude, complèteraient le dispositif. En pratique, il s'agirait de décapier 50 à 70 cm de matériaux et de sol pollués au droit de chaque dépôt afin de ne laisser en place que des sols présentant des concentrations inférieures à 1 000 mg/kg MS en Arsenic. Les matériaux extraits seraient remplacés par des matériaux d'apport extérieur qui empêcherait tout contact direct avec les sols restant en place. Cette solution permettrait de prévenir tout risque de contact, d'empêcher toute infiltration des eaux météoriques (même si la migration des polluants vers la profondeur apparaît comme très limitée) et d'empêcher tout entraînement par ruissellement. Elle suppose par contre, outre la mise en place d'une servitude, la nécessité d'assurer un entretien du site (clôture, entretien de la végétation) ; en première approche, le coût du chantier est évalué entre 200 k€ et 300 k€. Ces évaluations sont à affiner après un dimensionnement *ad hoc* du dispositif ;
- évacuer hors site, vers un lieu de stockage /confinement (par exemple un terrain dont l'État aurait la maîtrise foncière), constitue une variante plus coûteuse du scénario précédent (excavation des sols, transport sécurisé et construction des alvéoles de confinement) qui présente par ailleurs des écueils d'ordre réglementaire (quel statut pour ce confinement ?) ;

- traiter hors site l'ensemble des terres, solution qui impliquerait l'excavation des sols, leur transport sécurisé puis leur incinération / stabilisation / solidification pour être stockés *in fine* en installation de stockage pour déchets dangereux.

La première solution proposée répond aux exigences de gestion formulées (elle permet de supprimer tout risque de contact avec les usagers, de prévenir tout entraînement vers l'extérieur sous l'effet du ruissellement) en conservant la proportionnalité entre les enjeux sanitaires et environnementaux et les coûts associés, et d'inscrire le site dans une perspective d'amélioration globale de l'état des milieux, sans générer de plus amples impacts environnementaux (les autres options envisagées génèrent toutes un bilan environnemental beaucoup plus défavorable) et sans nécessiter de recourir à des moyens économiques disproportionnés (le coût d'une opération hors site a été chiffré entre 5 à 7 millions d'euros).

Remerciements

Le BRGM tient à remercier Monsieur Henry Bélot (ancien Chef de Centre du Service du déminage de Metz) qui a réalisé un travail un important travail d'expertise des éléments de munitions collectés par le BRGM à la faveur de ses interventions sur le terrain, ce qui a permis d'identifier les types de munitions auxquels ces éléments appartenaient.

Le BRGM tient également à remercier le laboratoire Labex Voltaire (ANR-10-LABX-100-01) et Tobias Bausinger (Envilytix GmbH, Allemagne) pour son soutien à l'expertise.

Sommaire

1. Contexte et objectifs.....	21
1.1 INTRODUCTION	21
1.2 OBJECTIFS DE LA MISSION D'INTERPRÉTATION DE L'ÉTAT DES MILIEUX	21
1.3 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE (NORMES, GUIDES ET RÈGLES DE L'ART)	22
1.4 DÉMARCHE SUIVIE POUR LE DIAGNOSTIC	23
1.5 RÉUNIONS D'AVANCEMENT	23
1.5.1 Réunion de lancement	23
1.5.2 Visite de site	24
1.5.3 Autres réunions.....	24
2. Étude documentaire	25
2.1 SITUATION DU SITE.....	25
2.1.1 Situation géographique	25
2.1.2 Occupation du site et des abords immédiats.....	26
2.2 CONTEXTE DU SITE	26
2.2.1 Sources d'informations consultées.....	26
2.2.2 Topographie.....	26
2.2.3 Contexte géologique	26
2.2.4 Contexte hydrogéologique et ressources en eaux souterraines	28
2.2.5 Contexte hydrologique	29
2.2.6 Contexte climatique	29
2.2.7 Zones protégées et d'intérêt écologique	30
3. Historique du site de la « Place à gaz ».....	31
3.1 SOURCES D'INFORMATIONS CONSULTÉES.....	31
3.1.1 Fonds d'archives consultés et références bibliographiques.....	31
3.1.2 Expertise pyrotechnique	31
3.2 SORTIE DE LA GRANDE GUERRE	31
3.3 FILIÈRES D'ÉLIMINATION DES MUNITIONS.....	33
3.4 HISTORIQUE DES ACTIVITÉS DE DÉSOBUSAGE DANS LE SECTEUR DE SPINCOURT.....	36
3.4.1 Le canton de Spincourt dans la Grande guerre.....	36
3.4.2 Phase de désobusage 1919-1925	39
3.4.3 Phase de désobusage post 1925.....	43

3.5	TYPOLOGIE ET NATURE DES MUNITIONS DÉTRUITES SUR LE SITE DE LA « PLACE À GAZ »	46
3.5.1	Munitions toxiques à Croix bleue (« <i>Blaukreuz</i> »), propriétés et effets des arsines vomitives	47
3.5.2	Obus à chargement chimique suffocant et/ou vésicant	53
3.5.3	Obus à chargement lacrymogène de type « T-Stoff »	55
3.6	PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES TOXIQUES DE GUERRE IDENTIFIÉS.....	56
3.6.1	Agents toxiques arséniés	56
3.6.2	L'Ypérite	58
4.	Investigations réalisées et résultats.....	61
4.1	PHASAGE DE L'ÉTUDE	61
4.2	PHASE D'ORIENTATION : SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES EXISTANTES ET VISITE DÉTAILLÉE DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE	62
4.2.1	Visite du site	62
4.2.2	Vulnérabilité des milieux et schéma conceptuel préliminaire	64
4.3	PHASE 2. DIAGNOSTIC DE LA QUALITÉ DES SOLS DE SURFACE	68
4.3.1	Première étape : identification des cortèges de polluants en présence et caractérisation des dépôts « <i>satellites</i> ».....	68
4.3.2	Seconde étape: caractérisation des extensions en surface des pollutions de la tache centrale et des dépôts « <i>satellites</i> ».....	80
4.4	PHASE 3 : DIAGNOSTIC DES SOLS EN PROFONDEUR	99
4.4.1	Sécurité et préparation du chantier	99
4.4.2	Investigations : prélèvements et analyses de sols réalisés.....	101
4.4.3	Description lithologique	103
4.4.4	Résultats analytiques bruts sur les sols de profondeur	106
4.4.5	Investigations et résultats sur les végétaux.....	110
4.4.6	Découverte et investigation du « <i>Dépôt nord</i> ».....	111
4.4.7	Bilan	115
4.5	ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES.....	116
4.5.1	Campagne de terrain sur les sols du « <i>Dépôt nord</i> »	116
4.5.2	Campagnes sur les sédiments et les eaux superficielles (janvier à mars 2015)	120
4.5.3	Résultats analytiques bruts sur les différents milieux	123
4.6	BILAN DES ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES	128
5.	Interprétation des résultats et modèle de fonctionnement.....	129
5.1	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE SOLS	129
5.1.1	Référentiel de fond géochimique local	129
5.1.2	Détermination du fond géochimique local	129
5.1.3	Interprétation par rapport au fond géochimique local	132
5.1.4	Interprétation des analyses en dioxines et furannes.....	137
5.1.5	Évaluation de la qualité des sols en profondeur au droit de la « <i>Place à gaz</i> »	145
5.1.6	Caractérisation physico-chimique approfondie de sol de surface de la « <i>Place à gaz</i> »	153

5.2 DISTRIBUTION DES TENEURS ET BILAN MASSIQUE EN ARSENIC DANS LES SOLS DE SURFACE	160
5.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES SÉDIMENTS	162
5.4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES EAUX SUPERFICIELLES	164
5.5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES VÉGÉTAUX	166
5.6 CONCLUSION ET SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC ENVIRONNEMENTAL	166
5.6.1 Description du site et reconstitution de son mode d'exploitation.....	166
5.6.2 Contexte environnemental	167
5.6.3 Bilan massique	169
6. Interprétation de l'État des Milieux (IEM) et orientations de gestion	171
6.1 CONTEXTE DE GESTION	171
6.2 ÉVALUATION QUALITATIVE DES RISQUES SANITAIRES (EQRS).....	171
6.2.1 Méthodologie	171
6.2.2 Substances à effets de seuil	171
6.2.3 Substances sans effets de seuil.....	172
6.2.4 Critères d'évaluation de l'acceptabilité des risques	172
6.2.5 Milieux d'exposition et usages considérés	173
6.2.6 Composés et teneurs d'exposition retenus	174
6.2.7 Choix des VTR.....	175
6.2.8 Détermination de l'exposition et calcul des risques	176
6.2.9 Analyse des incertitudes	177
7. Synthèse & conclusions	179
7.1 CONCLUSIONS DE L'EQRS	179
7.2 MESURES ET ORIENTATIONS DE GESTION	179
7.2.1 Rappel	179
7.2.2 Orientations de gestion	179

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du site d'étude - Extrait carte IGN Douaumont (Vaux-Devant-Damploup) (1/25 000).....	25
Figure 2 : Coupe géologique au point BSS 01362X0002/NH (Infoterre).....	27
Figure 3 : Diagramme ombrothermique sur la station de Metz-Frescaty (1961-1990).....	29
Figure 4 : Préparation d'un fourneau de pétardement par la Reclamation and Demolition Department, 1st Army. Jan. 13,1919. Meuse (National Archives, Washington, USA).	35
Figure 5 : Filières d'élimination des munitions après la Première Guerre mondiale (d'après Bausinger 2011, non publié, modifié).	36
Figure 6 : Carte spéciale des régions dévastées (feuille METZ nord-ouest, 1920) et carte de la Bundesarchiv (Allemagne) montrant la position des batteries allemandes dans le secteur de Spincourt.	38
Figure 7 : Page 1 de la lettre du Général REGNIER du 27 mars 1919, (AD55, cote 10R82).	39
Figure 8 : Position et organisation du dépôt de munitions de la Gélinerie (Inspection des Eaux-et- Forêts, lettre du 27 juillet 1920).	41
Figure 9 : Position du dépôt de munitions de la Gélinerie (lettre du 15 juillet 1920, C Thomas).....	41

Figure 10 :	Papier courrier de la société Pickett & Fils du 23 décembre 1926.	44
Figure 11 :	Fioles d'arsines et leurs bouchons issus d'obus à « Croix bleue » ; aperçu photographique.	48
Figure 12 :	Obus à « Croix bleue » de 150 mm ; Service Historique de la Défense, modifié.	49
Figure 13 :	Obus à « Croix bleue » de 77 mm avec écorché (source : H. Bélot)	50
Figure 14 :	Munition à « Croix bleue » de 105 mm et éléments de munitions découverts sur la « Place à gaz » (source : H. Bélot, novembre 2014).	51
Figure 15 :	Éléments de fusées d'artillerie et d'amorces collectés sur la « Place à gaz » (identification : H. Bélot, novembre 2014).	53
Figure 16 :	Fusée EKZ 17 avec pointe en fonte aciérée pour obus de 77 mm.	54
Figure 17 :	Fusée EKZ 17 plan et reconstitution.	54
Figure 18 :	Obus allemand lacrymogène de type T.	55
Figure 19 :	Dégradation et transformation des phénylarsines.	58
Figure 20 :	Carte positionnant les principaux dépôts de munitions et la « Place à gaz ».	59
Figure 21 :	Photographies prises lors de la visite de site.	63
Figure 22 :	Schéma de la « Place à gaz » et de ces environs annoté à partir des observations faites lors de la visite du 15 avril 2014 (le nord est en bas du croquis).	64
Figure 23 :	Schéma conceptuel préliminaire de la « Place à gaz »	67
Figure 24 :	Photographies de SPIN01 et SPIN03.	68
Figure 25 :	Plan de localisation des points de prélèvements.	69
Figure 26 :	Photographie d'un appareil à fluorescence X (11/06/14).	81
Figure 27 :	Mode de mesure FX in situ (directe) sur le sol après avoir dégagé la couverture végétale.	82
Figure 28 :	Localisation des points de mesures réalisés au moyen de l'analyseur portable FX de type NITON© (11/06/14).	83
Figure 29 :	Cartographies de répartition des teneurs pour les éléments arsenic, cuivre, plomb et zinc (mesures du 12/06/14).	85
Figure 30 :	Aperçu photographique des résidus de combustion au droit de la tache centrale de la « Place à gaz ».	86
Figure 31 :	Aperçu photographique des résidus au droit de la fosse « satellite » n° 1 (10 m au nord-est de la clairière).	87
Figure 32 :	Plan d'implantation des points de prélèvements de sols de surface sur fond topographique (avec précision des cotes altimétriques en m NGF).	88
Figure 33 :	Photographies des points de prélèvements SED01 (à gauche) et SED02 (à droite).	89
Figure 34 :	Plan d'implantation des points de prélèvement des sédiments.	90
Figure 35 :	Plan récapitulatif de la répartition des analyses en arsenic et plomb dans les sols de surface (campagnes de phase 1 et 2).	97
Figure 36 :	Localisation des points de prélèvement et résultats sur les sédiments et les eaux superficielles (campagnes de phase 2).	98
Figure 37 :	Travaux de sondage à la pelle mécanique ; aperçu photographique.	100
Figure 38 :	Plan d'implantation des sondages de sol et observations de terrain.	104
Figure 39 :	Profils des sondages à la pelle mécanique ; aperçu photographique.	105
Figure 40 :	Aperçu photographique des sols du « Dépôt nord » (avec mesures FX (en haut à droite) et détection géomagnétique (en haut à gauche)).	117

Figure 41 : Localisation des points de mesures à la fluorescence X NITON sur les sols au droit du « Dépôt nord »	118
Figure 42 : Localisation des prélèvements de sédiments (28/01/2015).	121
Figure 43 : Localisation des prélèvements d'eaux superficielles sur fond de carte IGN (campagnes de janvier, février et mars 2015).	121
Figure 44 : Graphique représentant la distribution des teneurs en arsenic dans les sols.	130
Figure 45 : Graphique représentant la distribution des teneurs en plomb dans les sols.	131
Figure 46 : Graphique représentant la distribution des teneurs en zinc dans les sols.	131
Figure 47 : Relations entre les teneurs en zinc et en cadmium des sols de la « Place à gaz » et du « Dépôt nord »	134
Figure 48 : Cartes par krigeage de la répartition des teneurs en arsenic, zinc, plomb et cuivre.	135
Figure 49 : Profil de concentrations relatives des 17 congénères toxiques (18 sols du site).	139
Figure 50 : Profil de concentrations relatives du sol TC3 et celui d'un sol moyen a) homologues, b) 17 congénères toxiques, mettant en évidence la très large contribution des furannes sur les sols du site.	140
Figure 51 : Toxicité TEQ et teneur en matière organique (échelle log) a) sans et b) avec étiquette désignant les échantillons de sols	140
Figure 52 : Discrimination des sols par CAH (calculée sous excel-stat à partir de la méthode de Gotz, 2007), a) dendrogramme b) liste des échantillons classés.	141
Figure 53 : Évolution des profils dioxines/furannes avec la profondeur pour les deux sondages.	142
Figure 54 : Contribution relative des PCB-dl du sol SPIN03 a) concentration, b) toxicité TEQ-OMS 2005.	143
Figure 55 : Contribution relative des 17 congénères de dioxines/furannes bromés (quatre échantillons) - PBCD & PBDF.	144
Figure 56 : Profils des fouilles SPM01 à SPM07 représentant la répartition des concentrations (en mg/kg) en arsenic, plomb et zinc selon la profondeur (en m).	146
Figure 57 : Profils de sols SPM01, SPM03 et SPM04 rattachés au système NGF.	147
Figure 58 : Distribution des teneurs en métaux sur le profil SPM06.	148
Figure 59 : Profil lithologique, sondage SPM06, Fosse Nord-est	149
Figure 60 : Répartition des concentrations en arsenic, zinc et cuivre dans le sol de surface de la « Place à gaz » et localisation des points de prélèvement.	153
Figure 61 : Corrélation entre As et les éléments Fe, Zn, Cu et Pb dans les différentes fractions granulométriques des quatre sols étudiés.	155
Figure 62 : Observation au MEB-EDS du sol I, charbon et grain riche en métaux.	157
Figure 63 : Observation au MEB-EDS d'une particule de charbon du sol I.	157
Figure 64 : Minéraux cristallisés à la surface d'un grain du sol I.	158
Figure 65 : Phase amorphe observée à la surface d'un grain du sol I.	158
Figure 66 : Représentation synthétique des résultats de granulochimie (ACP) et d'observations MEB-EDS.	159
Figure 67 : Représentation en isoteneurs de la distribution de l'arsenic dans les sols de surface (avril 2014-octobre 2014).	161
Figure 68 : Critères d'évaluation de l'acceptabilité des risques (source : Ministère de l'Écologie). ..	172
Figure 69 : Schéma de principe du « capping »	182

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Principales propriétés des arsines vomitives Clark I et Clark II et de composés phénylarséniés (d'après Missiaen <i>et al.</i> , 2010, modifié).....	57
Tableau 2 :	Programme analytique pour les échantillons de sols.....	70
Tableau 3 :	Programme analytique pour les échantillons de sédiments.....	71
Tableau 4 :	Programme analytique pour les échantillons d'eaux superficielles (campagne du 15/04/14).	71
Tableau 5 :	Résultats analytiques sur les sols - campagne du 15/04/14.....	77
Tableau 6 :	Résultats du screening de recherche des liaisons organiques sur SPIN01.	77
Tableau 7 :	Résultats du screening de recherche des liaisons organiques sur SPIN02, 03, 04, 05.	78
Tableau 8 :	Résultats analytiques sur les sédiments - campagne du 15/04/14.....	79
Tableau 9 :	Résultats analytiques sur les eaux superficielles - campagne du 15/04/14.	80
Tableau 10 :	Programme analytique pour les échantillons de sols.....	89
Tableau 11 :	Programme analytique pour les échantillons de sédiments (campagne du 15/04/15). ..	90
Tableau 12 :	Résultats analytiques sur les sols de surface (campagne du 10/06/14).....	93
Tableau 13 :	Résultats analytiques sur les sols de surface (campagne du 10/06/14).....	94
Tableau 14 :	Résultats analytiques sur les sédiments (campagne du 10/06/14).....	95
Tableau 15 :	Programme analytique pour les échantillons de sols.....	102
Tableau 16 :	Résultats d'analyses en métaux sur brut et lixiviat et ions chlorate et perchlorate sur lixiviat dans les sols.....	108
Tableau 17 :	Résultats d'analyses en dioxines (PCDD) et furannes (PCDF) sur les sols.	109
Tableau 18 :	Résultats d'analyses en agents chimiques de combat et explosifs dans les sols.	110
Tableau 19 :	Résultats d'analyses sur les champignons.	111
Tableau 20 :	Programme analytique sur les échantillons de sols du « Dépôt nord ».	111
Tableau 21 :	Résultats analytiques pour les échantillons D8 et D9 collectés au droit du « Dépôt nord » (octobre 2014).....	114
Tableau 22 :	Résultats des mesures in situ (par fluorescence X) sur les sols au droit du dépôt nord.	119
Tableau 23 :	Programme analytique pour l'échantillon de sol du « Dépôt nord » (campagne 27/01/15).	120
Tableau 24 :	Récapitulatif des programmes d'analyses sur les sédiments (janvier 2015) et les eaux superficielles (janvier à mars 2015).....	122
Tableau 25 :	Résultats analytiques sur l'échantillon de sol prélevé au droit du « Dépôt nord » (28/01/15).	124
Tableau 26 :	Résultats des analyses sur les échantillons de sédiments (28/01/15).....	126
Tableau 27 :	Résultats des analyses sur les eaux superficielles (campagnes de janvier, février et mars 2015).	127
Tableau 28 :	Répartition statistique pour les 8 métaux et métalloïdes dans les sols de surface.	130
Tableau 29 :	Tableau d'interprétation des résultats d'analyses de sols par rapport au fond géochimique local pour les métaux et métalloïdes.....	133
Tableau 30 :	Comparaison des résultats de sols avec le fond géochimique local au droit de la zone du « Dépôt nord ».	136

Tableau 31 : Teneurs en dioxines-furannes (PCDD & PCDF) et COT des sols (valeurs extrêmes min/max en gras).....	138
Tableau 32 : Teneurs en dioxines/furannes bromés de 4 sols (et rappels chlorés en Tableau 31) ..	144
Tableau 33 : Répartition des teneurs en As, Pb et Zn sur brut et sur lixiviat pour la fouille SPM02..	150
Tableau 34 : Répartition des teneurs en As, Pb et Zn sur brut et sur lixiviat pour la fouille SPM06..	150
Tableau 35 : Profils de sols pour les explosifs et toxiques de guerre pour les fouilles SPM01 et SPM06 (en jaune les valeurs >= 1mg/kg MS, en rouge celles >= 10 mg/kg MS).	152
Tableau 36 : Résultats d'analyse en granulochimie des 4 sols de surface, polluants inorganiques.	154
Tableau 37 : Résultats d'analyse en granulochimie des 4 sols de surface, composés majeurs	156
Tableau 38 : Tableau d'interprétation des résultats sur les sédiments.	163
Tableau 39 : Tableau d'interprétation des échantillons d'eaux superficielles prélevés sur l'ensemble du diagnostic.	165
Tableau 40 : Teneurs d'exposition retenues pour l'EQRS.Paramètres d'exposition retenus.	175
Tableau 41 : Résultats de l'exposition pour le scénario d'ingestion de sols.	176
Tableau 42 : Options de gestion des sols et matériaux du site de la « Place à gaz ».....	181

Liste des annexes

Annexe 1 : Plan topographique de la « Place à gaz » et de ses abords	183
Annexe 2 : Extrait de la carte géologique au 1/50 000	189
Annexe 3 : Localisation des puits, sondages et piézomètres du proche environnement de la « Place à Gaz ».....	191
Annexe 4 : Profils des sondages réalisés à la pelle mécanique (octobre 2010) (SMP03, SPM06, SPM07)	197
Annexe 5 : Toxicologie des substances et éléments identifiés dans les sols et matériaux de la « Place à gaz »	203

Liste des sigles et abréviations

ACP	Analyse en composantes principales
AD	Archives Départementales
AERM	Agence de l'Eau Rhin Meuse
ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, Alimentation, Environnement, Travail
ARS	Agence régionale de Santé
BIP	Blown-in-Place
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BSS	Banque du Sous-sol
CAH	Classification Ascendante Hiérarchisée
CIRC	Centre International de Recherche sur le Cancer
COT	Carbone Organique Total
DA	Diphénylchlorarsine
DC	Diphénylcyanoarsine
DDT	Direction Départementale des Territoires
DIRECCTE	Directions Régionales des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi
DJA	Dose Journalière Admissible
DJE	Dose Journalière d'Exposition
DPAA	DiPhenylArsinic Acid
DREAL	Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DRX	Diffraction de rayons X
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
EKZ	Empfindlicher Kanone Zünder
EPI	Équipement de Protection Individuel
EQRS	Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires
ERI	Excès de Risque Individuel
ERU	Excès de Risque Unitaire
EST	Étude de Sécurité du travail
GC-MS	Gas Chromatography – Mass Spectrometry
GQG	Grand Quartier Général
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCSP	Haut Conseil de la Santé Publique,
HPLC	High Performance Liquid Chromatography

ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry
IEM	Interprétation de l'État des Milieux
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INVS	Institut National de Veille sanitaire
IPE	Institut des Poudres et Explosifs
ISDD	Installations de Stockage des Déchets Dangereux
ISTO	Institut des Sciences de la Terre d'Orléans
MEB	Microscope Électronique à Balayage à sonde
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie
MS	Matière Sèche
NAK	National Archives Kew gardens, Londres
NGF	Nivellement Général de la France
OB	Open-Burning
OCDD	OctaChloroDibenzoDioxine
OCDF	OctaChloroDibenzoFuranne
OD	<i>Open-Detonation</i>
OMS	Organisation Mondiale pour la Santé
ONF	Office National des Forêts
pXRF	Spectromètre de fluorescence X portable
PBDD	Polybromodibenzo-p-dioxines
PBDF	Polybromodibenzo-furanes
PCB	PolyChloroBiphényles
PCDD	Polychlorodibenzo-p-dioxines
PCDF	Polychlorodibenzo-furanes
PCR	Personne Compétente en Radioprotection
QD	Quotient de Danger
SDIS	Service Départemental d'Incendie et de Secours
SHD	Service Historique de la Défense
SPM	Sondage à la Pelle Mécanique
TEQ	Système d'Equivalence Toxique
TGD	ThioDiGlycol
TNT	2,4,6-TriNitroToluène
US EPA	United State Environmental Protection Agency
UT2A	Centre Technologique en Chimie Analytique (Ultra Traces Analyses Aquitaine)
UX	Unexploded Ordnance
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

1. Contexte et objectifs

1.1 INTRODUCTION

Le site concerné par l'étude, connu sous le nom de « Place à gaz », est situé en plein cœur de la Forêt de Spincourt, sur la commune de Gremilly (55). Une quantité importante de munitions chimiques allemandes datant de la 1^{ère} Guerre mondiale a été détruite sur le site, après la fin de la Première Guerre mondiale.

Le site est une clairière qui se caractérise par une zone centrale d'environ 1 000 m², vierge de végétation, montrant une couleur noire, des éléments métalliques et des scories. En périphérie, une zone de 2 000 à 3 000 m², recouverte de mousses, lichens ou herbes est présente.

Diverses études ponctuelles et partielles ont été réalisées depuis 2004 afin de connaître les composés issus de cette activité de destruction présents sur le site et de définir les milieux potentiellement impactés.

Le site est clôturé depuis 2005 afin d'interdire son accès au public. Cette interdiction a été formalisée par un Arrêté Préfectoral. La clôture a été renforcée en 2014 par la pose (par l'Office National des Forêts) d'une barrière de barbelés militaires (*Anti-Intrusion type Réseau Défensif Concertina*).

Des discussions ont été engagées à partir de 2010 pour définir un programme d'étude portant sur la qualité des sols et des milieux en tenant compte à la fois des investigations antérieures, et à la fois des connaissances récentes dans le domaine des pollutions d'origine pyrotechnique.

Aux termes de ces échanges entre les services de l'État, il a été demandé au BRGM de réaliser une étude ayant pour objectifs de délimiter et de caractériser la zone de pollution apparaissant comme la plus concentrée, pour évaluer les risques d'exposition et les milieux à protéger.

Cette étude devait *in fine* conduire, si nécessaire, à la définition de mesures de gestion visant à réduire ou supprimer les risques et/ou les impacts du site sur son environnement.

1.2 OBJECTIFS DE LA MISSION D'INTERPRÉTATION DE L'ÉTAT DES MILIEUX

La mission a été réalisée conformément à la norme de référence NF X 31-620-2 : « *Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués - Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle (domaine A : Études, assistance et contrôle)* ». Elle relève :

- du domaine de prestations A - Études, assistance et contrôle ;
- de la prestation « IEM » - Interprétation de l'État des Milieux ;

Conformément aux demandes de la Préfecture de la Meuse et de l'Agence Régionale de Santé (ARS) de Lorraine, cette mission a porté sur les points suivants :

- une visite de site (codifiée A100 selon la norme NF X30-620-2) ;
- une étude historique, documentaire et mémorielle (codifiée A110 selon la norme NF X31-620-2) ;
- une étude de vulnérabilité des milieux (codifiée A120 selon la norme NF X31-620-2) ;
- des prélèvements, mesures et analyses sur sols (codifiés A200 selon la norme NF X31-620-2) ;

- des prélèvements, mesures et analyses sur eaux souterraines (codifiés A210 selon la norme NF X31-620-2) ;
- des prélèvements, mesures et analyses sur eaux superficielles et sédiments (codifiés A220 selon la norme NF X31-620-2) ;
- l'évaluation des impacts sur les enjeux à protéger (A300, A310, A320 et A330).

Les diagnostics des sols et des eaux de surface et l'Interprétation de l'État des Milieux visaient 1) à délimiter le zone de pollution concentrée (extension en surface, en profondeur, teneurs en polluants rencontrées), 2) à rechercher les composés impliqués dans cette pollution, 3) à comprendre leur dynamique (mobilité, etc.) et 4) à évaluer les risques d'exposition d'éventuels usagers et d'impact du site sur des milieux et/ou enjeux à protéger.

1.3 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE (NORMES, GUIDES ET RÈGLES DE L'ART)

La présente étude est conforme à :

- la norme de référence : NF X 31-620-1, « Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués - Partie 1 : Exigences » ;
- la norme générale NF X31-620-2 « Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués - Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle - Chapitre 5, « Contenu de l'offre » ;
- la norme NF X 31-620-2, Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués - Partie 2 : Exigences dans le domaine des prestations d'études, d'assistance et de contrôle (domaine A : Études, assistance et contrôle).

Les principaux textes normatifs de référence (liste non exhaustive) sont :

Pour les sols et sédiments :

- norme NF ISO, 10381-1, norme AFNOR X31-008-11, 2003, Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 1 : lignes directrices pour l'établissement des programmes d'échantillonnage, mai 2003 ;
- norme NF ISO 10381-2, norme AFNOR X31-008-2, 2003, Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 2 : lignes directrices pour les techniques d'échantillonnage, mars 2003 ;
- norme NF ISO, 10381-5, norme AFNOR X31-008-5, 2005, Qualité du sol - Échantillonnage - Partie 5 : lignes directrices pour la procédure d'investigation des sols pollués en sites urbains et industriels, décembre 2005 ;
- norme ISO 5667-12, Qualité de l'eau - échantillonnage - Partie 12 : guide général pour l'échantillonnage des sédiments, 1995.

Pour les eaux :

- norme FD X 31-615, Qualité du sol - Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions - prélèvements et échantillonnage des eaux souterraines dans un forage ;
- norme ISO 5667-11, Qualité de l'eau - échantillonnage - Partie 11 : guide général pour l'échantillonnage des eaux souterraines, avril 2009 ;
- norme ISO 5667-6, Qualité de l'eau - échantillonnage - Partie 6 : lignes directrices pour l'échantillonnage des rivières et des cours d'eau, juillet 2005.

L'étude du BRGM suit les recommandations des guides méthodologiques du Ministère de l'Écologie (note aux Préfets du 08/02/2007 et ses annexes, cf. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-et-sols-pollues-.html>):

- visite de site ;
- diagnostic du site ;
- l'interprétation de l'État des Milieux (IEM).

1.4 DÉMARCHE SUIVIE POUR LE DIAGNOSTIC

Le BRGM a réalisé entre avril 2014 et mars 2015, sous le pilotage de la Préfecture de la Meuse (et sur un financement Agence de l'Eau Rhin-Meuse, ARS lorraine et BRGM), un diagnostic scientifique et technique du site et de son proche environnement, en couplant des approches archivistiques, pyrotechniques (identification d'éléments de munitions), et analytiques (mesures sur des échantillons de sols, d'eaux, etc.).

Dans un premier temps, une synthèse de l'état des connaissances environnementales a été effectuée (« *étude documentaire* ») portant notamment sur le contexte géologique et hydrogéologique.

Cette étude bibliographique a été suivie d'une étude historique visant à connaître l'origine et les modalités d'exploitation du site de la « Place à gaz ».

Des investigations de terrains (« *diagnostic* ») ont ensuite été proposées sur la base de ces connaissances et études.

Le diagnostic, réalisé de façon progressive en 4 phases, a porté sur la qualité des sols de surface et de profondeur (jusqu'à 4 m) au droit et aux abords de la clairière, ainsi que sur la qualité des eaux de surface (et de leurs sédiments) drainant les zones réputées polluées :

- **la phase 1** exploratoire a permis de définir et de valider le programme analytique le mieux adapté au contexte et aux substances ;
- **la phase 2** avait pour objectif de circonscrire au mieux les pollutions de surface à partir des informations disponibles, et d'orienter ainsi la répartition des investigations de phase 3 ;
- **la phase 3** comprenait les opérations de sondage et de diagnostic des sols en profondeur (jusqu'à 4 m) ;
- et **la phase 4** avait comme objectif, à partir de compléments aux phases antérieures, de lever certaines incertitudes.

Les résultats ont été partagés à l'issue de chacune des phases avec les services de la Préfecture et les donneurs d'ordre.

1.5 RÉUNIONS D'AVANCEMENT

1.5.1 Réunion de lancement

Une réunion de lancement du projet s'est tenue le 15/04/2014 dans les locaux de la sous-préfecture de Verdun, en présence des représentants de la Préfecture de la Meuse, de l'ARS Lorraine, du SDIS 55, de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, de la DDT55, de Thomas Bausinger (Société Envilytix), de la DREAL 55, de l'ONF, de la Sécurité civile (Chef du Centre de Déminage de Metz) et du BRGM (Direction régionale et représentant du centre technique d'Orléans). Cette réunion a notamment permis de définir précisément les éléments de la mission confiée au BRGM et les attentes de la Préfecture et de l'ARS et de constituer un « *comité d'experts* » pour le suivi des opérations.

1.5.2 Visite de site

Une première visite du site a été réalisée le 15/04/2014 par le BRGM en présence de l'ONF.

1.5.3 Autres réunions

Le premier comité d'experts s'est réuni le 03/06/14 afin de préciser la nature et le dimensionnement des investigations, d'affiner le protocole d'hygiène et sécurité (protocole d'intervention « *Site et Sols Pollués* » en environnement pyrotechnique), ainsi que le planning d'intervention. La DIRRECTE (Direction régionale des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi) et la Préfecture de la Meuse ont saisi l'IPE (Institut des Poudres et Explosifs) afin d'expertiser et de valider le protocole (EST « *Étude de Sécurité du travail* ») proposé par le BRGM et l'entreprise CARDEM-Pyro en charge de la réalisation de tranchée de sondage au droit de la « Place à gaz ». Ce comité d'expert a notamment décidé d'organiser une réunion entre les différentes parties prenantes pour étudier le protocole d'hygiène et sécurité à mettre en place avant les investigations. Elle a eu lieu le 24/06/14. Des réunions de pilotage et d'avancement sont ensuite venues jalonner le processus d'études et d'investigations : 19 novembre 2014, 18 décembre 2014, 24 mars 2015 et le 28 avril 2015.

2. Étude documentaire

L'étude documentaire présentée ci-après reprend les termes et les informations du rapport d'expertise du BRGM n° RP-58084-FR « État des lieux du site pollué la « place à gaz », dans la Forêt domaniale de Spincourt, en vue de l'établissement d'un programme d'étude, commune de Gremilly (55) » d'avril 2010.

2.1 SITUATION DU SITE

2.1.1 Situation géographique

Le site de la « Place à gaz » se situe au cœur de la Forêt domaniale de Spincourt au nord-est, au lieu-dit « tranchée de la Gélinerie » de la commune de Gremilly et au sud de la partie est de l'étang du Haut Fourneau. Il est accessible par une route forestière (appelée Tranchée de la Gélinerie), puis par un sentier. Le site est localisé en position sommitale à environ + 212,5 m NGF. La localisation du site est présentée sur la Figure 1.

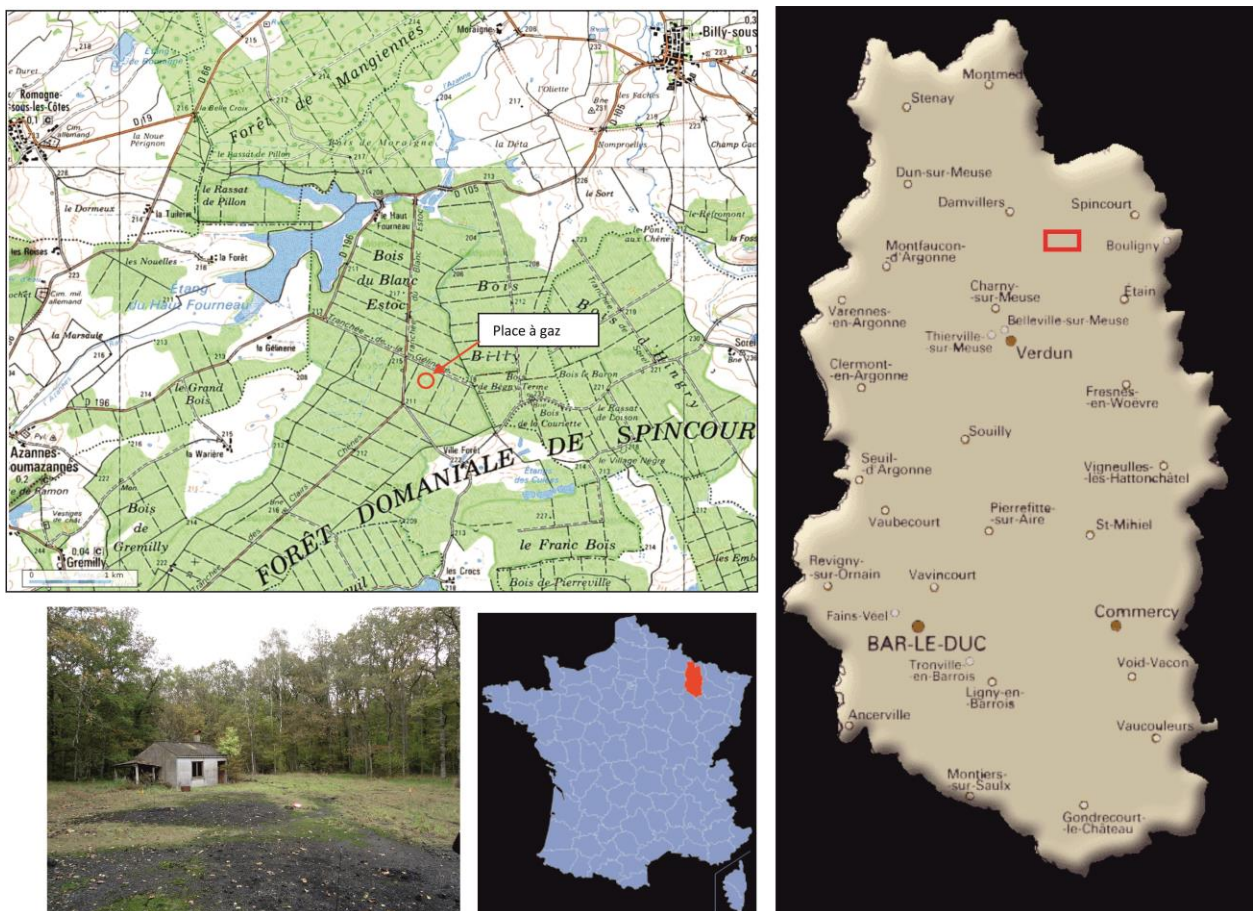


Figure 1 : Localisation du site d'étude - Extrait carte IGN Douaumont (Vaux-Devant-Damploup) (1/25 000).

2.1.2 Occupation du site et des abords immédiats

Le site étudié est une clairière au cœur de la forêt de Spincourt. Un ancien abri de chasse est encore présent dans cette clairière. Elle était occasionnellement fréquentée par les chasseurs jusqu'à la promulgation de l'interdiction d'accès et la pose d'une clôture autour de la clairière. Le site a été ponctuellement utilisé pour le campement de scouts et comme aire de pique-nique des familles d'agents forestiers de l'ONF. Les abords du site sont fréquentés durant l'automne pour la cueillette de champignons.

2.2 CONTEXTE DU SITE

2.2.1 Sources d'informations consultées

Les sources d'informations consultées sont :

- la carte IGN Douaumont (Vaux-Devant-Damloup) au 1/25 000 ;
- la carte géologique BRGM d'Etain au 1/50 000 (n° 126) ;
- les bases de données Infoterre et Banque du Sous-sol (BSS) du BRGM ;
- météo France, station de Metz-Frescaty ;
- la DREAL Lorraine.

2.2.2 Topographie

Le site est localisé en position sommitale entre + 212 et + 214 m NGF. Le plan topographique de la « *Place à gaz* » est fourni en Annexe 1.

2.2.3 Contexte géologique

La Forêt domaniale de Spincourt est principalement située sur la formation géologique des argiles de la Woëvre, attribuées au Callovien, et dont la puissance (épaisseur) est d'environ 240 m. Cette formation est essentiellement imperméable, ce qui favorise le ruissellement en surface et l'installation d'un réseau drainant, mal structuré, qui favorise l'existence d'importantes zones humides (nombreux cours d'eaux, lacs et étangs). Au droit de la « *Place à gaz* », des niveaux d'eau temporaires peuvent être présents entre 1 et 2 m de profondeur (Bausinger, 2007).

Le point BSS 01362X0002/NH, situé à 7 km au sud de la « *Place à gaz* », fournit le profil géologique suivant :

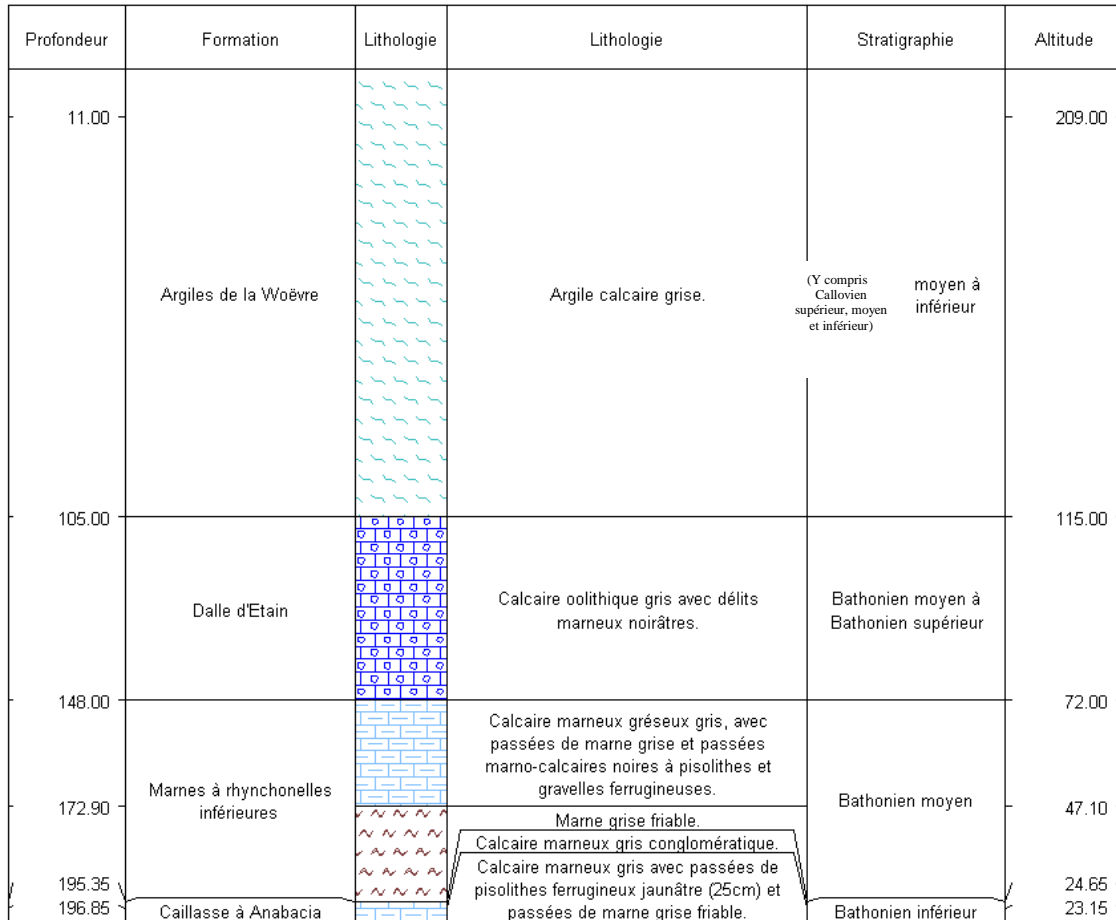


Figure 2 : Coupe géologique au point BSS 01362X0002/NH (Infoterre).

Un extrait de la carte géologique du secteur est fourni en Annexe 2.

Les sondages réalisés à la pelle mécanique par le BRGM en octobre 2014 au droit et aux abords immédiats de la « Place à gaz » permettent de préciser la lithologie des formations les plus superficielles. Les argiles franches et peu altérées du callovo-oxfordien sont atteintes vers 3,5 m de profondeur, sous un ensemble d'argiles brunes d'altération plus au moins limoneuses. Localement, des faciès argileux panachés gris et brun ont été rencontrés, ainsi que des sables et graviers argileux dont les éléments sont constitués de nodules calcaires et de fragments de coquilles et de spicules d'oursins.

2.2.4 Contexte hydrogéologique et ressources en eaux souterraines

Les argiles du Callovien formant l'assise du site de la « Place à gaz » ne sont pas aquifères. Les faciès locaux identifiés par le BRGM dans la partie la plus superficielle des argiles (sondages à la pelle d'octobre 2014) indiquent que, temporairement et localement, les argiles peuvent se saturer avec apparition de poches d'eau. Lors des sondages une seule venue d'eau, très localisée et sans débit (tarissement très rapide), a été constatée. L'occurrence de ces poches d'eau est attestée par la pose de piézomètres courts (2 m) et les mesures effectuées par T. Bausinger en 2006 (Bausinger *et al.*, 2007). Ces poches n'ont pas été observées par le BRGM en 2014 à proximité de ces ouvrages, ce qui semble logique compte tenu du déficit pluviométrique marqué durant les mois ayant précédé les investigations et confirme leur caractère temporaire.

Au sein de cet ensemble globalement non aquifère, la base des argiles de Woëvre (Callovien) et un mince niveau intermédiaire présentent une perméabilité non négligeable et sont susceptibles d'être aquifères. Il s'agit :

- d'un banc marneux à oolithes ferrugineuses, très fossilifère, d'une puissance d'environ 1,20 m situé dans le Callovien moyen, à 140 m au-dessus du Bathonien ;
- de la partie inférieure du Callovien, de nature marno-sableuse, conduisant à un niveau conglomératique.

Le calcaire oolithique du Bathonien (« Dalle d'Étain », présent à 105 m de profondeur au droit de la « Place à gaz » sous le Callovien) est également aquifère. Cette nappe d'eau souterraine n'est pas vulnérable au droit de la « Place à gaz » du fait de la couverture argileuse qui la protège.

Après consultation de la Base de Donnée du Sous-Sol (BSS), des captages en eau pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) ou à usage agricole (AEA) ont été recensés :

- à environ 5 km au sud-ouest du site (sur la commune de Gremilly) dans les terrains du Callovien ;
- entre 4 et 5 km à l'est du site d'étude (sur les communes de Loison et Senon), au droit de sources à l'interface entre le Callovien et le Bathonien supérieur, ou entre le Bathonien supérieur et le Bathonien moyen (nappe des calcaires) ;
- à environ 5 km à l'ouest de la « Place à gaz » (commune d'Azannes-et-Soumazannes), dans les terrains de l'Oxfordien (forage à une profondeur de 3,66 m/sol) ;
- à 6,7 km au sud-ouest du site (sur la commune d'Ornes) dans les alluvions.

Globalement, le fonctionnement hydrogéologique est relativement mal connu dans le secteur de la Forêt de Spincourt compte tenu des profondeurs élevées des eaux souterraines et de l'absence de besoins en eaux souterraines. Les eaux souterraines se situent à plus de 100 m de profondeur au droit du site de la « Place à gaz ». Les écoulements se font en direction de l'ouest-sud-ouest

Ainsi, les captages et la ressource en eau sont peu ou pas vulnérables vis-à-vis des polluants renfermés dans les sols et matériaux présent sur le site de la « Place à gaz ».

2.2.5 Contexte hydrologique

La « Place à gaz » est située à environ 250 m à l'ouest du fossé du Pont des Meuniers et à 750 m à l'est du ruisseau de la Worière qui se rejoignent dans le fossé de Parfondrupt lequel se jette dans l'étang du Haut Fourneau à environ 2 km au nord du site.

La pente générale au droit du site est d'environ 3 % vers le nord-est. La « Place à gaz » étant en partie sommitale, des écoulements superficiels existent notamment vers le sud et l'est (pente entre 1,5 et 2 %).

Aucun usage n'a été recensé pour les ruisseaux du Pont des Meuniers et du fossé de Parfondrupt, mais l'étang des Hauts Fourneaux, dans lequel se jettent ces deux ruisseaux, semble être utilisé pour l'aquaculture (présence d'une ferme piscicole¹ en amont du rejet des ruisseaux dans l'étang).

2.2.6 Contexte climatique

Le département de la Meuse est soumis à un climat à la fois océanique et continental, avec de forts écarts de température entre les hivers relativement froids et les étés relativement chauds. Les périodes intermédiaires présentent des températures et des précipitations qui restent moyennes.

Les précipitations sont bien réparties toute l'année. Leur hauteur annuelle oscille autour de 900 millimètres dans le département. Il existe toutefois de grandes différences, par exemple entre la zone de la Woèvre (à l'est du département), qui reçoit moins d'eau (moins de 850 mm), et la zone du Barrois (au centre), qui reçoit-elle plus de 1 000 millimètres de précipitations par an. La station météorologique de Metz Frescaty est distante de 50 km environ de la commune de Gremilly.

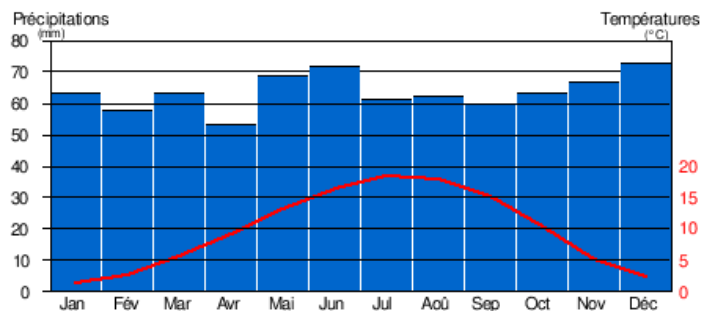


Figure 3 : Diagramme ombrothermique sur la station de Metz-Frescaty (1961-1990).

¹ Information Agence de l'Eau (réunion de lancement du 15/04/14)

2.2.7 Zones protégées et d'intérêt écologique

Le site de la « *Place à gaz* » est localisé au droit, ou à proximité de plusieurs zones protégées ou remarquables :

- au droit de la ZNIEFF de type 1² « *Forêt de Spincourt* » (n° 410001896) : elle concerne 11 communes avec une superficie de 4 396 hectares, et recense 53 espèces déterminantes ;
- au droit de la ZNIEFF de type 2³ « *Plaine de la Woëvre Nord* » (n° 410010382) : d'une superficie de 28 519 ha, elle inclut 9 ZNIEFF de type 1 et 45 communes ;
- en limite sud de la ZICO⁴ « *Val de Chiers et environs de Spincourt* » (n° 00066) ;
- à 4,4 km au nord-est de la zone Natura 2000⁵ Directive Habitats « *Corridor de la Meuse* » (n° FR4100171) ;
- à 11 km au nord-ouest de la ZNIEFF de type 1 « *Bois de Rouvres* » (n° 410030294) : d'une surface de 1 395 ha, elle concerne 7 communes et recense 27 espèces déterminantes.

² Les ZNIEFF de type I sont définies par la présence d'espèces, d'associations d'espèces ou de milieux rares, remarquables ou caractéristiques du patrimoine naturel national ou régional. Une ZNIEFF de type I est un territoire correspondant à une ou plusieurs unités écologiques homogènes.

³ Les ZNIEFF de type II sont des grands ensembles naturels riches et peu modifiés, ou qui offrent des potentialités biologiques importantes. Une ZNIEFF de type de II est un grand territoire correspondant à une combinaison d'unités écologiques présentant des caractéristiques homogènes.

⁴ ZICO : Zone importante pour la conservation des Oiseaux.

⁵ Le Natura 2000 est un ensemble de sites naturels européens, terrestres et marins, identifiés pour la rareté ou la fragilité des espèces sauvages, animales ou végétales, et de leurs habitats.

3. Historique du site de la « Place à gaz »

3.1 SOURCES D'INFORMATIONS CONSULTÉES

3.1.1 Fonds d'archives consultés et références bibliographiques

L'étude historique s'appuie sur différents fonds d'archives qui ont été en partie parcourus dans le cadre de la présente étude et en partie dans le cadre d'un projet interne visant à consolider plus largement les connaissances des faits et pratiques en lien avec la Première Guerre mondiale, susceptibles d'être à l'origine d'impacts environnementaux sur les milieux. Enfin, certains documents, issus de fonds d'archives britanniques et allemands, ont été gracieusement mis à disposition par T. Bausinger qui les a collectés dans le cadre de ses travaux de recherche⁶.

Les principales sources d'archives sont les suivantes :

- archives du Service Historique de la Défense (SHD, Vincennes), fond du Grand Quartier Général (GQG) ;
- archives Départementales de la Meuse (Bar-le-Duc) (AD 55) ;
- archives Départementales du Pas-de-Calais (Arras) (AD 62) ;
- *National Archives, Kew Gardens* (NAK), Londres ;
- Bibliothèque Nationale de France, Paris, fond numérisés Galicia ;
- « *The destruction of old chemical munitions in Belgium* », Jean-Pascal Zanders.

3.1.2 Expertise pyrotechnique

Les éléments de munitions collectés par le BRGM dans le cadre de ses interventions sur le terrain ont été confiés à messieurs H. Bélot (ancien Chef du Centre de déminage de Metz, à la retraite) à des fins d'expertise pour identifier les types de munitions auxquels ces éléments appartenaient.

3.2 SORTIE DE LA GRANDE GUERRE

L'Europe de l'Ouest a connu sur son territoire, entre 1914 et 1918, un conflit sans commune mesure avec les précédents ; la révolution industrielle et les progrès technologiques ont doté les parties belligérantes de moyens matériels et militaires inédits. D'abord guerre de mouvement entre 1914 et 1915, le conflit allait rapidement s'enliser dans une guerre de positions, de siège et de matériel (« *Materialschacht* »). D'économie de temps de paix il fallut urgemment passer à une économie tournée vers l'effort de guerre, et réorganiser, voire créer des filières industrielles nouvelles.

⁶ T. BAUSINGER. J. Gutenberg Universität Mainz. Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften Geographisches Institut "Quellenauswertung zum munitionsbezogenen Materialverbrauch während des Ersten Weltkrieges" 2011. Non publié.

T. BAUSINGER. J. PREUSS J. Gutenberg Universität Mainz. Fachbereich Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften Geographisches Institut Untersuchung eines Brandplatzes für Kampfstoffmunition im Wald von Spincourt (Frankreich)" Août 2011, non publié.

La Première Guerre mondiale a marqué l'avènement de l'usage massif de l'artillerie de campagne et de l'artillerie lourde grande portée (ALGP). L'artillerie a fait d'importants progrès technologiques après la Guerre franco-prussienne de 1870. Les inventions les plus marquantes sont les obus explosifs à ceinture de guidage et les canons rayés à chargement par la culasse. Les français dotent leur canon de campagne de 75 mm d'un frein hydraulique permettant d'encaisser le recul de la pièce lors du tir sans détourner le canon de sa ligne de visée. La puissance, les portées et la précision des moyens de l'artillerie augmentent alors très nettement et permettent au matériel de soutenir des cadences de tir intenses et d'atteindre des zones situées à plusieurs kilomètres dans les lignes ennemies. Les combats sont organisés selon l'adage « *Artillery conquers, Infantry occupies*⁷ ». Avec la *Guerre des tranchées*, à partir de 1915, d'autres matériels spécialisés apparaissent et/ou prolifèrent : l'artillerie de tranchée (ou d'infanterie) et les obusiers tirant tous deux des projectiles puissants selon des trajectoires paraboliques (en cloche), permettant d'atteindre le cœur des tranchées adverses. Les parties belligérentes créées et utilisent aussi l'artillerie chimique tandis que les bombes d'aviation font leur apparition. Les engins se spécialisent aussi. Les projectiles spéciaux (toxiques, incendiaires, fumigènes, éclairant, etc.) sont chargés de composés phosphorés, arséniés, halogénés et/ou soufrés. Les munitions de la Première Guerre mondiale renfermaient une grande variété d'explosifs et de produits chimiques.

Durant la Première Guerre mondiale, près de 1 milliard de munitions d'artillerie ont été produites, dont 750 millions ont été tirées sur le Front de l'Ouest, sur une bande de quelques kilomètres de large, sur 700 km de long, des Flandres belges à la frontière suisse, entre 1915 et 1917. À ces chiffres il convient d'ajouter les millions d'engins, bombes, munitions de tranchées et grenades et autres munitions « *bricolées* » dans les tranchées. Selon le type de munitions, les modalités des tirs et la typologie des sols au point d'impact, on estime qu'entre 10 et 30 % des munitions tirées sur le front occidental n'ont pas explosé, et sont pour partie encore présentes dans les sols à des profondeurs de quelques centimètres à plusieurs mètres. À l'Armistice, au moins 1,5 million de tonnes de munitions inutilisées étaient stockées dans des dépôts en Belgique et dans le nord de la France. Ces munitions correspondaient à des surplus formés par le rassemblement de dépôts de munitions des positions avancées et intermédiaires mais qui étaient également issus de ramassage d'engins épars sur les anciens champs de bataille. Le ramassage et le rassemblement des matériels collectés par le nettoyage des anciens champs de bataille s'est effectué durant et postérieurement à la Grande Guerre. Entre 1919 et 1928, ce sont au 1 000 000 de tonnes de munitions stockées ou collectées sur les zones de combat, qui ont été détruites par démontage / brûlage ou pétardage. D'autres ont été enfouies (mer, lacs, gouffres, sols). Les munitions non visées par les destructions, jugées réutilisables, ont été en partie réfectionnées et alloties dans des dépôts de munitions. Des opérations de récupération et de désobusage ont été menées à l'échelle industrielle entre fin 1918 et jusque dans les années 30, d'abord par les autorités militaires (françaises, mais aussi britanniques et américaines), puis par des entreprises civiles sous mandat des ministères compétents (« *de la Guerre* » et « *des Régions Libérées* »), afin 1) de libérer les sols agricoles et les usines des engins dangereux, 2) d'assurer la sécurité des populations civiles et 3) de récupérer / recycler les matières valorisables ou les projectiles encore utilisables. L'État, tout comme les entreprises mandatées pour démolir les munitions, trouvèrent aussi dans ces opérations des recettes et une source de profit. En effet, le métal issu du démantèlement des projectiles, propriété de l'État, était cédé aux entrepreneurs, pour une revente ultérieure, moyennant le versement d'une redevance à la tonne de métal récupérée. Une partie de ces taxes était par ailleurs forfaitaire.

⁷ L'artillerie conquiert et l'infanterie occupe.

Deux types de marchés se sont côtoyés :

- **les marchés civils** passés par l'administration civile « des Régions Libérées » qui vise la récupération des ferrailles et épaves de guerre « inertes » c'est-à-dire dépourvues de poudres et explosifs ;
- **les marchés militaires** (dits « de Guerre ») passés par le Ministère de la Guerre pour la récupération et le démantèlement des épaves de guerre « non inertes » c'est-à-dire les munitions et autres artifices.

Les taux de redevance étaient inférieurs pour les marchés de Guerre par rapport aux marchés des Régions libérées alors que ces marchés concernent une même marchandise. Cette situation incita à la fraude et aux pratiques de désobusage illicites dans l'Entre-deux-guerres.

Ces activités ont mis en œuvre des procédés rudimentaires qui se sont avérés polluants comme l'illustre la « Place à gaz ».

3.3 FILIÈRES D'ÉLIMINATION DES MUNITIONS

Plusieurs filières d'élimination des munitions ont été constituées dans le cadre des opérations de désobusage (cf. Figure 5) :

- pour les munitions sûres, en général les munitions non tirées et/ou dépourvues de leurs fusées, et/ou les munitions tirées non explosées en bon état (et identifiables), la voie retenue a principalement été le **démontage**. Cette technique de neutralisation des engins de guerre donne les meilleurs rendements en termes de récupération des matières valorisables. Le démontage suivait un ensemble d'opérations s'enchaînant de la manière suivante :
 1. **Retrait de l'ensemble fusée-gaine** (détonateur) par dévissage à l'ogive ou au culot, selon la position des amorces, pour inerte l'engin,
 2. **Dé-ceinturage** manuel au marteau et au burin (retrait de la ou des ceintures de guidage en cuivre ou en zinc),
 3. Pour les engins explosifs, **vidange de leur contenu**, en utilisant par exemple de l'eau chaude sous pression (« washout », expulsion des explosifs à l'eau chaude, comme à l'usine « C-Factory » de *F.N. Pickett & Fils* à Trélon-Liessie (59)) ou en faisant fondre (dans des étuves) les explosifs au moyen de la vapeur d'eau. Les engins chargés de toxiques de guerre liquide étaient, après percement ou dévissage, vidés, en infiltrant le contenu directement dans le sol (dans des puisards, comme dans les ateliers *Clere & Schwander* de la forêt de la Hardt (68)), ou en collectant les liquides dans des bacs de neutralisation (à l'eau, à la chaux) (comme à Trélon-Liessie (59)). Les toxiques de guerre gazeux ont été, dans certaines installations, collectés et dirigés vers des tours de lavage et de neutralisation (exemple du site *Clere & Schwander* à Muzeray (55)),
 4. **Grillage / brûlage** (en tranchées, rangées ou dans des fours) des fusées et gaines, des douilles et étuis, de certains obus vidés de leur contenu, pour éliminer les dernières traces de poudres et explosifs,
 5. **Câffutage**, opération qui consiste à morceler les enveloppes des engins évidés.

Les explosifs collectés étaient ensuite directement brûlés sur des aires dédiées.

Les explosifs binaires (mélange d'explosifs azotés et de sels comburants tels que les perchlorates et les nitrates d'ammonium), comme l'explosif standard allemand Fp80/20 (*Füllpulver 80/20*, 80 % NH_4NO_3 et 20 % TNT), collectés lors des opérations de vidage, étaient mis en solution dans l'eau bouillante. L'abaissement de la température du bain en dessous de 80 °C se traduisait ensuite par la précipitation de l'explosif azoté (TNT), alors retiré du bain pour être brûlé (sur des « *burning grounds* » ou terrain de brûlage). Les sels comburants étaient recyclés (engrais), de même que les métaux des enveloppes des munitions (fonte, acier, laiton, etc.), des ceintures (cuivre et zinc), des étuis (laiton), des obus à balles (shrapnels Pb/Sb, ou en acier).

Les fusées étaient soit brûlées avec les explosifs, soit collectées pour être nettoyées et grillées dans des centres spécialisés.

- **le brûlage** (« *Open-Burning* » (OB) pour les anglo-saxons) a aussi été employé pour la destruction des munitions à toxiques de guerre (arsines, ypérites, etc.), de certaines munitions explosives et de certains engins à chargement spécial (fumigène, incendiaire, etc.). Les techniques de brûlage maîtrisé des engins de guerre ont été développées par l'ingénieur militaire russe M. Kostevitch, qui a œuvré en Belgique et dans le quart nord-est de la France, entre 1920 et 1928, pour le compte de la société de désobusage britannique Pickett & Fils. Le brûlage était réalisé en tranchées, ou en rangées, formées par empilement ordonné d'obus ouverts, déposés sur des lits de bois. Des fours ont aussi été développés pour brûler les amorces (fusées, gaines), les douilles et cartouches et certains obus à ypérite épaissie. Après brûlage, la ferraille et les autres métaux étaient récupérés et câffutés, pour être ensuite revendus au prix du métal ;
- les munitions peu sûres, éparses, et trop dangereuses pour être transportées étaient détruites **par pétardage** (éclatement désigné par les termes anglo saxon de « BIP, *Blown-in-Place* » ou « *Open-Detonation* » (OD)). Le pétardage consiste à détruire les munitions par une explosion déclenchée volontairement par l'apposition d'une charge explosive ; l'énergie dégagée disloque l'enveloppe et détruit une partie du contenu de la munition. Ces pétardages étaient traditionnellement réalisés dans des entonnoirs, chaque tir concernant en général plusieurs munitions mises en tas (« *fourneau* »). Ces chantiers de destruction étaient organisés comme suit, pour ceux exploités par le Service du Désobusage et/ou les Entreprises privées mandatées par le Ministère de la Guerre pour ces activités : 1) Creusement de 10 ou 15 cratères par section, d'une superficie moyenne de 25 ares, 2) pétardage en privilégiant les entonnoirs préexistants (cratères d'impact), « *les dépenses de ce chef seront imputées aux dommages de guerre* », mais « *d'autres emplacements ont été choisis pour éviter des déplacements de projectiles dangereux* ». Le pétardement de masse a aussi été utilisé pour éliminer rapidement des engins transportables, qui étaient rassemblés dans des dépôts de munitions (champs d'éclatement des centres de destruction). Les munitions chimiques, possédant trop peu d'explosif pour détoner efficacement, se prêtent peu à l'élimination par éclatement. Le pétardage était parfois réalisé après dé-ceinturage et retrait de l'ensemble fusée-gaine.

- Des études menées aux USA⁸ et en Bavière⁹ sur des sites de pétardage montrent que les munitions chargeant les fourneaux n'entrent pas systématiquement en détonation mais en déflagration, phénomène qui a pour conséquence l'expulsion de fragments millimétriques à centimétriques d'explosifs (entre 0,1 et 80 % de la charge initiale renfermée) qui ne sont pas détruits.

Par ailleurs, des munitions partiellement détruites, des fragments d'explosifs et des matériaux arrachés du sol sont expulsés par-dessus les lèvres des entonnoirs, parfois à plusieurs dizaines ou centaines de mètres du point d'éclatement. Ainsi, ces pratiques, notamment lorsqu'elles ont été répétées avec de forts tonnages de munitions sur un même site, ont pu impacter significativement la qualité environnementale des sols en substances constitutives des explosifs et des chargements des munitions. Ces opérations sont illustrées par les films tournés en janvier 1919 par les troupes du Corps expéditionnaire américain (AEF, « *American Expeditionary Forces* ») dans le secteur Meuse-Argonne (nord-ouest du département de la Meuse, secteur d'Ecurey-en-Verdunois, de Romagne-sur-Montfaucon), dans le nord-ouest du département de la Meuse (<https://catalog.archives.gov/id/24986>¹⁰).



Figure 4 : Préparation d'un fourneau de pétardement par la Reclamation and Demolition Department, 1st Army. Jan. 13, 1919. Meuse (National Archives, Washington, USA).

- enfin, on procéda aussi, afin d'éliminer les munitions, à leur **enfouissement** (dans les sols, d'anciennes galeries de mines de sapes, dans des gouffres (ex. gouffre de Jardel (25)) et à leur **immersion** dans des lacs (ex. « *Lac bleu* » d'Avrillé (49)) ou en eau profonde en mer (large de Toulon, Manche et mer du Nord, etc.).

⁸ Taylor S., Lever J., Walsh M., Walsh M.E., Bostick B., and Packer B.... U.S. Army Corp of Engineers. U.S. Army Engineer Research and Development Center. Cold Regions Research and Engineering Laboratory "Underground UXO: Are They a Significant Source of Explosives in Soil."

⁹ Bayerisches Landesamt für Umwelt "Arbeitshilfen für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil" September 2009.

http://www.lfu.bayern.de/altlasten/ruestungsaltlasten/doc/arbeitshilfe_untersuchung_sprengplaetze.pdf

¹⁰ ORDNANCE SALVAGE ACTIVITIES IN THE MEUSE-ARGONNE SECTOR [1918-1919], 1936, National Archives. Washington, USA

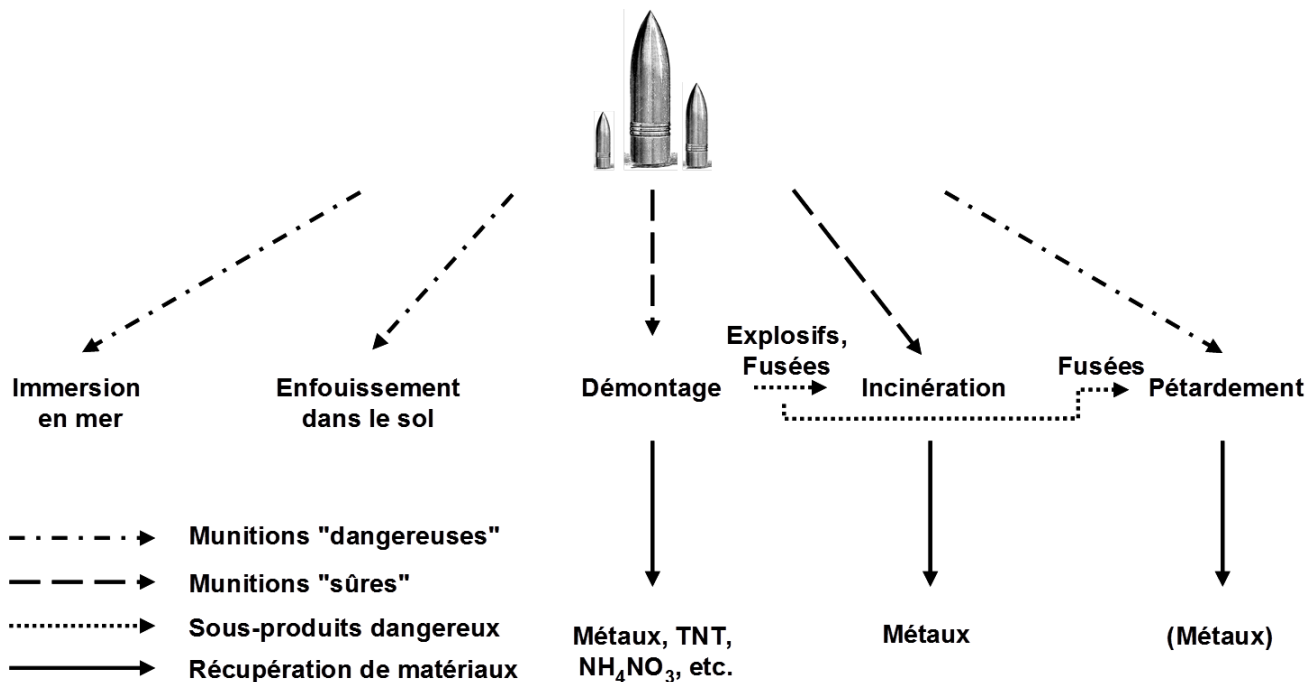


Figure 5 : Filières d'élimination des munitions après la Première Guerre mondiale (d'après Bausinger 2011, non publié, modifié).

3.4 HISTORIQUE DES ACTIVITÉS DE DÉSOBUSAGE DANS LE SECTEUR DE SPINCOURT

3.4.1 Le canton de Spincourt dans la Grande guerre

Le canton de Spincourt est d'abord l'emplacement de la toute première confrontation armée entre les troupes françaises et les troupes allemandes, le 18 août 1914¹¹. Les français reculent face aux mitrailleuses allemandes. Cette bataille de Spincourt préfigure en Lorraine le désastre sanglant et le revers militaire de la Bataille des Frontières. Les allemands s'installent aux portes des Hauts de Meuse, mettant la place forte de Verdun à portée de tir. Dès l'automne 1914, les Allemands de la 5^{ème} Armée entourant aux deux tiers Verdun, projettent de mettre en place des pièces d'artillerie à forte puissance et longue portée pour mener le siège de la ville. Un canon de marine de calibre 381 mm est positionné en septembre 1915 dans le Bois de Warphemont, sur la commune de Duzey. Ce canon baptisé « *Langer Max*¹² » expédie sur Verdun, son projectile de 750 kilogrammes, le 21 février 1916, à 4 h 15 du matin. Il s'agit du premier obus tiré, donnant le signal de l'offensive de la Bataille de Verdun, la plus grande bataille jamais dominée par l'usage de l'artillerie¹³. Le gigantesque duel d'artillerie débute. Le secteur de Spincourt accueille alors l'une des plus fortes densités de pièces d'artillerie de tout le front occidental, pour pilonner Verdun et le champ de bataille. À 7 h 15 du matin, la plus puissante artillerie lourde du monde déclenche le « *Trommelfeuer*¹⁴ », une pluie de 2 millions d'obus tirés par 1 200 canons de tous calibres. En moyenne, 6 obus tombent alors par mètre carré de champ de bataille. Les aviateurs

¹¹ « Bibliothèque Nationale de France. « La première bataille franco-allemande, le 18 août 18: réponse à la brochure « Die erste Schlacht im Zukunftskriege ». Théories tactiques du Général Boulanger. Dentu et Cie, Editeurs.

¹² Le «long Max »

¹³ Horne, 1993 ; Mosier, 2001

¹⁴ Le feu roulant

français qui survolent la forêt de Spincourt pour la reconnaissance « *s'accordent à dire que cette région est le centre d'un véritable feu d'artifice. Le petit bois de Gremilly, au nord de la Jumelle (ndlr : Jumelle d'Orme), accuse une telle densité d'ouvertures de feu que les observateurs en avions renoncent à pointer sur leurs cartes les batteries qu'ils voient en action* »¹⁵. Ces batteries sont alimentées en munitions depuis des dépôts d'arrière lignes au moyen d'un réseau de voies de chemin de fer étroites savamment organisé. Sur les quelques 200 km² du champ de bataille, les allemands tirent 34 millions de projectiles ; en réponse les français expédient 26 millions d'engins, sur une période entre février et août 1916. La fin de la Bataille de Verdun, 300 jours plus tard, ne signifie pourtant pas l'arrêt de l'usage d'importants moyens d'artillerie en forêt de Spincourt. Une nouvelle phase commence, celle du siège de Verdun et le harcèlement des positions françaises par les bombardements allemands au moyen d'engins explosifs et chimiques. L'affrontement frontal laisse place à l'« *Ermattungsstrategie* », la stratégie d'usure des allemands. Le rapport du Sénateur Cazeneuve devant le Sénat daté de janvier 1918 relate ces événements et l'emploi de quantités importantes de munitions chimiques très diverses, spécialisées et caractéristiques de la seconde moitié de la Grande Guerre (1917-1918) « *Du 31 juillet 1917 au 20 août 1917, les allemands ont tiré toutes les nuits des obus spéciaux sur le front de Verdun. La zone bombardée avait un front d'environ 30 km sur une profondeur de 3 à 5 km. Les projectiles étaient chargés en bromacétone, chloroformiate d'éthyle trichloré et sulfure d'éthyle dichloré (ypérite).*

Le nombre des obus tirés a été très considérable et peut être évalué à un million. Cinq corps d'armée étaient exposés à ces tirs qui ont provoqué 6 935 évacuations. Les décès ont été très peu nombreux et inférieurs à 2 % du nombre des évacués.

Du 31/08 au 10/09, des bombardements analogues, mais moins intenses ont eu lieu sur le front du 35^{ème} Corps d'Armée et du 1^{er} Corps d'Armée colonial dans la Région de Verneuil à Culches. Ils ont provoqué l'évacuation de 276 militaires parmi lesquels 2 morts ont été signalés.

La très grande majorité des obus était chargée en sulfure d'éthyle dichloré et de chlorure de diphénylarsine. Du 20 septembre au 04 octobre, la région de Verdun a été continuellement bombardée par des obus au sulfure d'éthyle dichloré tirés en très grande quantité et il y a eu environ 5 000 évacués la plupart légèrement atteints. Depuis le 04 octobre, nos ennemis continuent leurs bombardements d'obus à gaz et des tirs plus ou moins importants sont effectués presque quotidiennement sur notre front¹⁶ ».

Les cartes, pages suivantes (cf. Figure 6), issues d'archives françaises (Carte spéciale des régions dévastées, feuille 36NO METZ (1920)) et allemandes (*Bundesarchiv*, Munich) montrent l'organisation et la position des batteries d'artillerie allemande sur le secteur de Spincourt. Ces batteries étaient alimentées en munitions par wagonnets depuis des stocks de munitions, *via* des voies de chemin de fer étroites (60 cm).

¹⁵ Bibliothèque Nationale de France. Bulletin des armées, récit du 26 mars. La Grande guerre du XXème siècle. 1917/02.

¹⁶ Service Historique de la Défense. Vincennes. Sénat. « Rapport fait par la commission de l'Armée sur deux corps asphyxiants nouveaux utilisés par les Allemands (le sulfure d'éthyle bichloré et le chlorure de diphénylarsine » par M. Cazeneuve (adopté le 16 janvier 1918).

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

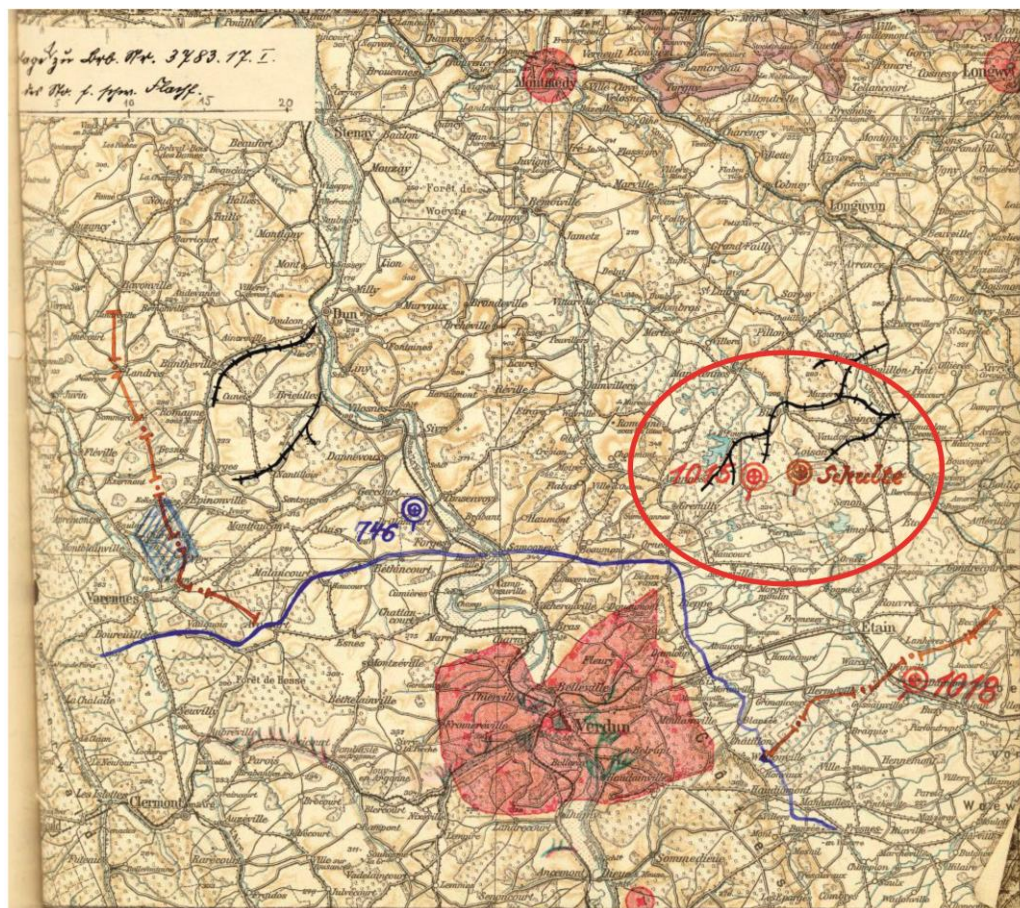
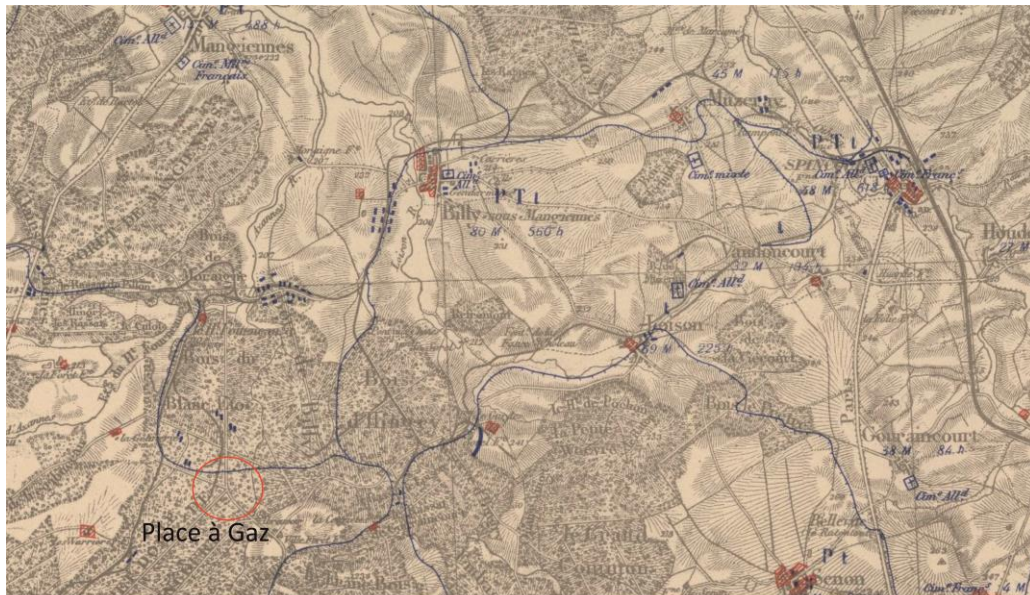


Figure 6 : Carte spéciale des régions dévastées (feuille METZ nord-ouest, 1920) et carte de la Bundesarchiv (Allemagne) montrant la position des batteries allemandes dans le secteur de Spincourt.

3.4.2 Phase de désobusage 1919-1925

Les documents d'archives collectés par le BRGM permettent de retracer en partie l'historique des opérations de désobusage dans le secteur de Spincourt-Gremilly. Le premier document d'archives relatant la constitution d'un dépôt de munitions destinées à être détruites dans le secteur de la « Place à gaz » - Gélinerie est la lettre du Général REGNIER, commandant l'Artillerie du 6^{ème} Corps d'Armée et la 6^{ème} Région du 27 mars 1919, intitulée « *note pour la destruction de projectiles* » (AD55, cote 10R82) (cf. Figure 7 ci-dessous).

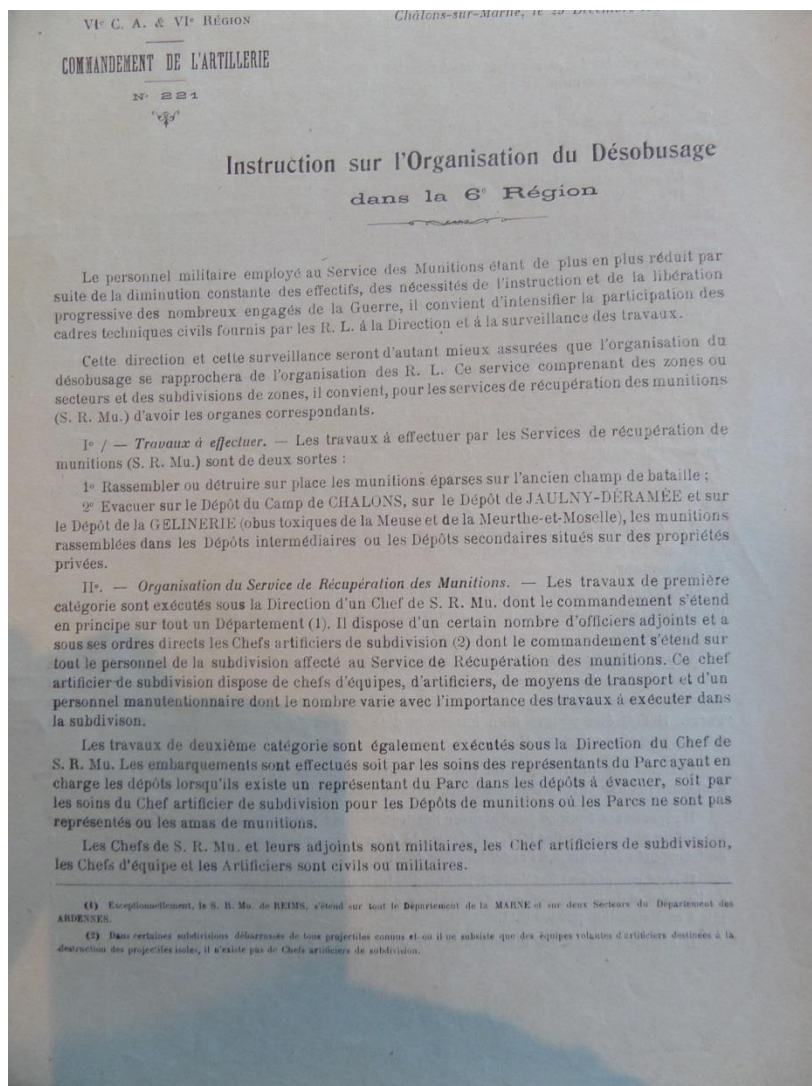


Figure 7 : Page 1 de la lettre du Général REGNIER du 27 mars 1919, (AD55, cote 10R82).

Il est précisé dans ce courrier que les munitions en dépôts intermédiaires et secondaires (munitions transportables) sont à évacuer sur le camp de Chalons (actuel camp de Mourmelon dans le département de la Marne), de Jaulny-Déramée (actuel fort de Rozeliers au sud-est de Verdun) et sur le **site de la Gélinerie, pour les obus chimiques de la Meuse et de la Meurthe-et-Moselle.**

Un dépôt de munitions dédié aux munitions chimiques a donc été créé, par rassemblement de dépôts intermédiaires, à proximité de la Ferme de la Gélinerie (à 2 km à l'ouest-nord-ouest de la « Place à gaz »).

D'autres documents historiques indiquent qu'un important dépôt de munitions a été créé en forêt de Spincourt.

Le dépôt de munitions principal était situé entre des voies ferrées (voies étroites de 0,6 m) à l'est de l'actuelle Ferme de la Gélinerie, et à l'ouest de la « Place à gaz », comme le montrent les cartes de la Figure 8. Ce dépôt de 200 m de long, organisé en 9 îlots aurait totalisé entre 300 000 et 400 000 munitions. Les articles de presse (« *Le Bulletin Meusien* ») et les courriers de l'Administration des Eaux-et-Forêt indiquent que des munitions chimiques constituent tout ou partie de ce dépôt ; le courrier du 16 juillet 1920 du Conservateur des Eaux-et-Forêt (AD (55), cote 1184 W 696) à la Direction Générale des Eaux et Forêt précise « *Guillemin déclare que le 22 juillet, vers 9 heures et demi [...], il a ressenti l'effet des gaz toxiques provenant d'obus fuyards de l'ancien dépôt allemand* ».

Après la guerre, les obus tuent toujours

Occupé à l'usine de désobusage de la Gélinerie, près Grémilly (Meuse) l'ouvrier Eugène Retours a été intoxiqué par les gaz en procédant au vidage d'un obus de 150 contenant du Phosgène.
Le malheureux a succombé peu après à l'hôpital de Mangiennes.

L'extrait du « *Bulletin Meusien* » ci-contre¹⁷ relate un accident durant lequel un ouvrier du chantier de désobusage de la Gélinerie succomba après avoir été intoxiqué par le phosgène d'un obus allemand de 150 mm.

Par la lettre, du 27 juillet 1920, Bar-le-Duc, (AD55, cote 1184 W 696) le Capitaine THOMAS, Chef du Service des Munitions sollicite l'avis de Monsieur le Conservateur des Eaux-et-Forêts afin d'établir « *un dépôt provisoire d'obus toxiques dans le Bois du Blanc Etoc, aux environs de la Ferme de la Gélinerie, canton de Damville* ».

En réponse, le 29 juillet 1920, le Conservateur des Eaux-et-Forêts « *après enquête, ne s'oppose pas au transfert projeté* » du stock de la ferme de la Gélinerie vers celui du Blanc Etoc. Ce Bois est localisé entre la Ferme de la Gélinerie et la « *Place à gaz* ».

Selon Forget (1928) :

« *Rappelons que, dans la série domaniale de Grémilly, près de la ferme de la Gélinerie, a été constitué, en 1920, un dépôt considérable de plus de 200.000 obus allemands à gaz toxiques, de tous calibres, dont la désamorçage et la destruction, non encore terminés, sont assurés sur place par un concessionnaire du Ministère de la Guerre*¹⁸ ».

Ces documents d'archives montrent donc :

- la présence de munitions toxiques et fuyards ;
- la présence de toxiques liquides ou gazeux (comme dans les obus à Croix Verte contenant du phosgène, etc.) ;
- qu'il devait exister un stock de munitions toxiques, initialement positionné à la ferme de la Gélinerie, puis transféré en 1920 dans le Bois du Blanc d'Etoc (en forêt de Spincourt) ;
- l'existence d'opération de destruction d'engins chimique de guerre au niveau du site de la Gélinerie.

¹⁷ BNF, Gallica

¹⁸ Forget, J. (1928): La reconstitution forestière de la zone rouge dans la Meuse. Bulletin de la Société des Lettres, Sciences et Arts de Bar-le-Duc et du Musée de Géographie: 121-131.

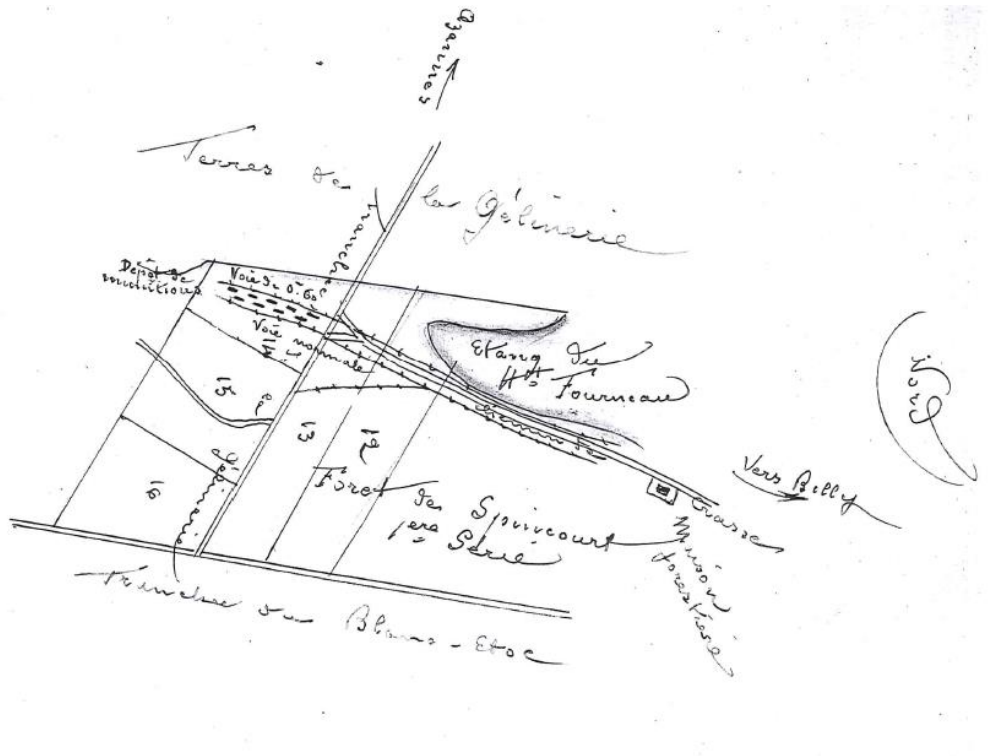


Figure 8 : Position et organisation du dépôt de munitions de la Gélinerie (Inspection des Eaux-et-Forêts, lettre du 27 juillet 1920).

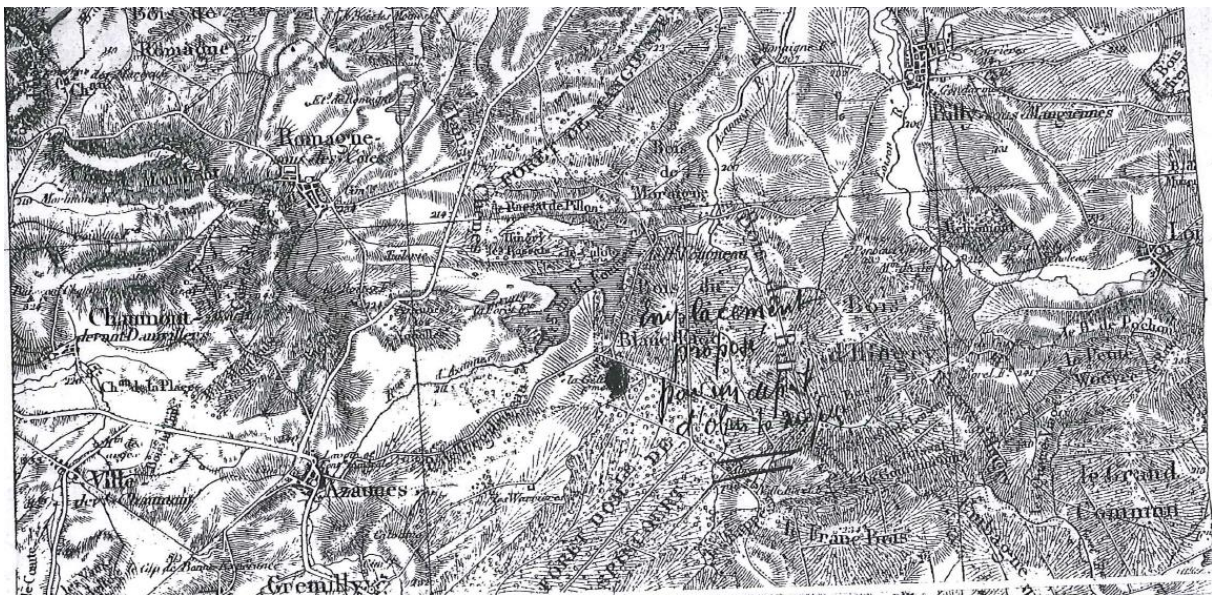


Figure 9 : Position du dépôt de munitions de la Gélinerie (lettre du 15 juillet 1920, C Thomas).

Les stocks de munitions du secteur de La Gélinerie-Bois du Blanc d'Etoc ont fait l'objet de destructions par pétardage (cf. article de presse page suivante). L'article du « *Bulletin Meusien* » intitulé « *après la Guerre, les obus tuent toujours* » témoigne du fait que des munitions chimiques auraient été démontées et vidangées dans des ateliers situés au niveau de la ferme de la Gélinerie.

DANS L'ARRONDISSEMENT

Azannes. — Explosion d'obus, deux artificiers tués. — Des artificiers travaillaient au désobusage aux environs d'Azannes.

A 8 h. 30, une explosion se produisit ; on courut à l'appel des blessés. Guillain Charles et Svoboda gisaient au fond d'un trou d'obus, râlant ; ils succombèrent presque aussitôt, un de leurs compagnons, Guillain Lucien, était atteint grièvement. L'accident est arrivé au moment où ils sortaient des éclats d'obus du trou, une fusée d'un 150 boche éclata. Les techniciens reconnaissent qu'ils n'y a pas eu d'imprudence de commise. Les ouvriers ramassaient dans un fourneau d'explosion à moitié loupé des culots d'obus, dont la manipulation n'est pas dangereuse, malheureusement, une ogive de ces obus cassés a pu se trouver, comme on le voit encore, sous leurs pieds et à la suite d'un choc léger a éclaté, ces engins se trouvent presque toujours à fleur de terre. Il est indispensable qu'ils soient détruits sur place.

Guillain Lucien, a été blessé sur diverses parties du corps. Un éclat lui a traversé la peau du thorax par un orifice large comme une lentille : une hémorragie importante s'en est suivie ; un œil paraît compromis.

Le Dr Misset à Damvillers, qui l'a visité fait toutes réserves sur ces blessures.

Guillain Charles a eu la jambe gauche broyée, la droite criblée d'éclats et le temple gauche effondré ; Svoboda a eu les deux jambes broyées, le bassin atteint.

GREMILLY. — Défaut de carte d'identité. — Le nommé Gorodetzky Nicolas, 38 ans, manoeuvre au dépôt de la Gélinerie, ayant négligé de présenter sa carte d'identité au renouvellement, les gendarmes lui dressèrent procès-verbal.

L'analyse de photographies aériennes datée de 1951, ainsi qu'une visite de terrain menée par le BRGM (septembre et octobre 2014) (cf. photographie de la Figure 20) montrent dans le secteur de la ferme de la Gélinerie, la présence d'une zone de cratères isolés, régulièrement espacés, et de grand diamètre (15 à 20 m). Leur localisation et configuration de ce secteur permettent de considérer qu'ils ne peuvent être attribués à des impacts de munitions tirées de gros diamètre. Il s'agit là possiblement des entonnoirs ayant servi à la destruction par explosion des munitions du stock du Bois du Blanc d'Étoc-Gélinerie.

Les informations collectées ne permettent pas d'établir un lien entre le contenu de ce rapport et le stock de 400 000 obus stockés à la Gélinerie décrit dans les archives, de même que les archives consultées ne donnent pas d'informations sur l'opérateur qui a procédé aux opérations de désobusage sur le site de la Gélinerie (services de l'artillerie, ou une entreprise privée sous mandat de l'autorité militaire).

L'ensemble des données collectées, des archives consultées et des constats de terrain, si elles apportent un nombre considérable d'informations qui n'avaient jamais été mises en commun, ne permettent :

- ni d'évaluer précisément l'organisation des activités de regroupement, stockage, destruction et élimination de munitions qui ont pu avoir lieu sur cette zone ;
- ni de les localiser de façon précise et exhaustive dans la zone concernée ;
- ni de définir les conditions dans lesquelles les activités en lien avec cette période se sont achevées.

3.4.3 Phase de désobusage post 1925

L'exploitant de la « Place à gaz » est identifié sur la base d'archives du fonds des Eaux et Forêts déposées aux archives départementales de la Meuse.

Le rapport de Forget¹⁹ précise en 1928, qu'une société aurait été mandatée par le Ministère de la Guerre pour éliminer un stock de 200 000 obus toxiques allemands. La lettre du Directeur de l'Enregistrement des Domaines et du Timbre à Monsieur le Conservateur des Eaux-et-Forêts, Bar-le-Duc, en date du 10 avril 1930, précise :

« Aux termes d'un arrêté préfectoral du 29 septembre 1926, la firme Pickett et Fils, de Londres, représentée par son mandataire, M. le Capitaine Cecil Darragh à Boulogne-sur-Mer, a été autorisée à occuper une surface de terrain de 1 hectare 86 dans la forêt domaniale de Spincourt, en vue de la destruction d'obus appartenant au Service de l'Artillerie. En outre, par une décision préfectorale du 30 décembre 1926, ladite firme a été autorisée à exploiter une surface de 3 hectare 86 de taillis ».

L'autorisation d'exploiter a été attribuée à la **société britannique F.N. Pickett²⁰ & Fils** le 29 septembre 1926, avec indemnisation (1 807 Frs) en compensation des dégâts forestiers occasionnés.

F.N. Pickett & Fils prend peut être en charge à cette occasion un stock résiduel de munitions présent sur le site, et procède à la destruction des munitions selon des protocoles appliqués dès 1920 sur d'autres sites dans le nord de la France (chantier « C-Factory » de Trélon-Liessie²¹), et en Belgique (Poelkapellen). Les archives conservées au *National Archives Kew gardens* (NAK) à Londres apportent des informations précises sur les modalités de destruction des munitions chimiques. Il s'agit notamment d'un courrier du Ministère de la Guerre à Francis Norman Pickett. Dans ce courrier, les difficultés et surprises rencontrées lors de la destruction des munitions chimiques sont exposées :

“You asked me my opinion of the breaking down of gas shell. The breaking down of shell, etc. charged with toxic gas constitutes a problem in which [...] everybody made a very great mistake. [...] This is a fact in all countries, both Allied and otherwise. Mustard gas which everybody was frightened of, thanks to the experiments which you [...] kindly made [...] became extraordinarily simple. The adjustment of this method was perfected entirely by your goodselves. All other gases caused the gravest misgivings, which you were able to diminish thanks to your admirable organization, for which it was impossible to take money into account. I must tell you that at the present time, your organization has been rendered official in all our similar French Breaking Down Factories (Spincourt, Camp de Chalons²² etc.)“

Ce document confirme ce que révèlent par ailleurs d'autres archives conservées en France et à l'étranger : le Ministère de la Guerre a été convaincu à Trélon du bien-fondé et de l'efficacité des méthodes de destruction mises en œuvre par F.N. Pickett & Fils et s'en est inspiré pour la rédaction des cahiers de charges destinés à contractualiser avec d'autres industriels.

¹⁹ Forget, J. (1928): La reconstitution forestière de la zone rouge dans la Meuse. Bulletin de la Société des Lettres, Sciences et Arts de Bar-le-Duc et du Musée de Géographie: 121-131.

²⁰ Francis Norman Pickett

²¹ C'est sur ce site que F.N. Pickett testa les méthodes d'élimination maîtrisée d'engins de guerre et persuada les gouvernements britannique, français et belge de l'efficacité de ses méthodes. F.N. Pickett contractualisa ensuite avec l'autorité britannique pour la destruction de 330 000 tonnes d'engins britanniques présents sur le sol français.

²² Actuel camp de Mourmelon dans le département de la Marne.

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

En décembre 1926, le site de la Gélinerie est déclaré comme « *site en exploitation* » sur le papier à entête de la maison F.N. Pickett et Fils (cf. Figure 10). D'après les archives disponibles, la « Place à gaz » est le dernier site exploité par F.N. Pickett & Fils sur le territoire français.

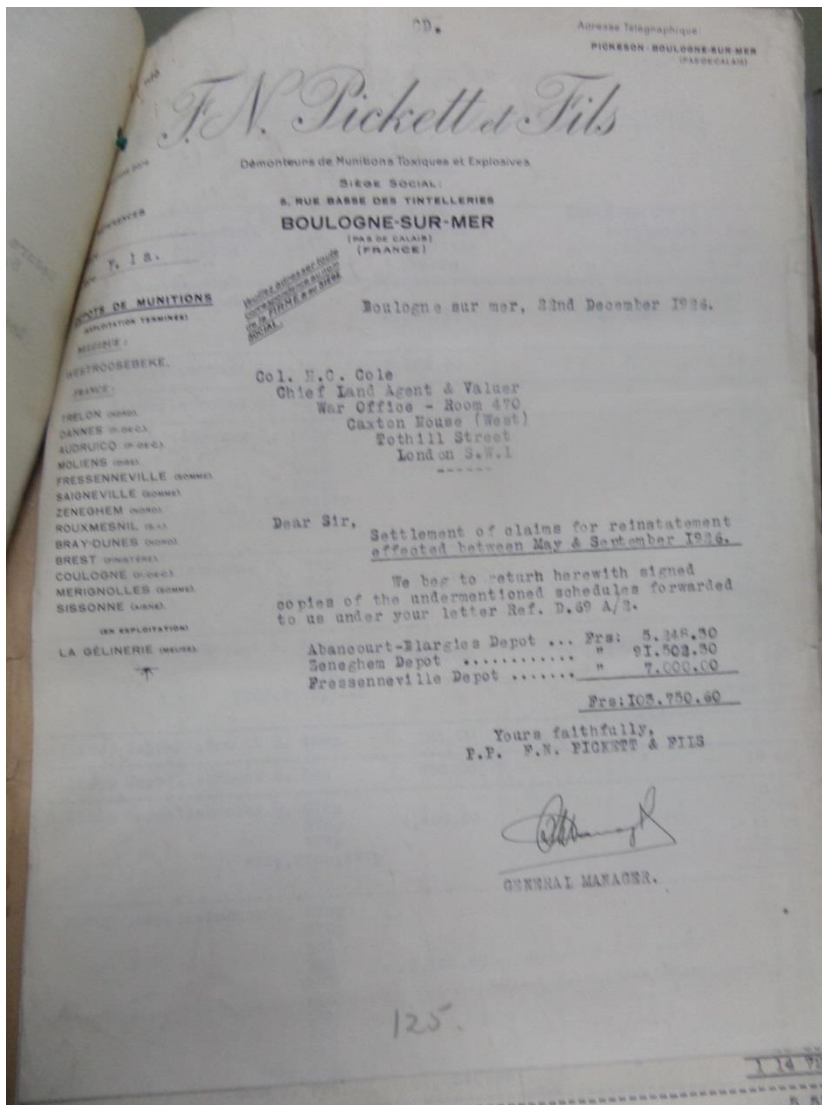
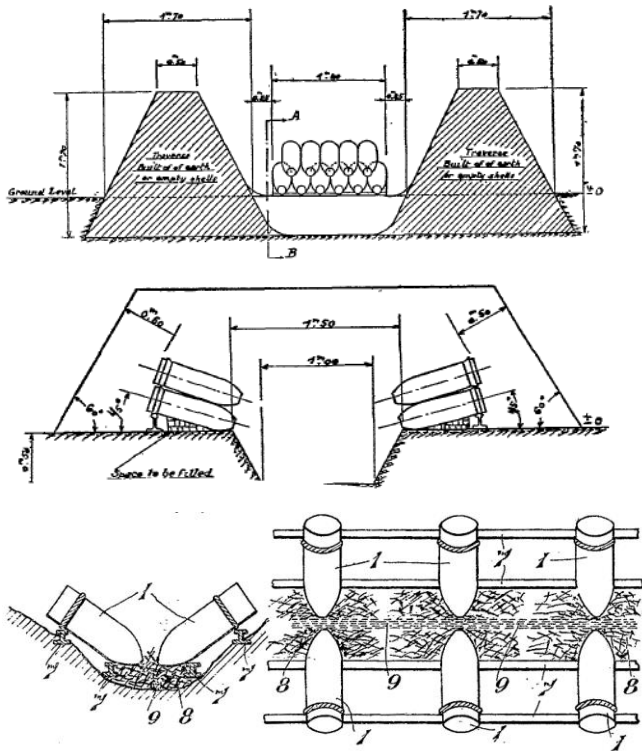


Figure 10 : Papier courrier de la société Pickett & Fils du 23 décembre 1926²³.

En l'absence d'informations relatives aux pratiques spécifiques à la « Place à gaz », le travail de dépouillement des archives relatives aux méthodes habituellement mises en œuvre par F.N. Pickett & Fils en France et en Flandres, apporte des éclairages précieux sur ce qu'auraient pu être les opérations de destruction de munitions chimiques au droit et aux abords de l'actuel site de la « Place à gaz ». Les opérations de destruction des munitions étaient confiées, au sein de la société F.N. Pickett & Fils, à un ancien officier scientifique russe du nom de M. Kostevitch, selon un procédé par brûlage (OB, « *Open-Burn* ») de munitions qu'il décrivait ainsi (1926)²⁴ :

²³ National Archives, Kew Gardens, Londres; MUN04/7011

²⁴ Kostevitch, M. (1926): Burning out filled projectiles. The Coast Artillery Journal 65: 463-473.



« Les aires de brûlage ("Burning Grounds") doivent être préparées comme suit : des tranchées de 30 cm de profondeur, 60 cm de large au fond pour 90 cm en surface, et de 14 m de long doivent être ouvertes. On place au fond de ces tranchées une couche de calcaire de 4 cm d'épaisseur avant chaque brûlage. Les obus de 77 mm, après que la fusée ait été retirée et que l'œil des engins ait été obstrué par un bouchon conique en bois, sont placés dès leur arrivée aux tranchées, les uns à côté des autres, aux bords des tranchées, l'ogive inclinée de 10° vers le bas de ces dernières. Quatre rangées d'obus de ce type sont superposées en veillant à ce que les têtes des obus soient bien alignées.

« Pour les projectiles de 105 et 150 mm, l'agencement est le même mais les obus sont séparés les uns des autres par une distance équivalente à deux fois le calibre afin d'éviter, en cas de détonation, les explosions sympathiques²⁵. Il ne doit y avoir dans ce cas qu'une seule rangée d'obus. La tranchée est ensuite comblée avec du bois de chauffage qui doit dépasser d'au moins un mètre des extrémités de la rangée d'obus et la hauteur de la couche de bois est le double de celle du tas d'obus. Les résidus [ndlr: d'explosif, comme le TNT, non valorisable] provenant des installations de vidage par l'eau chaude, tout comme certaines quantités d'acide picrique énergétique, sont à asperger sur le bois en quantité telle que le feu puisse prendre. Le feu doit être allumé par un cordon de sécurité d'au moins 5 mètres. Juste avant que la tranchée ait été comblée de bois, les bouchons en bois sont retirés des ogives des obus et placés dans une caisse spéciale réservée en dehors du chantier. Le contremaître et ses assistants, avant d'allumer le cordon de sécurité Bickford doivent s'assurer que plus personne n'est présent sur l'aire de brûlage. La mise à feu de telle manière à ce que le feu brûle contre le vent. Le contremaître doit alors se retirer immédiatement. Comme règle, on retient que le brûlage ne doit pas être commencé tant que tous les travaux dans l'usine soient achevés²⁶. Bien que les opérations de brûlage ne durent pas plus de deux heures, personne ne doit approcher l'aire de brûlage avant que le travail ait repris dans l'usine. Le lendemain matin, en arrivant sur le lieu du brûlage, les représentants du « Département de l'inspection des obus vides » doivent, après avoir mis des gants spéciaux, des masques, etc. s'assurer que le contenu de chaque obus a bien été détruit et que les projectiles sont vides. Au cas où un obus ne serait pas vide, ou si une fiole n'aurait pas été brisée, ce dernier est à boucher et réservé pour la prochaine opération de brûlage.

²⁵ Détonation d'une munition induite par l'onde de choc générée par une munition proche voisine

²⁶ Ces brûlages, comme on le verra plus tard en Alsace, s'effectuaient généralement de nuit.

Après que tous les obus vides aient été évacués, les tranchées doivent être méticuleusement nettoyée, et s'il persiste de l'explosif non brûlé, au cas où (ceci dit, ce qui reste extrêmement rare), il est récupéré et placé dans une caisse en bois avec couvercle et détruit le lendemain matin sur l'air de brûlage. Le « gas » contenu dans les obus à Croix bleu de 210 mm est renfermé dans un réservoir en tôle ondulée. En conséquence, du toxique peut subsister dans ce dernier après la première combustion. Ainsi pour être certain de la complète dissipation du toxique, les obus en question doivent être soumis à un processus particulier de brûlage à répéter 8 fois. Le procédé consiste, après la première combustion, à boucher de façon lâche les obus dans la tranchée. Pour ces aires de brûlage spéciales, les obus à Croix bleu de 210 mm doivent être placés de part et d'autre de bombes allemandes de 250 mm de sorte que la chaleur dégagée par le feu et les mines chauffe le contenu des obus chimiques²⁷ ».

Les conditions de cessation d'activité du site ne sont pas connues à l'heure actuelle et sur la base de la documentation disponible.

La carte de la Figure 20 a été construite sur le fond de la photographie aérienne de l'IGN (survol de 1951). Elle positionne les dépôts de munitions de la Gélinerie et du Bois du Blanc d'Etoc, le site de la « Place à gaz », les principales voies ferrées de desserte des dépôts, ainsi que les périmètres de sécurité généralement considéré par F.N. Pickett & Fils lors de ses opérations de brûlage. Les grands entonnoirs d'éclatement sont parfaitement visibles entre la Ferme de la Gélinerie au nord et la Ferme de la Warière au sud.

Comme pour la période précédente, malgré la masse d'informations collectées et leur qualité, des incertitudes subsistent en ce qui concerne la localisation précise des activités, leur nature, les quantités de munitions effectivement détruites et les conditions dans lesquelles ces activités se sont achevées tant au plan technique qu'environnemental.

3.5 TYPOLOGIE ET NATURE DES MUNITIONS DÉTRUITES SUR LE SITE DE LA « PLACE À GAZ »

Trois types d'informations ont été collectés par le BRGM afin de préciser la nature des munitions détruites sur le site de la « Place à gaz » :

- l'identification des éléments de munitions collectées lors des visites sur le site, par un expert de la Grande Guerre (H. Bélot, novembre 2014) ;
- la nature du marquage chimique des sols ;
- les documents d'archives.

Lors des investigations du BRGM, menées entre avril 2014 et octobre 2014 de nombreux éléments de munitions ont pu être recueillis. L'identification ces éléments, couplée aux spécificités des marquages chimiques des sols, ont permis de préciser les types de munitions qui ont été détruites sur le site.

²⁷ Kostevitch, M. (1926): Burning out filled projectiles. The Coast Artillery Journal 65: 463-473. Kostevitch, M. (1927): H. E. & P. burning ground. Paris. Patent GB212357

3.5.1 Munitions toxiques à Croix bleue (« *Blaukreuz* »), propriétés et effets des arsines vomitives

La présence d'arsenic, de phénylarsines, et de sous-produits de transformation (oxydation et/ou décomposition thermique), ainsi que la présence de nombreuses fioles ou tessons de fioles ayant renfermé des agents sternutatoires et vomitifs du type chlorure ou cyanure de diphénylarsine montrent que le site a accueilli des munitions dites à « *Croix bleue* ».

Majoritairement, il s'agit de fioles en verre vert, de 19 cm de long pour 4 cm de diamètre externe (3 cm de diamètre interne et 2,5 cm de diamètre externe au goulot), ayant renfermé des arsines vomitives et sternutatoires (à l'état solide).

Ces fioles ont chargé les munitions allemandes dites « à *Croix bleue* » de 77 mm et 77 mm allongées (tirées par le canon de campagne allemand de 77 mm) et de 105 mm. Ces fioles étaient obturées par des bouchons.

Trois types de bouchons correspondant à ces calibres ont été recueillis (cf. Figure 11) :

- 1) bouchons de fioles d'obus à « *Croix bleue* » en verre vert sombre (5 bouchons / 12 recueillis) ;
- 2) bouchons de fioles d'obus à « *Croix bleue* » en porcelaine blanche (6 bouchons/ 12 recueillis) ;
- 3) bouchons de fiole d'obus à « *Croix bleue* » en verre bleu clair (1 bouchon / 12 recueillis) (cf. Figure 11). À noter que le bouchon en verre bleu clair n'avait jamais encore été observé sur les sites de découverte des fioles d'arsine (Gremilly (55), ateliers *Clere & Schwander* à Muzeray (55), Trélon-Liessie (59), Poelkappellen (B)).

Les obus à « *Croix bleue* » étaient constitués par :

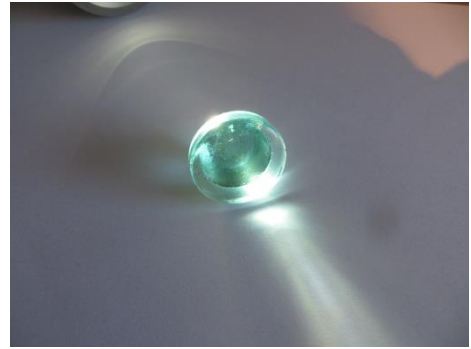
- **une fusée de mise à feu** positionnée sur la rallonge (pour les obus à *Croix bleue* de 77 mm allongés). Deux types de fusées ont été identifiés sur le site de la « *Place à gaz* », dont l'un présente les caractéristiques des fusées à percussion (vissées sur l'œil fileté de l'ogive, au-dessus d'une capsule en fer renfermant un explosif puissant formant une charge relais initiant la détonation de la munition ;
- **une enveloppe métallique**, dans laquelle était centrée la fiole en verre chargée d'arsine, dont le goulot était obturé par un bouchon et qui était tourné vers le bas de l'obus (le culot); ces ampoules étaient enveloppées dans un carton, l'ensemble étant serti d'un manchon d'explosif. Les archives montrent que les obus à « *Croix bleue* » étaient essentiellement chargés en 3,5,8-trinitrinaphtalène ou en 1,2-dinitrobenzène associés à une charge ogivale (en tête de l'obus, au contact de la fusée) de TNT (2,4,6-trinitrotoluène ou « *Tolite* »).

Les quantités d'explosifs étaient dosées de sorte à disperser le contenu de la fiole lors de la détonation, sous forme d'aérosols, selon une granulométrie leur permettant de traverser les masques à gaz usuellement utilisés par les parties adverses et à respecter une densité d'aérosols par m³ d'air pour laquelle le produit induit ses effets.

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux



Fiole d'arsine d'obus de 77 mm et de gauche à droite (D. Hubé, 2014) bouchon :
De fiole de 77 mm, en porcelaine,
De fiole de 77 mm, en verre bleu clair,
De fiole de 77 mm, en verre vert,
De fiole de 105 mm, en verre vert.



Bouchon de fiole d'obus de 77 mm en verre bleu clair (spécimen très rare).
D. Hubé, (2014).



Fioles en verre au moment de leur découverte (Spincourt, avril 2014). D. Hubé, (2014).



Fioles en verre d'obus à « Croix bleue » de 3 calibres différents (la fiole de gauche provenant d'un obus de 77 mm et du site de la « Place à gaz »). T. Bausinger / D. Hubé, (2014).

Figure 11 : Fioles d'arsines et leurs bouchons issus d'obus à « Croix bleue » ; aperçu photographique.

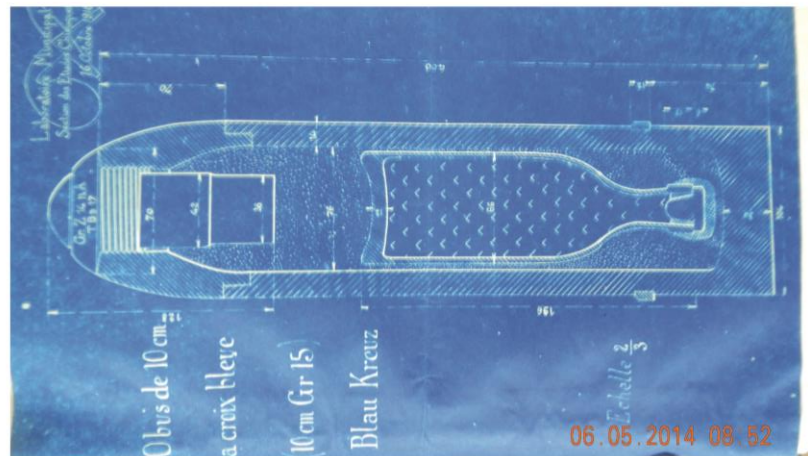
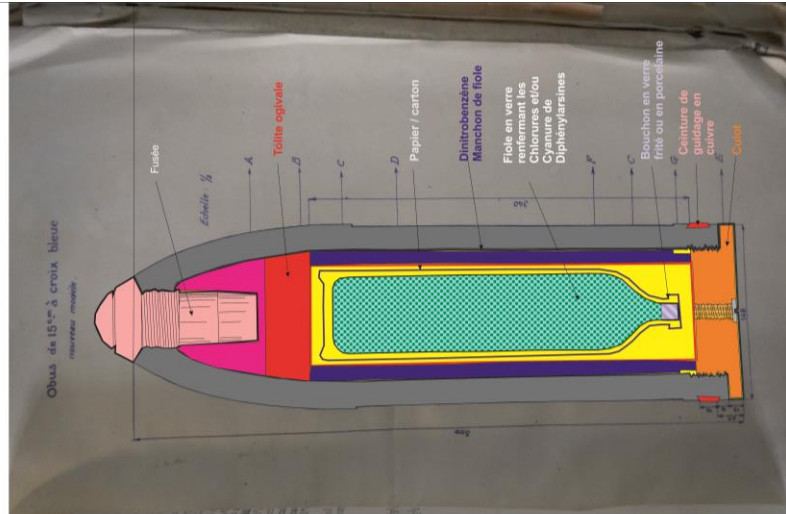


Figure 12 : Obus à « Croix bleue » de 150 mm ; Service Historique de la Défense, modifié²⁸.

²⁸ A Kling, Laboratoire Municipal de Chimie, Section des Études Chimiques de Guerre « Rapport relatif à un nouvel obus à croix bleue et à une nouvelle substance sternutatoire « le cyanure de diphénylarsine » », Grand Quartier Général, le 28 juin 1918.



Figure 13 : Obus à « Croix bleue » de 77 mm avec écorché (source : H. Bélot)²⁹ .

²⁹ Bundeswehr, garnison de Munster. Collections pédagogiques de l'ancienne installation militaire de démantèlement des chimiques. Auteur : H. Bélot, aimablement mise à disposition par l'auteur. L'obus de 77 est présenté ici avec la fusée KZ 14. Dans la réalité, la Kz 14 avait été retirée du service bien avant l'entrée en service des croix bleues.

Des éléments de munitions à « *Croix bleue* » de 105 mm ont pu être identifiés par H. Bélot. Les bouchons en verre vert du plus grand diamètre maximal (2.8 cm) (cf. Figure 14) correspondent peut être à ceux ayant été renfermés dans les munitions de 105 mm.

- 1) **Pièce formant l'ogive d'un obus allongé de 105 mm** pour obusier léger de campagne. L'obus était explosif ou à « *Croix bleue* », et amorcé par une fusée de type EHZ 17.



- 2) **l'éclat, d'obus de 105 mm**, explosif ou à Croix bleue, à corps en fonte aciérée moulée et passée au tour →

Figure 14 : Munition à « *Croix bleue* » de 105 mm et éléments de munitions découverts sur la « Place à gaz » (source : H. Bélot, novembre 2014).

La consultation des Archives Historiques de la Défense à Vincennes (SHD) permet de préciser la typologie de ces munitions et de leur chargement.

Les munitions de calibre 77 mm renfermaient des DC (Diphénylcycloarsine, Clark II, $(C_6H_5)_2AsCN$) ou des DA (Diphénylchlorarsine, Clark I $(C_6H_5)_2AsCl$) ; ces composés arsénisés se présentent sous forme de cristaux (solides) généralement jaunâtres, brun à noir, voire sous forme de liquides noirs et visqueux lorsque la formulation est impure. Chacune de ces fioles en verre renfermait environ 115 grammes de Clark I totalisant 28,3 % en arsenic métal (soit 32,5 grammes d'arsenic élémentaire) ; la fraction en arsenic dans le Clark II est proche de celle des obus chargés en Clark I (soit 41 grammes d'As élémentaire pour 120 grammes de DC).

Le nettoyage d'une fiole découverte au sein de la fosse nord-est de la « Place à gaz » (dépôt satellite) a permis de dégager un résidu noir goudronneux qui a pu être analysé par T. Bausinger (Envilytix GmbH) ; ce résidu est constitué par des chlorures et cyanures de diphénylarsine (dénommés respectivement Clark I et Clark II), les isomères du terphényl, de la triphénylarsine, du 9-Phénylarsafluorène, de l'acide diphénylarsinique, des oxydes de diphénylarsine et de nombreux composés arséniés inconnus (possiblement diphenylarsinhydroxyde et diphenylarsin-nitrate).

Ces résidus, issus de la pyrolyse des arsines, contiennent des sous-produits de décomposition chimique et thermique des chlorures et cyanures de diphénylarsines et le toxique de guerre chargeant initialement les fioles (Clark I et Clark II).

Selon les informations disponibles dans les archives du Service Historique de la Défense, les munitions de 105 mm à « Croix bleue » renfermaient environ 875 grammes de DC (soit 275 grammes d'arsenic élémentaire) pour un chargement en explosif de l'ordre de 1,2 kilogramme.

Les obus à « Croix bleue » chargés de DC apparurent tardivement sur le front de l'ouest de la Grande Guerre, vers septembre 1917. La DA (Clark II) fut quant à elle utilisée à partir de juin 1918. Seule l'artillerie allemande procéda au tir des obus à « Croix bleue ».

Aucune indication de terrain ne permet de supposer que des obus à « Croix bleue » de calibre supérieur à 105 mm (150 mm, 210 mm) aient été détruits / brûlés sur le site de la « Place à gaz » (contrairement à ce qui s'est produit sur le site de Trélon-Liessie et les aires de brûlage des ateliers *Clere & Schwander* à Muzeray).

L'historique indique qu'environ 200 000 munitions auraient été détruites sur le site de la « Place à gaz », ce qui apparaît cohérent avec la découverte d'une centaine de fioles en verre observées sur et aux alentours du site (essentiellement dans les dépôts satellites périphériques à la Tache centrale). Par contre, les sondages à la pelle mécanique effectués par le BRGM en octobre 2014, au droit et aux abords de la « Place à gaz » n'ont pas mis en évidence d'enfouissements ou d'indices d'enfouissement de munitions et/ou de fioles d'arsines.

Ainsi le verre résiduel issu des opérations de brûlage a vraisemblablement été évacué du site pour être recyclé ou mis en décharge.



Éléments issus des détonateurs relais à 23 grammes de mélinite³⁰ vissés sous les fusées allemandes EKZ 17 ou EHZ 17, pour obus de 77 mm du canon de campagne ou de 105 mm allongé pour obusier léger de campagne.

Tête en zamak³¹ d'une fusée EHZ 17. Apparemment l'obus n'a pas été tiré. La fusée armait des obus de 105 mm allongés pour obusier léger de campagne, explosifs ou à Croix bleue.

Figure 15 : Éléments de fusées d'artillerie et d'amorces collectés sur la « Place à gaz » (identification : H. Bélot, novembre 2014).

3.5.2 Obus à chargement chimique suffocant et/ou vésicant

La destruction de munitions toxiques suffocantes au droit du site de la « Place à gaz » a été démontrée en considérant :

- les analyses de sol réalisées par le BRGM et Envilytix (T. Bausinger) entre avril 2014 et octobre 2014. En effet ont été détectés dans les sols du monochlorobenzène et des thianes, composés qui correspondent respectivement au solvant et à des impuretés caractéristiques de l'ypérite (« gaz moutarde » ou Ypérite en France), « S-Lost ou Senfgas » en Allemagne, « Mustard gas » en Angleterre). L'agent vésicant de l'ypérite est le sulfure d'éthyle dichloré (dichlorésulfure de 2,2'-dichlorodiéthyle (C₄H₈Cl₂S)). Les thianes sont à l'origine de l'odeur de moutarde ou ailée de l'ypérite ;
- l'analyse par H. Bélot des éléments de munitions collectées sur la « Place à gaz » (ci-dessous).

³⁰ Nom donné au 2,4,6-trinitrophénol, encore appelé « acide picrique »

³¹ Alliage typique des fusées d'artillerie armant les obus allemand, formé de zinc et de cadmium



Figure 16 : Fusée EKZ 17 avec pointe en fonte aciérée pour obus de 77 mm.

La Figure 16 montre une fusée EKZ 17 avec pointe en fonte aciérée pour obus de 77 mm. Il s'agit d'une construction particulière apparue en 1918. Elle provient d'un obus non tiré, puisque l'allonge en métal léger n'a pas été insérée (mais elle peut par contre venir d'un obus pétardé).

Elle présente la croix frappée à froid qui indique que la gaine détonateur-relais était cimentée sous le corps de la fusée, construction réservée aux obus chargés en agents toxiques liquides, « Croix verte » (à chargement en diphosgène) ou « Croix jaune » (à chargement en ypérite). Ce type de fusée n'équipait ni les obus explosifs ni les obus à « Croix bleue ».

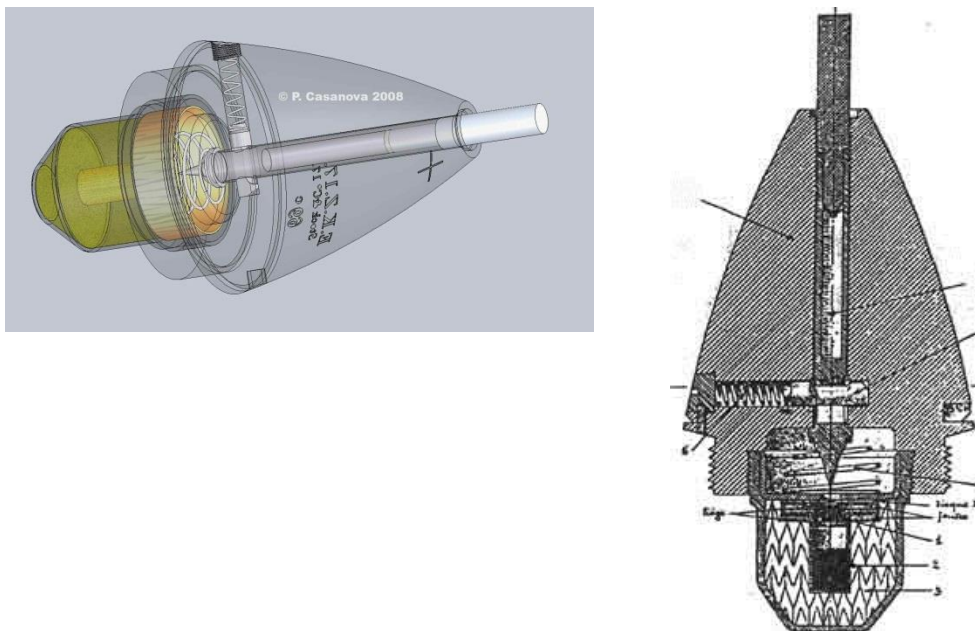
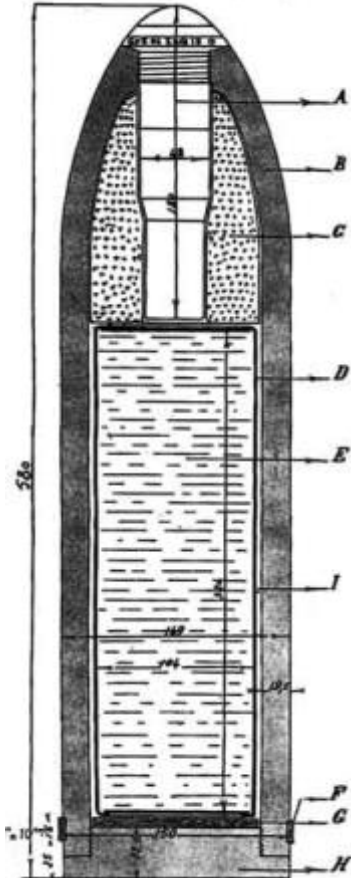


Figure 17 : Fusée EKZ 17 plan et reconstitution.

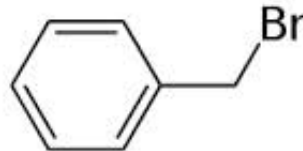
3.5.3 Obus à chargement lacrymogène de type « T-Stoff »

Les analyses des sols échantillonnés au sein de la fosse satellite nord-ouest (au nord-ouest de la clairière formant la « Place à gaz ») ont révélé la présence de teneurs élevées en brome lixiviable, associé à la présence de composés aromatiques bromés. L'occurrence du brome et de ces composés signe la présence possible de munitions chargées en agents lacrymogènes.



Ci-contre l'exemple d'un obus « *Obus – T* » de 150 mm allemand, renfermant 3 kilogrammes d'agent chimique (« *T-Stoff* ») conditionné dans un réservoir en plomb (2,58 kilogrammes) (produit corrosif pour le fer) constitué de :

- Bromure de xylyle + bromure de benzyle (40-50 %) $\text{CH}_3 \text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{Br}$,



- Dibromo benzyles + dibromo xylyles (25-30 %),
- Benzène, xylènes et cycles benzéniques méthylés (15-20 %)

Cette composition résulte de la bromation de benzol (mélanges impurs d'hydrocarbures issus de la condensation des gaz de cokerie et d'usines à gaz)³².

Figure 18 : Obus allemand lacrymogène de type T.

Ce mélange est caractérisé par une odeur de formol et d'amande amère, et une faible toxicité, mais aussi un pouvoir lacrymogène énorme.

Ces agents chimiques ont été vectorisés dans différentes munitions dès 1914. L'explosif était généralement constitué de « *Tolite* » (2.4.6-trinitrotoluène, ou TNT).

³² Service Historique de la Défense « Armes chimiques actuellement utilisée par l'Armée Allemande contre le front français » Ministère de la Guerre, Service du Matériel Chimique de Guerre. Paris, le 1er mai 1916 »

3.6 PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES TOXIQUES DE GUERRE IDENTIFIÉS

3.6.1 Agents toxiques arséniés

Les DA et DC, vectorisés par les obus à « *Croix bleue* », étaient historiquement classées au sein des toxiques de guerre parmi les composés sternutatoires. Il s'agit d'incapacitants physiques qui, en plus de leurs propriétés lacrymogènes, sont bronchodilatateurs et émétisants (« *vomiting agents* »).

Les arsines vomitives affectent uniquement les performances physiques de l'homme. Ils agissent par inhalation ou par contact (Plantamura, 2011). Leurs principales cibles sont les yeux, la peau, le nez, la bouche et les voies respiratoires. Les premiers symptômes d'intoxication sont quasi-immédiats sous l'effet de fortes doses. À doses moyennes, ils apparaissent 5 à 10 minutes maximum après l'exposition.

L'intoxication se manifeste par une sensation de brûlure des voies respiratoires supérieures, une hypersialorrhée, une rhinorrhée, et des éternuements incontrôlables, une toux, des nausées et des vomissements (Punte *et al.*, 1962, Nato, 2011). Au niveau oculaire, des larmolements et une sensation de brûlure sont les premiers symptômes ressentis. Un blépharospasme et une nécrose de l'épithélium cornéen sont également possibles. L'exposition cutanée conduit à une irritation avec érythème et démangeaisons.

En cas d'intoxication sévère, des complications peuvent être rencontrées : crises d'asthme, dyspnée voire œdème aigu du poumon et troubles neurologiques jusqu'à la perte de conscience (Burnat *et al.*, 2005).

Les toxicologues ont mis en évidence leur effet cytotoxique sur des leucocytes humains *in vitro* et leurs effets hépatiques chez le poisson (épinouche) *in vivo* ont été testés par Henriksson, *et al.*³³ L'inhibition de la prolifération cellulaire des leucocytes a permis de montrer que l'arsine la plus toxique était le Clark II (100 % d'inhibition à 0,75 mg.L⁻¹). L'étude sur l'hépatotoxicité n'a pas permis de mettre en évidence d'augmentation de la mortalité, de modification de la morphologie hépatique ou d'augmentation de la synthèse d'espèces réactives de l'oxygène par comparaison au groupe témoin³⁴. Concernant les effets sanitaires susceptibles de se manifester consécutivement à des expositions chroniques, il existe trop peu de données et d'études permettant de statuer sur le caractère toxique et/ou cancérigène des diphenylarsines.

³³ Henriksson J, Johannisson A, Bergqvist P-A, Norrgren L. The toxicity of organoarsenic-based warfare agents: in vitro and in vivo studies. Arch Environ Contam Toxicol 1996;30:213-9.

³⁴ J. Plantamura, A. Bousquet, E. Valéro, P. Vest, C. Renard. Les arsines vomitives : toxiques chimiques toujours d'actualité ? Médecine et armées, 2011, 39, 5, 453-457

Composé	CAS	Acronyme	Point de fusion (°C)	Point d'ébullition (°C)	Densité (g/cm ³)	Log K _{ow} (-)	Solubilité dans l'eau (g/l)	Log K _{oc} (-)
Clark I (DA)	712-48-1	DA	44	333	1,39	4,52	0,003-2	4,28
Clark II (DC)	23525-22-6	DC	31,5	346	1,33	3,29	2	3,84
Triphénylarsine	603-32-7	TPA	59-61	360	1,22	5,97	Insoluble	5,64

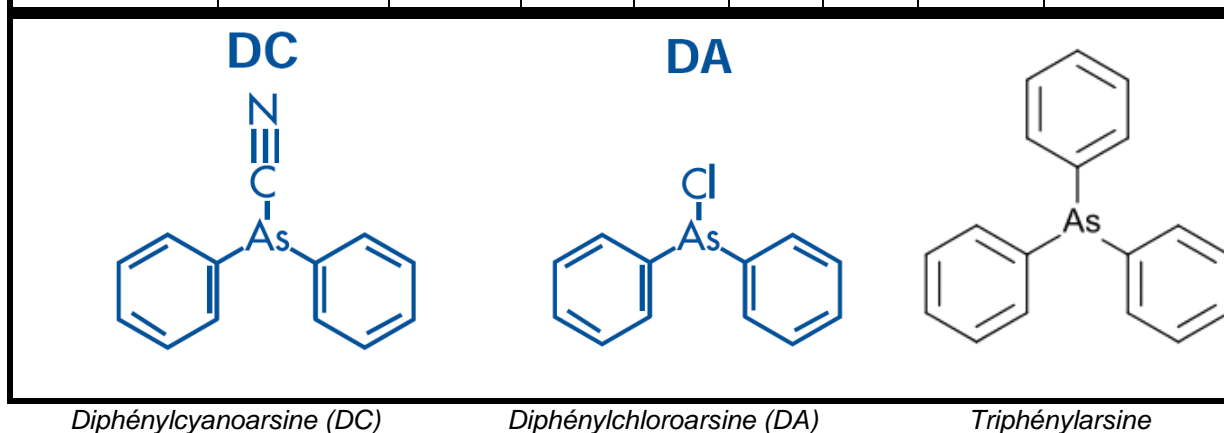


Tableau 1 : Principales propriétés des arsines vomitives Clark I et Clark II et de composés phénylarséniés (d'après Missiaen et al., 2010, modifié).

Les composés arséniés s'hydrolysent en formant des sous-produits similaires quel que soit la molécule initiale ; par exemple, le Clark I (DA) et le Clark II (DC) se dégradent en acide diphénylarsineux (As³⁺) (DPA) qui réagit aisément en s'oxydant en oxyde (bis)diphénylarsénique (Haas et al., 1998 ; Hanaoka et al., 2005).

Dans les conditions naturelles, l'oxydation a tendance à produire essentiellement de l'acide diphénylarsénique (As⁵⁺) (DPA(ox) ou « DPAA »). Ainsi, en présence d'eau ces composés ne persistent pas : Hanaoka et al. (2005) ont mis en évidence une dégradation totale en 30 min en solution aqueuse. La toxicité de ces sous-produits d'hydrolyse équivaut à celle des DA et DC (Franken & Hafez, 2009).

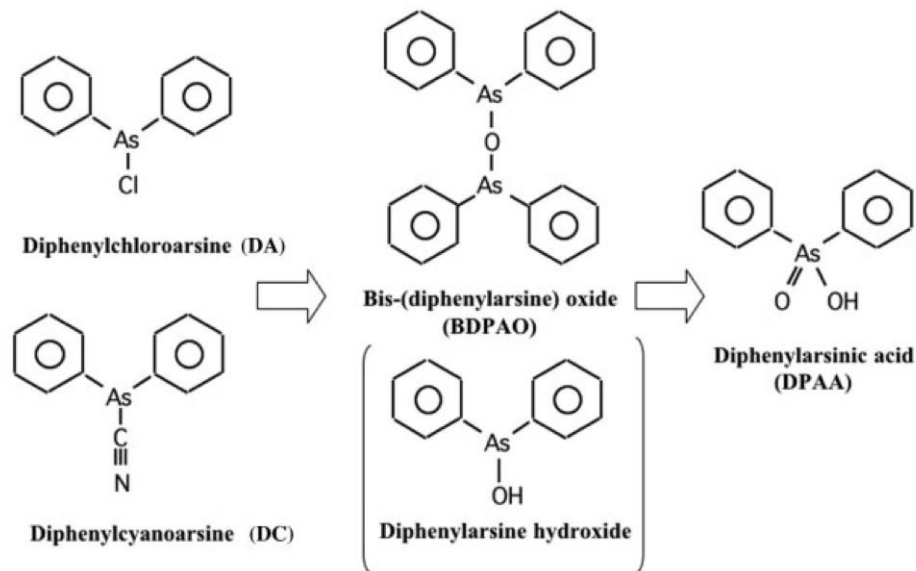


Figure 19 : Dégradation et transformation des phénylarsines³⁵.

Cet acide est persistant et mobile du fait de sa polarisation par l'apparition d'un groupement acide - OOH sur l'atome d'arsenic. L'acide diphenylarsinique, qui est le sous-produit de transformation environnemental des diphenylarsines, a été étudié afin d'évaluer ses effets sur la santé suite aux pollutions des eaux souterraines, exploitées pour l'alimentation en eau potable, à Kamisu, au Japon. Cette pollution est générée par une usine de fabrication d'arsines de la Seconde Guerre mondiale (Ishizaki *et al.*, 2004). Les chercheurs identifient chez les personnes exposées par l'ingestion d'eau de boisson des atteintes cérébrales et, chez les enfants, des retards mentaux associés à des atrophies du cerveau³⁶. Parkes *et al.*, ont démontré dès 1947 que les triphénylarsines ($\text{As}(\text{C}_6\text{H}_5)_3$) peuvent être générées par le chauffage à plus de 200 °C du chlorure de diphenylarsine. Les obus à « Croix bleue » sont une spécificité de l'artillerie chimique allemande de la seconde moitié de la Grande Guerre. Ils ont été développés en 1917 afin de parer la capacité de l'adversaire à se protéger des attaques chimiques. Les aérosols d'arsine produits par l'explosion de ces obus peuvent traverser le masque à gaz. Le fantassin ainsi exposé, pris de vomissement, d'intenses larmoiement et crises d'éternuement, est forcé de retirer son masque à gaz. Ces tirs d'obus à « Croix bleue » étaient accompagnés de bombardement par des projectiles suffocants (« Croix jaune », « Croix verte », double « Croix verte »). Par ailleurs, les effets des arsines étaient particulièrement handicapants pour le tir et la bonne visée.

3.6.2 L'Ypérite

Le sulfure d'éthyle dichloré, de formule $\text{C}_4\text{H}_8\text{Cl}_2\text{S}$ se décompose par hydrolyse en thiodiglycol (TDG) (Munro *et al.*, 1999), qui lui-même s'oxyde en thiodiglycol sulfoxyde (TDG(ox)) (Black *et al.*, 1992) ; il se dégrade par ailleurs en d'autres composés, mais qui restent minoritaires devant TDG et TDG (ox). Aux basses températures - comme celles rencontrées au fond des lacs et des sites marins d'ennoyage-, 3 - 5 °C, l'ypérite se fige et forme un solide polymérisé dispersé, ralentissant l'hydrolyse et la dissolution (Sanderson & Fauser, 2008).

³⁵ Ishii *et al.*, 2004

³⁶ Ishii K., Tamaoka A., Otsuka F., Iwasaki N., Shin K., Matsui K., Endo G., Kumagai Y., Ishii T., Shoji S., Ogata T., Ishizaki M., Doi M., and Shimojo N. Diphenylarsinic Acid Poisoning from Chemical Weapons in Kamisu, Japan. 2004 American Neurological Association

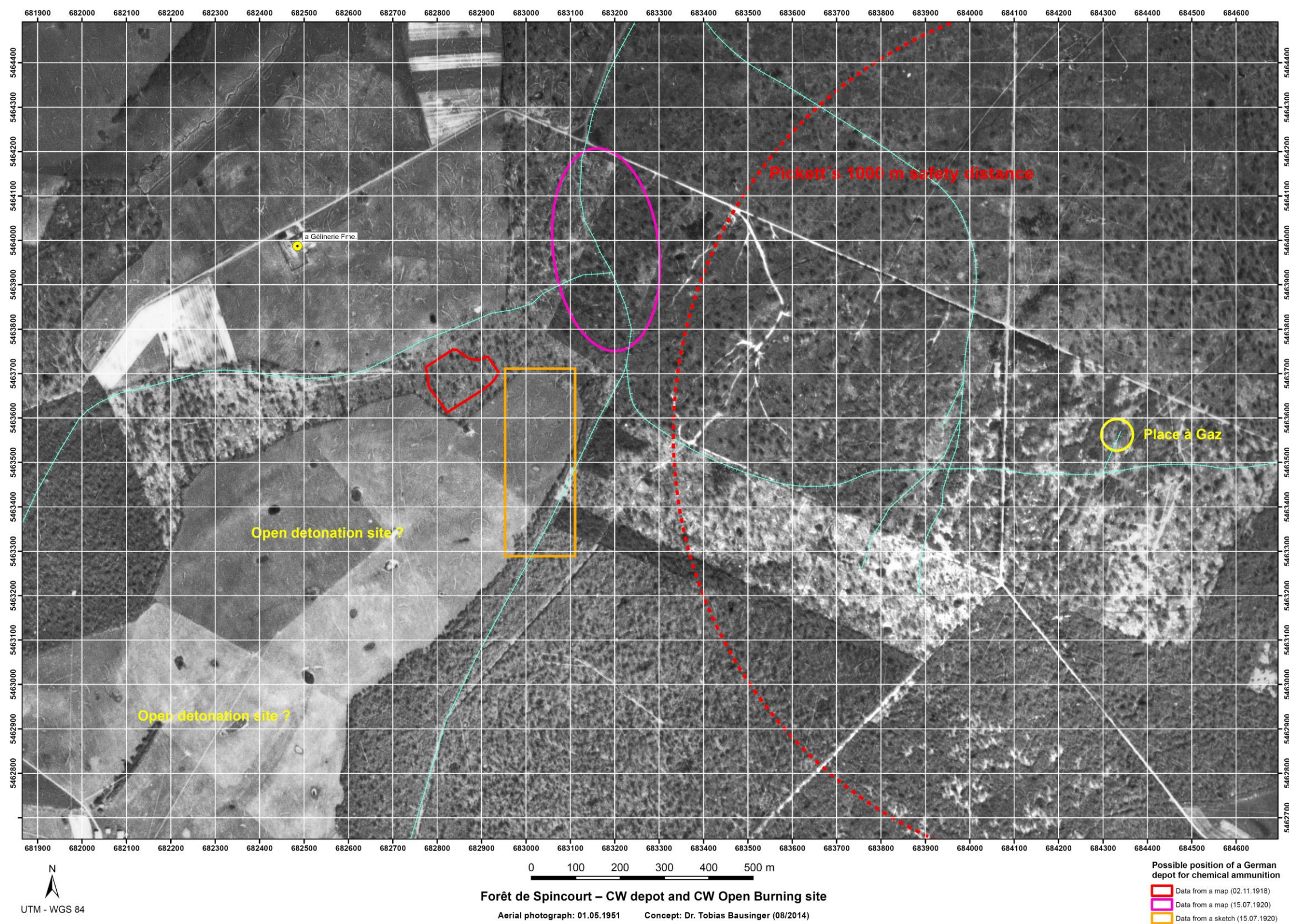


Figure 20 : Carte positionnant les principaux dépôts de munitions et la « Place à gaz ».

4. Investigations réalisées et résultats

4.1 PHASAGE DE L'ÉTUDE

L'étude du BRGM a été organisée selon une approche progressive, raisonnée et proportionnée, en accord avec les recommandations des textes du Ministère de l'Ecologie encadrant la gestion des sites et sols pollués (Note aux Préfet du 08 février 2007 et leurs annexes ; <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Sites-et-sols-pollues-.html>).

Les différentes phases de l'étude ont été réalisées dans un contexte soumis à de fortes contraintes tant au niveau sécurité qu'au niveau environnemental. Les investigations ont été adaptées au fur à mesure de l'avancée du projet selon ces contraintes. Les 5 phases d'études s'agencent de la manière suivante :

- **phase 1, dite « d'orientation »** : dont l'objectif a été de procéder à une synthèse des données existantes (historiques, documentaires, géologiques, hydrogéologiques...) complétée par une visite détaillée et exploratoire du périmètre d'étude ;
- **phase 2 : diagnostic de la qualité des sols de surface** au droit et aux abords de la « Place à gaz », avec dans un premier temps la réalisation d'analyses exhaustives visant à identifier les polluants en présence sur quelques échantillons ciblés, puis, dans un second temps une campagne d'échantillonnage élargie à l'ensemble de la zone limitée polluants ciblés et considérés comme caractéristiques du site et de sa pollution. Durant cette campagne, l'échantillonnage a été élargi aux abords de la « Place à gaz » pour à la fois circonscrire la zone de pollution concentrée (tache centrale) et à la fois s'assurer de l'absence d'autres dépôts satellites ;
- **phase 3** : cette phase avait pour objectif de permettre **l'évaluation de l'extension verticale des pollutions concentrées** constatées en surface (estimation de la profondeur de migration des polluants vers la profondeur). Cette phase de travail a été sécurisée par la définition d'un protocole d'intervention « sites et sols pollués » en environnement pyrotechnique (« *Étude de Sécurité du travail* », EST), élaboré à la demande de la DIRRECCTE par la société Cardem-pyro (opérateur pour la réalisation des sondages et pour la sécurisation pyrotechnique du chantier), en relation avec le BRGM et les services de la Sous-préfecture de Verdun. Le document a été approuvé par l'IPE (Institut des Poudres et Explosifs) ;
- **phase 4** : elle avait comme objectif **de resserrer le diagnostic des sols de surface** par des compléments d'échantillonnage sur un dépôt identifié au Nord de la « Place à gaz » à la faveur de la phase 3. Un suivi de la qualité des eaux des ruisseaux drainant le site a été réalisé à la même occasion ;
- **phase 5** : elle a consisté **procéder à une évaluation de la situation environnementale de la zone, à l'analyse des expositions et des risques, et à la définition de mesures de gestion dont la mise en œuvre permettrait de maîtriser les risques pour l'environnement.**

4.2 PHASE D'ORIENTATION : SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES EXISTANTES ET VISITE DÉTAILLÉE DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

4.2.1 Visite du site

La visite de terrain de la phase 1 de l'étude a été réalisée le 15 avril 2014 et a consisté à :

- étayer les données historiques, environnementales et hydrogéologiques disponibles pour ne permettre une synthèse (présentée dans le §2 de ce rapport) ;
- réaliser une visite détaillée du périmètre d'étude afin d'identifier, décrire et piqueter d'éventuels dépôts anthropiques présents au droit de la zone d'étude.

La « Place à gaz » est actuellement clôturée par un grillage et un barbelé. L'interdiction de pénétrer sur le site est fixée par un arrêté préfectoral du 3 septembre 2012. La clôture a été étendue début 2016 afin d'interdire l'accès aux dépôts « satellites » situés en dehors de la tache centrale.



« Place à gaz » ; aperçu général.



Obus brûlé et tessons de fioles d'arsine retrouvés dans une fosse satellite de la « Place à gaz ».



Ruisseau du Pont des Meuniers.

Figure 21 : Photographies prises lors de la visite de site.

La visite de site a mis en évidence la présence, en dehors de la tache centrale, de quelques dépôts de résidus de combustion des munitions (fosse et plaquages de résidus périphériques à la clairière formant la « Place à gaz »). La présence de fioles (entières ou en tessons épars), de dépôts cendreux noirs, d'éléments métalliques, a été observée dans chacun de ces dépôts. Les principaux dépôts identifiés, au nombre de 3, sont tous situés à l'est et au sud de la « Place à gaz »³⁷.

Ces mêmes dépôts ont fait l'objet d'un échantillonnage pour analyse en laboratoire (phase 2). Un obus (probablement brûlé) a également été découvert dans une des fosses jouxtant la « Place à gaz » (appelée fosse n° 1). Cet engin a été signalé à la Préfecture qui l'a fait enlever pour destruction par le Service du Déminage de Metz. La localisation de ces dépôts et des observations faites lors de la visite est précisée sur l'esquisse de la Figure 22.

³⁷ Le plus grand dépôt a été identifié de façon fortuite en octobre 2014, lors du creusement d'une tranchée de reconnaissance « témoin », en dehors de la zone alors reconnue comme polluée, à 30 m au nord de la Place à gaz. Ce dépôt, de 5 à 15 cm d'épaisseur, est désigné sous le terme « Dépôt nord ».

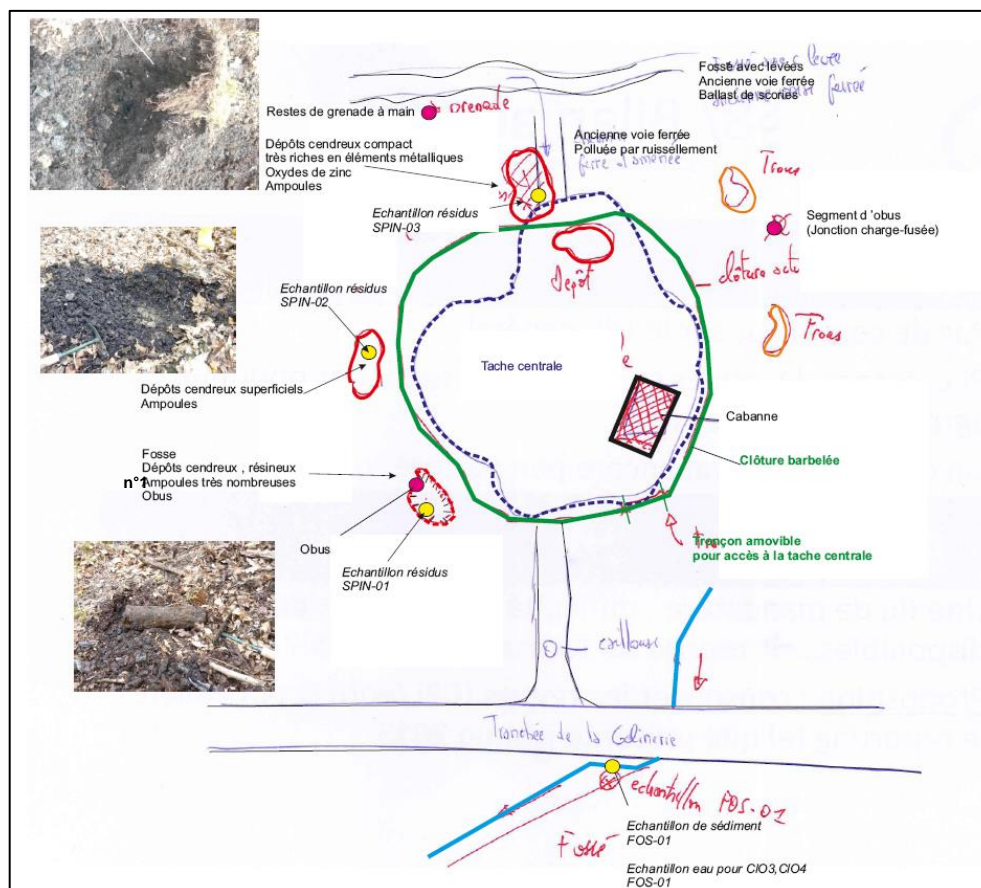


Figure 22 : Schéma de la « Place à gaz » et de ces environs annoté à partir des observations faites lors de la visite du 15 avril 2014 (le nord est en bas du croquis).

4.2.2 Vulnérabilité des milieux et schéma conceptuel préliminaire

Les informations documentaires et historiques collectées dans le cadre de cette étude, les études BRGM antérieures (rapport BRGM n° RP-58084-FR d'avril 2010) et une publication scientifique de T. Bausinger (2007), ont permis d'établir, aux termes de la phase 1, un schéma conceptuel de transfert et d'exposition préliminaire. Ce schéma présente et synthétise toutes les hypothèses de transferts des polluants depuis les dépôts de la « Place à gaz » vers les différents compartiments de l'environnement, les possibilités d'exposition d'éventuels usagers du site, et les milieux potentiellement impactés par le site. Ce schéma a constitué une base de travail utilisée pour orienter les investigations de la phase 2.

Typologie des zones de pollution concentrée

Les résidus de combustion, liés à la destruction d'anciennes munitions chimiques allemandes encore présents au droit de la « Place à gaz », constituent la principale zone de pollution concentrée. Peuvent y être également ajoutés, les dépôts satellites observés autour de la « Place à gaz », hors de l'enceinte clôturée (cernant la clairière de la « Place à gaz »).

À ces zones de pollution concentrée il convient d'ajouter les résidus de combustion découverts le long de la tranchée de la Gélinerie, désignés sous le terme « Dépôt nord », au moment de la phase 3 du diagnostic.

Potentiels de transferts

Les voies de transferts potentielles, depuis les zones de pollution concentrée vers l'environnement, sont :

- **migration par infiltration *per descensum* des eaux météoriques vers les sols, puis vers les eaux souterraines** (nappes perchées), via différents processus biogéochimiques (transferts verticaux) ;
- **migration via les eaux souterraines** : L'existence potentielle de nappes perchées, au droit de la « Place à gaz » et/ou des dépôts satellites, susceptible de véhiculer la pollution vers les eaux de surface et/ou d'autres compartiments aquifères (transfert latéraux) ne peut être écartée à ce stade ;
- **migration via les eaux superficielles** : Les polluants présents au droit de la « Place à gaz » et des dépôts satellites peuvent migrer *via* les eaux de ruissellement vers les ruisseaux entourant la « Place » (Fossé de la Worière et Pont des Meuniers), jusqu'à l'étang des Hauts Fourneaux situé plus en aval ;
- les sols de la « Place à gaz » sont nus. Les polluants peuvent potentiellement **se disperser dans l'air par envol des poussières**. Par contre, au droit des dépôts satellites, les sols ci sont en partie protégés par une couverture végétale (arbres, arbustes, etc.), ce qui limite les circulations d'air et donc les possibilités d'envol de poussières. Le transfert des polluants présents dans les sols vers les végétaux (dont les champignons) peut également avoir lieu dans les zones où la croissance végétale est possible.

Potentiels d'exposition

Les possibilités d'expositions, directes ou indirectes, identifiées pour chaque milieu sont :

- **pour les sols** :
 - l'exposition des promeneurs, et notamment des enfants âgés de moins de 6 ans, potentiellement concernés par le « porter main bouche » et l'ingestion non intentionnelle de sols,
 - l'inhalation de poussières issues des résidus de combustion,
 - la consommation de végétaux (champignons) ou d'animaux par les populations fréquentant occasionnellement le secteur environnant de la « Place à gaz » (celle-ci étant clôturée) ;
- **pour les eaux superficielles** : exposition indirecte par ingestion de poissons en présence de pollutions des eaux de surface piscicole.

Les milieux d'exposition retenus sont :

- **les sols de surface** : autour de la « *Place à gaz* » essentiellement, la tache centrale étant clôturée et interdite d'accès par arrêté préfectoral ;
- **les eaux superficielles** : l'étang des Hauts-Fourneaux ;

Les cibles susceptibles d'être exposées sont :

- **les personnes fréquentant occasionnellement la forêt de Spincourt, enfants ou adultes** (promenade ou cueillette de champignons).

Le schéma conceptuel préliminaire présenté en Figure 23 a été proposé comme base pour la poursuite de la démarche aux termes de la phase 1.

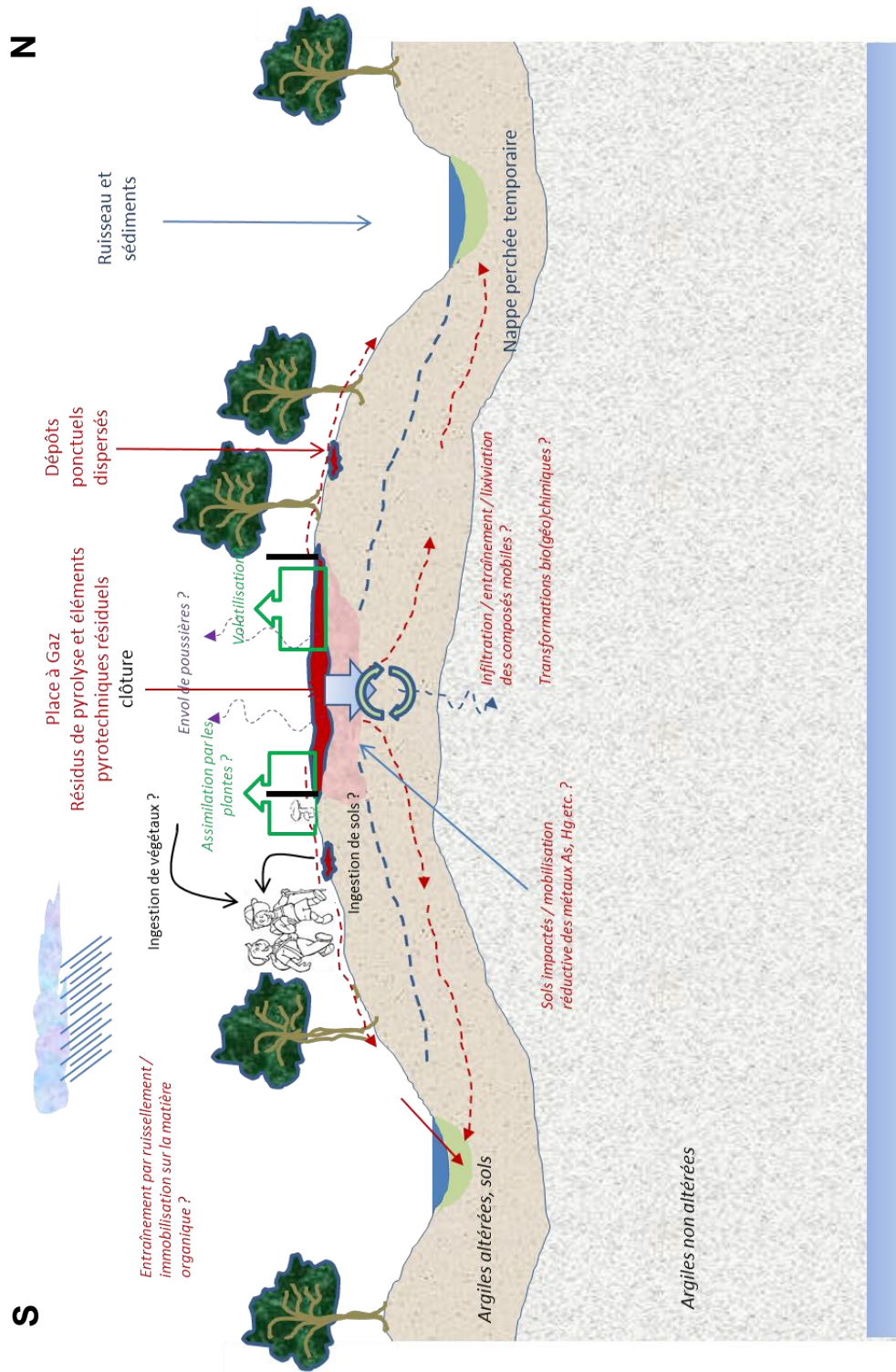


Figure 23 : Schéma conceptuel préliminaire de la « Place à gaz ».

4.3 PHASE 2. DIAGNOSTIC DE LA QUALITÉ DES SOLS DE SURFACE

4.3.1 Première étape : identification des cortèges de polluants en présence et caractérisation des dépôts « satellites »

Lors de la visite d'avril 2014, 3 échantillons de sols (SPIN01, SPIN02 et SPIN03) ont été prélevés dans l'environnement proche ou éloigné de la « Place à gaz », puis analysés au laboratoire.

L'objectif de ces prélèvements était triple : 1) identifier les polluants en présence au niveau de la tache centrale, 2) orienter les investigations et le programme analytique des phases ultérieures et 3) acquérir des informations sur la nature et la typologie des résidus et matériaux formant les dépôts satellites identifiés lors de la phase 1.

a) *Échantillonnage dans 3 dépôts satellites en dehors de la tache centrale et prélèvements d'eau de surface*

Points échantillonnés

Trois échantillons de sols ont été prélevés à la pelle manuelle (entre 0 et 20 cm de profondeur) dans la fosse (SPIN02) et au niveau des dépôts identifiés lors de la visite de site (SPIN01 et SPIN03). Un échantillon de sol témoin (TEMOIN01, désigné par SPIN05 par le laboratoire Envilytix) a également été prélevé hors zone polluée pour comparer les résultats des échantillons présumés pollués à ceux d'un sol correspondant à l'état non perturbé de l'environnement. Les sols de surface ont été prélevés conformément aux normes en vigueur (§1.3). Un échantillon baptisé « RESIDU01 » (désigné par SPIN04 pour le laboratoire Envilytix), prélevé dans une fiole d'arsine cassée, d'aspect gras et charbonneux, issu du brûlage des arsines, a également été prélevé. La Figure 25 indique la localisation de ces points de prélèvements.



Figure 24 : Photographies de SPIN01 et SPIN03.

Chaque prélèvement a fait l'objet d'une fiche de prélèvement.

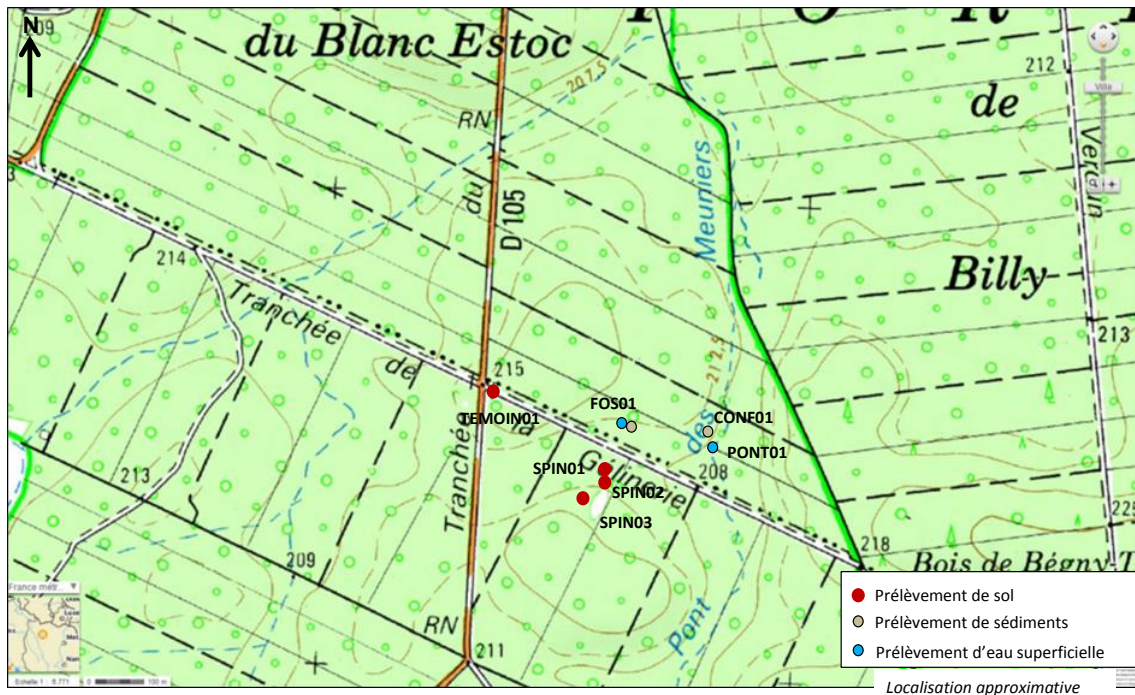


Figure 25 : Plan de localisation des points de prélèvements.

Ces échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre, puis stockés dans une glacière réfrigérée avant d'être envoyés aux différents laboratoires selon les analyses à réaliser (Wessling, laboratoire du BRGM, Dioxlabs, Envilytix).

Programme analytique appliqué

La liste analytique appliquée au stade de la phase 2 a été établie sur la base des connaissances historiques relatives aux pratiques de brûlage de munitions et aux constituants des munitions de la Première Guerre mondiale. Ont ainsi été visés par les analyses :

- les métaux toxiques (Zn, Cd, Hg, Cu, Pb, etc.) formant les fusées, détonateurs, les corps des engins, les caisses de munitions, etc. ;
- l'arsenic issu de la décomposition thermique des arsines ;
- les sous-produits organiques de décomposition thermique des toxiques de guerre (dioxines & furanes chlorées ou bromées, triphénylarsine, chlorures, bromure, etc.) ;
- les toxiques de guerre, avec leurs sous-produits de transformation environnementale (comme l'acide diphénylarsinique) et leurs solvants (comme le monochlorobenzène) ;
- les explosifs azotés typiques de la Grande Guerre (TNT, dinitrobenzènes, nitronaphtalènes, etc.) et leurs sous-produits de transformation environnementale ;
- les sels azotés et chlorés entrant dans la composition de certains explosifs (nitrate NO_3^-), ammonium (NH_4^+), sels de chlorate (ClO_3^-) ou de perchlorate (ClO_4^-), etc.).

Le programme analytique réalisé pour chaque échantillon est détaillé dans le Tableau 2 :

	Laboratoire	SPIN01	SPIN02	SPIN03	TEMOIN01	RESIDU01
Matière sèche	Laboratoire BRGM	x	x	x	x	x
8 Métaux et métalloïdes (As, Cr, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn) et Sb	Laboratoire BRGM	x	x	x	x	x
HAP	Wessling	x	x	x		
BTEX	Wessling	x	x	x		
PCDD/PCDF	Wessling	x	x	x		
PCB-DL	Wessling			x		
PBDD/PBDF	Dioxlab			x		
As, Br (sur éluat)	Laboratoire BRGM	x	x	x		
Cl, ClO3, ClO4-, I, NH4, NO3, SO4 (sur éluat)	Laboratoire BRGM	x	x	x		
composés pyrotechniques et agents chimiques de combat*	Envilytix	x	x	x		x

* la liste exhaustive des 62 composés analysés est présentée en dans les tableaux de résultats.

Tableau 2 : Programme analytique pour les échantillons de sols.

Ce programme analytique a été complété par une recherche systématique des composés organiques sur les échantillons SPIN01, SPIN02 et SPIN03, réalisée par le laboratoire Envilytix. Ce type d'approche qualitative permet de détecter et d'identifier, avec une certaine probabilité d'authentification, les substances organiques non volatiles présentes dans un échantillon, et donc de contrôler la pertinence du programme analytique quantitatif et le cortège de polluants en présence.

Choix de la méthode d'extraction des composés organiques nitrés pour l'analyse au laboratoire

Des doublons d'échantillons ont été analysés par le laboratoire Envilytix pour la recherche des composés organiques entrant dans la formulation des explosifs et agents toxiques de guerre. Une extraction par solvant organique (méthanol ou acétone) a été effectuée sur un des deux échantillons tandis que le second a été soumis à une extraction par lixiviation (1 L d'eau pour 1 kg de sol). Ceci a permis de constater que la lixiviation à l'eau minorait les teneurs en composés organiques par rapport à l'extraction aux solvants, cet écart étant lié à la présence d'une importante fraction charbonneuse et de matière organique qui adsorbe fortement les composés organiques visés par l'analyse. Ces derniers ne sont extractibles depuis cette matrice que par les solvants organiques.

Le BRGM a cependant privilégié une approche méthodologique et métrologique mettant en œuvre l'extraction des composés par lixiviation à l'eau pour les raisons suivantes :

- la lixiviation permet d'extraire les composés à partir d'un volume important de sol, ce qui permet de limiter l'impact de la distribution particulière des polluants dans les sols sur la représentativité du résultat sur échantillon eu égard aux niveaux de pollution réellement présents dans les sols ; en effet l'extraction aux solvants s'effectue sur quelques grammes de sol, alors que la lixiviation mobilise 0,75 à 1 kilogramme de matériaux solides ;
- la lixiviation rend compte des teneurs en composés labiles, susceptibles d'être à l'origine d'exposition et/ou d'émissions dans l'environnement ;
- la lixiviation (qui utilise de l'eau) est par ailleurs plus représentative des phénomènes susceptibles de se produire dans le milieu naturel, la mise en contact des sols du site avec des solvants apparaissant assez improbable dans le contexte du site.

Ainsi, pour les composés nitroaromatiques et l'acide diphénylarsinique, une lixiviation sur 24 heures a été réalisée, suivie d'une centrifugation, puis d'une extraction solide-liquide permettant d'obtenir un extrait finalement analysé par HPLC-DAD. Pour l'analyse des toxiques de guerre arséniés et sulfurés, du chlorobenzène par GC-MS, l'extraction a été effectuée dans un bain de dichloréthane sous agitation ultrasonique.

Cette démarche méthodologique a été suivie dans toutes les phases de l'étude impliquant des mesures et analyses des composés organiques.

b) Prélèvements et analyses de sédiments

Les sédiments ont été prélevés conformément aux normes en vigueur (§1.3).

Deux échantillons de sédiments ont été prélevés à la pelle manuelle entre 0 et 20 cm de profondeur, l'un dans le fossé longeant la tranchée de la Gélinerie (FOS01) et l'autre dans le ruisseau Pont des Meuniers (CONF01). Leur localisation est précisée sur la Figure 25.

Chaque prélèvement a fait l'objet d'une fiche de prélèvement.

Ces échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre, stockés dans une glacière réfrigérée, puis au laboratoire (Laboratoire BRGM) pour analyse. Le programme analytique réalisé pour chaque échantillon est détaillé dans le Tableau 3 :

	Laboratoire	FOS01	CONF01
Matière sèche	Laboratoire BRGM	x	x
8 Métaux et métalloïdes (As, Cr, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn) et Sb	Laboratoire BRGM	x	x

Tableau 3 : Programme analytique pour les échantillons de sédiments.

c) Prélèvements et analyses d'eaux superficielles

Les eaux superficielles ont été prélevées conformément aux normes en vigueur (§ 1.3).

Deux échantillons d'eaux superficielles ont été prélevés directement via le flacon de prélèvement, l'un dans le fossé longeant la tranchée de la Gélinerie (FOS01) et l'autre dans le ruisseau Pont des Meuniers (PONT01). Leur localisation est précisée sur la Figure 25.

Chaque prélèvement a fait l'objet d'une fiche de prélèvement.

Les échantillons ont été conditionnés dans des flacons en verre, puis stockés dans une glacière réfrigérée, et envoyés au laboratoire (Laboratoire BRGM) pour analyse.

Le programme analytique appliqué aux deux échantillons est détaillé dans le tableau suivant (cf. Tableau 4) :

	Laboratoire	FOS01	PONT01
8 Métaux et métalloïdes (As, Cr, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn) et Sb	Laboratoire BRGM	x	x
Cl, ClO3, ClO4-, I, NH4, NO3, SO4	Laboratoire BRGM	x	x
Cyanures libres et totaux	Laboratoire BRGM	x	x

Tableau 4 : Programme analytique pour les échantillons d'eaux superficielles (campagne du 15/04/14).

d) Résultats analytiques bruts sur les différents milieux investigués

Le Tableau 5 présente les résultats analytiques obtenus sur le milieu sol. Le Tableau 9 présente par ailleurs ceux pour les eaux superficielles.

Les bordereaux d'analyse des résultats de sols sont présentés en Annexe séparée.

Résultats sur les sols

Les échantillons de sols ont été prélevés dans les fosses satellites présentes autour de la tache centrale de la « Place à gaz ».

* Métaux sur brut

Les résultats montrent que les échantillons prélevés dans les résidus périphériques à la clairière présentent des teneurs hétérogènes pour l'ensemble des neuf métaux et métalloïdes, avec des teneurs en arsenic comprises entre 1 124 et 9 436 mg/kg MS, en chrome comprises entre 19 et 101 mg/kg MS, en cadmium entre 3 et 80 mg/kg MS, en cuivre entre 191 et 2 947 mg/kg MS, en mercure entre 0.16 et 15.7 mg/kg MS, en nickel entre 19 et 75 mg/kg MS, en plomb entre **2 357 et 143 922 mg/kg MS**, en antimoine entre 32 et 256 mg/kg MS et en zinc entre 512 et 30 836 mg/kg MS.

Il est à noter que les prélèvements de la fosse 1 présentent **des teneurs en plomb** et en antimoine respectivement **10 à 60 fois** et 1,5 à 8 fois supérieures à celles mesurées dans les deux autres fosses satellites. *A contrario*, les teneurs en arsenic, chrome, cadmium, cuivre, mercure et zinc des résidus de la fosse 1 sont inférieures à celles mesurées dans les deux autres fosses satellites.

Les teneurs mesurées pour l'ensemble des métaux et métalloïdes dans les fosses satellites sont systématiquement supérieures aux teneurs mesurées dans l'échantillon témoin (TEM01), excepté pour le chrome.

* Analyses sur éluat (après lixiviation)

L'arsenic lixiviable est quantifié majoritairement dans les échantillons SPIN02 et SPIN03 (1 444 µg As/L et 2 369 µg As/L) et en moindre quantité dans l'échantillon SPIN01 (84,7 µg As/L).

Les résidus de la fosse située au nord-est de la tache centrale montrent des teneurs élevées en brome total lixiviable. Le brome lixiviable a été mesuré à une concentration de 9 960 µg/L en SPIN01, contre 31,9 µg/L en SPIN02 et 75,3 µg/L en SPIN03. Le brome de SPIN01 est, comme nous le verrons plus loin, associé à des formes organo-bromées issues de toxiques de guerre.

Les ions chlorure et iodure sont présents de manière hétérogène dans les trois échantillons, avec des concentrations variant de 690 à 1 236 mg/L pour les ions chlorure et de 1,1 à 6,8 µg/L en ions iodure. Les ions ammonium sont quantifiés en SPIN01 (0,35 mg/L) mais non sur les deux autres échantillons. L'échantillon SPIN01 présente une concentration de 23,9 mg/L en nitrates contre 5,5 et 5,8 mg/L sur SPIN02 et SPIN03. Pour les sulfates, leurs concentrations varient de 3,3 mg/L en SPIN01 à 7,3 mg/L en SPIN03.

* Composés aromatiques (CAV-BTEX)

Seul l'échantillon SPIN01 présente des teneurs en toluène (0,3 mg/kg), m,p-xylènes (0,45 mg/kg), en mésitylène (0,3 mg/kg), pseudocumène³⁸ (0,45 mg/kg). Les deux autres échantillons ne montrent pas d'occurrence de ces composés à des teneurs supérieures aux limites de quantification appliquées par le laboratoire Wessling. Les teneurs mesurées sont peu élevées (traces).

* Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Le fluoranthène est quantifié en SPIN01 (1,9 mg/kg) et SPIN02 (1,3 mg/kg). Le pyrène, benzo(a)anthracène et chrysène sont uniquement quantifiés en SPIN01 (respectivement 1,5, 1,3, et 1 mg/kg). Les teneurs mesurées sont peu élevées (traces).

* Dioxines & furannes chlorées (PCDD & PCDF), « PCB-dioxin like » et dioxines & furannes bromées (PBDD & PBDF)

Les teneurs les plus élevées en dioxines (PCDD) et furannes (PCDF) sont mesurées dans les échantillons SPIN02 et SPIN03 (somme PCDD + PCDF = 160 000 ng/kg MS), et en moindre mesure en SPIN01 (somme PCDD + PCDF = 2 700 ng/kg MS). Il est à noter une forte prépondérance des furannes sur les dioxines sur les 3 échantillons analysés, d'un facteur 3 (en SPIN01) à 6 (en SPIN02 et SPIN03).

Les « PCB-dioxin like » ont été analysés uniquement sur l'échantillon SPIN03. L'ensemble des congénères a été détecté et quantifié, avec une prépondérance du PCB n° 118.

Les dioxines (PBDD) et furannes (PBDF) bromées ont été uniquement analysées sur l'échantillon SPIN03. Les congénères majoritaires sont le 1,2,3,4,6,7,8 heptabromodibenzofurane, avec une teneur de 143,8 ng/kg MS, et la 1,2,3,4,6,7,8 heptabromodibenzodioxine (283 ng/kg MS).

* Composés pyrotechniques et agents chimiques de guerre

Concernant les 3 échantillons de sols, ont été détectés puis quantifiés :

- **la triphénylarsine** sur les 3 échantillons, avec une concentration sur éluât (à rapporter à 1 kg de sol lixivié) variant de 0,53 µg/L à 5,35 µg/L ;
- **le chlorure de diphénylarsine** sur SPIN01 (11,8 µg/L) et SPIN03 (0,5 µg/L) ;
- le 9-phénylarsine fluorène, uniquement sur SPIN01 (0,76 µg/L) ;
- **les isomères des di- et trinitronaphtalènes** sur SPIN01 et SPIN02 ;
- **les dérivés du dinitrotoluène et les métabolites du trinitrotoluène (isomères des amino-dinitrotoluènes et des acides amino-dinitrobenzoïque)**, uniquement sur SPIN02.

Aucun composé recherché sur des sols bruts n'a été quantifié simultanément sur les trois échantillons de sols.

³⁸ Pseudocumène = 1,2,4-triméthylbenzène / mésitylène = 1,3,5-triméthylbenzène

* Screening de recherche des composés organiques

Ces screenings, effectués sur les échantillons SPIN01, SPIN02 et SPIN03, montrent :

- sur SPIN01 (cf. Tableau 6), l'occurrence de très nombreux composés organiques, appartenant pour l'essentiel aux familles des **hydrocarbures aromatiques** ; **à noter la présence de nombreuses liaisons bromées** ; ces composés ont été détectés mais non quantifiés (en dehors de ceux figurant dans la liste des substances recherchées pour quantification) ;
- sur SPIN02, 03, 04, 05 (cf. Tableau 7), la présence de composés organiques apparentés aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

Nom	Unité	RESIDU01	SPIN01	SPIN02	SPIN03	TEMOIN01
Libellé		Fosse 1 - Déchets résineux	Fosse 1 - Déchets de combustion	Dépôt satellite - Soils et déchets de combustion	Dépôt satellite - Déchets de combustion	Sol de surface à 300 m de la Place à Gaz
sur brut	% mass MB		67,2	57,7	37,5	
	mg/kg MS	NA	NA	NA	220000	NA
Carbone organique total (COT)	mg/kg MS	1124	4400	9436	7660	152
Arsenic (As)	mg/kg MS	19	99	101	97	112
Chrome (Cr)	mg/kg MS	3	6	80	31	4
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	512	191	2947	2027	39
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	0.16	0.16	15.7	7.2	0.10
Mercurure (Hg)	mg/kg MS	19	75	51	36	45
Nickel (Ni)	mg/kg MS	24149	143922	2357	2496	119
Plomb (Pb)	mg/kg MS	58	256	40	32	22
Antimoine (Sb)	mg/kg MS	512	2219	30836	12720	296
Zinc (Zn)	mg/kg MS	NA	84.7	1444	2369	NA
Arsenic (As)	µg/l	NA	9960	31.9	75.3	NA
Brome (Br)	µg/l	NA	690.6	1236.7	1094.7	NA
Chlorures (Cl)	mg/l	NA	< LQ	< LQ	< LQ	NA
Chlorates (ClO3)	mg/l	NA	0.7	0.6	1.4	NA
Perchlorates (ClO4-)	µg/l	NA	1.13	1.84	6.78	NA
Iodures	µg/l	NA	0.35	< LQ	< LQ	NA
Ammonium (NH4)	mg/l	NA	23.9	5.5	5.8	NA
Nitrates (NO3)	mg/l	NA	3.3	3.8	7.3	NA
Sulfates (SO4)	mg/l	NA				NA
Benzène et aromatiques (CAV - BTEX)						
	mg/kg MS	NA	0.3	<0.1	<0.1	NA
Toluène	mg/kg MS	NA	0.45	<0.1	<0.1	NA
m-, p-Xylène	mg/kg MS	NA	<0.1	<0.1	<0.1	NA
o-Xylène	mg/kg MS	NA	0.3	<0.1	<0.1	NA
Mésitylène	mg/kg MS	NA	<0.2	<0.1	<0.1	NA
Hémilitène	mg/kg MS	NA	0.45	<0.1	<0.1	NA
Pseudocumène	mg/kg MS	NA	1.5	-/-	-/-	NA
Somme des CAV	mg/kg MS	NA				
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)						
	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Naphthalène	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Acénaphthylène	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Acénaphthène	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Fluorène	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Phénanthrène	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Anthracène	mg/kg MS	NA	1.9	1.3	<0.43	NA
Fluoranthène (*)	mg/kg MS	NA	1.5	<0.58	<0.43	NA
Pyrène	mg/kg MS	NA	1.3	<0.46	<0.43	NA
Benzo(a)anthracène	mg/kg MS	NA	1	<0.43	<0.43	NA
Chrysène	mg/kg MS	NA	<1.1	<0.74	<0.43	NA
Benzo(b)fluoranthène (*)	mg/kg MS	NA	<0.38	<0.29	<0.43	NA
Benzo(k)fluoranthène (*)	mg/kg MS	NA	<0.74	<0.47	<0.43	NA
Benzo(a)pyrène (*)	mg/kg MS	NA	<0.34	<0.29	<0.43	NA
Dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS	NA	<0.5	<0.34	<0.43	NA
Indéno(123-cd)pyrène (*)	mg/kg MS	NA	<0.47	<0.37	<0.43	NA
Benzo(ghi)peryène (*)	mg/kg MS	NA	5.7	1.3	-/-	NA
Somme des HAP	mg/kg MS	NA				
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)						
	ng/kg MS	NA	2.9	340	520	NA
2,3,7,8 TCDD	ng/kg MS	NA	5.8	800	750	NA
1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MS	NA	3.3	600	470	NA
1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MS	NA	6.3	890	710	NA
1,2,3,6,7,8-HxCDD	ng/kg MS	NA	5.8	760	640	NA
1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MS	NA	29	4700	3400	NA
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MS	NA	61	7800	6400	NA
Octa CDD	ng/kg MS	NA	71	6400	9500	NA
Somme des tetra CDD	ng/kg MS	NA	100	7200	7500	NA
Somme des penta CDD	ng/kg MS	NA	96	8500	7100	NA
Somme des Hexa CDD	ng/kg MS	NA	53	8200	5600	NA
Somme des hepta CDD	ng/kg MS	NA	68	6000	8900	NA
Somme des TCDD restants	ng/kg MS	NA	95	6400	6700	NA
Somme des PeCDD restants	ng/kg MS	NA	80	6200	5200	NA
Somme des HxCDD restants	ng/kg MS	NA	24	3500	2200	NA
Somme des HpCDD restants	ng/kg MS	NA				

NA : Non Analyisé
< LQ : inférieur à la limite de quantification

Tableau 5 : Résultats analytiques sur les sols - campagne du 15/04/14.

Nom	Unité	RESIDU01	SPIN01	SPIN02	SPIN03	TEMOIN01
Libellé		Fosse 1 - Déchets résineux	Fosse 1 - Déchets de combustion	Dépôt satellite - Sols et déchets de combustion	Dépôt satellite - Déchets de combustion	Sol de surface à 300 m de la Place à Gaz
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)						
2,3,7,8 TCDF	ng/kg MS	NA	53	4300	5400	NA
1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MS	NA	69	3700	6800	NA
2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MS	NA	38	2900	3000	NA
1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MS	NA	210	4100	6700	NA
1,2,3,6,7,8-HxCDF	ng/kg MS	NA	21	3300	3600	NA
2,3,4,6,7,8-HxBDF	ng/kg MS	NA	31	3200	2600	NA
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MS	NA	11	360	1500	NA
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	ng/kg MS	NA	180	11000	11000	NA
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MS	NA	120	1300	2800	NA
Octa CDF	ng/kg MS	NA	820	4900	9900	NA
Somme des tetra CDF	ng/kg MS	NA	450	51000	46000	NA
Somme des penta CDF	ng/kg MS	NA	280	24000	26000	NA
Somme des Hexa CDF	ng/kg MS	NA	330	26000	26000	NA
Somme des Hepta CDF	ng/kg MS	NA	440	16000	16000	NA
Somme des TCDF restants	ng/kg MS	NA	390	47000	41000	NA
Somme des PeCDF restants	ng/kg MS	NA	170	17000	16000	NA
Somme des HxCDF restants	ng/kg MS	NA	57	15000	12000	NA
Somme des HpCDF restants	ng/kg MS	NA	140	3100	3000	NA
Valeurs calculées						
Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MS	NA	380	38000	36000	NA
Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	NA	2300	120000	120000	NA
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MS	NA	2700	160000	160000	NA
I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MS	NA	66	4300	5100	NA
I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MS	NA	66	4300	5100	NA
I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	NA	66	4300	5100	NA
TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MS	NA	69	4700	5400	NA
TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MS	NA	69	4700	5400	NA
TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	NA	69	4700	5400	NA
TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MS	NA	61	4000	4800	NA
TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MS	NA	61	4000	4800	NA
Somme I du "Chemikalienverbotsverordnung"	µg/kg MS	NA	0,1	8,4	9,7	NA
Somme II du "Chemikalienverbotsverordnung"	µg/kg MS	NA	0,45	25	33	NA
Somme III du "Chemikalienverbotsverordnung"	µg/kg MS	NA	1,7	55	66	NA
TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MS	NA	59,6	4 050	4 700	NA
TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MS	NA	59,6	4 050	4 700	NA
TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ	ng/kg MS	NA	59,6	4 050	4 700	NA
PCB-Dioxin like						
PCB n° 77	ng/kg MS	NA	NA	NA	1730	NA
PCB n° 81	ng/kg MS	NA	NA	NA	412	NA
PCB n° 126	ng/kg MS	NA	NA	NA	1160	NA
PCB n° 169	ng/kg MS	NA	NA	NA	355	NA
PCB n° 105	ng/kg MS	NA	NA	NA	1200	NA
PCB n° 114	ng/kg MS	NA	NA	NA	178	NA
PCB n° 118	ng/kg MS	NA	NA	NA	2190	NA
PCB n° 123	ng/kg MS	NA	NA	NA	158	NA
PCB n° 156	ng/kg MS	NA	NA	NA	755	NA
PCB n° 157	ng/kg MS	NA	NA	NA	305	NA
PCB n° 167	ng/kg MS	NA	NA	NA	442	NA
PCB n° 189	ng/kg MS	NA	NA	NA	494	NA
PCB-TEQ (OMS 1997) excl. LQ	ng/kg MS	NA	NA	NA	121	NA
PCB-TEQ (OMS 1997) incl. ½	ng/kg MS	NA	NA	NA	121	NA
PCB-TEQ (OMS 1997) incl. LQ	ng/kg MS	NA	NA	NA	121	NA
PCB-TEQ (OMS 2005) excl. LQ	ng/kg MS	NA	NA	NA	127	NA
PCB-TEQ (OMS 2005) incl. ½ LQ	ng/kg MS	NA	NA	NA	127	NA
PCB-TEQ (OMS 2005) incl. LQ	ng/kg MS	NA	NA	NA	127	NA
PBDD/PBDF						
2,3,7,8 Tetrabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	0.400	NA
1,2,3,7,8 Pentabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	1.600	NA
2,3,4,7,8 Pentabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	2.300	NA
1,2,3,4,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	10.100	NA
1,2,3,6,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	0	NA
2,3,4,6,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	0	NA
1,2,3,7,8,9 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	0	NA
1,2,3,4,6,7,8 Heptabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	143,8	NA
1,2,3,4,7,8,9 Heptabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	0	NA
Octabromodibenzofurane	ng/kg	NA	NA	NA	87.200	NA
2,3,7,8 Tetrabromodibenzodioxine	ng/kg	NA	NA	NA	0,2	NA
1,2,3,7,8 Pentabromodibenzodioxine	ng/kg	NA	NA	NA	0,65	NA
1,2,3,4,7,8 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	NA	NA	NA	6,5	NA
1,2,3,6,7,8 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	NA	NA	NA	6,5	NA
1,2,3,7,8,9 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	NA	NA	NA	5,9	NA
1,2,3,4,6,7,8 Heptabromodibenzodioxine 283	ng/kg	NA	NA	NA	283	NA
sur brut						

Tableau 5 (2/3) : Résultats analytiques sur les sols - campagne du 15/04/14.

Nom	Unité	RESIDU01	SPIN01	SPIN02	SPIN03	TEMOIN01
Composés pyrotechniques et agents chimiques de combat						
2-amino-4,6-dinitrotoluène	µg/l d'éluat	NA	<0,5	1,12	<0,5	NA
4-amino-2,6-dinitrotoluène	µg/l d'éluat	NA	<0,5	0,58	<0,5	NA
Acide 2-amino-4,6-benzoïque	µg/l d'éluat	NA	<0,5	32,3	<0,5	NA
Acide 4-amino-2,6-benzoïque	µg/l d'éluat	NA	<0,5	3,86	<0,5	NA
2,4,6-trinitrotoluène	µg/l d'éluat	NA	<0,5	0,73	<0,5	NA
1,3-dinitrobenzène	µg/l d'éluat	NA	<0,5	0,71	<0,5	NA
1,5-dinitronaphtalène	µg/l d'éluat	NA	<0,5	1,47	<0,5	NA
1,8-dinitronaphtalène	µg/l d'éluat	NA	1,79	3,47	<0,5	NA
1,3,8-trinitronaphtalène	µg/l d'éluat	NA	17,6	74,6	<0,5	NA
1,4,5-trinitronaphtalène	µg/l d'éluat	NA	2,33	2,07	<0,5	NA
Acide diphenylarsinique	µg/l d'éluat	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
Diphénylarsine (chlorure)	µg/l d'éluat	NA	11,8	0,5	<0,5	NA
Triphénylarsine	µg/l d'éluat	NA	5,35	1,03	0,53	NA
9-phénylarsine fluorene	µg/l d'éluat	NA	0,76	<0,5	<0,5	NA
Chlorure de diphenyl arsine	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
9-phénylarsine fluorene	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
Triphénylarsine	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
(Biphényl-4-yl)diphénylarsine	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
2-Bromotoluène	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
4-Bromotoluène	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
2-Bromo-p-xylène	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
2,5-Dibromo-p-xylène	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA
Chlorobenzène	mg/kg MS	NA	<0,5	<0,5	<0,5	NA

Tableau 5 (3/3) : Résultats analytiques sur les sols - campagne du 15/04/14.

Sample	Rt (min.)	Compound	Match factor
spin01	3,25	p-Xylene	808
spin01	3,41	Methane, tribromo	798
spin01	4,07	Benzene, 1,3,5-trimethyl	820
spin01	4,28	Benzene, 1,3,5-trimethyl	886
spin01	4,53	Benzene, 1,2,4-trimethyl	805
spin01	4,67	Benzene, 1-bromo-2-methyl	903
spin01	4,71	Benzene, 1-bromo-4-methyl	900
spin01	4,79	Benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl	833
spin01	5,27	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl	832
spin01	5,31	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl	903
spin01	5,47	Cyclopentane, 1-acetyl-1,2-epoxy	799
spin01	5,54	Benzene, 2-bromo-1,4-dimethyl	899
spin01	5,79	Benzene, 2-bromo-1,4-dimethyl	796
spin01	5,91	Benzene, 1-ethyl-2,4,5-trimethyl	681
spin01	6,00	2-Pyrazoline-1-carboxaldehyde, 5-tert-butyl-5-hydroxy-3-methyl	699
spin01	6,08	2-(4-Nitrobutyl)-cyclopentanone	602
spin01	6,13	trans-2-Oxabicyclo[4.4.0]decane	750
spin01	6,53	Benzene, pentamethyl	806
spin01	6,96	Ethanal, 2-methyl-2-[4-(1-methylethyl)phenyl]	795
spin01	7,06	Bicyclo[2.2.2]octa-2,5-diene, 1,2,3,6-tetramethyl	716
spin01	7,50	1-Amino-3,4-dinitroso-2',3'-methylenedioxy-biphenyl	576
spin01	7,54	Benzene, 1,4-dibromo-2,5-dimethyl	674
spin01	7,77	4-Butyl-indan-5-ol	784
spin01	7,85	16-Nitrobicyclo[10.4.0]hexadecan-1-ol-13-one	645
spin01	8,39	Benzene, 2,4-dibromo-1,3,5-trimethyl	702
spin01	9,08	4a,10a-Methanophenanthren-9a-ol, 11-syn-bromo-1,2,3,4,4a,9,10,10a-octahydro	657
spin01	9,95	2a,6a-Methano-1H-cyclopropa[b]naphthalene-1,1,8,8-tetrachloro-1a,2,3,6,7,7a-hexahydro-	691
spin01	10,00	Azulene, 1,4-dimethyl-7-(1-methylethyl)	700
spin01	11,06	Adamantane-2,6-dione, bis(ethylene ketal)	608
spin01	11,23	Pyrene	631
spin01	11,51	1-(1H-Benzotriazol-1-yl)-3,4,4-trichloro-2-nitro-1-piperidino-1,3-butadiene	628
spin01	11,74	Arsine, triphenyl	599
spin01	12,00	5H-Cyclopropa[3,4]benz[1,2-e]azulen-5-one, 9a-(acetyloxy)-1,1a,1b,4,4a,7a,7b,8,9,9a-decahydro	689
spin01	13,15	Anthraergostan-5,7,9-trien-14-ol-15-one	696

confirmed by reference compound

Tableau 6 : Résultats du screening de recherche des liaisons organiques sur SPIN01.

Sample	Rt (min.)	Compound	Match factor
spin02	9,75	Anthracene	861
spin02	9,82	Phenanthrene	785
spin02	10,35	5H-Dibenzo[a,d]cycloheptene	651
spin02	10,38	1H-Cyclopropa[l]phenanthrene, 1a,9b-dihydro	666
spin02	10,51	Phenanthrene, 1-methyl	619
spin02	11,21	Pyrene	874
spin02	11,49	Fluoranthene	852
spin02	11,72	Arsine, triphenyl	605
spin02	11,78	Pyrene, 1-methyl	598
spin02	11,90	11H-Benzo[b]fluorene	704
spin02	12,04	5-(2-Propenylidene)-10,11-dihydro-5H-dibenzo[a,d]cycloheptene	575
spin02	12,81	Benzo[c]phenanthrene	597
spin02	13,13	Benz[a]anthracene	863
spin02	13,21	Benz[a]anthracene	844
spin02	13,29	1-Naphthalenol, 2,4-dinitro	606
spin02	13,36	Benzo[c]phenanthrene	615
spin02	13,93	Chrysene, 6-methyl	583
spin03	11,04	Dibenzo[def,mno]chrysene	561
spin03	11,21	Pyrene	499
spin03	12,57	Indeno[1,2,3-cd]pyrene	555
spin04	9,03	Benzo[k]fluoranthene	693
spin04	9,29	7,12-Dihydrobenzo[k]fluoranthene	660
spin04	11,04	Benzo[j]fluoranthene	746
spin04	11,26	Benzo[k]fluoranthene	707
spin05	9,75	Phenanthrene	920
spin05	9,82	9H-Fluorene, 9-methylene	682
spin05	10,49	Phenanthrene, 4-methyl	674
spin05	11,21	Fluoranthene	917
spin05	11,49	Pyrene	846
spin05	11,90	Benzanthrene	648
spin05	13,13	Benz[a]anthracene	717
spin05	13,21	Benz[a]anthracene	720

confirmed by reference compound

Tableau 7 : Résultats du screening de recherche des liaisons organiques sur SPIN02, 03, 04, 05.

Résultats sur les sédiments

Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Les bordereaux d'analyse sont présentés en Annexe séparée.

Les résultats indiquent que :

- les teneurs en cadmium, chrome, mercure et antimoine sont homogènes ;
- la teneur en nickel est supérieure sur CONF01 (67 mg/kg MS) par rapport à FOS01 (50 mg/kg MS) situé en aval ;
- les teneurs en arsenic, cuivre, plomb et zinc sur FOS01 sont supérieures d'un facteur 2 à 6 à celles mesurées plus en aval sur CONF01.

Nom			FOS01	CONF01
Libellé		Unité	Fossé Nord	Confluence fossé et Pont des Meuniers
sur brut	As	mg/kg MS	312	148
	Cr		136	127
	Cd		6	6
	Cu		94	45
	Hg		0.16	0.16
	Ni		50	67
	Pb		633	103
	Sb		34	27
	Zn		1126	714

Tableau 8 : Résultats analytiques sur les sédiments - campagne du 15/04/14.

Résultats sur les eaux superficielles

Les résultats sur les 2 échantillons d'eaux superficielles sont présentés dans le Tableau 9.

Les bordereaux d'analyse sont présentés en Annexe séparée.

Les ions chlorate et perchlorate, n'ont été quantifiés sur aucun des deux échantillons.

Par ailleurs, ont été détectés puis quantifiés sur l'échantillon PONT01 de l'arsenic (1,12 µg/L), du chrome (0,14 µg/L), du cuivre (0,58 µg/L), du mercure (17 ng/L), du nickel (2,17 µg/L), du plomb (0,05 µg/L), de l'antimoine (0,06 µg/L) et du zinc (0,95 µg/L), ainsi que des chlorures (12,6 mg/L) et des sulfates (23,3 mg/L).

Ces composés n'ont pas été tous analysés sur l'échantillon FOS01. L'échantillon FOS01 a par ailleurs été analysé par Envilytix (échantillon « Wasser ») pour la quantification des composés nitroaromatiques, toxiques de guerre et leurs sous-produits de transformation environnementale. Ces composés n'ont pas été détectés dans l'échantillon pour une limite de quantification appliquée de 0,1 µg/L.

À noter que l'échantillonnage a été réalisé en période de forte pluviométrie, c'est à dire dans des conditions climatiques où la saturation des sols en eau et le ruissellement peuvent diluer les éventuels flux de polluants qui pourraient être véhiculés par les eaux de surface.

Nom		FOS01	PONT01
Libellé	Unité	Fossé Nord	Confluence fossé et Pont des Meuniers
As (Arsenic)	µg/l	NA	1.12
CNL (Cyanures libres)	mg/l	NA	< LQ
CNT (Cyanures totaux)	mg/l	NA	< LQ
Cd (Cadmium)	µg/l	NA	< LQ
Cl (Chlorures)	mg/l	NA	12.6
ClO3 (Chlorates)	mg/l	< LQ	< LQ
ClO4- (Perchlorate)	µg/l	< LQ	< LQ
Cr (Chrome)	µg/l	NA	0.14
Cu (Cuivre)	µg/l	NA	0.58
Hg (Mercure)	ng/l	NA	17
Ni (Nickel)	µg/l	NA	2.17
Pb (Plomb)	µg/l	NA	0.05
SO4 (Sulfates)	mg/l	NA	23.3
Sb (Antimoine)	µg/l	NA	0.06
Zn (Zinc)	µg/l	NA	0.95

NA : Non Analysé

< LQ : inférieur à la limite de quantification

Tableau 9 : Résultats analytiques sur les eaux superficielles - campagne du 15/04/14.

e) Bilan intermédiaire

Ainsi, outre les résultats des investigations menées au droit de la tache centrale, cette première étape a montré :

- la présence de dépôts satellites pollués par des résidus du brûlage d'obus chimiques renfermant des agents arséniés ou bromés ;
- un impact du site sur la qualité des sédiments et des eaux de surface en aval et au nord ;
- la pertinence du programme analytique appliqué ;
- la nécessité d'approfondir les connaissances pour évaluer les impacts de la « Place à gaz » et des dépôts « satellites » sur leur environnement.

L'approfondissement des connaissances sur la qualité des sols de surface, au droit et dans l'environnement de la « Place à gaz », fait l'objet de la seconde étape de la phase 2.

4.3.2 Seconde étape: caractérisation des extensions en surface des pollutions de la tache centrale et des dépôts « satellites »

a) Contenu et objectifs

Cette seconde étape de la phase 2 de l'étude a été réalisée entre les 10 et 12 juin 2014. Elle a consisté en la réalisation :

- d'un screening (balayage) multi-élémentaire des sols de surface à l'aide d'un analyseur portatif par fluorescence X (FX) (permettant la quantification, avec lecture directe, des métaux et métalloïdes) sur le périmètre d'étude (zone de la « Place à gaz » et son environnement proche) afin de dresser une cartographie la plus exhaustive possible des polluants métalliques présents dans les sols de surface ;

- **d'un relevé topographique du périmètre d'étude par un géomètre expert**, avec fourniture d'un plan au 1/500 géoréférencé et coté (x, y, z) comprenant notamment le positionnement des points de mesure réalisés par fluorescence X et des points piquetés (position des points repères et d'échantillonnage des sols pour analyses différées au laboratoire) ;
- **d'un échantillonnage composites des sols de surface** (entre 0 et 5 cm de profondeur) au droit de la « Place à gaz » et dans son proche environnement ; cet échantillonnage des sols a été complété par des prélèvements d'eau superficielle et de sédiments autour de la « Place à gaz ».

b) Mesures sur site des teneurs en composés inorganiques des sols de surface (« screening ») par fluorescence X

Présentation et protocole

La spectrométrie de fluorescence X permet de caractériser les éléments constitutifs d'un échantillon de sol. Non destructrice, elle permet de réaliser sur le terrain un grand nombre d'analyses qualitatives à semi quantitatives de manière rapide et d'apporter en temps réel une aide au diagnostic et d'optimiser des campagnes d'échantillonnage.

Environ 25 éléments (métaux et métalloïdes) peuvent être analysés simultanément en quelques secondes. La gamme de détection va du mg/kg au %. Les limites de détection sont variables suivant les éléments et peuvent être inférieures à 5 mg/kg.



Figure 26 : Photographie d'un appareil à fluorescence X (11/06/14).

Les mesures réalisées *in situ*, ne nécessitent qu'une préparation minimale (cf. Figure 26) :

- la surface du sol a été dégagée de la couche végétale ainsi que des cailloux, éléments grossiers et des roches ;
- les surfaces planes ont été mesurées de façon à assurer un bon contact entre la fenêtre de la source et le sol ;
- les mesures ont été réalisées en absence d'eau stagnante sur le sol ;
- l'appareil a été directement posé sur la surface du sol pour effectuer la mesure.



Figure 27 : Mode de mesure FX in situ (directe) sur le sol après avoir dégagé la couverture végétale.

Résultats

Une campagne a été réalisée par le BRGM le 11/06/2014 par une Personne Compétente en Radioprotection (PCR³⁹). La localisation des différents points de mesure est indiquée en Figure 28.

Le screening a ainsi permis d'aboutir à une première cartographie des principaux métaux et métalloïdes recherchés (arsenic, cuivre, plomb, zinc) dans les sols superficiels au droit et autour de la « Place à gaz » (cf. Figure 29). Le diamètre des sphères représentées sur la figure autour de chaque point est proportionnel à la teneur mesurée dans les sols superficiels. Les résultats des mesures brutes sont présentés en Annexe séparée.

On peut noter que les plus fortes teneurs en arsenic sont concentrées dans la tache centrale de la « Place à gaz », avec une extension vers le sud à l'extérieur de la zone clôturée. Les teneurs en arsenic ressortent également au droit des sols et résidus de la fosse 1, et le long du chemin d'accès de la « Place à gaz ».

Pour le plomb, les plus fortes teneurs sont concentrées dans la fosse 1 (en vert), et en moindre mesure au droit de la tache centrale, avec quelques points à l'extérieur de la zone clôturée, notamment à proximité du chemin d'accès à la tache centrale.

Les teneurs en zinc et en cuivre sont particulièrement fortes au droit de la tache centrale, avec quelques points remarquables le long du chemin d'accès. Les teneurs en ces éléments restent modérées dans la fosse n° 1.

³⁹ Le faisceau FX est généré par une source radioactive scellée.

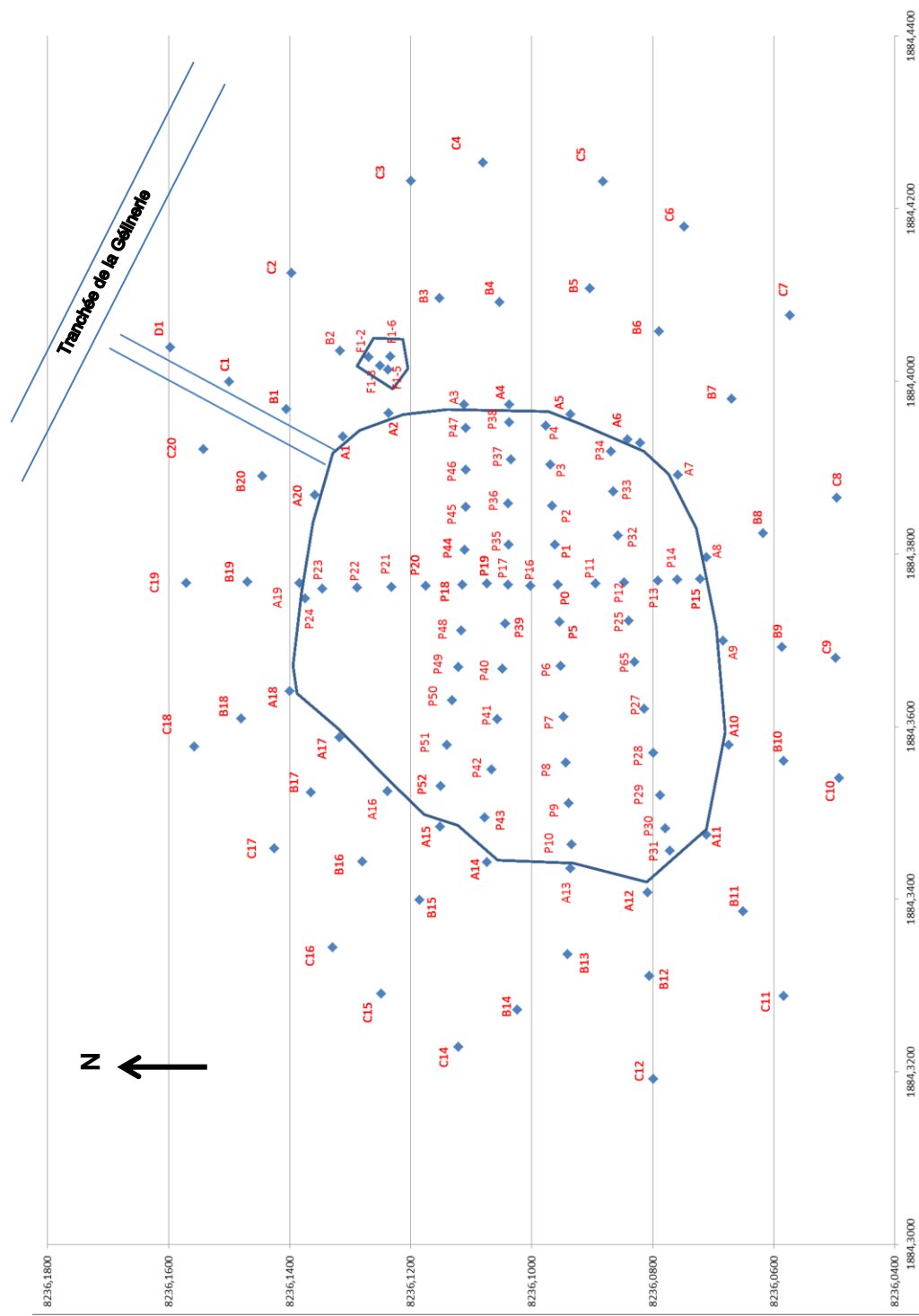
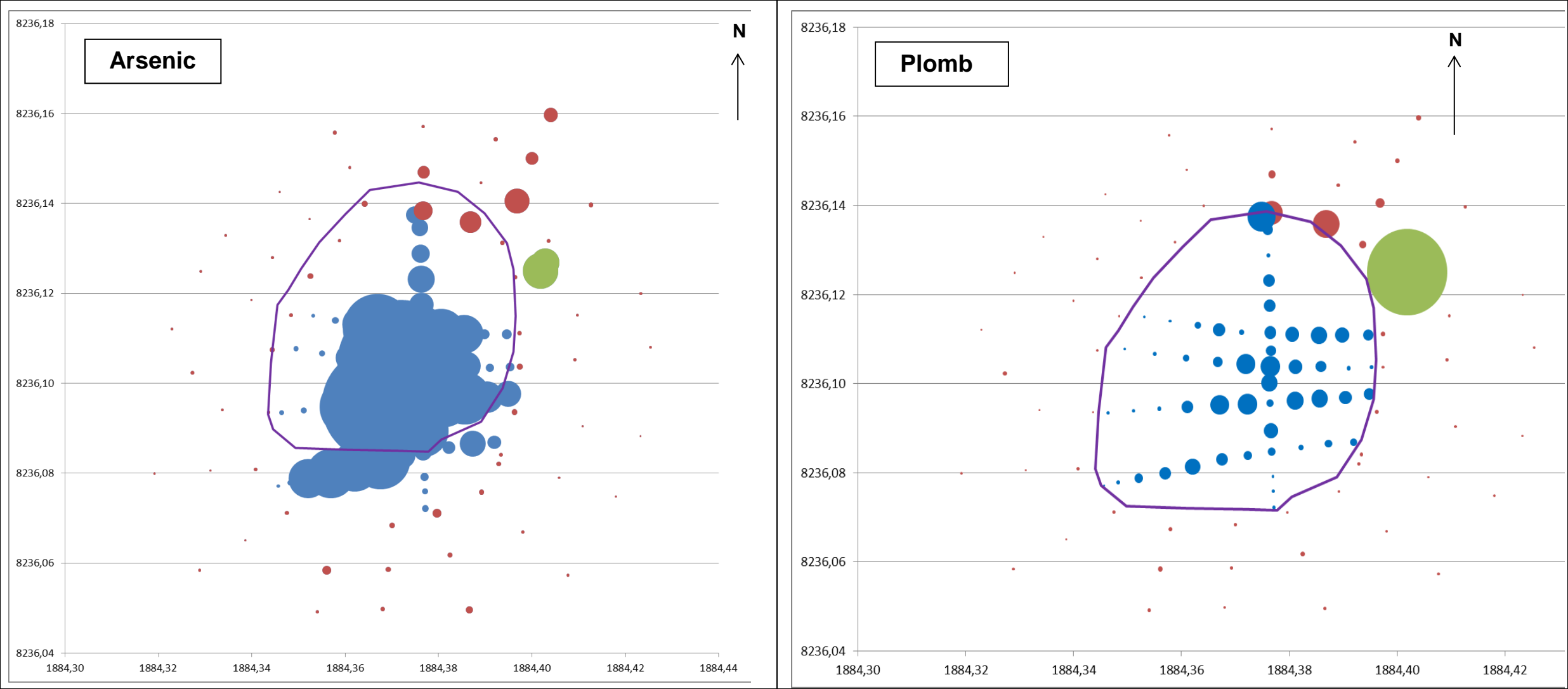


Figure 28 : Localisation des points de mesures réalisés au moyen de l'analyseur portatif FX de type NITON® (11/06/14).



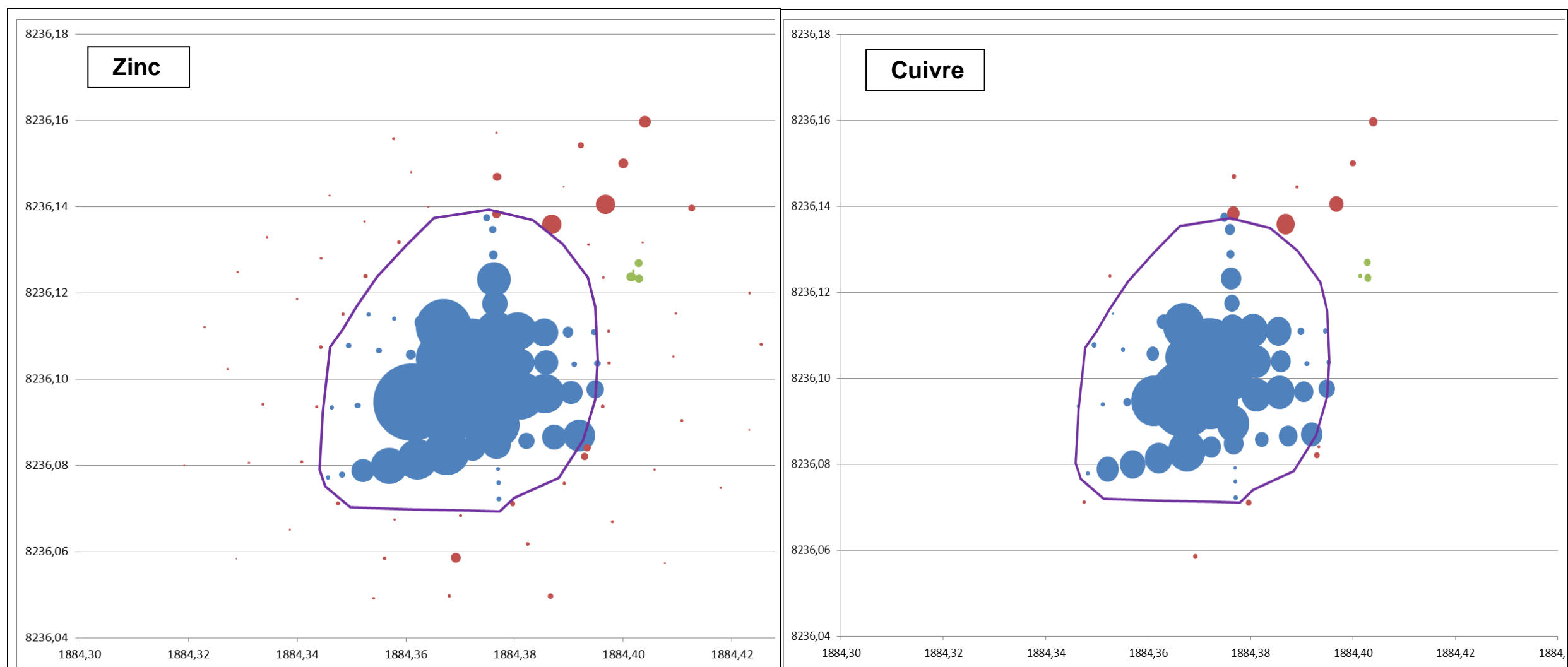


Figure 29 : Cartographies de répartition des teneurs pour les éléments arsenic, cuivre, plomb et zinc (mesures du 12/06/14) (en vert : mesures de janvier 2014 / en bleu : mesures d'avril 2014 / en rouge : mesures de juin 2014).

c) Établissement d'un plan coté et géoréférencé

Un relevé topographique de la « Place à gaz » et ses environs a été effectué par le cabinet Thierry Dehove Géomètre Expert le 12/06/14. Le relevé topographique est présenté en Annexe 1.

d) Prélèvements et analyses de sols

La phase de prélèvements des sols de surface s'est déroulée les 11 et 12 juin 2014. Les prélèvements ont été effectués conformément aux normes en vigueur (§1.3).



Figure 30 : Aperçu photographique des résidus de combustion au droit de la tache centrale de la « Place à gaz ».



Figure 31 : Aperçu photographique des résidus au droit de la fosse « satellite » n° 1
(10 m au nord-est de la clairière).

Les échantillons de sols (constitués à partir de 5 à 10 prises unitaires et prélevés à la pelle manuelle entre 0 et 15 cm de profondeur) répartis de la manière suivante :

- **6 prélèvements dans la fosse n° 1**, située à proximité immédiate de la « Place à gaz », à environ 10 m au nord-est de la tache centrale (clairière) ;
- **6 prélèvements au droit de la « Place à gaz »** (tache centrale) (P39, TC1, TC2, TC3, TC4, TC5) ;
- **5 prélèvements dans le périmètre immédiat de la « Place à gaz »** (A3, A7bis, A11, A13 et A18). Le choix de ces échantillons a été effectué au regard des résultats du screening par fluorescence X ;
- **6 échantillons dans le périmètre éloigné de la « Place à gaz »** : 1 à 10 m (B5) et 5 à 20 m (C1bis, C4bis, C7bis, C9bis, C14bis).

Leur localisation est précisée en Figure 32. Chaque prélèvement a fait l'objet d'une fiche de prélèvement.

Ces échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre, puis stockés dans une glacière réfrigérée avant d'être envoyés aux laboratoires (Wessling et Envilytix).

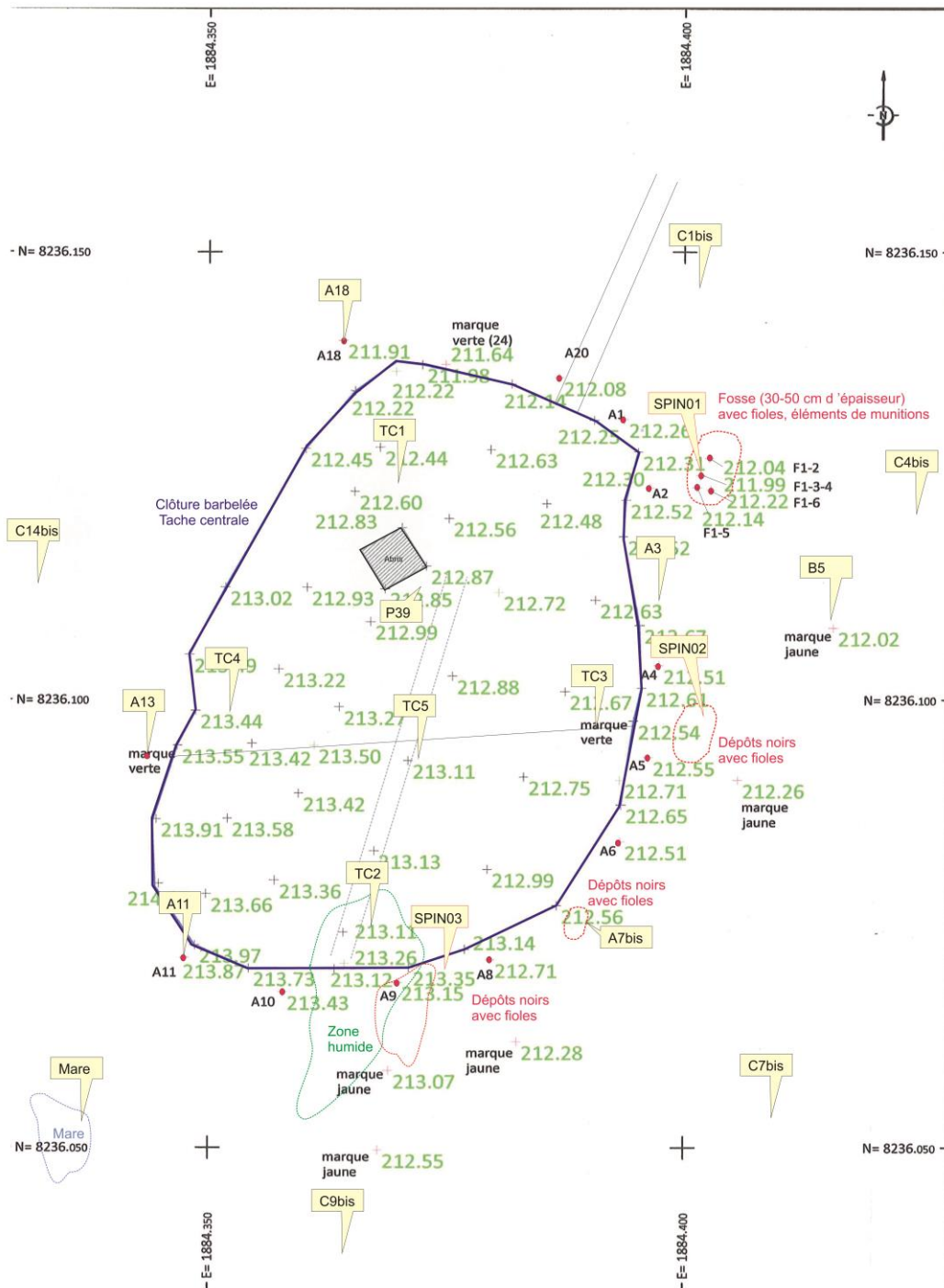


Figure 32 : Plan d'implantation des points de prélèvements de sols de surface sur fond topographique (avec précision des cotes altimétriques en m NGF).

Le programme analytique appliqué pour chaque échantillon est détaillé dans le Tableau 10 suivant :

	Laboratoire	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	P39	A3	A7bis	A11	A13	A18	B5	C1bis	C4bis	C9bis	C14bis
Matière sèche	Wessling	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
COT	Wessling	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7 Métaux et métalloïdes (As, Cr, Cu, Cd, Hg, Pb, Zn)	Wessling	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
HAP	Wessling	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x
PCDD/PCDF	Wessling	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
composés pyrotechniques et agents chimiques de combat*	Envilytix	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

* la liste des 62 composés analysés est présentée en Annexe 5.

Tableau 10 : Programme analytique pour les échantillons de sols.

Le programme analytique retenu a été motivé par les résultats des phases d'études antérieures et la première étape de la phase 2 d'avril 2014 (en termes d'occurrence, de prévalence et de traçage des activités historiques).

e) Prélèvements et analyses de sédiments

Les échantillons de sédiments, prélevés à la pelle manuelle entre 0 et 15 cm de profondeur, ont été répartis de la manière suivante :

- **3 prélèvements dans le ruisseau du Pont des Meuniers** en aval et à différentes distances (50, 150 et 180 m environ) de la « Place à gaz » (SED01, SED02, SED03) ;
- **1 prélèvement dans la mare** située au sud-ouest de la « Place à gaz » (MARE).

Leur localisation est précisée en Figure 34. Chaque prélèvement a fait l'objet d'une fiche de prélèvement.



Figure 33 : Photographies des points de prélèvements SED01 (à gauche) et SED02 (à droite).

Ces échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre puis stockés dans une glacière réfrigérée. Ils ont ensuite été envoyés au laboratoire (Wessling) pour analyse.

Le programme analytique appliqué à chaque échantillon est détaillé dans le Tableau 11 suivant :

	Laboratoire	SED01	SED02	SED03	MARE
Matière sèche	WESSLING	x	x	x	x
6 Métaux et métalloïdes (As, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn)	WESSLING	x	x	x	x

Tableau 11 : Programme analytique pour les échantillons de sédiments (campagne du 15/04/15).



Figure 34 : Plan d'implantation des points de prélèvement des sédiments.

f) Résultats analytiques sur les différents milieux investigués

Sols de surface

Les résultats d'analyse montrent que :

- Dans la fosse n° 1 située à proximité immédiate de la « Place à gaz »

Les six échantillons prélevés et analysés présentent des teneurs plutôt hétérogènes en arsenic (comprises entre 1 900 et 6 700 mg/kg MS), en zinc (entre 430 et 3 700 mg/kg MS) et en cadmium (entre 1,1 et 7,2 mg/kg MS). Les teneurs en plomb, chrome et mercure varient peu d'un échantillon à l'autre (respectivement entre 31 000 et 38 000 mg/kg MS, entre 9 et 16 mg/kg MS et entre 0,4 et 0,8 mg/kg MS).

- Sur la tache centrale de la « Place à gaz » (clairière)

Les six échantillons prélevés et analysés présentent de fortes teneurs pour tous les éléments métalliques analysés : en arsenic avec des valeurs comprises entre 6 400 et 120 000 mg/kg MS, en cuivre (de 2 700 à 12 000 mg/kg MS), en zinc (entre 15 000 et 73 000 mg/kg MS), en mercure (entre 6 et 24 mg/kg MS), en cadmium (entre 36 et 160 mg/kg MS) et en plomb (entre 1 500 et 16 000 mg/kg MS).

Par ailleurs, des dioxines (PCDD) et furannes (PCDF) ont été quantifiés sur les quatre échantillons analysés (TC1 à TC4), avec une prépondérance des PCDF sur les PCDD : pour les furannes, les teneurs (en considérant la somme Σ des 17 congénères) varient de 22 770 ng/kg MS (TC2) à 191 830 ng/kg MS (TC4) et pour les dioxines, les teneurs pour Σ 17 congénères varient de 5 364 ng/kg MS (TC2) à 29 310 ng/kg MS (TC4).

Les analyses en HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) mesurées sur 5 des 6 échantillons prélevés sur la tache centrale, montrent des teneurs hétérogènes, variant de 0,14 mg/kg MS pour la Σ 16 HAP en TC5 à 13,5 mg/kg MS pour la Σ 16 HAP en TC2.

Concernant les composés pyrotechniques et agents chimiques de guerre, ont été quantifiés le 4-amino-2,6-dinitrotoluène (TC2), l'acide 2-amino-4,6-benzoïque (TC1, TC2, TC4 et TC5), l'acide diphénylarsénique (TC1 à TC5), le chlorure de diphénylarsine (Clark 1) (TC1 à TC5), le 9-phénylarsine-fluorène (TC2), la triphénylarsine (TC2), le 2-bromotoluène (TC1 et TC2), le 4-bromotoluène (TC1 et TC2), le 2-bromo-p-xylène (TC1 et TC2), le 2,5-dibromo-p-xylène (TC1 et TC2), et le monochlorobenzène (TC1 à TC5). Ces teneurs restent globalement faibles.

- Dans le proche périmètre de la tache centrale (clairière)

Quatre des cinq échantillons prélevés dans le proche périmètre de la tache centrale (A3, A11, A13 et A18) présentent des teneurs relativement homogènes en arsenic (entre 110 et 350 mg/kg MS), en cadmium (entre 0,6 et 1,2 mg/kg MS), en cuivre (de 63 à 94 mg/kg MS), en mercure (entre 0,3 et 0,6 mg/kg MS), en plomb (entre 59 et 200 mg/kg MS) et en zinc (entre 390 et 570 mg/kg MS). L'échantillon de sol A7bis présente des teneurs en métaux de 5 à 10 fois supérieures à celles mesurées sur les quatre autres échantillons.

La tendance est la même pour les PCDD et PCDF : les échantillons A3, A11, A13 et A18 présentent des teneurs relativement homogènes, (avec une prépondérance des furannes sur les dioxines) avec des teneurs pour la Σ 17 congénères qui varient de 196 ng/kg MS (A18) à 584 ng/kg MS (A3) pour les furannes et de 74 ng/kg MS (A11) à 132 ng/kg MS (A3) pour les dioxines.

Les analyses en HAP montrent, sur les 4 des 5 échantillons prélevés dans le périmètre proche de la tache centrale (A3, A11, A13 et A18), des teneurs hétérogènes, variant de 0,79 mg/kg MS en A13 à 74,7 mg/kg MS en A3 pour la Σ 16 HAP.

Les composés pyrotechniques et agents chimiques de guerre ont principalement été quantifiés sur le point A7bis (l'acide 2-amino-4,6-benzoïque, le 1,8-dinitronaphtalène, le 1,3,8-trinitronaphtalène, le 1,4,5-trinitronaphtalène, l'acide diphénylarsénique, le chlorure de diphénylarsine, le 9-phénylarsine-fluorène, la triphénylarsine, et enfin la (biphényl-4-yl)diphénylarsine). Le chlorure de diphénylarsine a également été quantifié sur 3 autres points (A3, A11 et A13) ; le 1,3,8-trinitronaphtalène marque à l'état de traces sur le point A11 (2.05 μ g/L éluat) et le 2-bromotoluène a été détectés sur le point A3 à hauteur de 0,11 mg/kg de sol humide. Ces teneurs restent globalement faibles.

- Dans le périmètre éloigné de la tache centrale (clairière)

Les cinq échantillons prélevés dans le périmètre éloigné de la tache centrale (B5, C1bis, C4bis, C9bis et C14bis) présentent des teneurs relativement hétérogènes pour tous les composés métalliques analysés. Les *maxima* obtenus sont néanmoins systématiquement mesurés sur C9bis avec 800 mg/kg MS en arsenic, 3,9 mg/kg MS en cadmium, 170 mg/kg MS en cuivre, 0,6 mg/kg MS en mercure, 380 mg/kg MS en plomb et 3 000 MS mg/kg en zinc.

La tendance est la même pour les PCDD et PCDF, pour lesquels les échantillons B5, C1bis, C4bis et C14bis présentent des teneurs relativement homogènes, (avec une prépondérance des furannes sur les dioxines) avec des teneurs pour la Σ 17 congénères qui varient de 83 ng/kg MS (C14bis) à 501 ng/kg MS (C1bis) pour les furannes et de 51 ng/kg MS (B5) à 97 ng/kg (C1bis) pour les dioxines. Les maxima obtenus sont mesurés sur C9bis avec 1 882 ng/kg MS pour les furannes et 474 ng/kg MS pour les dioxines (Σ 17 congénères).

Les analyses en HAP sur les 5 échantillons prélevés dans le périmètre éloigné de la tache centrale (B5, C1bis, C4bis, C9bis et C14bis) montrent des teneurs hétérogènes, variant de 0,27 mg/kg MS en C14bis à 90.6 mg/kg MS en C4bis pour la Σ 16 HAP.

En ce qui concerne les composés pyrotechniques et toxiques de guerre, seul le chlorure de diphénylarsine (CLARK 1) a été quantifié sur le point C1bis à une teneur de 0,47 mg/kg MS (teneurs traces). Aucun autre composé n'a été quantifié dans le périmètre éloigné de la « Place à gaz ».

Les Tableau 12 et Tableau 13 présentent les résultats analytiques obtenus sur le milieu sols. Les bordereaux d'analyse sont présentés en Annexe séparée.

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

SOLS	Laboratoire Envilytix		FOSSE 1						TACHE CENTRALE					PERIMETRE PROCHE TACHE CENTRALE					PERIMETRE ELOIGNE TACHE CENTRALE						
	Composés	Unité	Typologie	SPIN01-2 (0,2 m)	SPIN01-3 (0,2 m)	F1-3 (0,01-0,09m)	F1-8 (0,15 m)	F1-9 (0,15-0,2 m)	F1-10 (0,15-0,25 m)	P39	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	A3	A7 bis	A11	A13	A18	B5	C1 bis	C4 bis	C9bis	C14 bis
2-amino-4,6-dinitrotoluène	µg / l d'éluat	Sous produit de transformation aérobie et/ou photolyse du TNT	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
4-amino-2,6-dinitrotoluène	µg / l d'éluat		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	0,97	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Acide 2-amino-4,6-benzoïque	µg / l d'éluat		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,89	7,74	<0,5	1,21	1,59	<0,5	2,82	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Acide 4-amino-2,6-benzoïque	µg / l d'éluat		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
2,4,6-trinitrotoluène (TNT)	µg / l d'éluat	TNT, "Tolite", explosif	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
1,3-dinitrobenzène	µg / l d'éluat	Impureté des TNT, adjuvants	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
1,5-dinitronaphtalène	µg / l d'éluat	Explosif, impuretés	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
1,8-dinitronaphtalène	µg / l d'éluat		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	3,99	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
1,3,8-trinitronaphtalène	µg / l d'éluat	Explosif de l'obus Croix bleue allongé de 77 mm	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	21	2,05	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
1,4,5-trinitronaphtalène	µg / l d'éluat	Explosif, impuretés	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,45	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Acide diphenylarsinique	µg / l d'éluat	Résidu, impureté et oxydation du Clark	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2205	24721	220	676	4947	<0,5	10698	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Diphénylarsine (chlorure)	µg / l d'éluat	Clark, agent chimique irritant et sternutatoire	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Triphénylarsine	µg / l d'éluat	Résidu, impureté du Clark	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
9-phénylarsine fluorene	µg / l d'éluat	Sous produit	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Chlorure de diphenyl arsine	mg/kg MS	CLARK I	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4,35	10,3	4,21	2,31	8,46	3,27	17	0,43	0,37	<0,1	<0,1	0,47	<0,1	<0,1	<0,1
9-phénylarsine fluorene	mg/kg MS	Décomposition CLARK	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,1	0,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,64	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Triphénylarsine	mg/kg MS	Décomposition CLARK	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,0	0,16	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	14	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
(Biphényl-4-yl)diphénylarsine	mg/kg MS	Décomposition CLARK	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,1	<0,0	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2-Bromotoluène	mg/kg MS	Sous produit de T Stoff	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,14	0,41	<0,1	<0,1	<0,1	0,11	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
4-Bromotoluène	mg/kg MS	Sous produit de T Stoff	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,11	0,44	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2-Bromo-p-xylène	mg/kg MS	Sous produit de T Stoff	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,16	0,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
2,5-Dibromo-p-xylène	mg/kg MS	Sous produit de T Stoff	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Chlorobenzène	mg/kg MS	Solvant du Lost	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,27	1,82	0,81	1,55	4,54	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

NA : Non Analysé

Tableau 13 : Résultats analytiques sur les sols de surface (campagne du 10/06/14).

Les sédiments

Les résultats des analyses effectuées sur les sédiments montrent :

- la présence d'arsenic (590 mg/kg MS), de chrome (29 mg/kg MS), de cadmium (1,2 mg/kg MS), de mercure (0,4 mg/kg MS), de plomb (120 mg/kg MS) et de zinc (500 mg/kg MS) dans les sédiments de la mare située à environ 50 m au sud-ouest de la « Place à gaz » ;
- pour les sédiments prélevés dans le ruisseau du Pont des Meuniers, ont principalement été quantifiés de l'arsenic, du plomb et du zinc, et en moindre mesure du chrome et du mercure. Le cadmium a été quantifié uniquement sur SED01 (point le plus proche en aval de la « Place à gaz »).

Le Tableau 14 présente les résultats analytiques obtenus sur le milieu sédiments. Les bordereaux d'analyse sont présentés en Annexe séparée.

	Nom	Libellé	Laboratoire	Teneur (mg/kg MS)								
				As	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Zn
SEDIMENTS	MARE	Sédiment de la mare à l'ouest de la Place à Gaz	WESSLING	590	29	1,2	NA	0,4	NA	120	NA	500
	SED01	Sédiment du ruisseau aval 1	WESSLING	51	30	1	NA	0,2	NA	62	NA	340
	SED02	Sédiment du ruisseau aval 2	WESSLING	11	21	<0,5	NA	0,2	NA	38	NA	110
	SED03	Sédiment du ruisseau aval 3	WESSLING	10	19	<0,5	NA	0,2	NA	25	NA	77

NA : Non Analysé

Tableau 14 : Résultats analytiques sur les sédiments (campagne du 10/06/14).

La Figure 36 présente la localisation des points d'échantillonnage des sédiments.

Les eaux de surface (ruisseau du Pont des Meuniers)

Les résultats des analyses effectuées sur les eaux du ruisseau du Pont des Meuniers, à 150 m environ en aval du site de la « Place à gaz » montrent (cf. Figure 36) :

- l'absence dans les eaux de surface (en juin 2014) des ions chlorate et perchlorate ;
- la présence de traces d'arsenic (1,1 µAs/L), de cuivre et de nickel (< 1 µg/L) en juin 2014.

g) Bilan

La seconde étape de la phase 2 d'investigations, focalisée pour l'essentiel sur les sols superficiels, a montré :

- au droit de la « Place à gaz », dans le périmètre clôturé, l'occurrence **de fortes teneurs en métaux et métalloïdes** (notamment, arsenic, cuivre, plomb et zinc), en dioxines et furannes chlorées ;
- **la présence de composés nitroaromatiques** (dominés par le TNT) et **toxiques de guerre**, détectés et quantifiés à l'état de traces issus des explosifs et des chargement des engins de guerre ayant été détruits sur le site de la « Place à gaz » ; la technique utilisée pour leur analyse (extraction par lixiviation à l'eau) minimise les teneurs réelles sur les sols bruts compte tenu de la forte adsorption de ces composés organiques ou organométalliques sur la matière organique carbonneuse présente en quantité élevée dans les résidus de combustion formant la surface de la « Place à gaz » ;
- **dans la fosse 1** située au nord-est et à proximité immédiate de la « Place à gaz », hors périmètre clôturé, la présence de **teneurs élevées en dioxines et furannes chlorées et bromées, associées à des composés pyrotechniques**; on constate par ailleurs une signature chimique particulière au niveau de cette fosse marquée par la présence, au côté des phénylarsines, de l'arsenic et des sous-produits de décomposition thermique et d'oxydation des diphénylarsines, de **teneurs élevées en plomb et en brome lixiviable**,

lui-même **associé à des formes organobromées** (PBDD & PBDF, composés aromatiques bromés). Cette signature chimique résulte très vraisemblablement de la combustion d'engins de guerre à chargements spéciaux arséniés (obus à Croix bleue) ou bromés (agents lacrymogènes) ;

- **la présence de teneurs encore sensiblement élevées en métaux et métalloïdes** (notamment arsenic, plomb et zinc) dans les sols de surface à proximité immédiate de la « *Place à gaz* », avec une diminution rapide de ces teneurs au fur et à mesure de l'éloignement par rapport à la tache centrale (clairière). De la même manière, les composés pyrotechniques et les toxiques de guerre, quantifiés sur les points les plus proches de la zone clôturée, ne sont plus mesurables à 30 m de distance de la clôture ;
- **un léger marquage des sédiments par les métaux et métalloïdes** en aval direct du site de la « *Place à gaz* ». Ce marquage, encore mesurable à 150 m du site, n'est plus observé à 500 m, où les teneurs sont proches ou égales de celles couramment rencontrée dans le fond géochimique naturel. Ces constats montrent une influence du site de la « *Place à gaz* » sur la qualité des sédiments du ruisseau du Pont des Meuniers, avec un impact modéré en termes de teneurs et 3) et peu étendu (limité à un linéaire de ruisseau de moins de 500 m).

Les résultats obtenus lors de la phase 2 d'investigations montrent la présence de polluants dans les sols superficiels au droit de la « *Place à gaz* » mais également dans l'environnement immédiat du site (et notamment dans les fosses satellites). Globalement, si les teneurs en polluants sont très élevées au niveau de la clairière (« *tache centrale* »), elles s'atténuent très rapidement dans le proche environnement de la « *Place à gaz* ».

Ainsi, la zone de pollution concentrée est circonscrite à la clairière ; en dehors de cette dernière, seules 3 zones (nombre qui s'étendra à 4 aux termes de la phase 3 de l'étude) montrent des pollutions concentrées, mais très localisées (moins de 40 m²) ; ces zones correspondent à une fosse remplie de résidus de combustion et à 2 plaquages pelliculaires de résidus de combustion déposés à même le sol forestier. Afin d'évaluer les impacts des pollutions superficielles sur l'environnement du site, et notamment pour évaluer les migrations potentielles de ces polluants vers les milieux profonds (les sols profonds, les éventuels horizons aquifères), une phase 3 d'investigations a été menée sur les sols en profondeur au droit de la « *Place à gaz* » et au droit des fosses satellites (notamment la fosse 1, au nord-est de la clairière), qui présente les épaisseurs en résidus les plus importantes (50-60 cm) et les plus fortes teneurs en polluants).

La phase 3 a été dimensionnée afin de répondre aux questions suivantes :

- parmi le cortège de polluants identifiés, certains sont-ils mobiles vers les sols profonds et les eaux souterraines ?
- quels sont les mécanismes actuels et/ou passés à l'origine de la mobilisation, ou de l'immobilisation des polluants, et/ou l'atténuation des composés dans les sols superficiels et profonds ?

Enfin, le marquage des eaux de surface en aval de la « *Place à gaz* » est directement dépendant du ruissellement au droit et aux abords de la « *Place à gaz* ». Compte tenu de sa variabilité temporelle, liée au régime des précipitations, il a été décidé - pour être conclusif sur l'impact ou non du site sur les eaux superficielles- de renforcer le diagnostic sur les eaux du ruisseau du Pont des Meuniers par un suivi qualitatif sur 3 mois, avec 3 campagnes d'échantillonnage réalisées selon une périodicité mensuelle sur 3 stations de prélèvement.

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

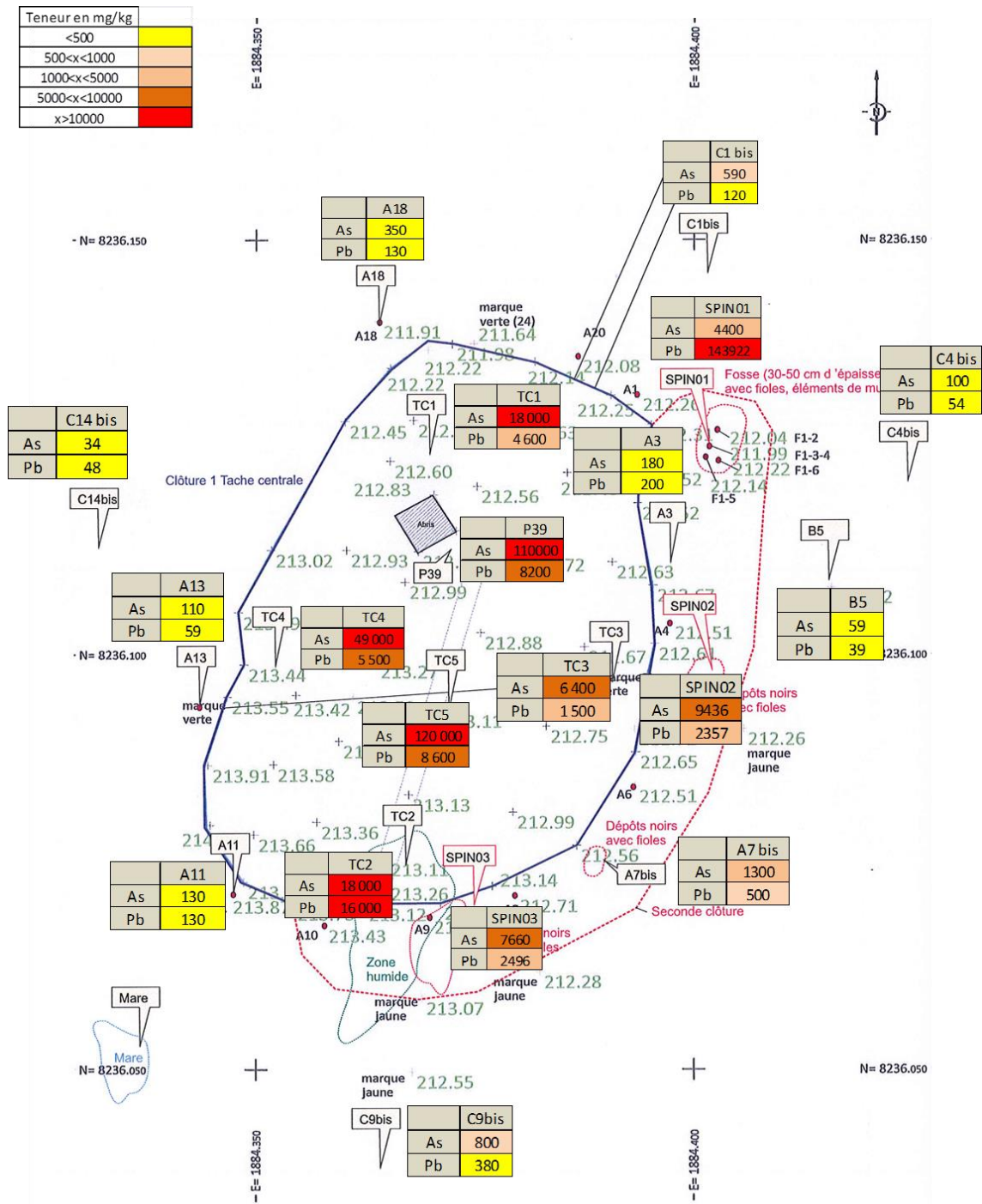


Figure 35 : Plan récapitulatif de la répartition des analyses en arsenic et plomb dans les sols de surface (campagnes de phases 1 et 2).

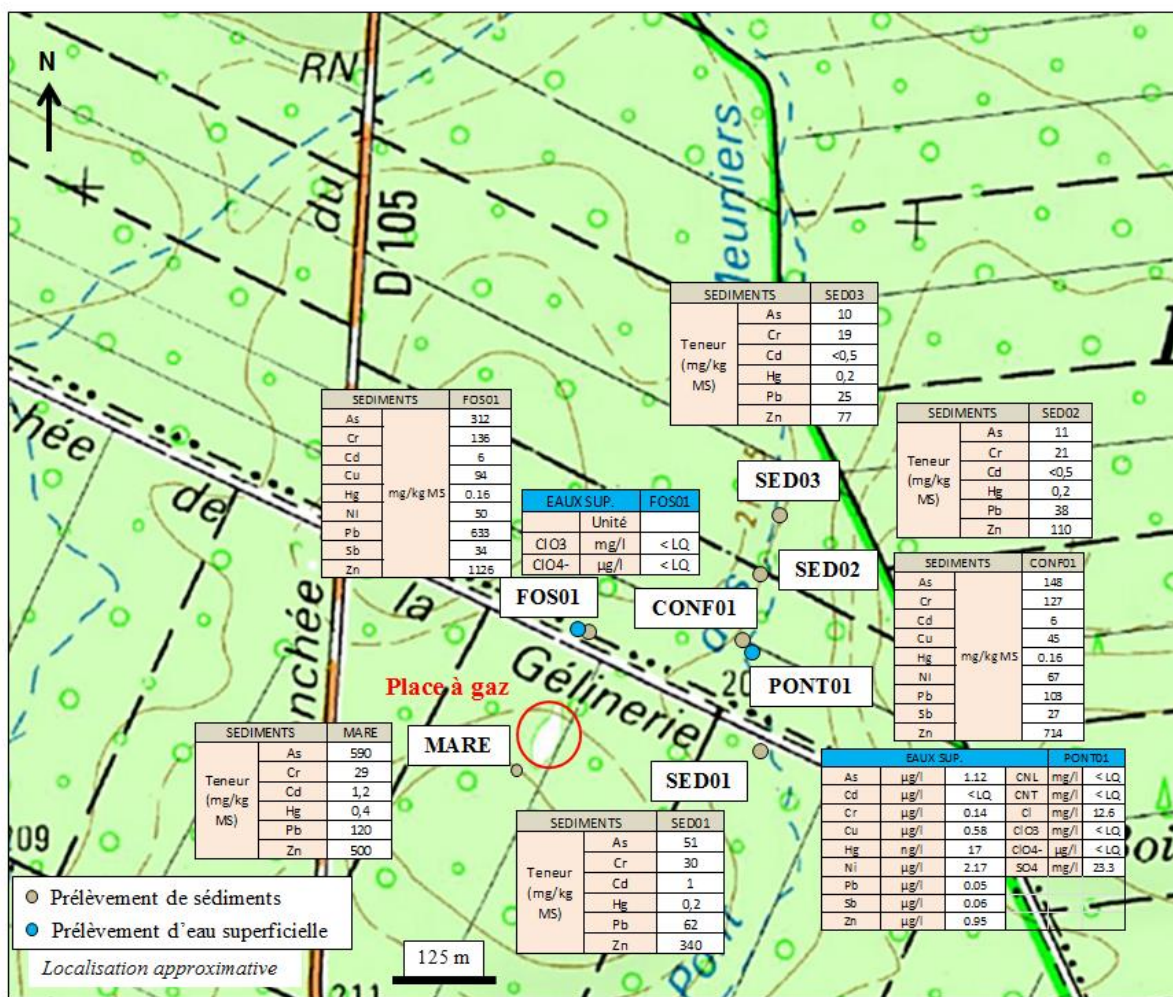


Figure 36 : Localisation des points de prélèvement et résultats sur les sédiments et les eaux superficielles (campagnes de phase 2).

4.4 PHASE 3 : DIAGNOSTIC DES SOLS EN PROFONDEUR

Afin d'approfondir les connaissances sur les polluants et leur migration potentielle dans les sols, des investigations complémentaires ont été entreprises au droit et aux abords immédiats de la « Place à gaz ». Cette phase d'investigations a été adaptée et mise en cohérence avec les résultats obtenus lors des phases 1 et 2 du diagnostic.

4.4.1 Sécurité et préparation du chantier

L'échantillonnage des sols en profondeur implique l'usage de techniques de sondage invasives comme l'ouverture de tranchées à la pelle mécanique ou le sondage (par un carottier battu par exemple). Le site de la « Place à gaz » étant susceptible de renfermer encore dans ses sols des engins de guerre intacts ou partiellement détruits: (risques d'incendie, d'explosion, risques chimique), des protocoles de sécurité, compatibles avec ceux encadrant le travail des entreprises spécialisées dans la détection et l'enlèvement d'engins de guerre, ont été nécessaires pour sécuriser les investigations.

Afin de pouvoir procéder à des observations visuelles sur l'état des sols à l'avancement des sondages, le BRGM a fait de choix d'exécuter les sondages à la pelle mécanique de 20T, ce qui a permis d'ouvrir des tranchées jusqu'à 4 m de profondeur environ. Ces sondages ont été exécutés par une entreprise spécialisée dans le diagnostic pyrotechnique, après détection géomagnétique préalable, au droit de chaque emplacement de sondage. La mission a été confiée par le BRGM à la société Cardem-pyro.

Ainsi, préalablement à la phase de sondages la DIRECCTE⁴⁰, l'IPE⁴¹, le BRGM, la société Cardem-pyro (chargée du diagnostic pyrotechnique) et les services de la Préfecture de la Meuse (SDIS) ont travaillé étroitement en vue de l'élaboration et la finalisation d'un plan de prévention et d'un protocole d'intervention (EST « *Étude de Sécurité du travail* »).

Le protocole décrit notamment, et de manière précise :

- l'organisation globale du chantier, et notamment la sécurisation pyrotechnique ;
- les équipements de protection individuelle spécifiques aux polluants potentiellement présents au droit du site ;
- le dispositif de sécurité et de secours (intervention des secours, base vie à environ 250 m de la Place à gaz, sécurisation du périmètre, etc.).

Le mode opératoire retenu pour la réalisation des sondages a été le suivant :

- ↻ Validation préalable des zones de sondage par une détection magnétique de surface,
- ↻ Détection magnétique des points de sondage en surface et lors des passes successives,
- ↻ Mise au jour des anomalies magnétiques,
- ↻ En cas de détection d'anomalies, Identification sans manipulation (pour un lever de doute),
- ↻ Réalisation de ces opérations par couches successives dans le premier mètre de terrain lors de l'exécution des sondages à la pelle mécanique,

⁴⁰ DIRECCTE : Direction Régionale des Entreprises, de la Concurrence, de la Consommation, du Travail et de l'Emploi

⁴¹ IPE : Inspection des Poudres et des Explosifs

↪ En cas de découverte d'engins de guerre, le chantier serait arrêté et les personnels écartés au-delà d'un périmètre de sécurité précisé dans l'EST, puis la Préfecture de la Meuse serait avertie. Elle saisirait si nécessaire le Service du déminage de Metz. Ce dernier, une fois sur place, réaliserait les opérations d'identification, de relevage, de transport et de destruction du ou des engins de guerre, conformément au décret 76-225.

Les personnels habilités à pénétrer au sein du périmètre clos étaient équipés d'EPI (Équipement de Protection Individuel) comprenant des bottes coquées, le port de gants, d'une combinaison de protection chimique, d'un masque à gaz (avec cartouches adaptées) ou d'un masque à ventilation assistée (cf. illustrations photographiques de la Figure 37).



Figure 37 : Travaux de sondage à la pelle mécanique ; aperçu photographique.

4.4.2 Investigations : prélèvements et analyses de sols réalisés

Cette phase d'investigations, menée du 21 au 23 octobre 2014, a consisté en la réalisation de :

- **7 sondages de sols à l'aide d'une pelle mécanique à une profondeur de 3 à 4 m**, ce qui a permis d'obtenir des profils de sols et d'identifier la présence ou l'absence de venues d'eau :
 - 5 sondages localisés au droit de la « Place à gaz » (SPM01 à SPM05),
 - 1 sondage localisé à proximité de la « Place à gaz » (SPM06),
 - 1 sondage localisé à proximité de la tranchée de la Gélinerie (SPM07). L'objectif de cette dernière tranchée était de disposer d'un profil de sol « témoin » en dehors des zones hautement polluées ;
- **l'échantillonnage de sols à différentes profondeurs**. Dans chaque sondage, 5 à 6 échantillons de sols (un échantillon moyen de sol par tranche d'un mètre environ) ont été prélevés. Chaque échantillon a été prélevé en double, le double étant destiné à être conservé pour d'éventuelles analyses complémentaires.

Chaque sondage a donné lieu à une description détaillée des terrains traversés : lithologie (terrain naturel/remblai, texture), couleur, odeurs éventuelles, venues d'eau... Les profils des sondages sont présentés en Annexe 4.

Les tranchées de reconnaissance ont été relevées par un géomètre expert et sont reportées sur le fond cartographique en Figure 37.

Les sondages n'ont pas interceptés de niveau d'eau. Ainsi, aucun prélèvement d'eau n'a pu être réalisé. Par ailleurs, cette phase d'investigations, et notamment le creusement de la tranchée de reconnaissance SPM07, a mis en évidence la présence d'une zone de dépôts de résidu de combustion d'obus chimiques le long de la tranchée de la Gélinerie. La description de cette zone - dénommée « Dépôt nord » - est développée ultérieurement. Deux prélèvements de sols de surface ont été réalisés dans cette zone.

Les échantillons ont été conditionnés dans des bocaux en verre puis stockés dans une glacière réfrigérée. Ils ont ensuite été envoyés aux laboratoires (Wessling et Envilytix) pour analyse.

Le programme analytique réalisé pour chaque échantillon est détaillé dans le Tableau 15 :

4.4.3 Description lithologique

Au droit de la « Place à gaz », les fouilles SPM01 à SPM05 ont mis en évidence les lithologies suivantes :

- des résidus noirs, résultant de la combustion des projectiles chimiques, dont l'épaisseur varie entre 10 et 30 cm (horizon 1, SPM03, Figure 39) ;
- des limons argileux, gris beige, panaché de brun, à passées noirâtres, marqués par la présence de traces de racines, (jusqu'à 50 cm de profondeur) (horizon 3, SPM03, Figure 38) ; parfois, comme dans SPM03, une couche de 2 à 3 cm de limon compact, gris beige à crème, à débit en plaquettes (horizon 2, SPM03, Figure 39), sépare les horizons 1 et 3 ;
- des limons argileux brun orangé, à passées bleues ou noirâtres, moyennement meubles, avec des passages plus compacts jusqu'à 4 m de profondeur.

Le sondage SPM06 au droit de la fosse nord-est, située à proximité immédiate de la clairière de la « Place à gaz » a mis en évidence :

- des résidus de pyrolyse noirs avec de nombreux tessons de fioles d'arsine et de bouchons en verre sur 50 cm d'épaisseur (horizon 1, Figure 28) ;
- un horizon sablo-argileux rouge brique très humide sur 20 cm d'épaisseur (horizon 2, Figure 39) ;
- des limons argileux jaunes à gris, avec des passées de couleur rouille, jusqu'à 1,2 m de profondeur (horizon 3, Figure 39) ;
- une argile limoneuse brun orangé mouchetée de gris, compacte et plastique.

La fouille témoin SPM07 réalisée le long de la tranchée de la Gélinerie a mis en évidence :

- des dépôts noirâtres riches en matière organique, avec présence de nombreux éléments de munitions, clous et charnières, sur un lit de graviers concassés calcaire sur 20 cm d'épaisseur ;
- des limons argileux brun orangé, avec des passages plus gris, avec présence de concrétions millimétriques entre 0.2 et 2.5 m de profondeur ;
- des sables argilo-limoneux bruns grossiers à graviers, humides jusqu'à 3,5 m de profondeur ;
- une argile sableuse et micacée grise, avec passées de rouille jusqu'à 4,2 m de profondeur.

Des profils de sondage représentatifs sont présentés en Annexe 4. L'implantation des fouilles et le résultat des différentes observations sont présentés en Figure 38.

Aucune venue d'eau n'a été observée dans les sondages réalisés, excepté en SPM07, pour lequel une venue d'eau ponctuelle et très réduite (quelques suintements qui se sont rapidement interrompus) a été observée vers 3,5 m de profondeur.

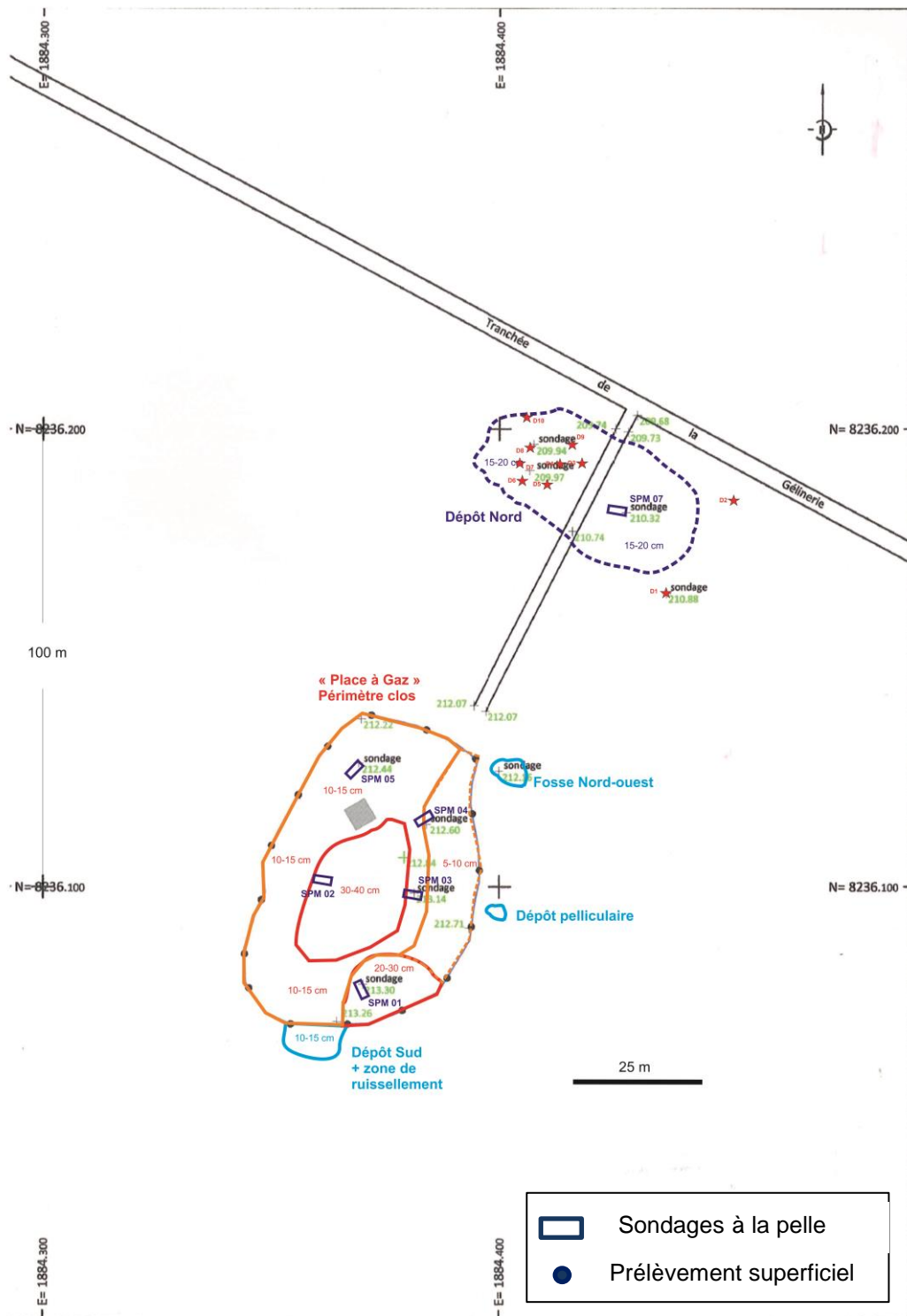


Figure 38 : Plan d'implantation des sondages de sol et observations de terrain.



Figure 39 : Profils des sondages à la pelle mécanique ; aperçu photographique⁴².

⁴² Les différentes couches ont été numérotées ; la couche n° 1 correspond aux résidus de combustion arséniés

4.4.4 Résultats analytiques bruts sur les sols de profondeur

Les résultats d'analyse obtenus sur les sols sont présentés dans les Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18. Les bordereaux analytiques sont présentés en Annexe séparée.

Pour les échantillons prélevés sur les profils des fouilles SPM01 à SPM04, seuls les paramètres arsenic, plomb et zinc ont été analysés sur les sols bruts. Les 8 métaux et métalloïdes (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) ont été analysés sur l'ensemble des échantillons prélevés sur le profil de SPM05 (tache centrale), SPM06 (fosse n° 1), SPM07 (sondage témoin) et D8 et D9 (« Dépôt nord »).

On peut observer que pour l'ensemble des sondages, les teneurs en arsenic, plomb et zinc sont élevées sur la tranche 0,1 - 0,2 m (correspondant aux résidus de combustion), et diminuent fortement avec la profondeur, d'un facteur 1 000 à 10 000 dès 0,6 m de profondeur (sols naturels pollués).

L'arsenic lixiviable en SPM02 présent à une concentration de 125 000 µg/kg à 0,2 m diminue à 1 940 µg/kg à 2,0 m de profondeur et atteint une concentration inférieure à la limite de quantification à 4 m de profondeur. Sur cette même fouille, le zinc et le plomb lixiviable présentent les mêmes tendances que l'arsenic, avec une diminution drastique du métal avec la profondeur.

Les teneurs en arsenic, cadmium, plomb, cuivre, mercure et zinc sur les profils SPM06 et SPM07 diminuent également fortement avec la profondeur (concentration des métaux dans les résidus de combustion). Les analyses sur lixiviat présentent la même tendance, sauf pour le zinc lixiviable qui augmente sur SPM06 entre 2,8 et 3,6 m de profondeur, variant de < 10 µg/kg (LQ) à 42,2 µg/kg.

Pour les éléments chrome et nickel, les teneurs sont sensiblement identiques dans les différents horizons prélevés (profils homogènes typiques du fond géochimique naturel).

Les échantillons D8 et D9 prélevés dans les résidus de combustion superficiels du « Dépôt nord » présentent des teneurs en arsenic, plomb et zinc similaires aux échantillons de la tache centrale.

a) Ions chlorate et perchlorate

Les analyses en métaux ont été complétées pour SPM02 (0,2 m, 2,0 m et 4,0 m) et SPM06 (ensemble du profil) par des analyses sur lixiviat visant les bromures, chlorures, et ions chlorate (ClO_3^-) et perchlorate (ClO_4^-).

Pour les bromures lixiviables, les résultats sur SPM02 et SPM06 indiquent une forte diminution de la concentration avec la profondeur jusqu'à environ 3 m puis une ré-augmentation entre 3 et 4 m de profondeur. Cette tendance est également observée pour les chlorures lixiviables et pour les ions perchlorate sur SPM02 qui ne sont pas quantifiés en surface (<LQ) mais présents à 4 m de profondeur (avec respectivement 65 mg/kg et 13,7 µg/kg).

Les ions chlorate ne sont quantifiés que sur l'échantillon de surface SPM06-0.2 m.

La fosse témoin ne présente aucun des composés recherchés.

b) Dioxines et furannes (PCDD & PCDF)

Les dioxines (PCDD) et furannes (PCDF) ont été analysées sur les profils SPM02 et SMP05. Les résultats indiquent :

- de fortes teneurs en PCDD sur les échantillons superficiels (SPM02-0.2 m et SPM05-0,2 m), avec des teneurs comprises entre 45 500 ng/kg pour SPM05-0.2 m et 91 100 ng/kg pour SPM02-0,2 m pour la somme des PCDD (tetra-octa) ; ces matériaux analysés correspondent aux résidus de combustions des projectiles chimiques ;
- de fortes teneurs en PCDF sur les échantillons superficiels (SPM02-0.2 m et SPM05-0,2 m), avec des teneurs comprises entre 204 000 ng/kg pour SPM05-0.2 m et 360 000 ng/kg pour SPM02-0.2 m pour la somme des PCDF (tetra-octa) ; ces matériaux analysés correspondent aux résidus de combustions des projectiles chimiques ;
- les furannes (PCDF) sont prépondérants sur les dioxines (PCDD) sur l'ensemble des échantillons ;
- les teneurs totales en dioxines & furannes des deux sondages, montrent une très nette diminution avec la profondeur, puisque les teneurs mesurées sont nettement atténuées dès 0,6 m de profondeur (dans les sols présents sous les résidus de combustion).

c) Composés nitroaromatiques et toxiques de guerre

Des traces de composés énergétiques nitroaromatiques et de leurs sous-produits de transformation environnementale sont détectées dans les résidus de combustion (tranche superficielle 0-20 cm). Il s'agit de traces de :

- **2-amino-4,6-dinitrotoluène, 4-amino-2,6-dinitrotoluène** en SPM01 (respectivement 0,51 et 0,11 mg/kg) et D8 (respectivement 0,41 et 0,75 mg/kg) ; il s'agit de métabolites du TNT (2,4,6-trinitrotoluène) ;
- **acide-2-amino-4,6-benzoïque** (0.16 mg/kg) en SPM06 ; il s'agit de métabolites du TNT (2,4,6-trinitrotoluène) ;
- **2,4,6-trinitrotoluène (TNT)** en SPM01 (0.39 mg/kg) et D8 (1 mg/kg). Ce composé est également retrouvé en SPM06 plus en profondeur : à 0.6 m de profondeur (0,63 mg/kg) et à 2,8 m de profondeur (0,29 mg/kg) ;
- **2,4,6-trinitrophénol** (« acide picrique ») en SPM06 à une teneur de 1,56 mg/kg ;
- **1,5-dinitronaphtalène et 1,8-dinitronaphtalène** en SPM01 et D8.

Par ailleurs, **des phénylarsines résiduelles et leurs sous-produits d'oxydation (acide diphenylarsénique)**, plus toxiques et plus mobiles, sont quantifiés dans les résidus de la fouille SPM06 à une teneur de 17,5 mg/kg.

Les résultats d'analyse obtenus sur les sols sont présentés dans les Tableaux 16, 17 et 18.

SOLS	Nom	Laboratoire	Teneur (mg/kg MS) sur brut										Teneur sur lixivié					
			As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As lixiviable (µg/kg)	Zn lixiviable (µg/kg)	Pb lixiviable (µg/kg)	Br lixiviable (µg/kg)	Cl lixiviable (mg/kg)	CIO3 lixiviable (mg/kg)	CIO4 lixiviable (µg/kg)	
Tache centrale	SPM01-0.1m	Wessling	19000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3800	40000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM01-0.6m		3600	NA	NA	NA	NA	NA	180	3400	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM01-1m		660	NA	NA	NA	NA	NA	33	6400	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM01-2.6m		38	NA	NA	NA	NA	NA	27	150	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM01-3.8m		35	NA	NA	NA	NA	NA	20	89	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM02-0.2m		53000	NA	NA	NA	NA	NA	5700	110000	7666	4000	<5	<1	<5	<5	<5	
	SPM02-0.6m		95	NA	NA	NA	NA	NA	24	710	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM02-2.0m		75	NA	NA	NA	NA	NA	26	140	2,81	11,2	<10	<5	<1	<5	<5	
	SPM02-3.0m		30	NA	NA	NA	NA	NA	22	120	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM02-4.0m		20	NA	NA	NA	NA	NA	23	67	<1	<10	367	65	<1	13,7	13,7	
	SPM03-0.2m		25000	NA	NA	NA	NA	NA	9000	36000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM03-0.3mPRODET		1300	NA	NA	NA	NA	NA	100	1200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM03-0.4m PRODET		1100	NA	NA	NA	NA	NA	33	680	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM03-0.6m		64	NA	NA	NA	NA	NA	21	1100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM03-1.5m		60	NA	NA	NA	NA	NA	20	1100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM03-2.6m		57	NA	NA	NA	NA	NA	22	130	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM03-3.7m		78	NA	NA	NA	NA	NA	20	380	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM04-0.2m		17000	NA	NA	NA	NA	NA	6200	24000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM04-0.6m		110	NA	NA	NA	NA	NA	45	930	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM04-1.8m		27	NA	NA	NA	NA	NA	20	78	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM04-2.7m		44	NA	NA	NA	NA	NA	45	110	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SPM04-3.8m		37	NA	NA	NA	NA	NA	44	110	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	kalk		2600	NA	NA	NA	NA	NA	140	1200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	SPM05-0.2		23000	96	15	5100	11	22	4200	55000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	SPM05-0.6		170	0.5	35	23	<0.1	21	48	870	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	SPM05-2.2		26	<0.5	45	17	<0.1	39	48	110	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	SPM05-3.2		26	<0.5	57	17	<0.1	46	40	100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
SPM05-0.2	11000	25	9	420	0.4	18	50000	5300	9100	13900	69000	57000	7	5,01	<5	<5		
SPM06-0.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	780	968	3400	4600	<5	<1	<5	<5		
SPM06-1.8	31	<0.5	37	13	<0.1	27	290	61	290	<10	<10	3800	<5	<1	<5	<5		
SPM06-2.8	23	<0.5	46	15	<0.1	35	87	70	163	<10	<10	5200	<5	<1	<5	<5		
SPM06-3.6	18	<0.5	52	17	<0.1	44	180	95	124	42,2	<10	6800	<5	<1	<5	<5		
SPM07-0.2	980	19	22	1700	2,2	19	2600	13000	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
SPM07-0.6	21	<0.5	47	21	<0.1	47	29	120	NA	NA	NA	NA	<5	<1	<5	<5		
SPM07-2.0	20	<0.5	23	15	<0.1	27	26	59	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		
SPM07-3.0	43	<0.5	29	31	<0.1	56	35	130	NA	NA	NA	NA	<5	<1	<5	<5		
SPM07-4.2	15	<0.5	35	12	<0.1	27	32	60	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA		

NA : Non Analysé

Tableau 16 : Résultats d'analyses en métaux sur brut et lixivié et ions chlorate et perchlorate sur lixivié dans les sols

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux

Désignation d'échantillon	Laboratoire Wessling	TACHE CENTRALE					
		SPM02-0.2 m	SPM02- 0.6m	SPM02-2.0m	SPM05-0.2 m	SPM05-0.6 m	SPM05-2.2 m
Matière sèche	%	77,6	92,6	91,7	79,5	94,5	94,3
PCDD							
2,3,7,8 TCDD	ng/kg	1 250	<2,5	<2,5	920	2,92	<2,5
1,2,3,7,8 PeCDD		1 990	<5	<5	1 330	<5	<5
1,2,3,4,7,8-HxCDD		999	<7,5	<7,5	568	<7,5	<7,5
1,2,3,6,7,8 HxCDD		1 970	<7,5	<7,5	1 060	<7,5	<7,5
1,2,3,7,8,9-HxCDD		1 780	<7,5	<7,5	1 030	<7,5	<7,5
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD		7 550	<37,5	<37,5	3 440	<37,5	<37,5
Octa CDD		10 800	<125	<125	4 640	<125	<125
Somme des tetra CDD		29 500	<25	<25	15 200	55,6	<25
Somme des penta CDD		18 600	<50	<50	10 500	36,2	<50
Somme des Hexa CDD		18 400	<75	<75	9 370	<75	<75
Somme des hepta CDD		13 800	<75	<75	5 870	<75	<75
Somme PCDD (tetra-octa)		91 100	-/-	-/-	45 500	91,8	-/-
Somme des HpCDD restants		6 240	<75	<75	2 430	<75	<75
Somme des HxCDD restants		13 700	<75	<75	6 720	<75	<75
Somme des PeCDD restants		16 600	<50	<50	9 160	36,2	<50
Somme des TCDD restants	28 200	<25	<25	14 200	52,7	<25	
PCDF							
2,3,7,8 TCDF	ng/kg	14 000	4,42	2,66	9 450	28,7	6,66
1,2,3,7,8 PeCDF		19 500	<5	<5	11 400	35,9	9,48
2,3,4,7,8 PeCDF		7 520	<5	<5	5 220	16,2	<5
1,2,3,4,7,8-HxCDF		20 600	<7,5	<7,5	10 600	36,1	9,95
1,2,3,6,7,8 HxCDF		9 780	<7,5	<7,5	5 670	17,3	<7,5
2,3,4,6,7,8 HxCDF		6 690	<7,5	<7,5	3 550	12	<7,5
1,2,3,7,8,9-HxCDF		5 150	<7,5	<7,5	2 590	8,98	<7,5
1,2,3,4,6,7,8 HpCDF		29 500	<37,5	<37,5	13 800	45	<37,5
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF		10 500	<37,5	<37,5	4 720	<37,5	<37,5
Octa CDF		33 200	<125	<125	15 600	<125	<125
Somme des tetra CDF		132 000	77,9	35,7	83 300	289	77,5
Somme des penta CDF		72 100	<50	<50	44 000	132	37,2
Somme des Hexa CDF		72 300	<75	<75	37 600	124	<75
Somme des Hepta CDF		49 700	<150	<150	23 200	81,7	<150
Somme PCDF (tetra-octa)		360 000	77,9	35,7	204 000	626	115
Somme des HpCDF restants	9 760	<150	<150	4 710	36,6	<150	
Somme des HxCDF restants	30 200	<75	<75	15 200	49,9	<65,1	
Somme des PeCDF restants	45 100	<50	<50	27 400	79,6	27,7	
Somme des TCDF restants	118 000	73,5	33	73 800	260	70,8	
Valeurs calculées							
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg	451 000	77,9	35,7	249 000	718	115
I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ		13 600	0,442	0,266	8 450	23,6	2,14
I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ		13 600	14,8	14,6	8 450	29,3	15,5
I-TE (OTAN CCMS) incl. ½ LOQ		13 600	7,63	7,45	8 450	26,4	8,82
TEQ (OMS 1997) excl. LOQ		14 600	0,442	0,266	9 090	23,6	2,14
TEQ (OMS 1997) incl. LOQ		14 600	17,1	16,9	9 090	31,6	17,8
TEQ (OMS 1997) incl. ½ LOQ		14 600	8,77	8,59	9 090	27,6	9,96
TE-BGA excl. LOQ		13 300	1,18	0,596	7 870	23,7	3,59
TE-BGA incl. LOQ		13 300	14,8	14,2	7 870	28,3	15,3
Somme I du "Chemikalienverbotsverordnung"		24,8	0,00442	0,00266	16,9	0,0478	0,00666
Somme II du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand		91,3	0,00442	0,00266	53,3	0,158	0,0261
Somme III du "Chemikalienverbotsverordnung" allemand		183	0,00442	0,00266	95,5	0,203	0,0261
TEQ (OMS 2005) excl. LOQ		12 700	0,442	0,266	7 830	19,6	1,95
TEQ (OMS 2005) incl. LOQ		12 700	16	15,9	7 830	27,7	16,6
TEQ (OMS 2005) incl. ½ LOQ		12 700	8,24	8,07	7 830	23,7	9,3

Tableau 17 : Résultats d'analyses en dioxines (PCDD) et furannes (PCDF) sur les sols.

Laboratoire Envilytix Composés	Unité	TACHE CENTRALE							
		SPM01-0,6m	SPM01-1,0m	SPM01-2,6m	SPM06-0,2m	SPM06-0,6m	SPM06-1,8m	SPM06-2,8m	SPM06-3,6m
2-amino-4,6-dinitrotoluène	mg/kg MS	0,51	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
4-amino-2,6-dinitrotoluène		0,11	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acide 2-amino-4,6-benzoïque		<0,05	<0,05	<0,05	0,16	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acide 4-amino-2,6-benzoïque		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2,4,6-trinitrotoluène (TNT)		0,39	<0,05	<0,05	<0,05	0,63	<0,05	0,29	<0,05
2,4,6-trinitrophénol (acide picrique)		<0,05	<0,05	<0,05	1,56	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,3-dinitrobenzène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,5-dinitronaphtalène		0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,8-dinitronaphtalène		0,05	<0,05	<0,05	0,42	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,3,8-trinitronaphtalène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,4,5-trinitronaphtalène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acide diphenylarsinique		<0,05	<0,05	<0,05	17,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Diphénylarsine (chlorure)		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Triphénylarsine		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
9-phénylarsine fluorene		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Chlorure de diphenyl arsine		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
9-phénylarsine fluorene		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Triphénylarsine		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
(Biphényl-4-yl)diphénylarsine		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2-Bromotoluène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
4-Bromotoluène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2-Bromo-p-xylène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2,5-Dibromo-p-xylène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Chlorobenzène		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Tableau 18 : Résultats d'analyses en agents chimiques de combat et explosifs dans les sols.

4.4.5 Investigations et résultats sur les végétaux

Dans le cadre de la phase 3, une visite du site a permis de constater la présence aux abords de la « Place à gaz » et sur les résidus de la fosse nord-est, de champignons comestibles (Trompettes de la Mort). Afin d'affiner le diagnostic et l'évaluation des risques, le BRGM a saisi cette opportunité pour procéder à l'échantillonnage et à l'analyse de ces champignons.

Des analyses en métaux et métalloïdes ont été réalisées sur les échantillons prélevés, afin de voir le potentiel d'accumulation de ces composés métalliques dans ces végétaux comestibles (et donc potentiellement ramassés).

• Champignons

Deux échantillons de champignons (trompettes de la mort) ont été prélevés par le BRGM le 29/09/14 :

- un échantillon ayant poussé au droit du sondage SPM06 (au droit de la fosse n° 1) (échantillon TROMP DEPOT) ;
- un échantillon témoin (échantillon TROMP EXT), ayant poussé dans une zone non influencée par les pollutions de la « Place à gaz », à environ 30 m au nord-est de la clairière de la « Place à gaz ».

Les échantillons ont été conditionnés dans des glacières et envoyés dans les 48 h au laboratoire Wessling par transporteur.

Des analyses en arsenic, zinc et plomb ont été réalisées sur les deux échantillons. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 19. Les certificats d'analyse sont présentés en Annexe séparée.

		Echantillon ayant poussé sur SPM06	Echantillon témoin, Ouest et hors Place à Gaz
Après minéralisation à HNO ₃	E/L	24/09/2014	24/09/2014
Zinc (Zn)	mg/kg MS	28	22
Arsenic (As)	mg/kg MS	3,9	<3
Plomb (Pb)	mg/kg MS	40	<10

Tableau 19 : Résultats d'analyses sur les champignons.

Le zinc est présent à des concentrations du même ordre dans les deux échantillons, ce qui est vraisemblablement aussi le cas pour l'arsenic, car la concentration mesurée dans l'échantillon ayant poussé sur SPM6 est proche de la limite de quantification. Un enrichissement en plomb (au moins d'un facteur 4) est constaté sur l'échantillon provenant de la « Place à gaz » par rapport à l'échantillon témoin provenant de l'environnement du site.

4.4.6 Découverte et investigation du « Dépôt nord »

a) Contexte des investigations

Lors du creusement de la fouille SPM07 (fouille « témoin »), réalisée le long de la tranchée de la Gélinerie, des dépôts noirâtres riches en matière organique ont été observés sur les premiers centimètres de sols. Ces dépôts contenaient de nombreux éléments de munitions (amorces, éléments de gaine et de fusées), de clous et de charnières qui laissent penser que cette zone a pu être une **aire de brûlage de fusées et/ou d'amorces**. Ces matériaux et résidus reposent sur un lit de concassé calcaire.

Pour caractériser à la fois l'extension de ce dépôt et à la fois la qualité chimique de ces résidus, le BRGM a réalisé deux prélèvements de sols superficiels pour l'analyse au laboratoire, l'extension de la zone du « Dépôt nord » ayant ensuite été affinée lors de la campagne complémentaire réalisée en janvier 2015.

La localisation des deux points de prélèvement de sols réalisés sur la zone du « Dépôt nord » est présentée en Figure 38.

Les échantillons de sols (D8 et D9) ont été conditionnés dans des bocaux en verre, puis stockés dans une glacière réfrigérée et envoyés aux laboratoires Wessling et Envilytix pour analyse.

Le programme analytique sur les deux échantillons figure dans le Tableau 20.

Analyses	Laboratoire	D8	D9
Matière sèche	Wessling	x	x
COT	Wessling		
8 Métaux et métalloïdes (As, Cr, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb, Zn)	Wessling	x	x
PCDD/PCDF	Wessling	x	
composés pyrotechniques et agents chimiques de combat*	Envilytix	x	

Tableau 20 : Programme analytique sur les échantillons de sols du « Dépôt nord ».

b) Résultats

Les résultats analytiques obtenus sur les échantillons D8 et D9 (cf. Tableau 21) confortent l'hypothèse selon laquelle le « Dépôt nord » est bel et bien formé de résidus de combustion d'éléments de munitions, et très possiblement de fusées et/ou d'amorces :

- **teneurs élevées en zinc** (jusqu'à 130 gZn/kg MS), en **plomb** (avec un maximum à 6,5 gPb/kg MS), en **cuivre et en arsenic** avec des maxima mesurés respectivement de 12 et 9,8 g/kg MS ; à noter par ailleurs les teneurs élevées en cadmium (jusqu'à 170 mg Cd/kg MS) ;
- comme pour les résidus de la clairière de la « Place à gaz » les résidus du « Dépôt nord » marquent par des **teneurs élevées en dioxines** (PCDD) (avec un maximum de 40 000 ng/kg MS (somme des tetra- à octachloro DD) et **en furannes** (PCDF) (jusqu'à 140 000 ng/kg MS pour la somme des tetra- à octachloro DF), **avec une nette prévalence des PCDF sur les PCDD** ;
- parmi les composés nitroaromatiques et les toxiques de guerre recherchés, **des traces de TNT** (à hauteur de 1 mg/kg MS) et de leurs métabolites (isomères des amino-dinitrotoluène) ; ces traces sont associées à celles des 1.5- et 1.8-dinitronaphtalènes.

SOLS			Dépôt Nord	
Nom			D8	D9
Laboratoire		Unité		
	Matière sèche	%	76,6	57,2
Teneur sur brut	Arsenic (As)	mg/kg MS	8800	9800
	Cadmium (Cd)	mg/kg MS	64	170
	Chrome (Cr)	mg/kg MS	27	32
	Cuivre (Cu)	mg/kg MS	2700	12000
	Mercure (Hg)	mg/kg MS	4,8	14
	Nickel (Ni)	mg/kg MS	30	44
	Plomb (Pb)	mg/kg MS	2000	6500
	Zinc (Zn)	mg/kg MS	54000	130000
Teneur sur lixiviat	As lixiviable	µg/kg	NA	NA
	Zn lixiviable	µg/kg	NA	NA
	Pb lixiviable	µg/kg	NA	NA
	Br lixiviable	µg/kg	NA	NA
	Cl lixiviable	mg/kg	NA	NA
	ClO3 lixiviable	mg/kg	NA	NA
	ClO4 lixiviable	µg/kg	NA	NA
Teneur sur brut	2-amino-4,6-dinitrotoluène	mg/kg MS	0,41	NA
	4-amino-2,6-dinitrotoluène		0,75	NA
	Acide 2-amino-4,6-benzoïque		<0,05	NA
	Acide 4-amino-2,6-benzoïque		<0,05	NA
	2,4,6-trinitrotoluène (TNT)		1	NA
	2,4,6-trinitrophénol (acide picrique)		<0,05	NA
	1,3-dinitrobenzène		<0,05	NA
	1,5-dinitronaphtalène		0,1	NA
	1,8-dinitronaphtalène		0,34	NA
	1,3,8-trinitronaphtalène		<0,05	NA
	1,4,5-trinitronaphtalène		<0,05	NA
	Acide diphénylarsinique		<0,05	NA
	Diphénylarsine (chlorure)		<0,05	NA
	Triphénylarsine		<0,05	NA
	9-phénylarsine fluorene		<0,05	NA
	Chlorure de diphényl arsine		<0,05	NA
	9-phénylarsine fluorene		<0,05	NA
	Triphénylarsine		<0,05	NA
	(Biphényl-4-yl)diphénylarsine		<0,05	NA
	2-Bromotoluène		<0,05	NA
	4-Bromotoluène		<0,05	NA
	2-Bromo-p-xylène		<0,05	NA
	2,5-Dibromo-p-xylène		<0,05	NA
	Chlorobenzène		<0,05	NA

4.4.7 Bilan

Les résultats de la phase 3 de diagnostic montrent que :

- **les teneurs les plus élevées en arsenic, plomb et zinc ont été mesurées au droit de la tache centrale et des fosses / résidus « satellites »** ; ces fortes teneurs exceptionnellement élevées (> 1 000 mgAs/kg) se cantonnent dans les 15 à 50 premiers centimètres du terrain, c'est-à-dire dans les résidus de combustion eux-mêmes ;
- le constat est le même pour les dioxines et furannes et pour les composés énergétiques (dérivés du dinitrotoluène, du nitrophénol et nitronaphtalène) et toxiques de guerre (et dérivés) (phénylarsines et acide diphénylarsénique) ;
- les teneurs en composés nitroaromatiques, toxiques de guerre et leur sous-produits de transformation restent faibles (traces) à modérées ;
- **les résidus formant le sol de la clairière de la « Place à gaz » et les dépôts périphériques correspondent à des déchets issus d'opérations de brûlage d'obus chimiques datant de la Première Guerre mondiale ; ces déchets pelliculaires, reposent sur le sol naturel forestier qui a été pollué (à des teneurs moindres par rapport aux résidus) au contact des résidus exposés aux intempéries ;**
- les éléments de munitions collectés, ainsi que la nature des polluants et autres composés mesurés dans les sols montrent que le site a été exploité pour la **destruction par brûlage contrôlé (« open-burning ») de projectiles à chargement chimique, et majoritairement des obus allemands à chargement sternutatoire** (chlorure et cyanures de diphényarsine) de calibre 77 et 105 mm dits obus à «*Croix bleue* ». **D'autres projectiles chimiques ont été intégrés aux brûlages** : projectiles lacrymogènes et projectiles suffocants et/ou vésicants (Croix verte et/ou Croix jaune) ;
- les chlorures lixiviables et les ions perchlorate apparaissent, non pas dans les résidus de surface, mais plutôt dans les sols plus profonds vers 3-4 m de profondeur ;
- **les métaux et métalloïdes affectent la qualité des sols jusqu'à au moins 4 m de profondeur**, ce qui traduit la migration *per descensum* de ces éléments depuis les résidus de combustion jusque dans les sols naturels en profondeur ;
- **les composés organiques, fortement adsorbés sur la matière organique et les fractions charbonneuses des résidus de combustion sont peu ou pas mobiles** ; ils n'affectent pas la qualité des sols au-delà de 50 à 60 cm de profondeur ;
- **aucune venue d'eau significative n'a été reconnue lors des sondages à la pelle d'octobre 2014, dans les 4 premiers mètres de terrain investigués**. Compte tenu du déficit hydrique constaté lors de la période des prélèvements, il n'est pas possible d'affirmer que l'existence de nappes perchées, discontinues est impossible dans certaines conditions hydriques ;
- **un dépôt présentant des teneurs en métaux, métalloïdes et en dioxines & furannes, similaires à celles constatées au niveau de la clairière de la « Place à gaz » a été découvert** lors du creusement de la tranchée de reconnaissance SPM07. L'étendue de ce «*Dépôt nord*», n'a pas été évaluée à ce stade de la phase 3 des investigations ;
- **l'impact des pollutions présentes au droit de la « Place à gaz » sur les eaux superficielles et les sédiments reste modéré (métaux, PCDD & PCDF) et limité** à environ 500 m en aval du site. Néanmoins, l'absence d'évènements pluvieux au moment des différentes phases d'investigations ne permet pas d'évaluer la mobilisation des polluants par ruissellement vers les eaux de surface ;
- les analyses réalisées sur deux champignons ont montré que l'un avait accumulé du plomb. Le faible nombre d'analyses conduit à relativiser la portée de ce constat.

Au vu de ces différents résultats, les principaux freins et difficultés rencontrées au stade de la phase 3 des investigations ont été :

- les conditions météorologiques de l'automne 2014 (déficit hydrique), qui n'ont pas permis d'appréhender les possibles variations des conditions hydriques, et donc du potentiel de migration des polluants identifiés vers et dans les eaux superficielles ;
- la découverte d'un nouveau dépôt de résidus le long de la tranchée de la Gélinerie dont l'étendue est pour l'instant inconnue.

Pour finaliser le diagnostic et assoir les conclusions concernant l'état de pollution du site et les risques associés, des investigations complémentaires ont été proposées par le BRGM au COPIL technique qui s'est tenu en Sous-Préfecture de Verdun le 19 novembre 2014.

4.5 ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES

Afin d'affiner les connaissances sur la zone de « Dépôt nord », le BRGM a réalisé une campagne de mesures *in situ* en métaux et métalloïdes (par fluorescence X) spécifique et a procédé au prélèvement et analyse d'un échantillon de sol.

Par ailleurs, des prélèvements des milieux - eaux superficielles et sédiments - ont été réalisés en aval de la « Place à gaz » afin d'évaluer la migration des polluants contenus dans les résidus de combustion de la « Place à gaz » (et plus directement du « Dépôt nord ») vers les milieux environnants, et notamment lors d'évènements pluvieux, propices à la mobilisation des polluants. Pour cela, trois campagnes de prélèvements ont été programmées entre janvier et mars 2015.

La localisation des points de prélèvements est présentée en Figure 43.

4.5.1 Campagne de terrain sur les sols du « Dépôt nord »

La campagne de mesures multi-élémentaire des sols de surface par fluorescence X réalisée le 27 janvier 2015 au droit de la zone du « Dépôt nord » afin de la délimiter a été complétée par un échantillonnage des sols pour analyse au laboratoire. La localisation des différents points de mesure est présentée sur la Figure 41. Cette figure présente aussi par ailleurs le tracé de la clôture, étendue au « Dépôt nord » et aux petits dépôts périphériques à la tache centrale.



Figure 40 : Aperçu photographique des sols du « Dépôt nord » (avec mesures FX (en haut à droite) et détection géomagnétique (en haut à gauche)).

Le Tableau 22 présente les résultats obtenus sur les 15 points effectués.

Ces données ont permis de circonscrire la zone du dépôt nord, qui représente environ 375 m² de (25 m x 15 m) sur une épaisseur de 15 cm environ.

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
 Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux.

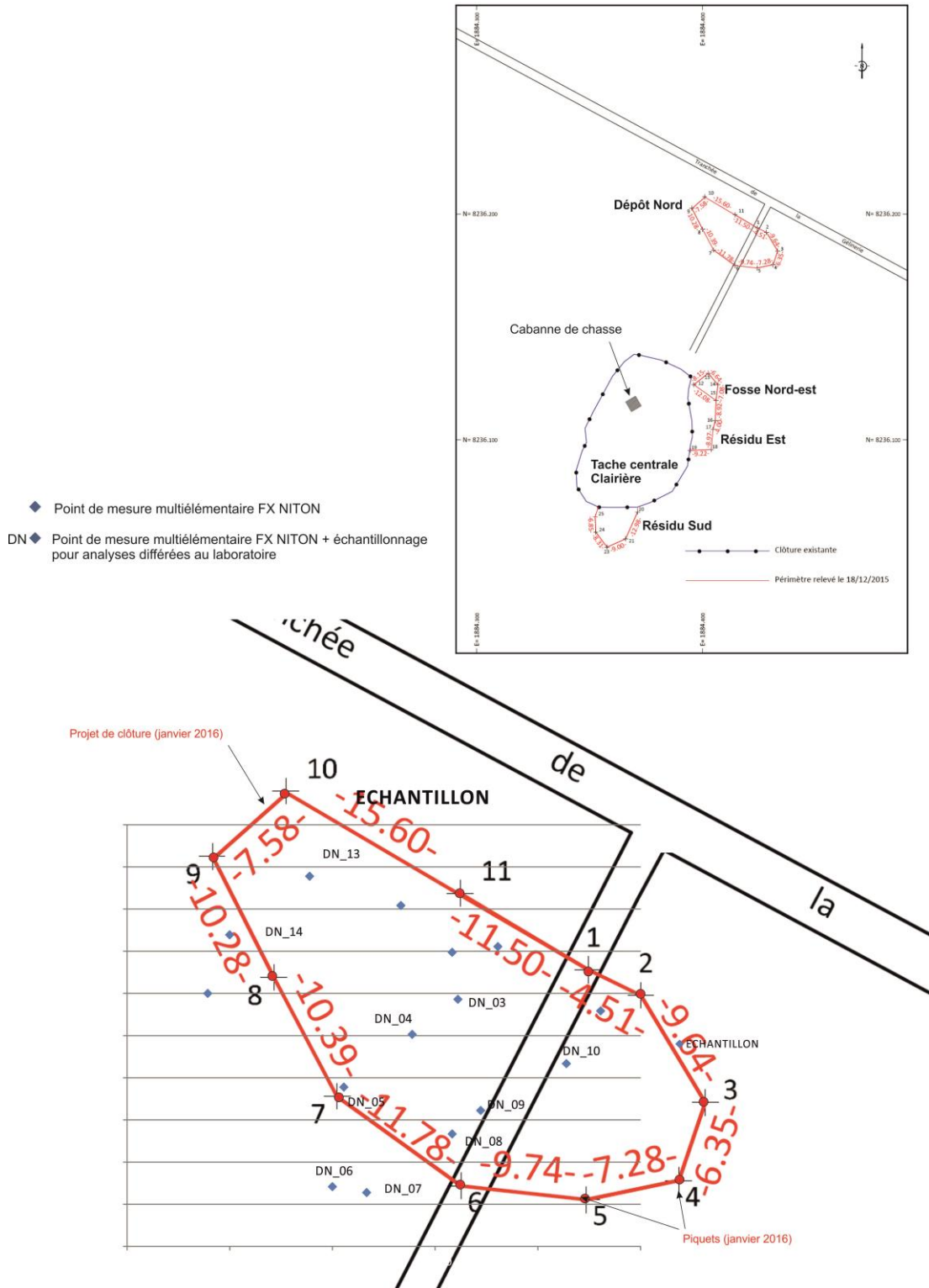


Figure 41 : Localisation des points de mesures à la fluorescence X NITON sur les sols au droit du « Dépôt nord ».

ECHANTILLON	Remarques / observations	LONG Est (Deg décimaux)	LAT Nord (Deg décimaux)	Pb ppm	As ppm	Zn ppm	Cu ppm	Sb ppm	Sn ppm	Cd ppm	Ag ppm	Sr ppm	Rb ppm	Co ppm	Fe ppm	Mn ppm	Cr ppm	V ppm	Ti ppm	Sc ppm	Ca ppm	K ppm	Cl ppm
DN_01	Sol végétal sous feuille, métaux très faibles	5,5393055600	49,3072222200	11	20	143	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	33	28	< LOD	5236	543	171	< LOD	1460	< LOD	1870	2119	14610
DN_02	Sol + gris sous feuilles	5,5390833300	49,3071944400	150	43	489	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	34	29	< LOD	4746	161	206	< LOD	1426	< LOD	3084	2773	21482
DN_03	Sol marron foncé sous feuilles	5,5391111100	49,3069722200	19	18	387	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	36	32	< LOD	5358	126	204	< LOD	1631	< LOD	2139	3176	19352
DN_04	Sol marron foncé sous feuilles	5,5388888900	49,3068055600	96	19	71	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	35	43	< LOD	6674	220	152	< LOD	1714	< LOD	1425	2573	15841
DN_05	Sol très noir, plein de verres brisés, tout proche d'une coulée noire	5,5385555600	49,3065555600	49769	5204	714	102	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	523	< LOD	13608	320	185	< LOD	643	< LOD	1620	1111	13405
DN_06	Sous herbes très denses	5,5385000000	49,3060833300	88	77	66	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	34	38	< LOD	6684	200	168	70	2566	< LOD	900	3852	22528
DN_07	Sol très noir et très trempée, coulée noire	5,5386666700	49,3060555600	895	2468	4820	604	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	10	13	96	5121	80	191	< LOD	1099	< LOD	1801	1960	28002
DN_08	Sous herbes très denses, métaux présents Pb, As et Zn	5,5390833300	49,3063333300	50	119	520	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	23	22	< LOD	3776	238	142	< LOD	1169	< LOD	2216	2187	25518
DN_09	Sous herbes très denses	5,5392222200	49,3064444400	18	33	316	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	38	36	< LOD	5429	233	175	< LOD	1632	< LOD	1732	2694	20047
DN_10	Sol marron clair	5,5396388900	49,3066666700	10	17	66	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	34	31	< LOD	6054	< LOD	185	61	1407	< LOD	1209	2543	18489
DN_11	Sol très noir	5,5398055600	49,3069166700	13	18	35	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	36	40	< LOD	5884	148	207	< LOD	1580	< LOD	1633	2353	16923
DN_12	Sol marron clair	5,5388333300	49,3074166700	297	208	7128	867	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	15	6	< LOD	3155	139	186	< LOD	437	< LOD	2224	1099	29330
DN_13	Sol marron clair sous herbes très denses	5,5383888900	49,3075555600	55	27	147	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	38	36	< LOD	4950	245	190	< LOD	1998	< LOD	1353	2877	19862
DN_14	Sol marron clair sous couverture végétale	5,5380000000	49,3072777800	11	18	57	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	23	39	30	< LOD	5034	< LOD	152	< LOD	1047	< LOD	1039	1481	14972
DN_15	Sol noir sous couvert végétal dense	5,5378935185	49,3070000000	96	27	1146	109	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	11	10	< LOD	1659	105	221	< LOD	813	< LOD	1225	1416	28746

< LOD : inférieure à la limite de détection de l'appareil NITON

Tableau 22: Résultats des mesures in situ (par fluorescence X) sur les sols au droit du dépôt nord.

L'échantillon de sols prélevé sur la zone du « Dépôt nord » le 27/01/15, une fois conditionné dans des bocaux en verre et stocké dans une glacière réfrigérée, a ensuite été envoyé aux laboratoires Wessling et Dioxlab. Le programme analytique réalisé par Wessling est présenté dans le Tableau 23.

Remarque : L'échantillon de sol prélevé dans le cadre de cette campagne est identifié comme échantillon D8, tout comme celui prélevé dans la même zone de Dépôt nord en octobre 2014. Pour autant, ces deux échantillons sont bien différents.

SOLS				Dépôt Nord
Laboratoire Wessling			Nom	D8
Teneur	sur brut	As	mg/kg	x
		Cd	mg/kg	x
		Pb	mg/kg	x
		Zn	mg/kg	x
	sur brut	2,3,7,8 TCDD	ng/kg	x
		1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg	x
		1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg	x
		1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg	x
		1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg	x
		1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg	x
		Octa CDD	ng/kg	x
		2,3,7,8 TCDF	ng/kg	x
		1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg	x
		2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg	x
		1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg	x
		1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg	x
		2,3,4,6,7,8 HxCDF	ng/kg	x
		1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg	x
		1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg	x
		1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg	x
Octa CDF	ng/kg	x		
Laboratoire Dioxlab				
Teneur	sur brut	PBDD/PBDF	mg/kg	x

Tableau 23 : Programme analytique pour l'échantillon de sol du « Dépôt nord » (campagne 27/01/15).

4.5.2 Campagnes sur les sédiments et les eaux superficielles (janvier à mars 2015)

Des prélèvements et analyses ont été effectués sur les sédiments (une campagne en janvier 2015) et les eaux superficielles (3 campagnes de prélèvements en janvier, février et mars 2015) du ru du Pont des Meuniers.

Le Tableau 24 récapitule le programme analytique pour chaque milieu.

La Figure 42 et la Figure 43 localisent des prélèvements effectués dans les différents milieux.



Localisation approximative

Figure 42 : Localisation des prélèvements de sédiments (28/01/2015).



Localisation approximative

Figure 43 : Localisation des prélèvements d'eaux superficielles sur fond de carte IGN (campagnes de janvier, février et mars 2015).

	Dates de prélèvements		Sédiments		Eaux superficielles		Eaux superficielles		Eaux superficielles		Eaux superficielles			
	28/01/2015	28/01/2015	28/01/2015	28/01/2015	28/01/2015	28/01/2015	28/01/2015	28/01/2015	19/02/2015	19/02/2015	19/02/2015	19/03/2015		
Laboratoire Wessling	CONF-01	FOS-01	AVAL-01	MARE	FOSUD	CONF-01	FOS-01	AVAL-01	CONF-02	FOS-02	AVAL-02	CONF-03	FOS-03	AVAL-03
	Nom	mg/kg												
Teneur sur brut	COT		x											
	2,3,7,8-TCDD	ng/kg	x											
	1,2,3,7,8-PeCDD	ng/kg	x											
	1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg	x											
	1,2,3,6,7,8-HxCDD	ng/kg	x											
	1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg	x											
	1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	ng/kg	x											
	OctaCDD	ng/kg	x											
	2,3,7,8-TCDF	ng/kg	x											
	1,2,3,7,8-PeCDF	ng/kg	x											
	2,3,4,7,8-PeCDF	ng/kg	x											
	1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg	x											
	1,2,3,6,7,8-HxCDF	ng/kg	x											
	2,3,4,6,7,8-HxCDF	ng/kg	x											
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg	x												
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	ng/kg	x												
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg	x												
OctaCDF	ng/kg	x												
Laboratoire Dioxlab														
Teneur sur brut	PBDD/PBDF	mg/kg	x											
Laboratoire LAB/BRGM														
Concentration	As	µg/l		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Pb	µg/l		x	x									
	Zn	µg/l		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Br	mg/l				x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Cl	mg/l				x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cl03	mg/l													
Cl04	µg/l													

Tableau 24 : Récapitulatif des programmes d'analyses sur les sédiments (janvier 2015) et les eaux superficielles (janvier à mars 2015)

4.5.3 Résultats analytiques bruts sur les différents milieux

a) Résultats sur les sols au droit du dépôt nord

Le Tableau 25 présente les résultats obtenus sur l'échantillon D8 prélevé dans la zone du « Dépôt nord ».

Les résultats sur les sols superficiels prélevés au droit du « Dépôt nord » montrent la présence de:

- **teneurs élevées en arsenic** (5 g/kg MS), cadmium (40 mg/kg MS), plomb (2,1 g/kg MS) et zinc (32 g/kg MS) ;
- **teneurs en dioxines et furannes chlorées** (PCDD & PCDF), avec une prépondérance des furannes sur les dioxines (\sum PCDF 390 000 ng/kg contre \sum PCDD 120 000 ng/kg) ;
- **dioxines et furannes bromées** (PBDD & PBDF) représentées par tous les congénères, à l'exception des 1,2,3,6,7,8 hexabromodibenzofurane, 2,3,4,6,7,8 hexabromodibenzofurane, 1,2,3,7,8,9 hexabromodibenzofurane. 1,2,3,4,7,8 heptabromodibenzofurane.

Il est à noter que les teneurs constatées au droit du « Dépôt nord » se situent dans les mêmes ordres de grandeurs que celles mesurées au droit de la tache centrale de la « Place à gaz ».

SOIS	Unité	Dépôt Nord
Teneurs sur brut		
Métaux		
Zinc (Zn)	mg/kg MS	32000
Arsenic (As)	mg/kg MS	5000
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	40
Plomb (Pb)	mg/kg MS	2100
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)		
2,3,7,8 TCDD	ng/kg MB	640
1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MB	1600
1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MB	1500
1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MB	2500
1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MB	2300
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MB	17000
Octa CDD	ng/kg MB	34000
Somme des tetra CDD	ng/kg MB	13000
Somme des penta CDD	ng/kg MB	16000
Somme des Hexa CDD	ng/kg MB	25000
Somme des hepta CDD	ng/kg MB	34000
Somme des TCDD restants	ng/kg MB	12000
Somme des PeCDD restants	ng/kg MB	14000
Somme des HxCDD restants	ng/kg MB	18000
Somme des HpCDD restants	ng/kg MB	17000
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)		
2,3,7,8 TCDF	ng/kg MB	8200
1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MB	15000
2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MB	6700
1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MB	22000
1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MB	11000
2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MB	8100
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MB	1900
1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MB	53000
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MB	13000
Octa CDF	ng/kg MB	48000
Somme des tetra CDF	ng/kg MB	70000
Somme des penta CDF	ng/kg MB	98000
Somme des Hexa CDF	ng/kg MB	86000
Somme des Hepta CDF	ng/kg MB	90000
Somme des TCDF restants	ng/kg MB	62000
Somme des PeCDF restants	ng/kg MB	76000
Somme des HxCDF restants	ng/kg MB	43000
Somme des HpCDF restants	ng/kg MB	24000
Somme PCDD (tetra-octa)		
	ng/kg MB	120000
Somme PCDF (tetra-octa)		
	ng/kg MB	390000
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)		
	ng/kg MB	510000
I-TE (OTAN CCMS) excl. LOQ	ng/kg MB	12000
I-TE (OTAN CCMS) incl. LOQ	ng/kg MB	12000
I-TE (OTAN CCMS) incl. 1/2 LOQ	ng/kg MB	12000
TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MB	13000
TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MB	13000
TEQ (OMS 1997) incl. 1/2 LOQ	ng/kg MB	13000
TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MB	12000
TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MB	12000
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MB	11 400
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MB	11 400
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. 1/2 LOQ	ng/kg MB	11 400
Dibenzofuranes polybromés (PBDF)		
2,3,7,8 Tetrabromodibenzofurane	ng/kg	153,43
1,2,3,7,8 Pentabromodibenzofurane	ng/kg	304,34
2,3,4,7,8 Pentabromodibenzofurane	ng/kg	313,70
1,2,3,4,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	3023,71
1,2,3,6,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	<9,3
2,3,4,6,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	<10,1
1,2,3,7,8,9 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	<24,3
1,2,3,4,6,7,8 Heptabromodibenzofurane	ng/kg	4393,43
1,2,3,4,7,8,9 Heptabromodibenzofurane	ng/kg	<11,8
Dibenzodioxines polybromés (PBDD)		
Octabromodibenzofurane	ng/kg	22997,64
2,3,7,8 Tetrabromodibenzodioxine	ng/kg	17,80
1,2,3,7,8 Pentabromodibenzodioxine	ng/kg	99,46
1,2,3,4,7,8 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	1301,23
1,2,3,6,7,8 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	1301,23
1,2,3,7,8,9 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	1655,73
1,2,3,4,6,7,8 Heptabromodibenzodioxine	ng/kg	55,21
Octabromodibenzodioxine	ng/kg	13688,01

Tableau 25 : Résultats analytiques sur l'échantillon de sol prélevé au droit du « Dépôt nord » (28/01/15).

b) Résultats bruts sur les sédiments et les eaux superficielles

Les résultats analytiques sur les sédiments sont présentés dans le Tableau 26. Ils montrent que :

- **les 7 PCDD et des 10 PCDF ont été quantifiés** sur les trois échantillons de sédiments (FOS01, CONF01 et AVAL01), avec une prépondérance des furanes sur les dioxines ;
- **des PBDD et PBDF ont été quantifiés sur les deux échantillons analysés** (FOS01 et CONF01), avec une prépondérance des furanes sur les dioxines. Les congénères 1,2,3,6,7,8 hexabromodibenzofurane, 2,3,4,6,7,8 hexabromodibenzofurane, 1,2,3,7,8,9 hexabromodibenzofurane et 1,2,3,4,6,7,8,9 heptabromodibenzofurane ne sont quantifiés sur aucun des deux échantillons.

Les résultats analytiques sur les eaux superficielles, présentés dans le Tableau 28 indiquent que :

- tous les échantillons prélevés présentent des concentrations en **arsenic** dissous (entre 0,75 (AVAL01) et 6,02 µg/L (FOS01)) en **zinc** dissous (entre 2,09 (AVAL03) et 103 µg/L (FOS03)) ;
- le brome total a été quantifié uniquement dans les échantillons prélevés en février 2015 (FOS02) et en mars 2015 (FOS03, CONF03 et AVAL03), à des concentrations comprises entre 48,7 µg/L et 223 µg/L ;
- les deux échantillons pour lesquels le plomb a été analysé (Mare et FOS SUD) présentent des **concentrations traces en plomb** dissous comprises entre 0,58 et 0,71 µg/L ;
- tous les échantillons présentent des concentrations en chlorures, comprises entre 5,2 (CONF01) et 7,3 µg/L (AVAL03). Ces concentrations sont proches ou égale au fond hydrochimique local ;
- **les ions chlorate et perchlorate n'ont été quantifiés sur aucun échantillon.**

Globalement, les prélèvements échantillonnés à différentes distances de la « Place à gaz » (FOS01, CONF01 et AVAL01) montrent que les concentrations en arsenic, brome et zinc diminuent avec la distance.

Pour les échantillons prélevés plus en aval, les concentrations en arsenic et en zinc dissous sont supérieures en mars 2015 (CONF03 et AVAL03) à celles de février 2015 (CONF02 et AVAL02).

Les concentrations en arsenic et en zinc dissous les plus élevées, mesurées sur la période d'observation de décembre 2014 à mars 2015, ont été relevées en mars 2015.

Les concentrations en chlorures sont par contre homogènes d'une campagne à l'autre et d'un échantillon à l'autre (attestant que ces concentrations s'inscrivent dans le fond hydrochimique naturel local).

Désignation d'échantillon	Unité	FOS01	CONF01	AVAL01
Matière sèche	% mass MB	42	48	51
Carbone organique total (COT)	mg/kg MS	100000	55000	86000
Dibenzodioxines polychlorés (PCDD)				
2,3,7,8 TCDD	ng/kg MB	14	2	<0,5
1,2,3,7,8 PeCDD	ng/kg MB	25	3	<1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	ng/kg MB	18	2	<1,5
1,2,3,6,7,8 HxCDD	ng/kg MB	32	3	<1,5
1,2,3,7,8,9-HxCDD	ng/kg MB	30	3	<1,5
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD	ng/kg MB	180	16	<7,5
Octa CDD	ng/kg MB	260	28	<25
Somme des tetra CDD	ng/kg MB	220	32	5,4
Somme des penta CDD	ng/kg MB	220	31	7,5
Somme des Hexa CDD	ng/kg MB	290	31	9,9
Somme des hepta CDD	ng/kg MB	330	30	12
Somme des TCDD restants	ng/kg MB	200	30	5,4
Somme des PeCDD restants	ng/kg MB	190	28	7,5
Somme des HxCDD restants	ng/kg MB	210	23	9,9
Somme des HpCDD restants	ng/kg MB	150	14	12
Dibenzofuranes polychlorés (PCDF)				
2,3,7,8 TCDF	ng/kg MB	150	23	4,8
1,2,3,7,8 PeCDF	ng/kg MB	220	31	10
2,3,4,7,8 PeCDF	ng/kg MB	100	13	3
1,2,3,4,7,8-HxCDF	ng/kg MB	250	30	15
1,2,3,6,7,8 HxCDF	ng/kg MB	150	16	4,5
2,3,4,6,7,8 HxBDF	ng/kg MB	100	10	2,4
1,2,3,7,8,9-HxCDF	ng/kg MB	27	3	<1,5
1,2,3,4,6,7,8 HpCDF	ng/kg MB	450	46	12
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	ng/kg MB	140	16	<7,5
Octa CDF	ng/kg MB	460	52	<25
Somme des tetra CDF	ng/kg MB	1200	190	37,0
Somme des penta CDF	ng/kg MB	1400	170	48,0
Somme des Hexa CDF	ng/kg MB	980	110	36,0
Somme des Hepta CDF	ng/kg MB	830	85	26,0
Somme des TCDF restants	ng/kg MB	1100	170	32,0
Somme des PeCDF restants	ng/kg MB	1000	130	34
Somme des HxCDF restants	ng/kg MB	450	49	14
Somme des HpCDF restants	ng/kg MB	240	23	14
Somme PCDD (tetra-octa)	ng/kg MB	1300	150	35
Somme PCDF (tetra-octa)	ng/kg MB	4900	610	150
Somme PCDD + PCDF (tetra-octa)	ng/kg MB	6200	760	180
I-TE (OTAN CCMs) excl. LOQ	ng/kg MB	170	21	4,8
I-TE (OTAN CCMs) incl. LOQ	ng/kg MB	170	21	6,6
I-TE (OTAN CCMs) incl. 1/2 LOQ	ng/kg MB	170	21	5,7
TEQ (OMS 1997) excl. LOQ	ng/kg MB	180	23	4,8
TEQ (OMS 1997) incl. LOQ	ng/kg MB	180	23	7,1
TEQ (OMS 1997) incl. 1/2 LOQ	ng/kg MB	180	23	6
TE-BGA excl. LOQ	ng/kg MB	170	21	5,2
TE-BGA incl. LOQ	ng/kg MB	170	21	6,6
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) excl. LOQ	ng/kg MB	160	19,8	4
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. LOQ	ng/kg MB	160	19,8	6,3
PCDD/F-TEQ (OMS 2005) incl. 1/2 LOQ	ng/kg MB	160	19,8	5,2
PBDD/PBDF				
2,3,7,8 Tetrabromodibenzofurane	ng/kg	662,75	1125,33	NA
1,2,3,7,8 Pentabromodibenzofurane	ng/kg	1716,72	2425,04	NA
2,3,4,7,8 Pentabromodibenzofurane	ng/kg	2535,60	2707,15	NA
1,2,3,4,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	25415,68	2704,87	NA
1,2,3,6,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	<2,20	<5,6	NA
2,3,4,6,7,8 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	<2,20	<5,6	NA
1,2,3,7,8,9 Hexabromodibenzofurane	ng/kg	<2,20	<5,6	NA
1,2,3,4,6,7,8 Heptabromodibenzofurane	ng/kg	32744,37	1023,91	NA
1,2,3,4,7,8,9 Heptabromodibenzofurane	ng/kg	<1,18	<10,3	NA
Octabromodibenzofurane	ng/kg	260,16	200,19	NA
2,3,7,8 Tetrabromodibenzodioxine	ng/kg	184,57	743,42	NA
1,2,3,7,8 Pentabromodibenzodioxine	ng/kg	773,44	1591,21	NA
1,2,3,4,7,8 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	4586,22	2218,80	NA
1,2,3,6,7,8 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	4586,22	2218,80	NA
1,2,3,7,8,9 Hexabromodibenzodioxine	ng/kg	2784,90	766,11	NA
1,2,3,4,6,7,8 Heptabromodibenzodioxine	ng/kg	352,96	703,33	NA
Octabromodibenzodioxine	ng/kg	6428,57	1097,35	NA

Tableau 26 : Résultats des analyses sur les échantillons de sédiments (28/01/15).

Eaux de surface : aval Place à Gaz		Mare 28/01/15	FOS Sud 28/01/15	FOS 01 28/01/15	FOS 02 19/02/15	FOS 03 19/03/15	CONF 01 28/01/15	CONF02 19/02/15	CONF03 19/03/15	AVAL 01 28/01/15	AVAL 02 19/02/15	AVAL03 19/03/15
Laboratoire BRGM		Mare	Ruisseau Sud	Fossé nord	Fossé nord	Fossé nord	confluence fossé et ru du Pont des Meuniers	confluence fossé et ru du Pont des Meuniers	confluence fossé et ru du Pont des Meuniers	ru du Pont des Meuniers	ru du Pont des Meuniers	ru du Pont des Meuniers
	Unité											
As (Arsenic)	µg/l	1.43	1.42	6,02	6,95	11,6	5,55	1,63	2,48	0,75	0,72	1,2
Brome total	µg/L	NA	NA	<100	100	223	<100	<100	77,2	<100	<100	48,7
Pb (Plomb)	µg/l	0.58	0.71	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Zn (Zinc)	µg/l	12.5	27.0	78,8	82,1	103	47,9	13,6	6,78	2,16	5,8	2,09
Cl (Chlorures)	mg/l	NA	NA	5,2	5,7	6,6	5,2	6,1	7,1	5,4	6,2	7,3
ClO3 (Chlorates)	mg/l	NA	NA	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
ClO4- (Perchlorates)	µg/l	NA	NA	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tableau 27 : Résultats des analyses sur les eaux superficielles
(campagnes de janvier, février et mars 2015).

NA : Non analysé

4.6 BILAN DES ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES

L'étude complémentaire a permis de circonscrire la zone du « *Dépôt nord* », qui couvre environ 375 m², pour une dimension de 25 m x 15 m sur une profondeur de 15 cm environ.

Tout comme au droit de la « *Place à gaz* » (clairière), le « *Dépôt nord* » est formé de résidus « *pelliculaires* » qui correspondent à des déchets industriels issus d'opérations de brûlage. Des teneurs en métaux élevées en arsenic, plomb, cadmium, et en dioxines et furannes chlorées et bromées ont ainsi été relevées sur 10 à 15 cm d'épaisseur.

Les eaux superficielles drainant le site (ruisseaux en période de forte pluviométrie) ne font l'objet d'aucun usage connu.

Ces eaux et leurs sédiments sont marquées par des traces en arsenic et en zinc au moment des épisodes pluvieux, mais ces concentrations se dispersent et s'atténuent très rapidement vers l'aval. L'absence d'ions chlorate et perchlorate observée est cohérente avec les faits historiques et notamment le fait que ces composés n'étaient pas utilisés pour le chargement des munitions d'artillerie allemande qui ont été détruites ici.

5. Interprétation des résultats et modèle de fonctionnement

5.1 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS DE SOLS

5.1.1 Référentiel de fond géochimique local

Les résultats sont interprétés conformément à la démarche d'Interprétation de l'État des Milieux (IEM) définie dans la circulaire du Ministère de l'Écologie et ses annexes en date du 8 février 2007, qui conduit à comparer l'état des milieux :

- 1) **à l'état (normal) des milieux naturels voisins de la zone de pollution** (afin d'établir un environnement « témoin » exempt de pollution) ;
- 2) **aux valeurs de gestion réglementaires** mises en place par les pouvoirs publics, lorsqu'elles existent. Ces valeurs de gestion réglementaires correspondent au niveau de risque accepté par les pouvoirs publics pour l'ensemble de la population française.

La méthodologie est la suivante :

- 1) **Dans un premier temps, les résultats obtenus sont comparés aux valeurs mesurées dans les échantillons de sols témoins** (ou au fond géochimique local établi sur la base des jeux des résultats analytiques locaux au site d'étude lorsqu'il existe) ;
- 2) Ensuite, **les teneurs mesurées au droit de la place à gaz sont comparées aux teneurs des fonds géochimiques locaux et nationaux** (renseignés dans des bases de données).

L'état des milieux naturels voisins de la zone d'investigations a été établi grâce à un sol prélevé à 300 m de la « Place à gaz » (TEMOIN01).

L'état de référence dans le secteur de la « Place à gaz » a été fait à partir de deux bases de données :

- **une base de données française** : le Fond géochimique Naturel « *État des connaissances à l'échelle nationale* » - rapport BRGM/RP-50158-FR de juin 2000, et en particulier sur les sols lorrains (Plaine alluviale de la Moselle, bassin houiller lorrain, vallées ferrifères (Homécourt-Longwy-Micheville) ;
- **une base de données allemande** : Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, LABO « *Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden* » 3. überarbeitete und ergänzte Auflage, 2003 Hintergrundwerte, en particulier les sols argileux liassiques allemands.

Si l'état des sols est jugé dégradé par rapport à ces référentiels, alors des calculs de risques sanitaires peuvent être réalisés en fonction des usages constatés et des scénarios d'expositions.

5.1.2 Détermination du fond géochimique local

La répartition statistique des différentes teneurs dans les sols de surface a été réalisée pour les éléments arsenic, chrome, cuivre, cadmium, mercure, nickel, antimoine, plomb et zinc, à partir des prélèvements et analyses effectués lors des campagnes du diagnostic.

Les teneurs en métaux ont été, pour chaque élément, classées par ordre croissant et combinées à un pourcentage qui correspond au ratio entre le nombre de résultats de teneur inférieur à la teneur visée et le nombre total de résultats analytiques considéré. Par ce moyen, il est possible d'identifier différentes familles de teneurs, selon l'homogénéité ou l'hétérogénéité de leur distribution statistique.

Le Tableau 28 récapitule les différentes données statistiques pour chaque élément métal ou métalloïde, et propose des valeurs hautes du fond géochimique local :

	As	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Zn
Min	10	9	0,5	12	0,2	18	20	27	59
max	110000	136	170	12000	24	75	143922	256	130000
médiane	170	28	6	76	1	38	103	40	565
moyenne	5295	40	33	908	4	39	8067	86	9549
Valeur haute du fond géochimique retenue	20	50	5	30	0,5	50	40	20	80

Tableau 28 : Répartition statistique pour les 8 métaux et métalloïdes dans les sols de surface.

En comparant les différentes distributions statistiques de chaque élément, on peut noter que la présence de l'arsenic est fortement liée à la présence de plomb, zinc et cadmium dans les sols de surface. Ainsi les fortes teneurs en arsenic dans les sols sont corrélées aux fortes teneurs élevées en plomb, zinc et cadmium.

Les graphiques (des Figures 44, 45 et 46) permettent de mieux visualiser leur distribution au droit de la tache centrale et dans l'environnement de la « Place à gaz ».

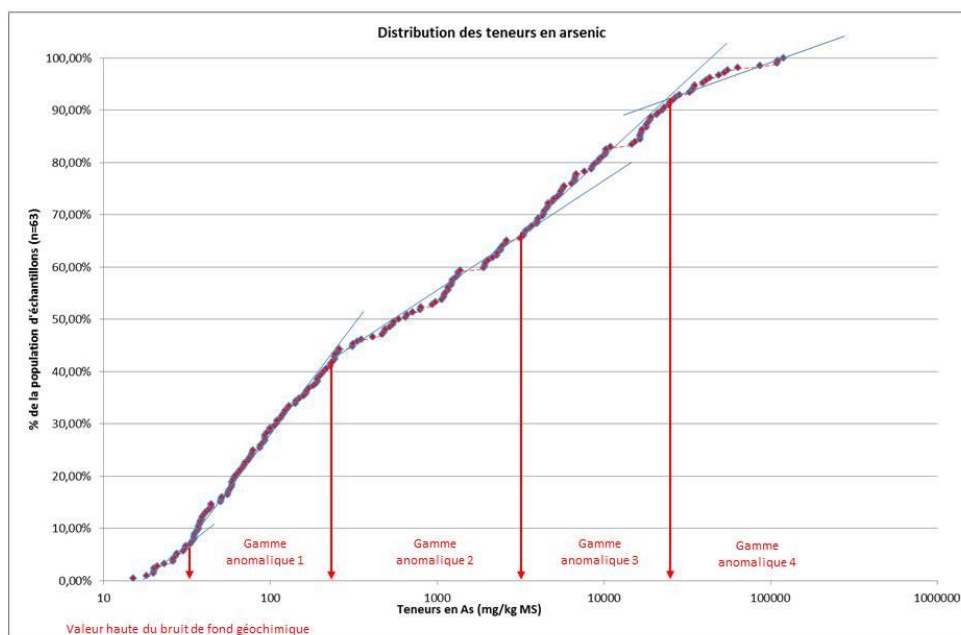


Figure 44 : Graphique représentant la distribution des teneurs en arsenic dans les sols.

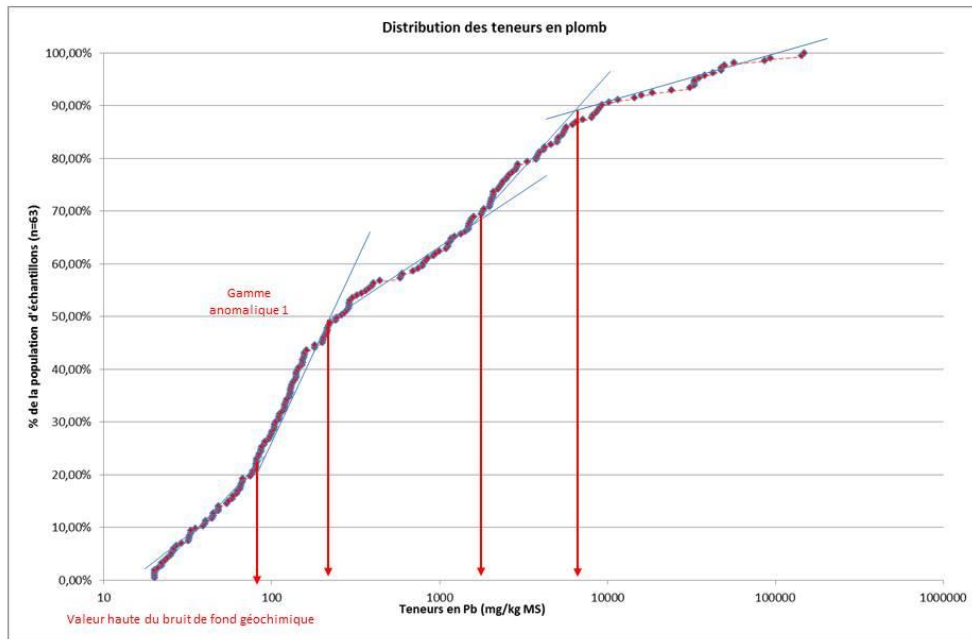


Figure 45 : Graphique représentant la distribution des teneurs en plomb dans les sols.

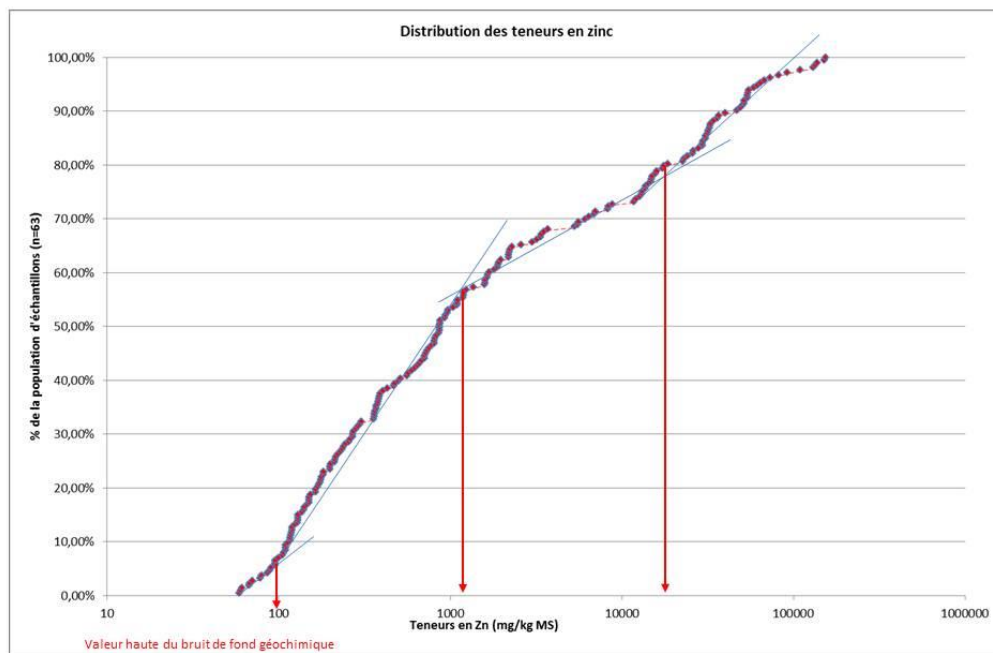


Figure 46 : Graphique représentant la distribution des teneurs en zinc dans les sols.

5.1.3 Interprétation par rapport au fond géochimique local

a) Sols au droit de la tache centrale et dans son environnement

Le Tableau 29 d'interprétation des résultats analytiques des sols de surface pour les métaux et métalloïdes est présenté ci-dessous.

Les résultats montrent qu'au droit de la tache centrale (clairière) :

- **les teneurs en arsenic sont supérieures d'un facteur 50 à 5 000 au fond géochimique local pour les échantillons de sols prélevés en surface (qui correspondent aux résidus de combustion).** Les teneurs en arsenic diminuent ensuite avec la profondeur pour s'approcher du fond géochimique entre 0,6 m de profondeur (pour SPM02 et SPM03) et 2 m de profondeur (SPM01, SPM04 et SPM05) ;
- **les teneurs en plomb sont supérieures d'un facteur 50 à 500 (uniquement TC2) au fond géochimique local pour les échantillons prélevés dans les résidus de combustion** (20 cm de profondeur). Les teneurs diminuent fortement pour s'inscrire dans les gammes de teneurs du fond géochimique local dès 0,6 m/surface ;
- **les teneurs en zinc sont supérieures d'un facteur 50 à 500 au fond géochimique local pour les échantillons de surface (résidu).** Les teneurs diminuent avec la profondeur mais les teneurs sont encore supérieures d'un facteur 5 à 50 au fond géochimique entre à 1,5 m de profondeur (SPM03) voire au-delà de 2 m (pour SPM01). Ce constat est cohérent avec la grande mobilité du zinc dans les sols par rapport à celle des autres métaux et métalloïdes ;
- **le cuivre**, qui a uniquement été analysé sur les échantillons TC1 à TC5 titre sur les échantillons de surface (résidus de combustion) à des teneurs supérieures au fond géochimique local d'un facteur 50. Les échantillons de sols prélevés en profondeur sur le profil SPM05 présentent des teneurs en cuivre cohérentes avec le fond géochimique local ;
- de la même manière, pour le mercure et le cadmium Les teneurs sont supérieures d'un facteur 5 au fond géochimique local dans les résidus de combustion régalez en surface et s'inscrivent dans le fond géochimique local dès 0,6 m de profondeur (SPM5) ;
- les teneurs en chrome et en nickel sont cohérentes avec le fond géochimique local sur l'ensemble des échantillons prélevés sur le profil de SPM05. Ces deux élément n'impactent donc pas la « Place à gaz » ;
- au droit de la fosse satellite n° 1, le constat est globalement le même qu'au droit de la clairière de la « Place à gaz », avec des dépassements du fond géochimique local pour l'arsenic (d'un facteur 50), pour le plomb (d'un facteur 500 voire 5 000) et pour le zinc, le cuivre et l'antimoine (d'un facteur 5) ;
- on peut néanmoins noter que les teneurs en plomb au droit de cette fosse sont supérieures à celles mesurées au droit de la tache centrale, ce qui laisse à penser que cette fosse a possiblement été exploitée différemment ou pour un autre usage que la clairière ; l'hypothèse d'une fosse de brûlage des imbrulés provenant de la tache centrale apparaît plausible, tout comme celle d'un puits de brûlage de munitions autres que celles à « Croix bleue » (cf. Figure 38).

	Date d'échantillonnage	Libellé	Teneur (mg/kg MS)									
			As	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Zn	
REFERENTIELS		Plaine alluviale de la Moselle (Custines-Thionville); moyenne	20	75	2	30	1	40	30	-	120	
		Bassin houiller Lorrain (Forbach-Grosbliederstroff), Buntsandstein, Muschelkalk; moyenne	40	80	2	15	0,5	30	25	-	120	
		Vallées ferrifères (Homécourt – Longwy –Micheville) Jurassique; moyenne	20	30	5	20	0,5	20	20	-	60	
		Plaine alluviale de la Moselle (Custines-Thionville); max	50	200	5	100	2	100	100	-	500	
		Bassin houiller Lorrain (Forbach-Grosbliederstroff), Buntsandstein, Muschelkalk; max	200	500	5	50	2	100	100	-	500	
		Vallées ferrifères (Homécourt – Longwy –Micheville) Jurassique; max	50	200	10	50	1	100	50	-	500	
		Sols ARGILEUX	-	37	0,17	18	0,17	31	85	-	80	
		LIASSIQUES ALLEMANDS	-	54	0,6	31	0,32	56	205	-	120	
			Argile Lias, 50ème percentile	-	44	<0,08	23	0,06	47	21	75	
			Argile Lias, 90ème percentile	-	63	0,41	41	0,16	73	51	118	
	15/04/2014	Sol de surface à 300 m de la Place à Gaz	152	112	4	39	-	45	119	22	296	
		TEMEUR DE FOND	20	50	40	30	0,5	50	80	20	400	
		Dépassement du BDF d'un facteur 5	100	250	25	150	2,5	250	200	100	4000	
		Dépassement du BDF d'un facteur 50	1000	2500	250	1500	25	2500	2000	1000	40000	
		Dépassement du BDF d'un facteur 500	10000	25000	2500	15000	250	25000	20000	10000	400000	
		Dépassement du BDF d'un facteur 5000	100000	250000	25000	150000	2500	250000	200000	100000	4000000	
FOSSE 1 (Fosse de brûlage Nord-est)	SPIN 01	Déchets de combustion, fosse 1	44000	99	6	191	-	75	143922	256	2219	
	RESIDU 01	Déchets résineux, fosse 1	1124	19	3	512	-	19	24149	58	512	
	SPIN01-2 (0,2)	Déchets de combustion, fosse 1	5900	10	4	-	0,6	-	38000	-	1900	
	SPIN01-3 (0,2)	Déchets de combustion, fosse 1	1900	14	1,1	-	0,6	-	35000	-	430	
	FL-3 (0,01-0,09)	Déchets de combustion, fosse 1	6700	16	7,2	-	0,8	-	33000	-	3700	
	FL-8 (0,15)	Déchets de combustion, fosse 1	2400	14	1,2	-	0,4	-	31000	-	960	
	FL-9 (0,15-0,2)	Déchets de combustion, fosse 1	5800	10	6,6	-	0,5	-	33000	-	3200	
	FL-10 (0,15-0,25)	Déchets de combustion, fosse 1	4000	9	1,8	-	0,5	-	33000	-	860	
	Moyenne Fosse		3953	23,875	3,8625	351,5	0,566667	47	46383,875	157	1722,625	
	SPM06-0,2m	22/10/2014	Tache centrale, profils	110000	9	25	420	0,4	18	50000	-	5900
DEPOTS SATELLITES	SPM06-1,8m	Tache centrale, profils	31	37	<0,5	13	<0,1	27	290	-	61	
	SPM06-2,8m	Tache centrale, profils	23	46	<0,5	15	<0,1	35	87	-	70	
	SPM06-3,6m	Tache centrale, profils	18	52	<0,5	17	<0,1	44	180	-	95	
	SPIN02	Sols et déchets de combustion	9456	101	80	2947	-	51	2557	40	30636	
	D8	Déchets de combustion riche en métaux	7660	97	31	2027	-	36	2496	32	12720	
	D9	Dépôt Nord, sols de surface	8900	27	64	2700	4,8	30	2000	-	54000	
	SPM07-0,2m	Dépôt Nord, sols de surface	9800	32	170	12000	14	44	6500	-	130000	
	SPM07-0,6m	Dépôt Nord, profils	980	22	19	1700	2,2	19	2600	-	13000	
	SPM07-2,0m	Dépôt Nord, profils	21	47	<0,5	21	<0,1	47	29	-	120	
	SPM07-3,0m	Dépôt Nord, profils	43	29	<0,5	31	<0,1	56	35	-	130	
TACHE CENTRALE	SPM07-4,2m	Dépôt Nord, profils	15	35	<0,5	12	<0,1	27	32	-	60	
	P39	Tache centrale, sols de surface	110000	24	160	-	7,8	-	8200	-	59000	
	TC1	Tache centrale, sols de surface	18 000	-	52	3 600	9,8	-	4 600	-	28 000	
	TC2	Tache centrale, sols de surface	18 000	-	47	2 900	6	-	16 000	-	26 000	
	TC3	Tache centrale, sols de surface	6 400	-	36	2 700	8,6	-	1 500	-	15 000	
	TC4	Tache centrale, sols de surface	49 000	-	140	9 700	22	-	5 500	-	64 000	
	TC5	Tache centrale, sols de surface	120 000	-	150	12 000	24	-	8 600	-	73 000	
	SPM01-0,1m	Tache centrale, profils	19000	-	-	-	-	-	3800	-	40000	
	SPM01-0,6m	Tache centrale, profils	3600	-	-	-	-	-	180	-	3400	
	SPM01-1m	Tache centrale, profils	660	-	-	-	-	-	33	-	6400	
PERIMETRE PROCHE	SPM01-2,6m	Tache centrale, profils	38	-	-	-	-	-	27	-	150	
	SPM01-3,8m	Tache centrale, profils	35	-	-	-	-	-	20	-	89	
	SPM02-0,2m	Tache centrale, profils	53000	-	-	-	-	-	5700	-	110000	
	SPM02-0,6m	Tache centrale, profils	95	-	-	-	-	-	24	-	710	
	SPM02-2,0m	Tache centrale, profils	75	-	-	-	-	-	26	-	140	
	SPM02-3,0m	Tache centrale, profils	30	-	-	-	-	-	22	-	120	
	SPM02-4,0m	Tache centrale, profils	20	-	-	-	-	-	23	-	67	
	SPM03-0,2m	Tache centrale, profils	25000	-	-	-	-	-	9000	-	36000	
	SPM03-0,3m PRODET	Tache centrale, profils	1900	-	-	-	-	-	100	-	1200	
	SPM03-0,4m PRODET	Tache centrale, profils	1100	-	-	-	-	-	33	-	680	
PERIMETRE ELOIGNE	kaik (SPM03)	Tache centrale, profils	2600	-	-	-	-	-	140	-	1200	
	SPM03-0,6m	Tache centrale, profils	64	-	-	-	-	-	21	-	1100	
	SPM03-1,5m	Tache centrale, profils	60	-	-	-	-	-	20	-	1100	
	SPM03-2,6m	Tache centrale, profils	57	-	-	-	-	-	22	-	130	
	SPM03-3,7m	Tache centrale, profils	78	-	-	-	-	-	20	-	380	
	SPM04-0,2m	Tache centrale, profils	17000	-	-	-	-	-	6200	-	24000	
	SPM04-0,6m	Tache centrale, profils	110	-	-	-	-	-	45	-	930	
	SPM04-1,8m	Tache centrale, profils	27	-	-	-	-	-	20	-	78	
	SPM04-2,7m	Tache centrale, profils	44	-	-	-	-	-	45	-	110	
	SPM04-3,8m	Tache centrale, profils	37	-	-	-	-	-	44	-	110	
PERIMETRE ELOIGNE	SPM05-0,2m	Tache centrale, profils	23000	15	96	5100	11	22	4200	-	55000	
	SPM05-0,6m	Tache centrale, profils	170	35	0,5	23	<0,1	21	48	-	870	
	SPM05-2,2m	Tache centrale, profils	26	45	<0,5	17	<0,1	39	48	-	110	
	SPM05-3,2m	Tache centrale, profils	26	57	<0,5	17	<0,1	46	40	-	100	
	A3	Périmètre rapproché de la tache centrale	180	-	1	94	0,5	-	200	-	470	
	A11	Périmètre rapproché de la tache centrale	130	-	1,2	65	0,6	-	130	-	560	
	A13	Périmètre rapproché de la tache centrale	110	-	0,6	63	0,3	-	59	-	390	
	A18	Périmètre éloigné de la tache centrale	350	-	1,1	71	0,4	-	130	-	570	
	B5	Périmètre éloigné de la tache centrale	59	-	0,5	25	0,2	-	39	-	260	
	C1 bis	Périmètre éloigné de la tache centrale	590	-	1,2	81	0,4	-	120	-	500	
PERIMETRE ELOIGNE	C4 bis	Périmètre éloigné de la tache centrale	100	-	<0,5	21	0,2	-	54	-	130	
	C9 bis	Périmètre éloigné de la tache centrale	800	-	3,9	170	0,6	-	380	-	3000	
	C14 bis	Périmètre éloigné de la tache centrale	34	-	<0,5	130	0,3	-	48	-	270	

Tableau 29 : Tableau d'interprétation des résultats d'analyses de sols par rapport au fond géochimique local pour les métaux et métalloïdes.

Une représentation cartographique de la distribution des teneurs a été réalisée à partir des résultats analytiques et des mesures *in situ* (fluorescence X) pour les éléments arsenic, cuivre, plomb et zinc (cf. Figure 48 page suivante). Les gammes d'isoteneurs ont été établies après interpolation entre les points de mesure. Les plus fortes teneurs sont représentées en rouge, les moins fortes en bleu.

Ces différentes cartographies montrent une répartition homogène entre l'arsenic, le cuivre et le zinc, les plus fortes teneurs étant concentrées dans la tache centrale de la « Place à gaz » avec une diminution vers l'extérieur de la clairière.

Pour le plomb, la répartition des teneurs dans les sols de surface est plus hétérogène, avec les plus fortes teneurs principalement centrées au droit de la fosse n° 1 (fosse satellite au nord-est de la « Place à gaz »). Les teneurs en plomb sont également élevées au droit de la tache centrale et en périphérie (au nord de la clairière notamment).

On constate, en reportant dans un graphique (cf. Figure 47) les teneurs en zinc et par rapport à celles en cadmium des échantillons dans lesquels ce métal a été recherché et quantifié à des teneurs supérieures aux limites de quantifications que, les deux métaux sont globalement liés. Cette relation peut s'expliquer par le marquage des sols par l'alliage appelé « zamak », mélange de zinc et de cadmium et constituant les fusées d'artillerie allemandes.

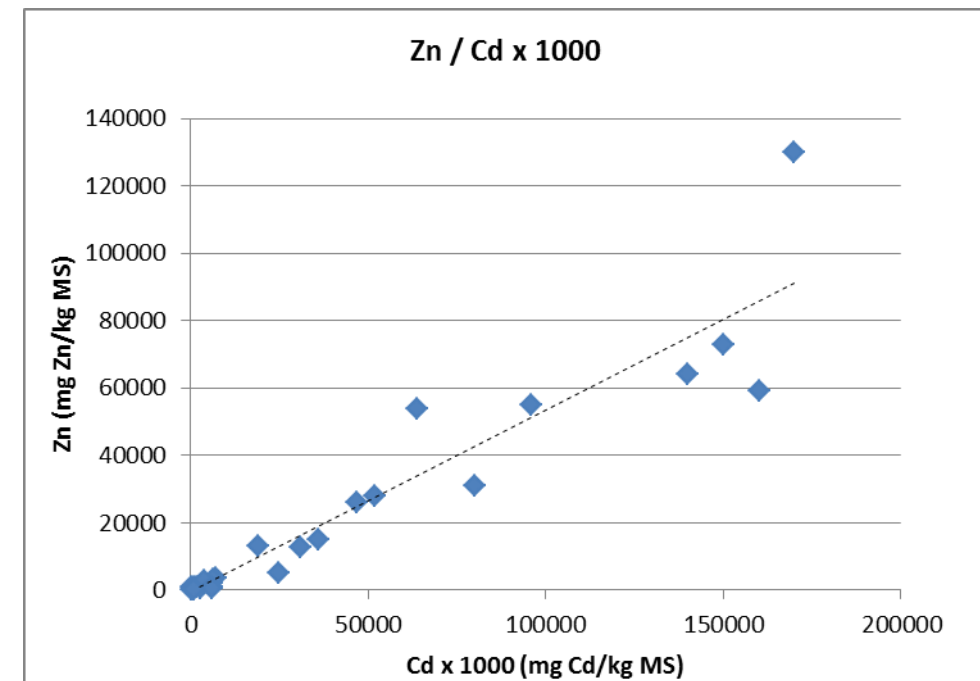
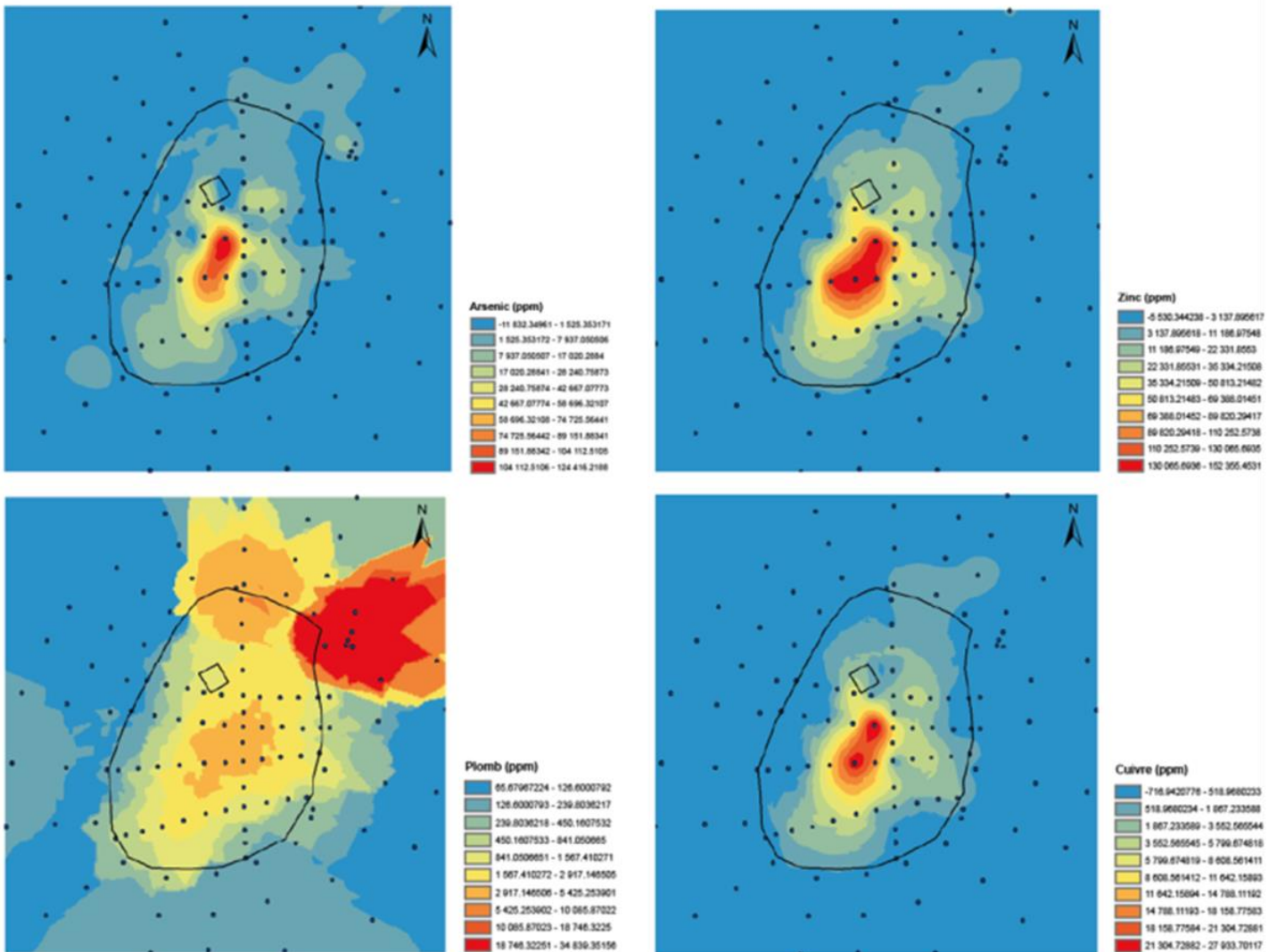


Figure 47 : Relations entre les teneurs en zinc et en cadmium des sols de la « Place à gaz » et du « Dépôt nord ».



Source : H. Thouin, Thèse BRGM/ISTO

Figure 48 : Cartes par krigeage de la répartition des teneurs en arsenic, zinc, plomb et cuivre⁴³.

⁴³ À noter que la géométrie en étoile de la distribution des teneurs en plomb dans la partie nord-est du périmètre d'étude est un artéfact lié à 1) les très fortes teneurs en plomb au niveau de la fosse nord-est, avec de forts gradients latéraux des teneurs et 2) à l'absence de points de mesure à l'est et au nord-est des fortes teneurs de la fosse.

b) Qualité des sols au droit du « Dépôt nord »

Le Tableau 30 présente la comparaison des résultats sur la qualité des sols au droit de la zone du « Dépôt nord » (sols de surface D8 et D9 et fosse témoin SPM07) avec le fond géochimique local.

	As	Cr	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
TENEUR DE FOND	20	50	5	30	0,5	50	40	80	
Dépassement du BDF d'un facteur 5	100	250	25	150	2,5	250	200	400	
Dépassement du BDF d'un facteur 50	1000	2500	250	1500	25	2500	2000	4000	
Dépassement du BDF d'un facteur 500	10000	25000	2500	15000	250	25000	20000	40000	
Dépassement du BDF d'un facteur 5000	100000	250000	25000	150000	2500	250000	200000	400000	
DEPOT NORD	D8	8800	27	64	2700	4,8	30	2000	54000
	D9	9800	32	170	12000	14	44	6500	130000
	SPM07-0.2m	980	22	19	1700	2,2	19	2600	13000
	SPM07-0.6m	21	47	<0,5	21	<0,1	47	29	120
	SPM07-2.0m	20	23	<0,5	15	<0,1	27	26	59
	SPM07-3.0m	43	29	<0,5	31	<0,1	56	35	130
	SPM07-4.2m	15	35	<0,5	12	<0,1	27	32	60

Tableau 30 : Comparaison des résultats de sols avec le fond géochimique local au droit de la zone du « Dépôt nord ».

Les résultats des analyses indiquent que :

- les sols au niveau du « Dépôt nord » s'écartent du fond géochimique local et sont principalement marqués par l'arsenic, le cuivre, le plomb et le zinc ;
- les teneurs en cadmium sont localement élevées lorsque les teneurs en zinc sont exceptionnellement fortes ;
- les teneurs en cuivre et plomb sont supérieures au fond géochimique local d'un facteur 50 dans les sols de surface (D8, D9 et SPM07-02 m) ;
- les teneurs en arsenic dans les sols de surface sont supérieures au fond géochimique local d'un facteur 5 pour SPM07-0,2 m à facteur 50 pour D8 et D9 ;
- les teneurs en plomb dans les sols de surface sont supérieures au fond géochimique local d'un facteur 50 pour SPM07-0,2 m à facteur 500 pour D8 et D9 ;
- les teneurs en mercure dans les sols de surface sont supérieures d'un facteur 5 pour D8 et D9 et cohérentes avec le fond géochimique local pour SPM07-0.2 ;
- les teneurs en cuivre, cadmium et nickel sont cohérentes avec le fond géochimique local pour tous les échantillons.

Les teneurs en cuivre et en plomb au niveau du « Dépôt nord » et de la « Place à gaz » sont du même ordre de grandeur.

Celles en arsenic sont en revanche nettement inférieures au sein du « Dépôt nord » comparativement à la tache centrale de la « Place à gaz ».

Pour le zinc, les teneurs sont équivalentes voire supérieures (d'un facteur 5) à celles mesurées au droit de la « Place à gaz » et bien supérieures (d'un facteur 35) à celles mesurées dans les fosses satellites.

Au droit de la zone du « Dépôt nord », les teneurs en arsenic, cuivre, plomb et zinc diminuent très rapidement avec la profondeur (les teneurs sont cohérentes avec le fond géochimique local dès 0,6 m de profondeur) et sont, tout comme pour la tache centrale de la « Place à gaz », circonscrites à la couche superficielle des résidus de combustion.

Les teneurs en métaux et métalloïdes mesurées au droit du dépôt nord sont :

- pour l'arsenic, (2 à 12 fois) inférieures à celles mesurées au droit de la tache centrale, mais équivalentes (voire 2 fois supérieures) à celles retrouvées dans les fosses satellites ;
- pour le cuivre, du même ordre de grandeur que celles mesurées au droit de la « Place à gaz » ;
- pour le plomb, du même ordre de grandeur que celles mesurées au droit de la tache centrale, mais bien inférieures (d'un facteur 5) à celles retrouvées dans les fosses satellites.

5.1.4 Interprétation des analyses en dioxines et furannes

L'ensemble des échantillons correspondant à des sols plus ou moins mélangés à des résidus de pyrolyse, ont été analysés vis-à-vis de leur teneur en dioxines/furannes (chlorés, PCDD/F) et, quand cela était possible, en carbone organique total (COT).

Un contrôle des PCB-dl (PCB de type dioxine) a été réalisé sur un échantillon.

Des analyses de dioxines/furannes bromés, en lien avec la présence de brome sur le site, ont aussi été réalisées sur plusieurs échantillons.

a) Résultats dioxines/furannes chlorées (PCDD & PCDF)

Données globales

Le Tableau 31 propose une synthèse des données de concentrations en dioxines-furannes de l'ensemble des sols, qui montre la variabilité des échantillons en ng/kg MS, en termes :

- de teneur globale (136 congénères tétra à octachlorés, dits homologues) ;
- de teneur des 17 congénères toxiques ;
- et de toxicité (TEQ), calculée selon le système OMS 2005 (nd = LD c'est-à-dire en assimilant à toute valeur non détectée une teneur égale à la limite de quantification) et hors contribution PCB-dl à ce stade.

Les valeurs TEQ s'échelonnent de 6 à 14 846 ng TEQ-OMS 2005/kg MS (nd = LD), soit de l'ordre de grandeur d'un sol marqué par une pollution avérée.

Le mélange des dioxines/furannes est en faveur d'une large contribution des molécules de furannes tant parmi les homologues (65-86 %, médiane 77 %), qu'en considérant uniquement les 17 congénères toxiques (61-93 % ; médiane 80 %).

Les valeurs des deux sondages réalisés à la pelle mécanique (SPM02 et SPM05) montrent une très nette diminution des teneurs avec la profondeur : de 250 000 et 450 000 à des valeurs <1 000 ng TEQ-OMS 2 005/kg MS (nd = LD), en deçà de 20 cm de profondeur.

PCDD/F	Concentration des homologues ng/kg MS (nd=LD)			Concentration des congénères toxiques ng/kg MS (nd=LD)			proportion furannes des 17 toxiques %	Toxicité ng- TEQ OMS- 05/kg MS	Carbone organique total COT %
	2014	dioxines	furannes	total	dioxines	furannes			
TC1	31 440	131 800	163 240	10 102	63 090	73 192	86	5 255	14
TC2	22 630	58 670	81 300	5 364	22 770	28 134	81	2 277	19
TC3	18 740	59 630	78 370	6 524	24 679	31 203	79	2 388	19
TC4	91 500	409 800	501 300	29 310	191 830	221 140	87	14 846	24
C1 bis	308	1 408	1 715	97	501	599	84	46,8	3,9
A7 bis	1 480	2 705	4 185	490	1 771	2 261	78	157	5,2
C4 bis	129	331	460	60	128	188	68	11,8	10
C9bis	1 382	4 601	5 983	474	1 882	2 355	80	169,1	5,8
A13	225	804	1 029	99	387	486	80	28,0	5
A18	177	414	591	84	196	280	70	15,9	4,4
B5	93	269	362	51	120	170	70	10,1	4,3
A11	159	999	1 158	74	480	554	87	45,9	4,3
A3	333	1 409	1 742	132	584	716	82	56,4	4,1
C14 bis	89	164	253	54	83	136	61	6,0	6,7
SPIN01	381	2 320	2 701	114	1 553	1 667	93	59,9	nm
SPIN02	38 100	121 900	160 000	15 890	39 060	54 950	71	4 046	nm
SPIN03	36 100	123 900	160 000	12 890	53 300	66 190	81	4 713	22
2015									
SPM05 (0-0.2m)	40 940	203 700	249 280	12 988	82 600	95 588	86	7835	nm
SPM05 (0,2-0.6m)	242	752	1 119	193	363	556	65	28	nm
SPM05 (0,6-2.2m)	225	465	815	193	254	446	57	17	nm
D8	29 440	143 700	184 040	19 382	70 980	90 362	79	4940	nm
SPM02 (0-0.2m)	80 300	359 300	450 400	26 339	156 440	182 779	86	12667	nm
SPM02- (0.2-0.6m)	225	478	828	193	244	437	56	16	nm
SPM02 (0.-2.0m)	225	436	786	193	243	435	56	16	nm
minimum	89	164	253	51	83	136	56	6	4
maximum	91 500	409 800	501 300	29 310	191 830	221 140	93	14 846	24
mediane	357	1 865	2 221	193	1 068	1 191	79	58	6

Tableau 31 : Teneurs en dioxines-furannes (PCDD & PCDF) et COT des sols
(valeurs extrêmes min/max en gras).

Profils de concentrations

Les profils de concentration des 18 échantillons de 2014 (cf. Figure 49) montrent une signature assez constante (à une ou deux exceptions près), avec une importante part des congénères de type furannes alors que les sols sont généralement plus riches en congénères de type dioxines.

À titre d'exemple, la comparaison du profil des concentrations pour TC3 avec celui d'un sol moyen (cf. Figure 50) met en évidence la diminution très nette des octadioxines (OCDD), compensée par une large contribution des congénères furannes.

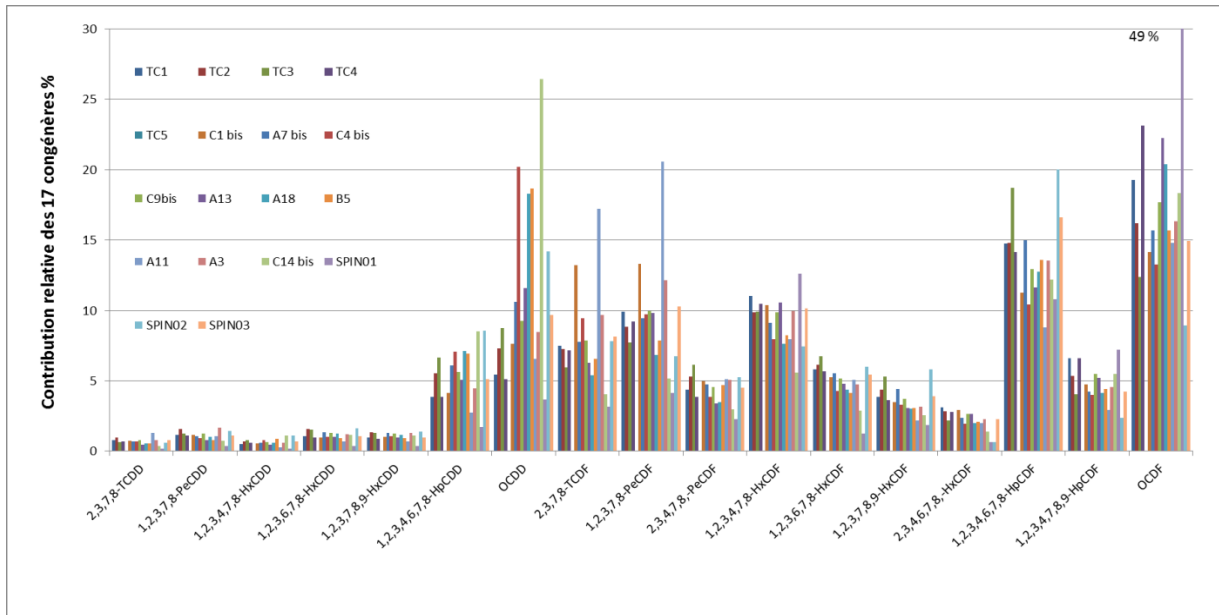


Figure 49 : Profil de concentrations relatives des 17 congénères toxiques (18 sols du site).

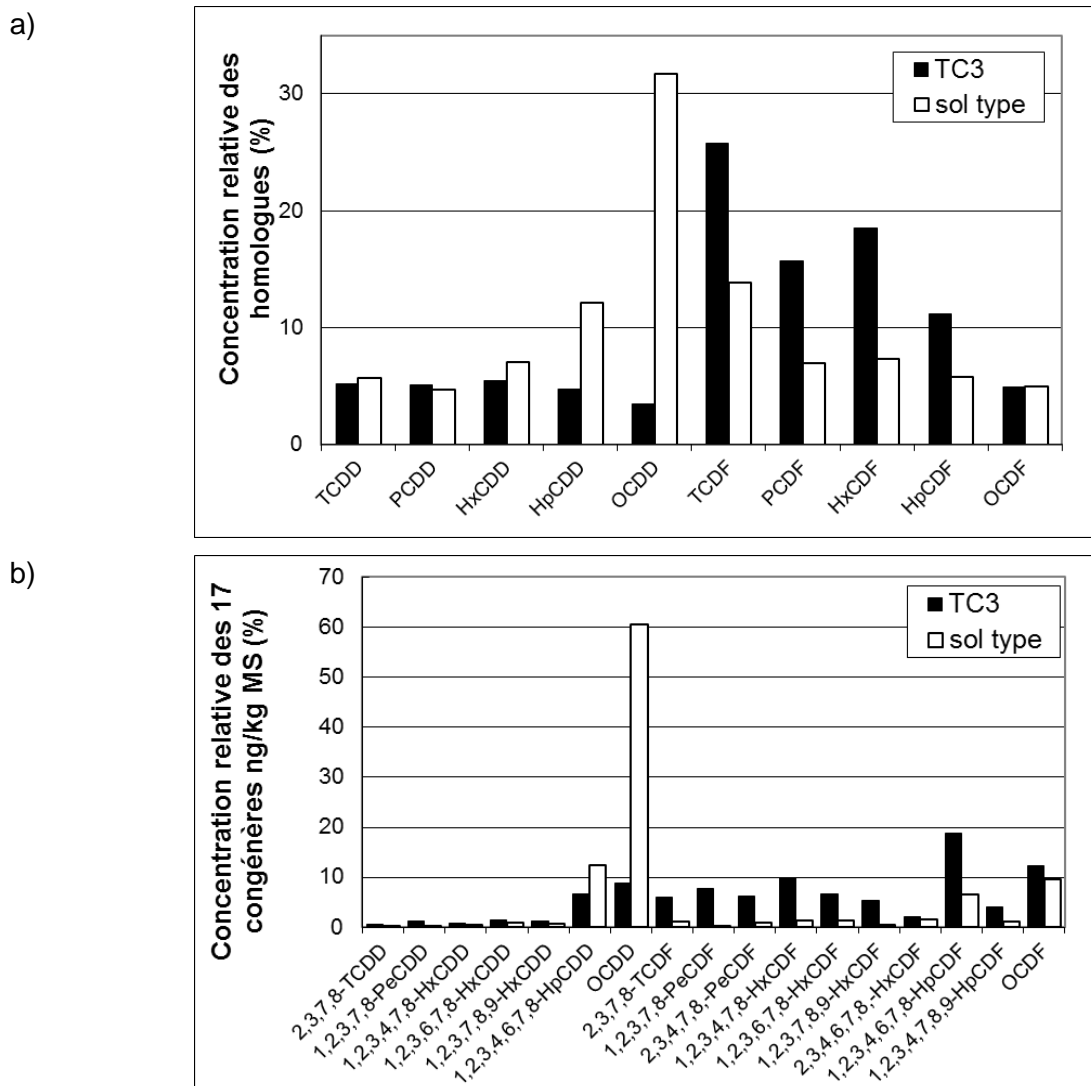


Figure 50 : Profil de concentrations relatives du sol TC3 et celui d'un sol moyen a) homologues, b) 17 congénères toxiques, mettant en évidence la très large contribution des furannes sur les sols du site.

Influence de la matière organique

Les sols les plus riches en matière organique, mesurée au travers du carbone organique total (COT), sont ceux présentant les plus fortes teneurs en dioxines/furannes (cf. Figure 51), ce qui est cohérent avec l'affinité des polluants organiques pour la matière organique.

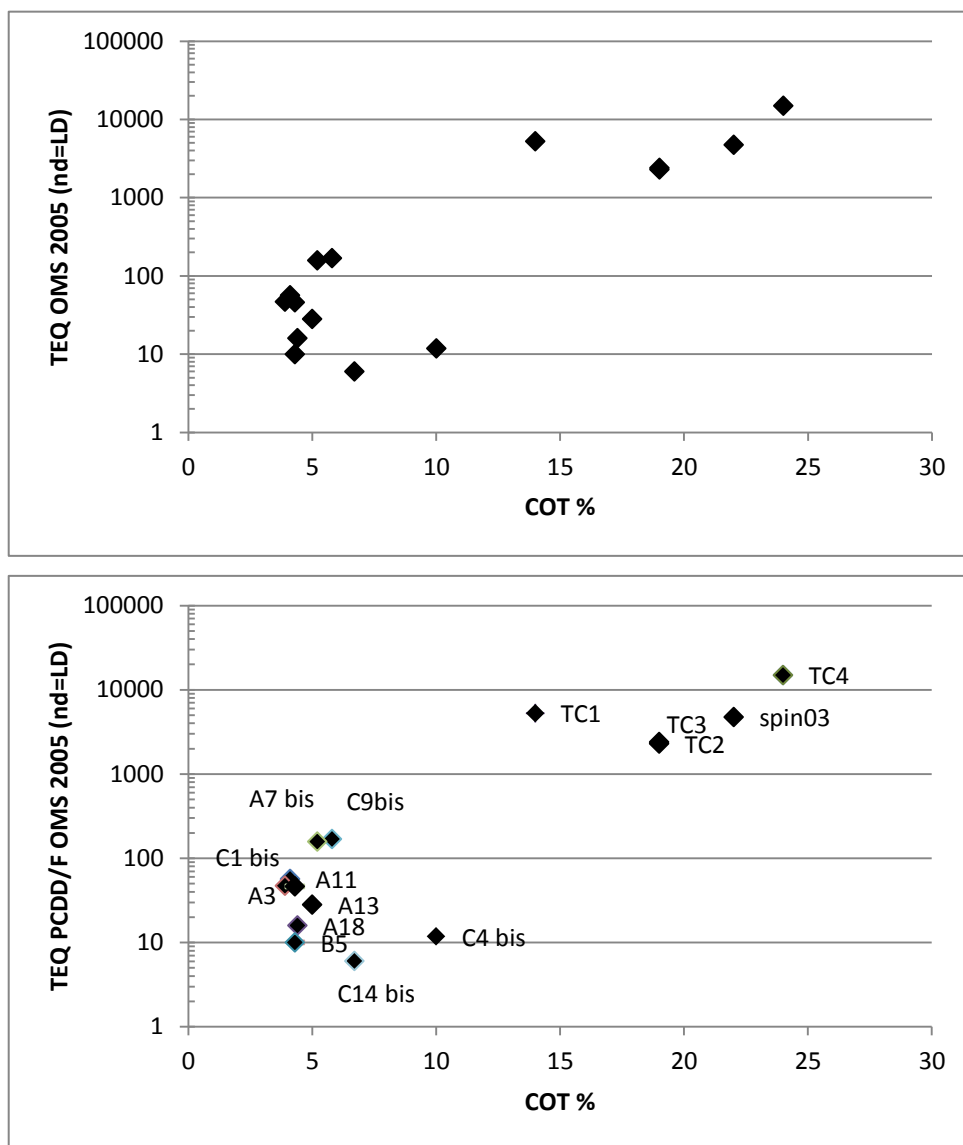


Figure 51 : Toxicité TEQ et teneur en matière organique (échelle log) a) sans et b) avec étiquette désignant les échantillons de sols.

Discrimination des 18 sols (2014)

Une tentative de tri par classification ascendante hiérarchisée (CAH) a été menée (cf. Figure 52), en considérant les variables décrites par des chercheurs allemands (Hagenmaier, 1994 ; Gotz *et al.*, 2003, 2007). Cette méthode intègre à la fois la teneur globale (homologues) et à la fois l'information plus spécifique aux 17 congénères toxiques, soit 18 variables⁴⁴.

À nouveau, la singularité des signatures du site par rapport à un sol moyen est mise en évidence. Ensuite les échantillons sont classés (cf. Figure 52). La spécificité de l'échantillon SPIN01 est confirmée (OCDF 49 %).

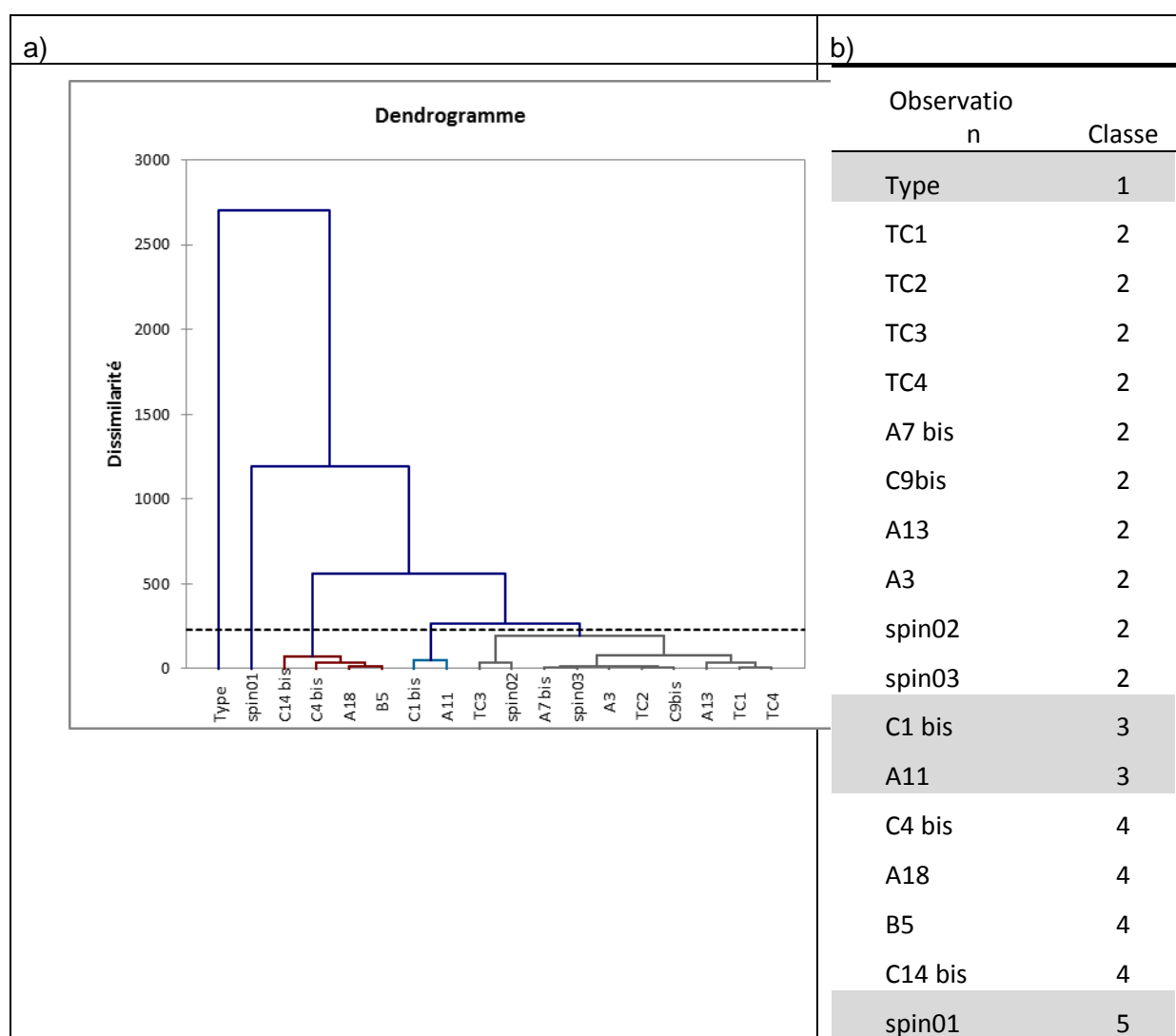


Figure 52 : Discrimination des sols par CAH (calculée sous excel-stat à partir de la méthode de Gotz, 2007), a) dendrogramme b) liste des échantillons classés.

⁴⁴ Des détails sont disponibles dans un rapport public BRGM (BRGM/RP-63111-FR, 2013)

Évolution des profils avec la profondeur

Les teneurs totales en dioxines/furannes des deux sondages, réalisés à la pelle mécanique (SPM02 et SPM05), montrent une très nette diminution des valeurs avec la profondeur (cf. Tableau 31). Dans les deux cas, cette différence se traduit par une diminution relative des furannes dans le mélange : de 82-86 % à 55-67 %. La part des furannes diminue progressivement à l'exception d'un congénère hepta et de l'OCDF qui augmentent (cf. Figure 53).

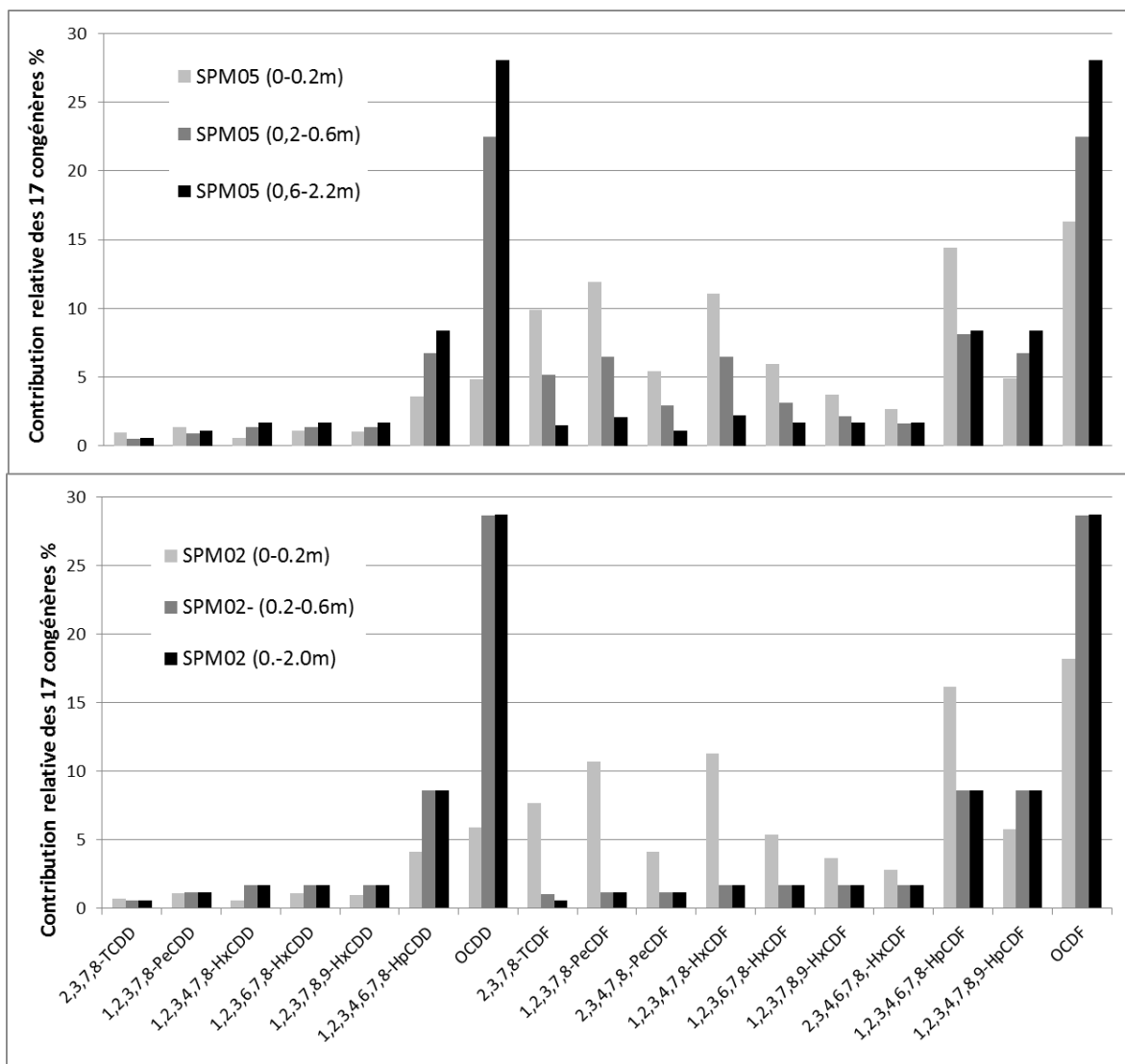


Figure 53 : Évolution des profils dioxines/furannes avec la profondeur pour les deux sondages.

b) Résultats PCB-dl

12 PCB dit de type PCB-dl (dl pour dioxin-like) sont de plus en plus souvent considérés dans les études « dioxines ». Notamment, les méthodes de calcul du TEQ les plus récentes (OMS, 1998, 2005) intègrent leur contribution à celles des dioxines/furannes chlorés. Ces molécules sont dosées réglementairement dans les aliments, mais pour les sols, les données sont beaucoup moins nombreuses. Cette contribution peut toutefois être non négligeable, comme cela a par exemple été montré par Pirard *et al.* (2002) pour des sols français hors influence industrielle et, dans une moindre mesure pour des sols plus impactés, par un ancien incinérateur dans ce cas.

L'analyse faite sur le sol SPIN03 montre une contribution moindre des concentrations en PCB-dl par rapport aux dioxines/furannes (cf. Figure 54a).

Du fait de facteurs de toxicité moindres pour les PCB-dl par rapport aux PCDD/F, cela se traduit par une contribution à la toxicité globale TEQ assez faible pour les PCB-dl (2,6 % du TEQ total ; cf. Figure 54 b). Les valeurs absolues demeurent toutefois fortes :

- TEQ PCDD/F (OMS-2005) en ng TEQ/kg MS : 4 713 ;
- TEQ PCB-dl (OMS-2005) en ng TEQ/kg MS : 127 ;
- TEQ (PCDD/F + PCB-dl ; OMS-2005) en ng TEQ/kg MS : 4 840.

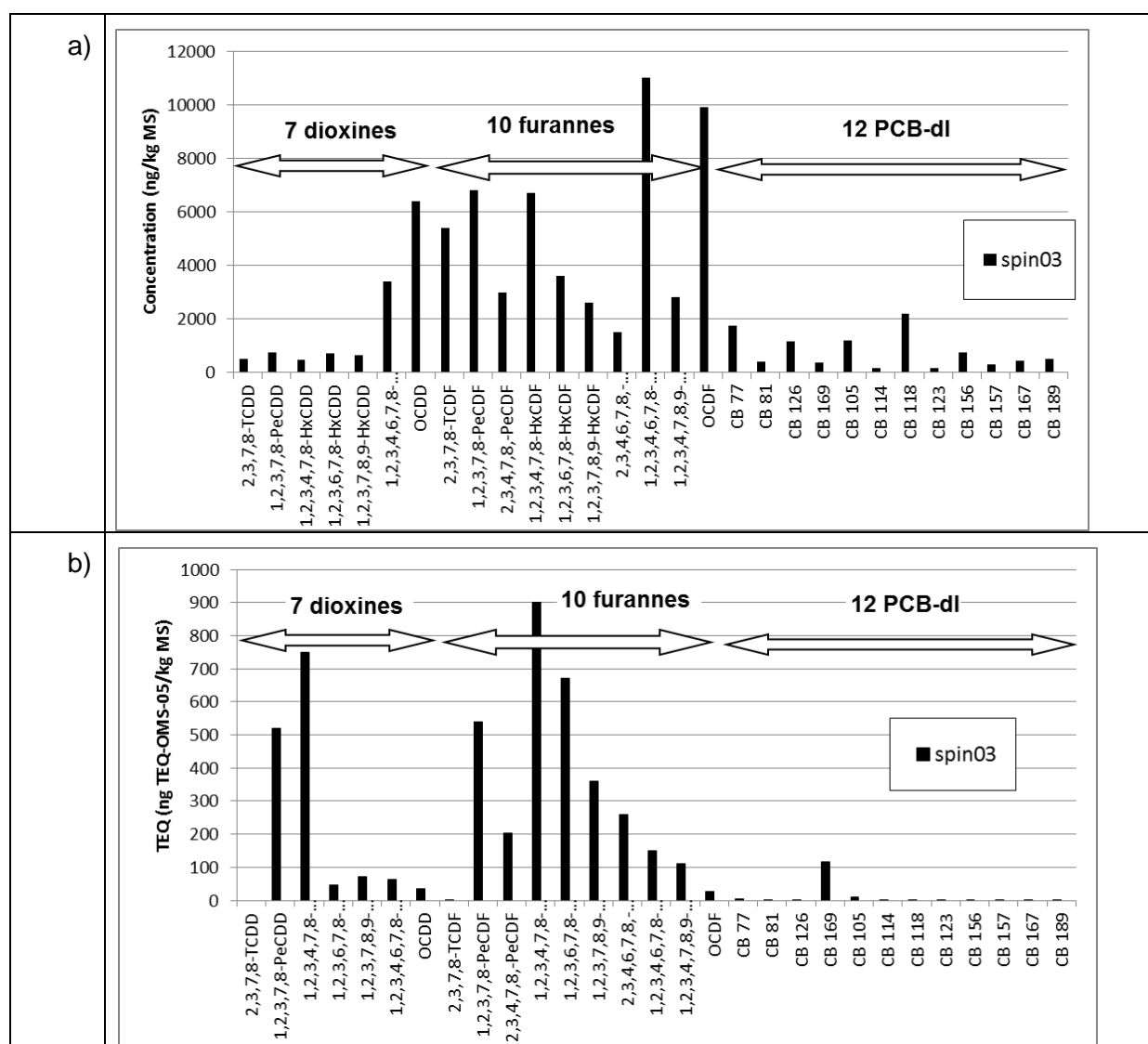


Figure 54 : Contribution relative des PCB-dl du sol SPIN03 a) concentration, b) toxicité TEQ-OMS 2005.

c) Résultats PBDD et PBDF (bromées)

La présence de brome sur le site a amené à rechercher la présence de dioxines/furannes bromés, en plus des chlorés. L'analyse de 4 échantillons démontre bien leur présence (cf. Tableau 32), en quantité variable (635 à 83 032 ng/kg MS) et démontre également des contributions variables des dioxines par rapport aux furannes (24 à 61 %).

Le sol SPIN03 contient les congénères dioxines et furannes bromés les plus substitués : hepta et octabromés (cf. Figure 55). Dans les trois autres échantillons, les congénères moins substitués sont plus largement représentés, avec une grande variabilité qu'il est difficile de commenter plus en avant, tout comme la distinction avec les congénères chlorés.

D'autres molécules bromées sont potentiellement présentes, notamment des polybromo biphényles éthers (PBDE), mais n'ont pas été recherchées à ce stade.

	PBCDD/F (bromés)					PCDD/F (chlorés) - rappel tableau1				
	Concentration des congénères bromés ng/kg MS (nd=LD)			Concentration relative des congénères bromés %		Concentration des congénères chlorés ng/kg MS (nd=LD)			Concentration relative des congénères chlorés %	
	dioxines	furannes	total	dioxines	furannes	dioxines	furannes	total	dioxines	furannes
spin03 (2014)	390	245	635	61	39	12890	53300	66190	19	81
D8 28/1/15	18119	31186	49305	37	63	29440	143700	184040	16	78
CONF-1 28/1/15	9339	10186	19526	48	52	nm	nm	nm		
FOS-01 28/1/15	19697	63335	83032	24	76	nm	nm	nm		

Tableau 32 : Teneurs en dioxines/furannes bromés de 4 sols (et rappels chlorés en Tableau 31).

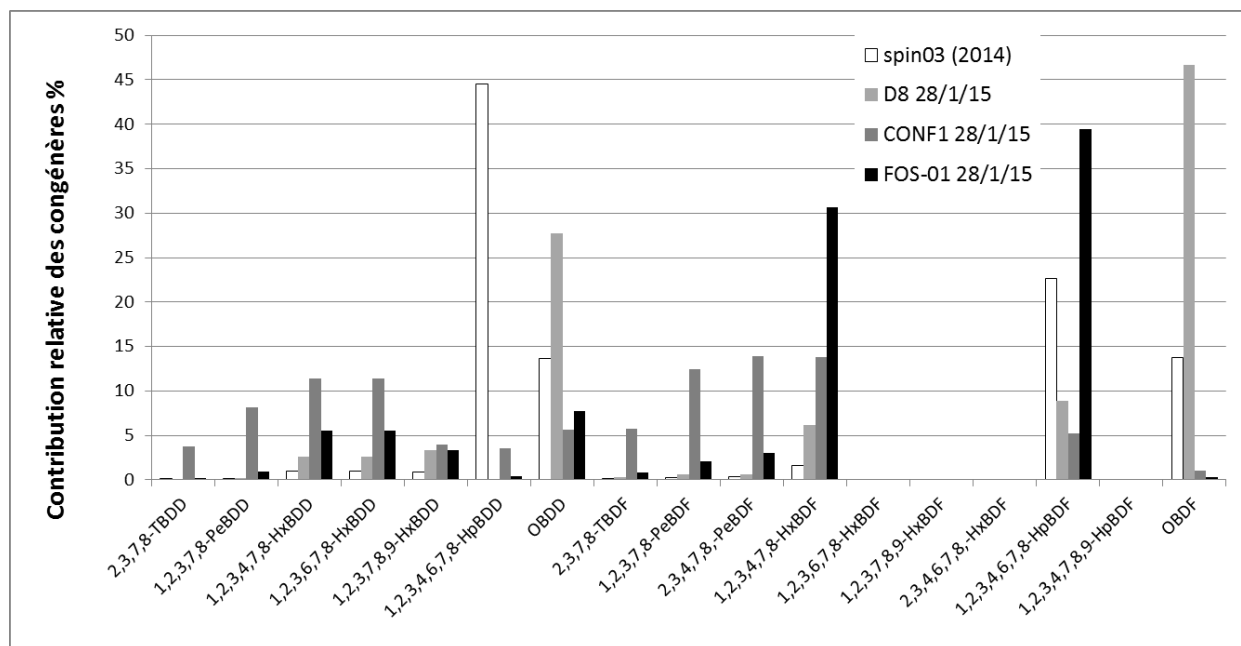


Figure 55 : Contribution relative des 17 congénères de dioxines/furannes bromés (quatre échantillons) - PBCD & PBDF.

5.1.5 Évaluation de la qualité des sols en profondeur au droit de la « *Place à gaz* »

a) Métaux et métalloïdes

Des profils de sols ont été réalisés en octobre 2014 pour chaque tranchée de reconnaissance à la pelle mécanique (SPM01 à SPM07) afin de visualiser la migration verticale des 3 métaux et métalloïdes principalement mesurés dans les sols de la « *Place à gaz* » : arsenic, plomb et zinc.

Les profils sont présentés sur la Figure 56 et la Figure 57. Ils montrent clairement que les teneurs supérieures à 1 000 mg/kg concernent essentiellement la tranche de sol (0-50 cm), soit les 20 à 30 premiers centimètres de sol naturel.

Par ailleurs, l'impact sur les sols (teneurs supérieures au fond géochimique) est encore mesurable localement à 3,5 m de profondeur, mais avec des teneurs proches du fond géochimique naturel (teneurs ne s'écartant pas d'un facteur 5 par rapport au fond géochimique).

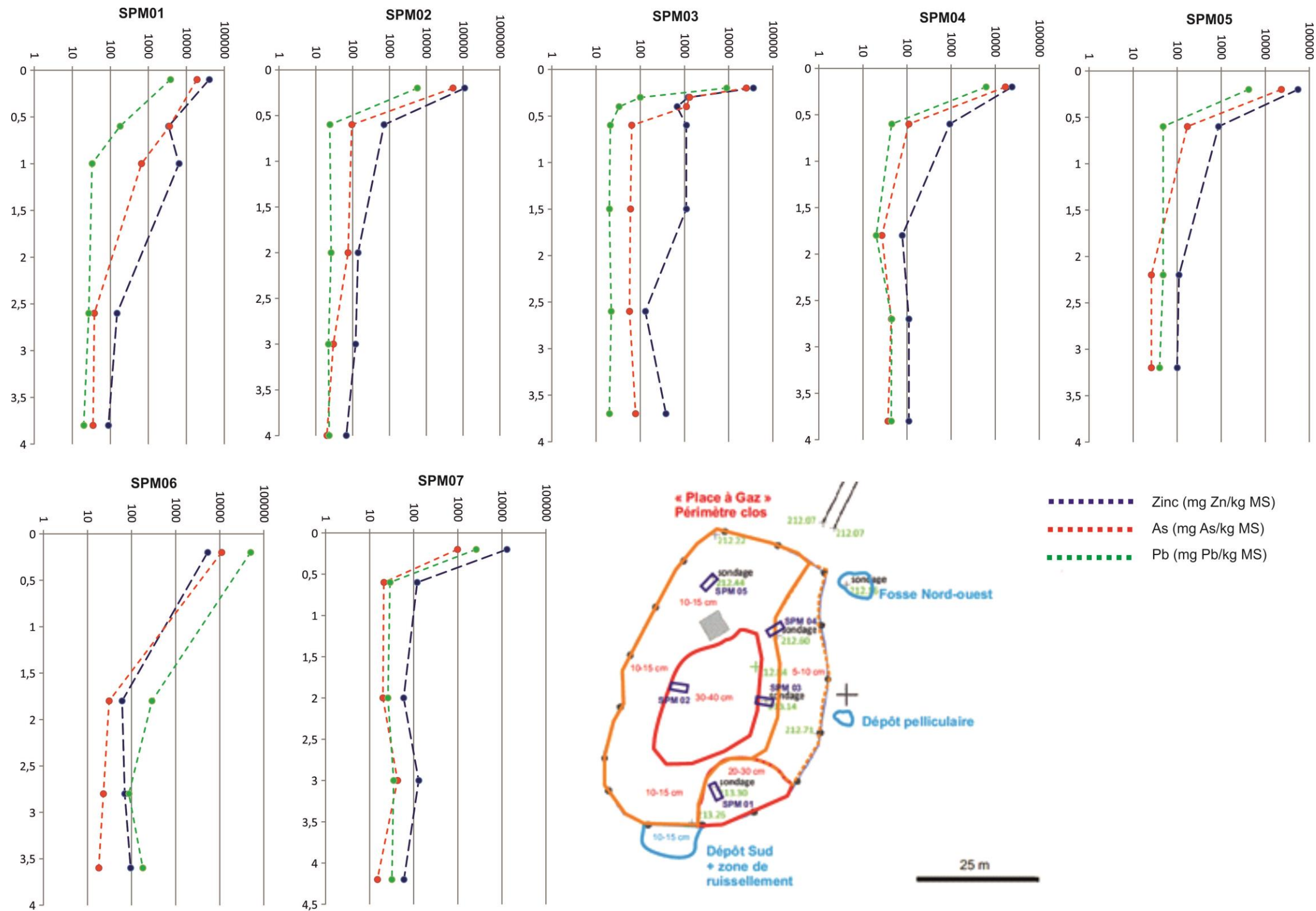


Figure 56 : Profils des fouilles SPM01 à SPM07 représentant la répartition des concentrations(en mg/kg) en arsenic, plomb et zinc selon la profondeur (en m).

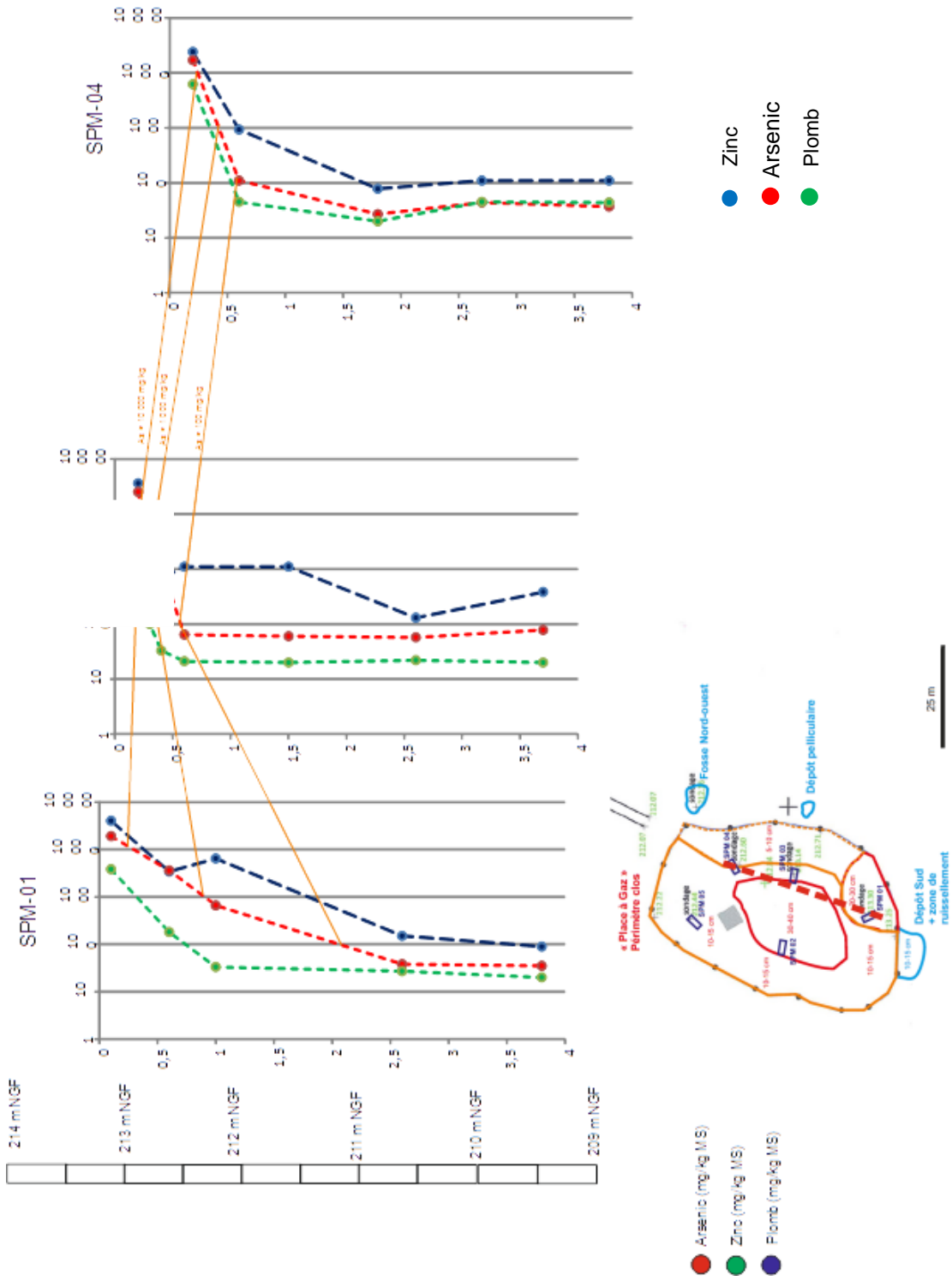


Figure 57 : Profils de sols SPM01, SPM03 et SPM04 rattachés au système NGF.

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux.

SPM06	Pb	As	Zn	Cu	Fe	Mn
FOSSE06 0-20 noir	86127	16623	2204	435	30205	1249
FOSSE06 20-30cm rouge	18464	5554	1362	69	49297	459
FOSSE06 30-80cm jaune	5094	1164	199	< LOD	20374	< LOD



	Profondeur (m/surface)	Pb	As	Zn	Cu	Fe	Ca
COUCHE 1 surface1 pt1	0,1	1122	35192	31591	4654	46268	1376
COUCHE 1 surface1 pt2	0,1	1488	43194	54498	8802	56254	1485
COUCHE 1 surface2 pt1	0,3	1774	55549	53763	9407	67261	1404
COUCHE1 surface2 pt2	0,3	1230	39507	31953	5298	41921	1207
COUCHE2 argile brun pt1	0,6	944	28360	29403	4206	33186	1392
COUCHE2 argile brun pt2	0,6	1178	34290	30683	5624	40337	2221
COUCHE3 argile jaune pt1	1	123	3316	1978	329	23775	2083
COUCHE3 argile jaune pt2	1	32	3425	1042	48	16450	956



Figure 58 : Distribution des teneurs en métaux sur le profil SPM06.

Sondage SPM06, fosse Nord-est

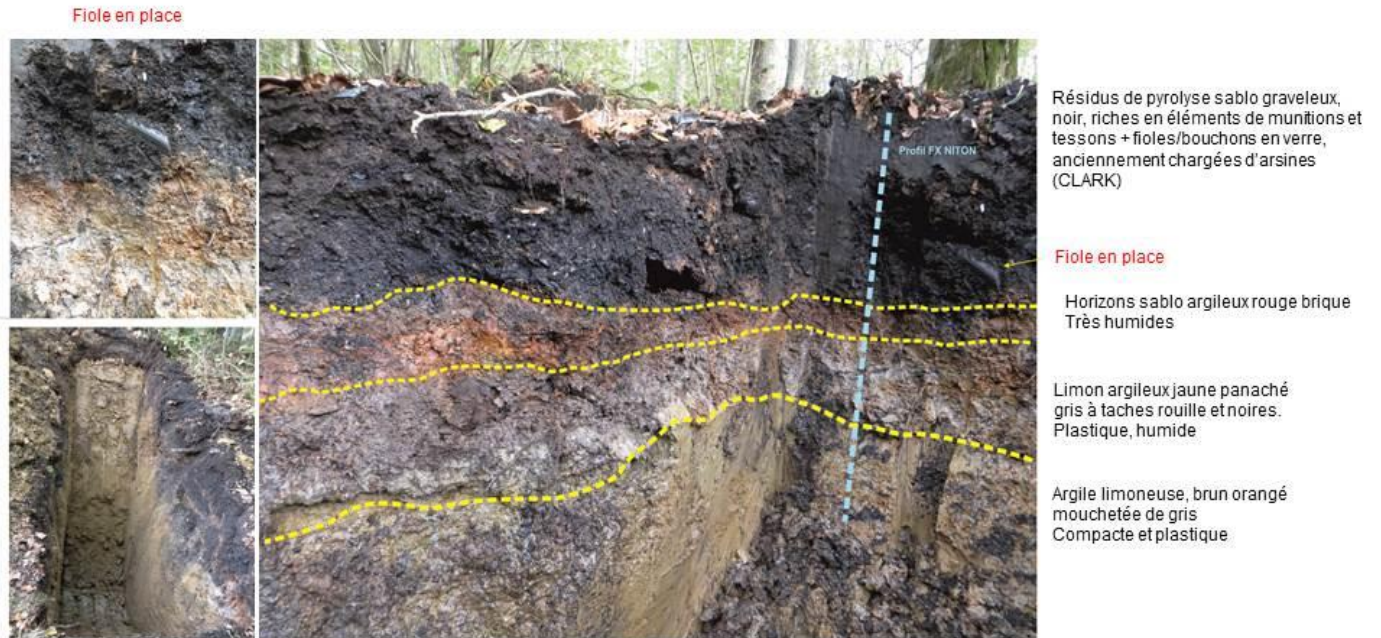


Figure 59 : Profil lithologique, sondage SPM06, fosse nord-est

* Évaluation des fractions mobiles lixiviables

Une évaluation des fractions mobiles lixiviables a été réalisée à partir des résultats d'analyse sur brut et sur lixiviat pour l'arsenic, le plomb et le zinc sur deux fouilles :

- SPM02 au droit de la tache centrale ;
- SPM06 au droit de la fosse n° 1 (fosse au nord-est).

Ces résultats montrent que (cf. Tableau 33 et Tableau 34) :

- la tranche superficielle de sol (0,2 à 0,6 m) présente les plus fortes teneurs en métaux (As, Pb et Zn) ;
- les éléments les plus mobiles sont représentés par l'arsenic et le brome, puisque ces éléments sont encore détectés dans les horizons profonds (jusqu'à 3.6 m de profondeur), contrairement au plomb et au zinc ;
- le plomb et le zinc sont au contraire peu mobiles, car ils ne sont plus ou pas détectés dès 1,8 m de profondeur.

Par ailleurs, les analyses indiquent que le pourcentage de fractions lixiviables en arsenic, zinc et plomb dans les sols reste relativement faible dans les horizons de surface (moins de 0,2 %), ce qui traduit la présence de métaux peu mobiles.

Echantillon	Profondeur (m/sol)	Zn sur brut (mg/kg MS)	Zn lixiviable (mg/kg)	Zn Fraction lixiviable	As sur brut (mg/kg MS)	As lixiviable (mg/kg)	As Fraction lixiviable	Pb sur brut (mg/kg MS)	Pb lixiviable (mg/kg)	Pb Fraction lixiviable
SPM02-0,2m	0,2	110000	7,666	0,007%	53000	125	0,236%	5700	2,28	0,040%
SPM02-0,6m	0,6	710	-	-	95	-	-	24	-	-
SPM02-2,0m	2	140	0,00281	0,002%	75	1,94	2,587%	26	0,0112	0,043%
SPM02-3,0m	3	120	-	-	30	-	-	22	-	-
SPM02-4,0m	4	67	<0,001	<	20	<0,01	<	23	<0,01	<

Tableau 33 : Répartition des teneurs en As, Pb et Zn sur brut et sur lixiviat pour la fouille SPM02.

Sondage / échantillon	Profondeur (m / sol)	As sols bruts (mg/kg)	As lixiviable (mg/kg)	As Fraction lixiviable	Zn sols bruts (mg/kg)	Zn lixiviable (µg/kg)	Zn Fraction lixiviable	Pb sols bruts (mg/kg)	Pb lixiviable (µg/kg)	Pb Fraction lixiviable	Br lixiviable (µg/kg)	Cl lixiviable (mg/kg)	ClO3 lixiviable (mg/kg)	ClO4 lixiviable (µg/kg)
SPM06-0,2	0,2	11000	9,1	0,083%	5300	13,9	0,262%	50000	69	0,138%	57000	7	5,01	<5
SPM06-0,6	0,6	-	0,78	-	-	0,968	-	-	3,4	-	4600	<5	<1	<5
SPM06-1,8	1,8	31	0,29	0,935%	61	<0,010	<	290	<0,010	<	3800	<5	<1	<5
SPM06-2,8	2,8	23	0,163	0,709%	70	<0,010	<	87	<0,010	<	5200	<5	<1	<5
SPM06-3,6	3,6	18	0,124	0,689%	95	0,0422	<	180	<0,010	<	6800	<5	<1	<5

Tableau 34 : Répartition des teneurs en As, Pb et Zn sur brut et sur lixiviat pour la fouille SPM06.

b) Toxiques et explosifs de guerre

La migration verticale des toxiques et explosifs de guerre est étudiée dans le Tableau 35.

Des traces de composés énergétiques nitroaromatiques et de leurs sous-produits sont détectées dans les résidus de combustion (tranche superficielle 0-20 cm) :

- 2-amino-4,6-dinitrotoluène, 4-amino-2,6-dinitrotoluène en SPM01 (respectivement 0,51 et 0,11 mg/kg) et D8 (respectivement 0,41 et 0,75 mg/kg) ;
- Acide-2-amino-4,6-benzoïque (0,16 mg/kg) en SPM06 ;
- 2,4,6-trinitrotoluène (TNT) en SPM01 (0,39 mg/kg) et D8 (1 mg/kg). Ce composé est également retrouvé en SPM06 plus en profondeur : à 0,6 m de profondeur (0,63 mg/kg) et à 2.8 m de profondeur (0,29 mg/kg) ;
- 2,4,6-trinitrophénol (acide picrique) en SPM06 à une teneur de 1,56 mg/kg ;
- 1,5-dinitronaphtalène et 1,8-dinitronaphtalène en SPM01 et D8.

Par ailleurs, des phénylarsines résiduelles et leurs sous-produits d'oxydation (acide diphénylarsénique), plus toxiques et plus mobiles, sont quantifiés dans les résidus de la fouille SPM06 à une teneur de 17,5 mg/kg.

D'autre part, ces composés n'ont pas été détectés dans les sols présents sous les résidus de combustion (sauf le TNT en SPM06). Ainsi, les résultats indiquent une faible migration de ces polluants dans les sols plus en profondeur. Leur impact est donc circonscrit aux dépôts de résidus de combustion.

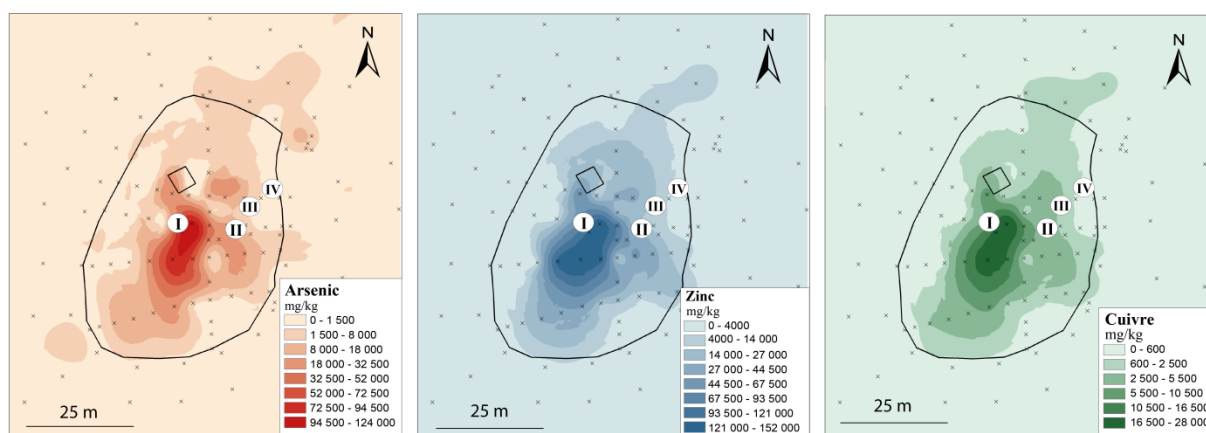
Composés	Unité	Matrice analysée	Typologie	TACHE CENTRALE / PROFILS (OCTOBRE 2014). Exprimé en mg/kg MS										Dépôt Nord			
				SPM01-0,6 m	SPM01-1,0 m	SPM01-2,6 m	SPM06-0,2 m	SPM06-0,6 m	SPM06-1,8 m	SPM06-2,8 m	SPM06-3,6 m	D8 (0,2m)					
2-amino-4,6-dinitrotoluène	mg/kg MS	Sol	Sous produit de transformation aérobie et/ou photolyse du TNT	0,51	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,41	
4-amino-2,6-dinitrotoluène	mg/kg MS	Sol		0,11	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,75
Acide 2-amino-4,6-benzoïque	mg/kg MS	Sol		<0,05	<0,05	<0,05	0,16	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acide 4-amino-2,6-benzoïque	mg/kg MS	Sol		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2,4,6-trinitrotoluène (TNT)	mg/kg MS	Sol		0,39	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,63	<0,05	<0,05	<0,05	0,29	<0,05	<0,05	<0,05	1
2,4,6-trinitrophenol (acide picrique)	mg/kg MS	Sol		<0,05	<0,05	<0,05	1,56	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,3-dinitrobenzène	mg/kg MS	Sol		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,5-dinitronaphtalène	mg/kg MS	Sol		0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,1
1,8-dinitronaphtalène	mg/kg MS	Sol		0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,42	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,34
1,3,8-trinitronaphtalène	mg/kg MS	Sol		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
1,4,5-trinitronaphtalène	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Acide diphenylarsinique	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	17,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Diphénylarsine (chlore)	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Triphénylarsine	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
9-phénylarsine fluorene	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Chlore de diphenyl arsine	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
9-phénylarsine fluorene	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Triphénylarsine	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
(Biphényl-4-yl)diphénylarsine	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
2-Bromotoluène	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
4-Bromotoluène	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
2-Bromo-p-xylène	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
2,5-Dibromo-p-xylène	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	
Chlorobenzène	mg/kg MS	Sol	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	

Tableau 35 : Profils de sols pour les explosifs et toxiques de guerre pour les feuilles SPM01 et SPM06 (en jaune les valeurs >= 1 mg/kg MS, en rouge celles >= 10 mg/kg MS).

5.1.6 Caractérisation physico-chimique approfondie de sol de surface de la « Place à gaz »

a) Prélèvements

Des échantillons de sol de surface ont été prélevés à la spatule (0-20 cm) sur la « Place à gaz » le 11 juin 2014. Les quatre points de prélèvement sont localisés dans des zones présentant des couverts végétaux contrastés et des concentrations en arsenic et métaux différentes (cf. Figure 60).



Cartes obtenues par mesure en fluorescence de rayon X in-situ.

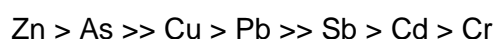
Figure 60 : Répartition des concentrations en arsenic, zinc et cuivre dans le sol de surface de la « Place à gaz » et localisation des points de prélèvement.

Le sol I a été prélevé au centre de la place, dans une zone non végétalisée. Le sol II a été prélevé sous un couvert de mousse. Le sol III était couvert de mousse et d'herbacées se développant dans la mousse. Le sol IV était recouvert par la litière de feuilles des arbres environnants. Le sol a été tamisé sur site à 2 mm, puis conservé dans des bocaux en verre fermés de façon étanche. Au laboratoire, il a été conservé tel quel en chambre froide (5 °C).

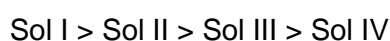
b) Analyse granulochimique

Les sols ont été quartés (séparateur à lames), puis tamisés de façon à récupérer trois fractions granulométriques : <50 µm, 50-200 µm, > 200 µm. Ces trois fractions, ainsi que le sol brut, ont été analysés par ICP-MS⁴⁵ après dissolution (CRPG⁴⁶, Nancy). Les résultats de ces analyses sont donnés par les Tableaux 36 et Tableau 37.

Les polluants inorganiques présents dans ces sols de surface peuvent être classés par ordre de teneurs décroissantes de la façon suivante :



Les sols peuvent également être classés par ordre de niveau décroissant de teneurs en polluants inorganiques :



⁴⁵ ICP-MS : Inductively coupled plasma mass spectrometry

⁴⁶ CRPG : Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques

Les polluants inorganiques sont présents en teneurs élevées dans toutes les fractions granulométriques. Néanmoins, les métaux sont majoritairement contenus dans la fraction >200 µm.

Réf Échantillon	As	Cd	Cu	Pb	Sn	Zn	Cr
Sols	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
SI total	72 820	159	9 113	3 830	308	90 190	58
SI >200 µm	74 870	224	12 680	4 332	324	152 200	41
SI 50-200µm	83 090	127	8 929	4 526	318	84 520	56
SI <50µm	67 270	109	7 331	3 661	324	68 330	105
SII total	30 840	77	5 082	5 777	139	37 310	77
SII>200 µm	57 840	136	8 736	9 325	220	61 730	59
SII 50-200µm	41 900	96	6 501	8 013	176	40 210	70
SII <50µm	21 310	48	3 106	3 927	109	23 610	99
SIII total	6 253	18	1 591	2 529	46	10 660	84
SIII >200 µm	9 793	31	3 009	4 379	72	19 550	95
SIII 50-200µm	8 480	24	1 863	3 621	57	12 610	97
SIII <50µm	4 055	13	1 078	2 103	35	7 257	120
SIV total	1 937	26	1 451	968	44	13 270	97
SIV >200 µm	3 612	50	2 795	2 007	60	24 540	80
SIV 50-200µm	8 469	30	2 042	1 427	48	12 670	90
SIV <50µm	1 436	18	992	646	39	9 284	112

Tableau 36 : Résultats d'analyse en granulochimie des 4 sols de surface, polluants inorganiques.

La Figure 61 montre les corrélations entre l'arsenic et le fer et les autres polluants inorganiques majeurs (Zn, Cu et Pb), dans les 4 sols et les différentes fractions granulométriques. Ces représentations montrent qu'au sein d'un même sol, les teneurs en As sont peu corrélées aux teneurs en Fe, Zn, Cu et Pb présentes dans les différentes fractions granulométriques, excepté dans le sol II. Par contre, lorsque tous les sols sont confondus, des corrélations positives sont constatées entre ces éléments, surtout entre As et Cu. Le sol I se distingue nettement des autres dans la représentation As en fonction du Pb. Ces corrélations démontrent que l'origine du plomb diffère de celle de l'arsenic. La présence de plomb au droit de la « Place à gaz » n'est pas en relation avec l'élimination des obus à « Croix bleue ».

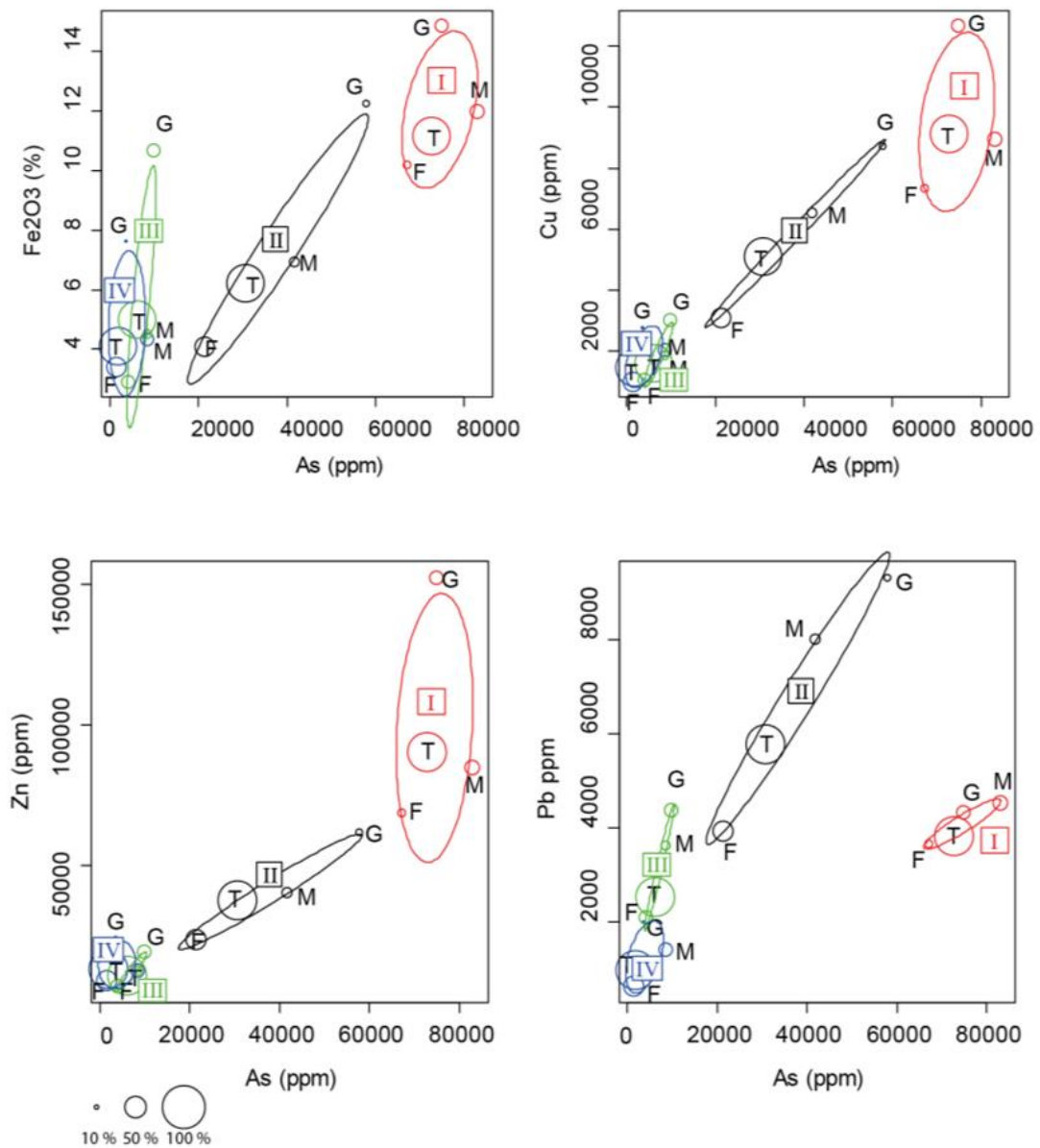


Figure 61 : Corrélation entre As et les éléments Fe, Zn, Cu et Pb dans les différentes fractions granulométriques des quatre sols étudiés.

Le Tableau 37 donne des indications sur les composants majeurs de chaque sol. Le carbone représente une fraction importante des sols, surtout dans le sol I (près de 50 %) et le sol II. Par ordre décroissant viennent ensuite la silice (très majoritaire dans le sol III), le fer et l'aluminium. Ce dernier élément, certainement associé aux argiles, présente une teneur croissante du sol I vers le sol IV. Les carbonates représentent une part très faible (moins de 1 %) des sols. Le carbone présent dans les sols I et II provient certainement, pour une fraction importante, de la calcination de bois au cours de la destruction des munitions chimiques.

Réf Échantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF carbone
Sols	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SI total	14	2,3	11,1	0,1	0,2	0,6	0,1	0,4	0,4	52
SI >200 µm	7	1,9	14,9	0,1	0,1	0,5	0,1	0,2	0,4	46
SI 50-200µm	16	2,6	12,0	0,1	0,2	0,6	0,1	0,5	0,4	48
SI <50µm	26	3,1	10,2	0,1	0,2	0,6	0,3	0,7	0,4	45
SII total	50	4,8	6,2	0,1	0,3	0,6	0,5	1,2	0,3	26
SII >200 µm	18	3,4	12,3	0,1	0,3	1,1	0,2	0,6	0,4	48
SII 50-200µm	43	4,5	6,9	0,1	0,3	0,7	0,4	1,1	0,3	32
SII <50µm	66	5,5	4,1	0,0	0,3	0,5	0,7	1,5	0,2	14
SIII total	70	6,7	5,0	0,1	0,4	0,5	0,7	1,7	0,2	11
SIII >200 µm	61	6,7	10,7	0,1	0,5	0,8	0,6	1,6	0,2	12
SIII 50-200µm	69	6,5	4,5	0,1	0,4	0,4	0,6	1,8	0,2	12
SIII <50µm	76	6,8	2,9	0,0	0,4	0,4	0,8	1,8	0,2	8
SIV total	59	7,2	4,1	0,2	0,5	0,6	0,6	1,7	0,3	23
SIV >200 µm	36	5,8	7,6	0,3	0,5	0,9	0,4	1,2	0,4	42
SIV 50-200µm	53	7,1	4,3	0,2	0,5	0,6	0,5	1,6	0,3	29
SIV <50µm	68	7,5	3,4	0,1	0,5	0,5	0,7	1,9	0,2	15

Tableau 37 : Résultats d'analyse en granulochimie des 4 sols de surface, composés majeurs.

c) Observations au MEB-EDS⁴⁷ et DRX⁴⁸, analyse minéralogique

Les analyses MEB-EDS et DRX ont été réalisées à l'ISTO⁴⁹ sur un microscope à balayage Hitachi TM3000, et un diffractomètre **Inel (Thermo)**. L'observation des particules de sols au MEB-EDS montre la présence de particules de charbon présentant une morphologie ligneuse (cf. Figure 62), côtoyant des grains riches en métaux (clairs car réfléchissant les électrons). Dans certains débris de charbon, les canaux du végétal calciné sont remplis de matière minérale riche en métaux (cf. Figure 63).

⁴⁷ MEB-EDS : Microscope Électronique à Balayage à sonde EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)

⁴⁸ DRX : Diffractométrie de rayons X

⁴⁹ ISTO : Institut des Sciences de la Terre d'Orléans

D'autres particules de sol sont recouvertes de minéraux secondaires, bien cristallisés et riches en métaux (cf. Figure 64 et Figure 65), ou d'une phase amorphe pouvant prendre la forme de sphères vitreuses (cf. Figure 65).

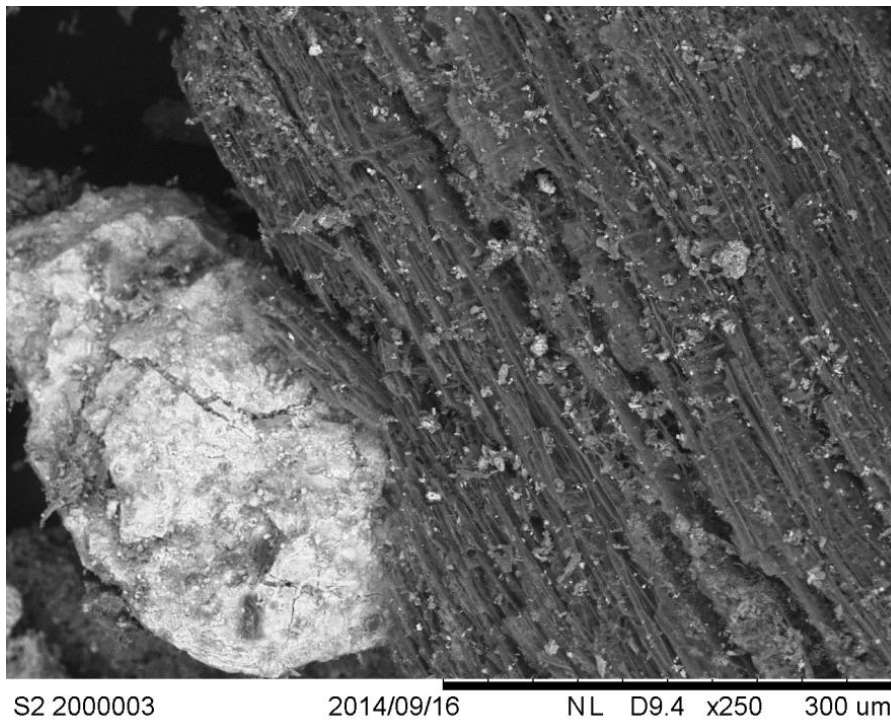


Figure 62 : Observation au MEB-EDS du sol I, charbon et grain riche en métaux.

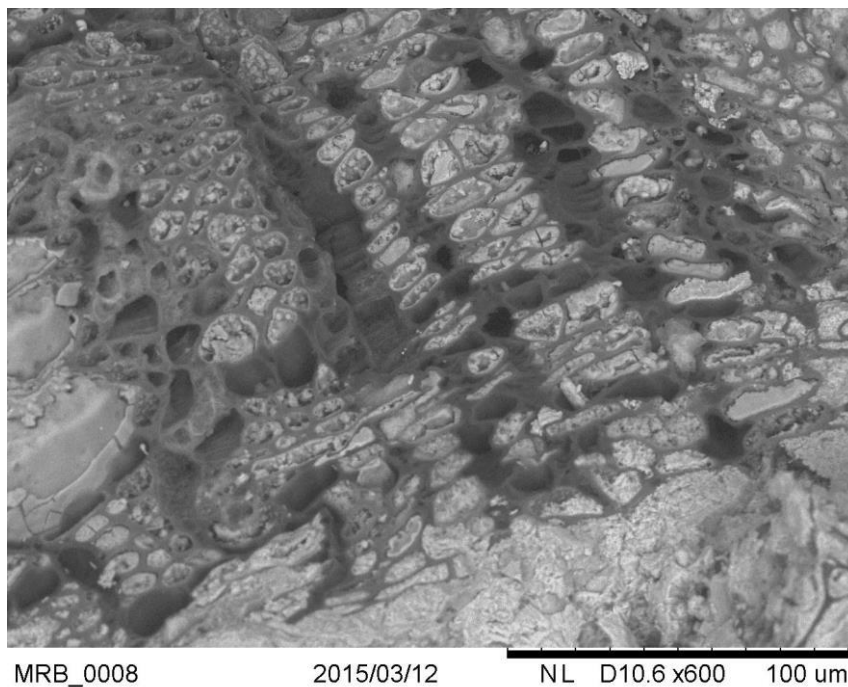


Figure 63 : Observation au MEB-EDS d'une particule de charbon du sol I.

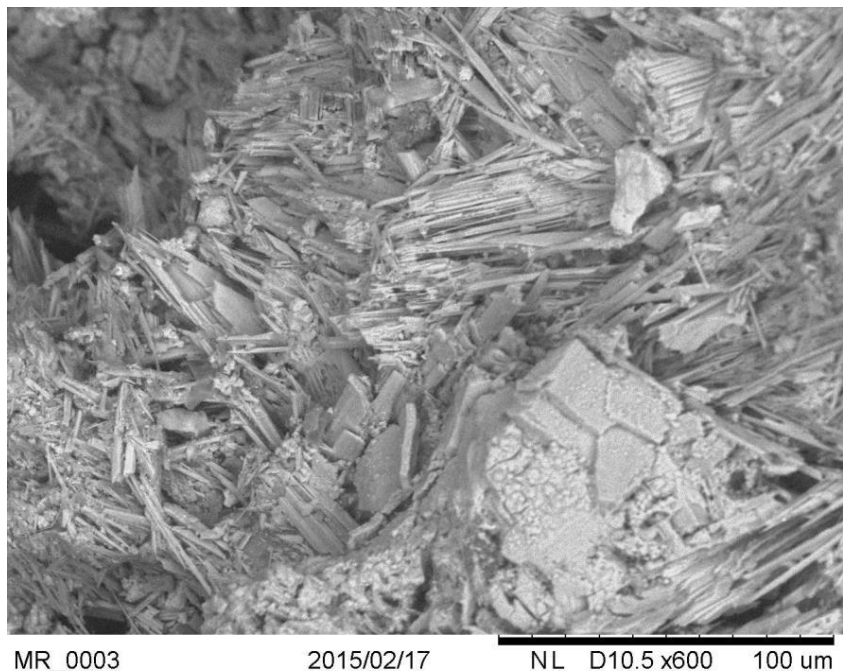


Figure 64 : Minéraux cristallisés à la surface d'un grain du sol I.

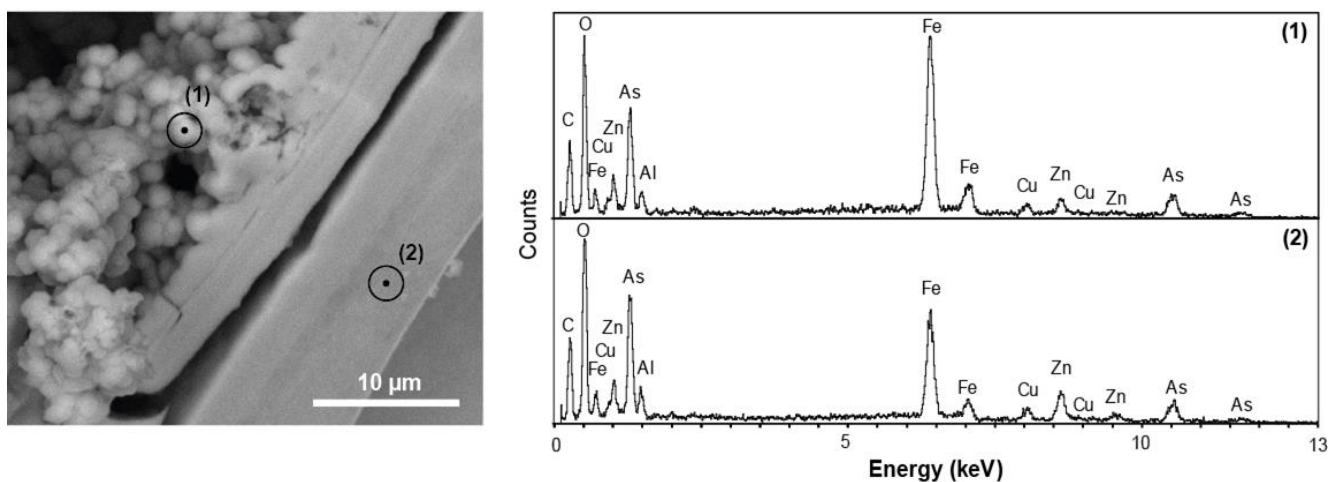


Figure 65 : Phase amorphe observée à la surface d'un grain du sol I.

Les observations et analyses MEB-EDS indiquent que le matériau pollué est constitué de minéraux hérités (silicates et argiles), de charbon et de phases secondaires porteuses de métaux. Dans les grains riches en métaux, deux phases très différentes ont été identifiées : une phase cristalline au sein de laquelle l'arsenic est associé à du cuivre et du zinc, et une phase amorphe riche en fer, zinc, cuivre et arsenic.

Les analyses DRX indiquent la présence, dans la phase cristallisée, de quatre minéraux secondaires porteurs d'arsénate (AsV) : les arsénates de zinc et de cuivre (adamite et olivénite), et deux types de pharmacosidérates (arsénates hydratés de fer ferrique).

La Figure 66 synthétise les résultats de granulochimie et de MEB-DRX, montrant trois compartiments dans les sols étudiés, correspondant à des types de particules différentes : l'argile, le charbon et les porteurs de métaux.

Cette représentation montre que les métaux et l'arsenic sont essentiellement présents en phase minérales spécifiques et distinctes et ne sont portés par les argiles et les particules charbonneuses qu'en faible proportion.

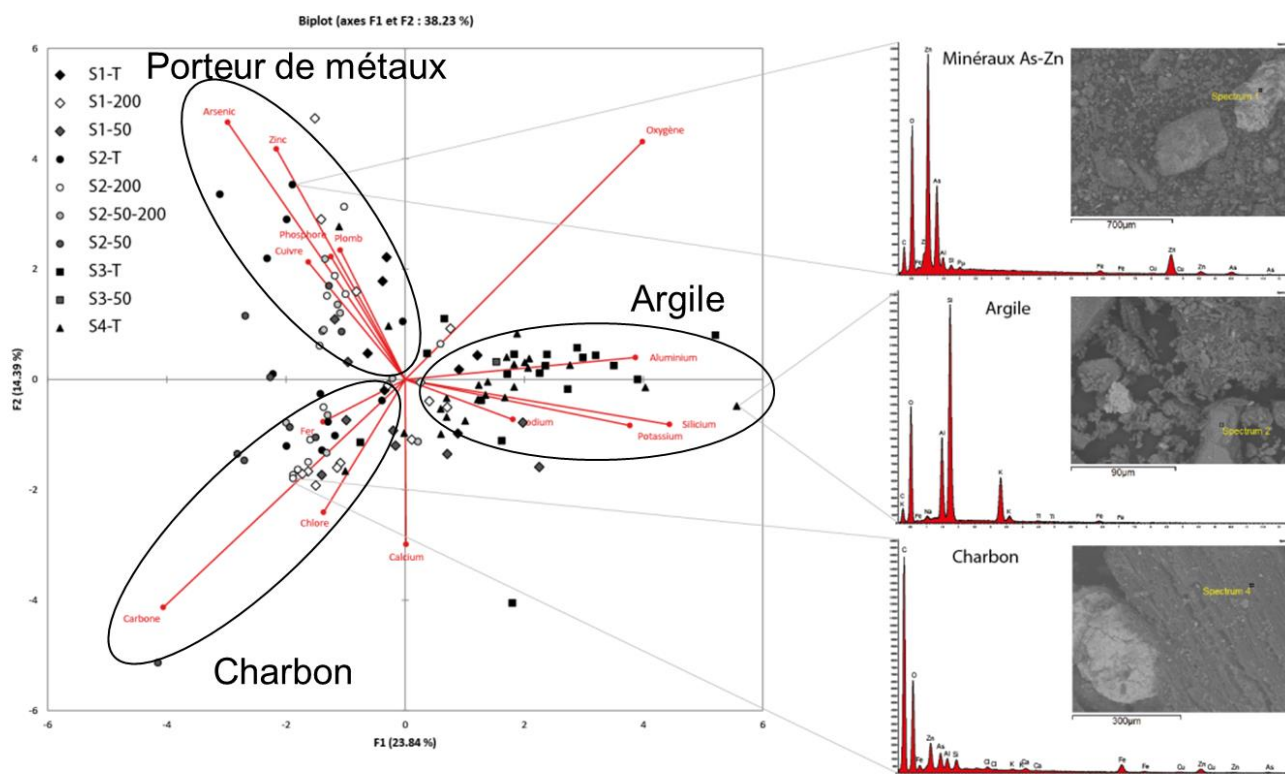


Figure 66 : Représentation synthétique des résultats de granulochimie (ACP⁵⁰) et d'observations MEB-EDS.

d) Spéciation de l'arsenic dans le sol I

La spéciation de l'arsenic dans le sol le plus pollué (sol I) a été réalisée par le laboratoire UT2A⁵¹ par ICP-MS après extraction dans l'acide phosphorique aux micro-ondes.

Les résultats de cette analyse sont les suivants :

- AsV : 70 178 mg/kg ;
- AsIII : 1 577 mg/kg ;
- Autre espèce polaire non déterminée : 1 956 mg/kg.

Ce résultat est cohérent avec l'ICP-MS réalisée à Nancy qui indiquait 72 820 mg/kg d'As total dans le sol I. L'As³⁺ (espèce réduite) ne représente que 2 % de l'As total, cependant la valeur absolue de la concentration de cette espèce connue comme plus mobile que l'As⁵⁺ (espèce oxydée) est très élevée.

⁵⁰ ACP : Analyse en composantes principales

⁵¹ UT2A : Centre Technologique en Chimie Analytique (Ultra Traces Analyses Aquitaine)

e) Conclusion et perspectives

La caractérisation détaillée du sol de surface de la « Place à gaz » a révélé comment le traitement thermique des obus chimiques a influencé la distribution et la spéciation des métaux et de l'arsenic :

- des fragments de munitions peu dégradés sont porteurs de métaux et notamment de Pb ;
- néanmoins la majorité des phases porteuses de métaux sont héritées du brûlage des obus. La combustion a libéré dans le milieu les métaux contenus dans les munitions mais également l'arsenic des diphénylarsines.

5.2 DISTRIBUTION DES TENEURS ET BILAN MASSIQUE EN ARSENIC DANS LES SOLS DE SURFACE

L'ensemble des résultats d'analyse et des mesures par fluorescence X sur le terrain, capitalisés entre avril et octobre 2014, a permis d'aboutir à la réalisation d'une carte représentant les isoteneurs en arsenic au droit et à proximité immédiate de la « Place à gaz » (fosses « satellites ») présentée en Figure 67 :

- cette carte montre que la zone la plus concentrée en arsenic dans les sols de surface (> 50 gAs/kg MS) est localisée en plein centre de la clairière. Au cœur de cette zone, les teneurs excèdent 100 gAs/kg MS ;
- latéralement, les teneurs décroissent rapidement ;
- le périmètre clos englobe la majorité des sols montrant des teneurs supérieures à 1 000 mgAs/kg MS à l'exception de la fosse nord-est et du plaquage de résidus situé immédiatement à l'Est de la « Place à gaz ».
- des teneurs supérieures à 1 000 mgAs/kg MS se prolongent vers le nord, au-delà du périmètre clos, vers les fortes teneurs marquant le « Dépôt nord ».

Les masses estimées en arsenic sont de 15 à 16 tonnes (dont 800-900 kg dans le « Dépôt nord »). Le volume de ces résidus peut être estimé à environ 1500 - 1 600 m³ (dont 60-70 m³ dans le « Dépôt nord ») auxquels on peut ajouter environ 700 m³ correspondant aux 20 premiers centimètres de terrain naturel fortement pollués (> 1 gAs/kg MS).

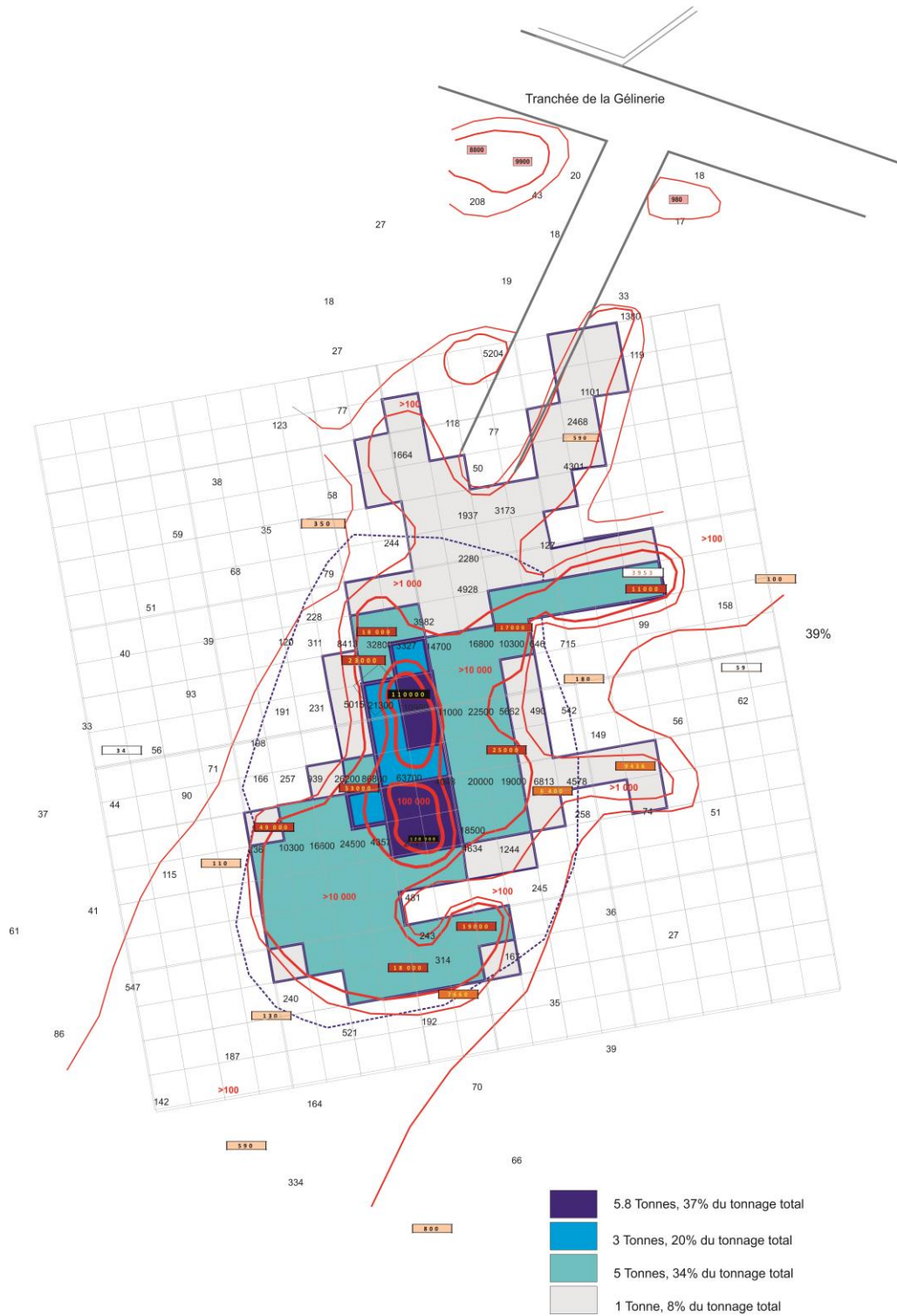


Figure 67 : Représentation en isotoneurs de la distribution de l'arsenic dans les sols de surface (avril 2014-octobre 2014).

5.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES SÉDIMENTS

Le Tableau 38 présente la synthèse des résultats sur les sédiments.

Les résultats montrent que :

- les sédiments de la mare (à 30 m au sud-ouest de la « Place à gaz ») présentent une teneur supérieure d'un facteur 30 au fond géochimique local en arsenic, d'un facteur 6 en zinc et d'un facteur 3 en plomb. Les teneurs en chrome, cadmium, mercure des sédiments sont cohérentes avec le fond géochimique local ;
- au niveau du réseau hydrographique, en aval de la « Place à gaz » :
 - les sédiments (FOS01 puis CONF01) présentent des teneurs en arsenic et en zinc supérieures d'un facteur 7 à 16 au fond géochimique local et d'un facteur 1.3 à 3 en chrome, cuivre et antimoine,
 - la teneur en plomb de FOS01 est 16 fois supérieure au fond géochimique local, et celle de CONF01 est supérieure d'un facteur 3,
 - la teneur en nickel est plus importante dans le sédiment CONF01 (67 mg/kg, 1.3 fois le fond géochimique local) mais cohérente avec le fond géochimique local dans le sédiment FOS01 ;
- les sédiments prélevés en juin 2015 à différentes distances en aval de la « Place à gaz » (localisation en Figure 34) présentent des teneurs en arsenic, plomb et zinc 1.65 à 4 fois supérieures au fond géochimique local sur SED01 puis diminuent sur SED02 et SED03 avec des teneurs cohérentes avec le fond géochimique local. Les teneurs en chrome, cadmium et mercure sont systématiquement cohérentes avec le fond géochimique local.

En ce qui concerne les dioxines et furannes chlorées et bromées, il n'y a pas de valeurs de référence pour ces composés. On peut noter leur quantification sur les sédiments les plus proches de la « Place à gaz » (dans FOS01, fossé au nord de la tranchée de la Gélinerie, à plus de 100 m de la « Place à gaz ») puis une diminution des teneurs dans les sédiments prélevés plus en aval (250 m puis 300 m).

De manière synthétique, il ressort de tous ces éléments que les sédiments présentent un marquage plus ou moins marqué en arsenic, plomb, chrome, cuivre, zinc par rapport au fond géochimique local ; toutefois les concentrations baissent rapidement pour rejoindre le fond géochimique local au-delà de quelques centaines de mètres. De même les concentrations en dioxines et furannes décroissent rapidement au-delà de quelques centaines de mètres.

5.4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES EAUX SUPERFICIELLES

Les résultats obtenus sur les échantillons d'eaux superficielles sur l'ensemble des campagnes de diagnostic ont été comparés aux valeurs limites de potabilité définies dans l'arrêté du 11 janvier 2007 - annexe III Limites de qualité des eaux douces superficielles utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine (catégorie A3, I) (cf. Tableau 39).

On peut noter que, pour les substances qui présentent des valeurs limites de potabilité, les concentrations en arsenic dissous, chrome dissous, mercure dissous, plomb dissous, zinc dissous et chlorures sont toutes inférieures aux valeurs limites définies d'arrêté du 11 janvier 2007.

Eaux de surface: aval Place à Gaz	Laboratoire	LQ	Unité	PONT 01	FOS 01	FOS 01	FOS 02	FOS 03	CONF 01	CONF 02	CONF 03	AVAL 01	AVAL 02	AVAL 03	Mare	FOS Sud	Limites de potabilité arrêtées du 11 janvier 2007 (annexe 3 - catégorie A3, I)
				15/04/14	15/04/14	28/01/15	19/02/15	19/03/15	28/01/15	19/02/15	19/03/15	28/01/15	19/02/15	19/03/15	28/01/15	28/01/15	
As (Arsenic)	BRGM	0,05	µg/l	1.12	NA	6,02	6,95	11,6	5,55	1,63	2,48	0,75	0,72	1,2	1,43	1,42	100
CNL (Cyanures libres)	BRGM	0,05	mg/l	<LQ	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	50
CNT (Cyanures totaux)	BRGM	0,01	mg/l	<LQ	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Brome total	BRGM	1	µg/L	NA	<100	<100	100	223	<100	<100	77,2	<100	<100	48,7	NA	NA	NA
Cl (Chlorures)	BRGM	0,5	mg/l	12.6	NA	5,2	5,7	6,6	5,2	6,1	7,1	5,4	6,2	7,3	NA	NA	200
ClO3 (Chlorates)	BRGM	0,1	mg/l	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	NA	NA	NA
ClO4- (Perchlorate)	BRGM	0,5	µg/l	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	NA	NA	NA
Cd (Cadmium)	BRGM	0,01	µg/l	<LQ	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Cr (Chrome)	BRGM	0,1	µg/l	0.14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	50
Cu (Cuivre)	BRGM	0,1	µg/l	0.58	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Hg (Mercure)	BRGM	15	ng/l	17	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1000
Ni (Nickel)	BRGM	0,1	µg/l	2.17	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Pb (Plomb)	BRGM	0,05	µg/l	0.05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	50
SO4 (Sulfates)	BRGM	0,5	mg/l	23.3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.58	0.71	50
Sb (Antimoine)	BRGM	0,05	µg/l	0.06	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Zn (Zinc)	BRGM	0,5	µg/l	0.95	NA	78,8	82,1	103	47,9	13,6	6,78	2,16	5,8	2,09	12,5	27,0	5000

Tableau 39 : Tableau d'interprétation des échantillons d'eaux superficielles prélevés sur l'ensemble du diagnostic.

5.5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS SUR LES VÉGÉTAUX

Les analyses des deux échantillons de champignons prélevés le 24/09/14 ont montré la présence de plomb sur l'échantillon de la fosse n° 1 à une concentration au minimum 4 fois plus importante que celle mesurée sur l'échantillon témoin (< 10 mg/kg). Pour l'arsenic et le zinc, les concentrations mesurées dans les 2 échantillons sont dans la même gamme de valeurs.

Ces résultats montrent que le transfert entre les sols impactés vers la flore que l'accumulation du plomb dans les champignons sont possibles (le nombre d'échantillons est toutefois insuffisant pour en tirer une conclusion définitive).

5.6 CONCLUSION ET SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC ENVIRONNEMENTAL

5.6.1 Description du site et reconstitution de son mode d'exploitation

Les zones de pollution concentrées identifiées au droit et aux abords du site désigné par la « Place à gaz » se répartissent en 3 ensembles :

- la « **tache centrale** » formant la clairière de la « **Place à gaz** », de 80 x 80 m environ (pour une épaisseur des résidus de 5 à 20 cm environ) , à laquelle on rattache 2 dépôts de résidus, l'un de quelques dizaines de mètres carrés à 5 m à l'est de la lisière de la clairière et du périmètre clôturé, le second à l'extrême sud du périmètre clos, couvre une superficie d'environ 5 * 15 m ; le premier dépôt (de 5 cm d'épaisseur environ) est probablement issu d'un déblaiement / déplacement de matériaux provenant de la tache centrale, le second (de 5 à 15 cm d'épaisseur environ), localisé à l'emplacement de la voie ferrée d'amenée des obus, ayant possiblement été généré de la même manière et par l'entraînement par ruissellement des résidus depuis la tache centrale. Ces résidus noir à brun noir sont riches en éléments métalliques d'éléments de munitions, de scories d'aspect gras, de fragments charbonneux, localement associés à du laitiers de haut fourneau (ballast de l'ancienne voie de chemin de fer d'amené des obus) et des tessons de fioles d'arsines (chlorure et/ou cyanures de diphénylarsine) ;
- **une fosse (appelée « fosse nord-est »)** de 50 à 60 cm de profondeur et de 5 x 5 m de superficie environ, située à 5 m au nord-est de la clairière (et du périmètre clos), aménagée avec des linteaux de bois, et qui renferme des résidus noirs, d'aspect parfois gras et charbonneux, très riches en éléments métalliques et en fioles, bouchons et tessons de fioles d'arsines ;
- **Le « Dépôt nord »** situé à 50 m au nord de la clairière, qui couvre une superficie d'environ 15 x 30 m, pour une épaisseur variant de 5 à 15 cm. Ces résidus, brun à noir, sont riches en éléments métalliques ; ils reposent sur un lit de concassé calcaire.

Les analyses chimiques effectuées sur ces résidus, l'identification des éléments de munitions collectées, ainsi que la connaissance des pratiques d'élimination d'engins de guerre chimiques entre les deux guerres éclairent sur l'historique du site et sur les fonctions probables des 3 zones décrites ci-dessus.

La clairière de la « Place à gaz »

La pollution identifiée au droit de la « Place à gaz » (clairière) correspond à un **dépôt de déchets/résidus industriels issus d'opérations de brulage d'obus chimiques arséniés sternutatoires, allemands**, de calibre 77 mm, 77 mm allongé et 105 mm de type « *Croix bleue* » typiques de la fin de la Grande Guerre. D'autres obus chimiques allemands ont pu également être traités sur le site.

Ces obus sont issus d'un **dépôt d'au moins 200 000 projectiles**, stockés d'abord près de l'étang des Haut-fourneaux, de la ferme de la Gélinerie, puis dans le bois (du Blanc Etoç), à l'ouest du site de la « Place à gaz ». **Ces obus ont été éliminés entre 1926 et 1928 par la société F.N. Pickett & Fils**, selon des méthodes de **brûlage** développées dès 1920 au sein de cette entreprise par l'ingénieur militaire russe M. Kostevitch. Les opérations s'effectuaient en utilisant du bois, aspergé d'explosif, et des obus ouverts à l'œil, disposés en rangées. La « Place à gaz » est l'unique site connu comme ayant été exploité par F.N. Pickett & Fils en Lorraine, l'activité de cette entreprise en France ayant débuté en 1920 à Trélon-Liessie dans le département du Nord.

Ces brûlages, ont laissé sur le sol naturel, des résidus constitués de produits de décomposition thermiques des explosifs et toxiques de guerre (l'arsenic, les HAP arséniés, les triphényarsine, les dioxines et furannes), des traces des composés initiaux (TNT et leurs sous-produits de transformation environnementale, acide diphénylarsinique etc.) et les métaux qui constituaient ces munitions (zinc, cuivre, plomb, cadmium, etc.).

Après brûlage, les obus étaient enlevés, possiblement câffutés en vue de la revente des métaux, de même que les fioles et le verre résiduels. Les lieux où étaient « préparés » les obus (dé ceinturage, dévissage des ensembles fusées-gaine, etc.) n'ont pu être clairement identifiés (possiblement à proximité de la ferme de la Gélinerie).

La « fosse nord-est »

Les terrains formant l'assise de la fosse nord-est montrent un aspect rubéfié (rouge ocre, à brun-rouge) attestant que du brûlage a été réalisé dans la fosse et/ou que cette fosse a réceptionné des matériaux chauds issus du brûlage opéré sur la tache centrale ; toutefois, la singularité du chimisme des matériaux de la fosse (présence de fortes teneurs en plomb, brome lixiviable et composés organo-bromés) comparativement aux résidus identifiés par ailleurs, tend à montrer que cette fosse avait une fonction particulière : puits de brûlage et/ou de vidage d'obus autres que les obus à Croix bleue et/ou puits de brûlage des imbrûlés collectés après les opérations sur la tache centrale.

Le « Dépôt nord »

- la richesse de ces résidus en éléments de gaines, d'amorces, de fusées, associés à de nombreuses charnières, ainsi que l'occurrence de fortes teneurs en zinc, plomb et cadmium (avec une corrélation entre les teneurs en zinc et celles en cadmium) ;
- l'absence de tessons de fioles d'arsine ;
- la présence de teneurs élevées en dioxines et furannes ;

militent en faveur d'une aire de brûlage dédiée à la destruction des fusées et détonateurs, qui auraient pu fonctionner parallèlement à l'aire de la clairière de la « Place à gaz » plus spécifiquement consacrée au brûlage des corps des projectiles.

5.6.2 Contexte environnemental

Migration verticale et incidence potentielle sur la ressource en eau

Les 3 zones reposent sur une épaisse couche d'argile compacte (du callovo oxfordien), d'extension régionale, particulièrement protectrice en ce qui concerne les potentialités de migration des polluants vers la profondeur.

En ce qui concerne les métaux et métalloïdes, l'impact du dépôt de résidus se mesure jusqu'à 4 m de profondeur mais décroît très vite avec la profondeur, puisque plus de 90 % de la masse en arsenic est concentrée dans le premier mètre de terrain (résidus + sols pollués au contact du dépôt). Bien qu'ils soient relativement peu mobiles, les teneurs exceptionnellement élevée en métaux dans les résidus ont provoqué la saturation des

capacités d'adsorption des sols, ce qui explique la migration verticale constatée, même si elle doit être relativisée (la fraction en arsenic dans les sols entre 1 et 4 m ne représente que 10 % de la masse totale estimée d'arsenic). L'arsenic et le zinc présents dans les résidus de combustion sont les métaux les plus mobiles.

La mobilité des composés organiques est très faible compte tenu de leurs faibles solubilités (PCDD & PCDF) et de la richesse des résidus en fractions carbonneuses qui sorbent efficacement les composés.

Environ 100 m d'argile compacte du Callovien isolent les dépôts des premières couches de terrains potentiellement aquifères. Aucune venue d'eau significative n'a été observée en 2014 dans les 4 premiers mètres de terrain. **Les ressources en eau ne sont donc pas impactées par les polluants renfermés dans les résidus de combustion reposant sur le site de la « Place à gaz ».**

Extension latérale des dépôts et incidence sur l'environnement proche (hydrographie, sédiments, végétation)

En termes d'extension latérale, l'ensemble des résultats d'analyse et des mesures de terrain, montre que la zone la plus concentrée en résidus (arsenic notamment) dans les sols de surface (> 50 gAs/kg MS) est localisée en plein centre de la clairière et de la zone clôturée, qui englobe la majorité des sols montrant des teneurs supérieures à 1 000 mg As/kg MS), à l'exception de la fosse Nord-est et du plaquage de résidu situé immédiatement à l'est. À l'extérieur de cette zone close et de ses deux « satellite », les teneurs décroissent rapidement.

Les eaux superficielles drainant le site (ruisseaux en période de forte pluviométrie) ne font l'objet d'aucun usage connu.

Les résultats obtenus sur les échantillons d'eaux superficielles montrent que, pour les substances concernées, les concentrations sont toutes inférieures aux valeurs limites de potabilité définies dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (annexe III Limites de qualité des eaux douces superficielles utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine catégorie A3, I). Il s'agit de l'arsenic dissous, du chrome dissous, du mercure dissous, du plomb dissous, du zinc dissous et des chlorures.

Les sédiments présentent un marquage plus ou moins marqué en arsenic, plomb, chrome, cuivre, zinc par rapport au fond géochimique local ; toutefois les concentrations baissent rapidement pour rejoindre le fond géochimique local au-delà de quelques centaines de mètres.

De même les concentrations en dioxines et furannes décroissent rapidement au-delà de quelques centaines de mètres.

Les eaux de surface et leurs sédiments sont marquées par des traces en arsenic et en zinc au moment des épisodes pluvieux, mais ces concentrations se dispersent et s'atténuent très rapidement vers l'aval.

Les analyses comparées de deux champignons ont montré la présence de plomb sur l'échantillon de la fosse n° 1 à une concentration au minimum 4 fois plus importante que celle mesurée sur l'échantillon témoin (< 10 mg/kg). Pour l'arsenic et le zinc, les concentrations mesurées dans les 2 échantillons sont dans la même gamme de valeurs.

Ces résultats montrent que le transfert entre les sols impactés vers la flore que l'accumulation du plomb dans les champignons sont possibles (le nombre d'échantillons est toutefois insuffisant pour en tirer une conclusion définitive).

5.6.3 Bilan massique

Les masses estimées en arsenic sont de 15 à 16 tonnes (dont 800-900 kg dans le « *Dépôt nord* »).

Le volume de ces résidus peut être estimé à environ 1 500 - 1 600 m³ (dont 60 à 70 m³ dans le « *Dépôt nord* ») auxquels on peut ajouter environ 700 m³ correspondant aux 20 premiers centimètres de terrain naturel fortement pollués (> 1 gAs/kg MS) localisés sous les résidus de combustion de la tache centrale de la clairière.

La pollution par les métaux lourds et les dioxines & furannes est circonscrite à l'environnement immédiat des dépôts.

Les teneurs mesurées sont supérieures au fond géochimique local sur une partie de la zone étudiée (« *Place à gaz* », fosses satellites et « *Dépôt nord* ») pour les métaux et métalloïdes recherchés (arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb et zinc) et les dioxines et furannes (PCDD, PCDF, PBDD, PBDF, PCB-*dioxin like*).

Conformément aux textes de la méthodologie du 8 février 2007, il convient de réaliser, sur la base du diagnostic effectué, une **Interprétation de l'État des Milieux dans le but** :

- d'évaluer la compatibilité de l'état de ces sols avec l'usage constaté ;
- d'estimer en quoi les sols et résidus identifiés posent ou non un problème d'ordre environnemental et/ou sanitaire ;
- d'identifier des modalités de gestion pérenne du site et des résidus qui soient techniquement faisables et économiquement supportables, qui puissent satisfaire toutes les parties prenantes, permettant de limiter ou réduire les éventuels risques identifiés.

L'accès à la clairière formant la « *Place à gaz* » (la zone de pollution concentrée) est interdit par un Arrêté Préfectoral. Par ailleurs une ceinture continue de fil de fer barbelé (de type Anti-Intrusion Concertina) barre physiquement l'accès à la clairière.

6. Interprétation de l'État des Milieux (IEM) et orientations de gestion

6.1 CONTEXTE DE GESTION

Le contexte réglementaire et méthodologique de gestion des sites et sols pollués en France se base sur une approche spécifique, au cas par cas et selon les usages, et non pas sur des valeurs réglementaires et génériques de gestion pour les sols.

Les teneurs mesurées dans les sols au droit et aux abords de la « Place à gaz » ont donc été comparées au fond géochimique local (pour les métaux et métalloïdes et les dioxines et furannes, composés pour lesquels un fond géochimique local existe), afin de vérifier si la qualité des sols s'écarte ou non de l'état normal, non perturbé, de ce milieu.

Dans les cas où la dégradation du milieu est avérée, il est nécessaire de vérifier la compatibilité du milieu sols avec les usages actuels et futurs, via une Interprétation de l'État des Milieux (IEM).

En absence de valeurs réglementaires ou de référence qualifiant la compatibilité des sols avec un usage donné, cette évaluation est menée *via* un calcul des expositions et des risques, dénommé EQRS (« *Évaluation Qualitative des Risques Sanitaires* »). Ces niveaux de risques sont ensuite comparés à des jalons qualifiant l'acceptabilité ou non du risque calculé. Enfin, ces calculs mettent en jeu des valeurs et des paramètres qui se veulent toujours sécuritaires et conservatoires compte tenu des incertitudes subsistant sur la toxicologie et les effets sur l'homme des composés.

Dans le cas où l'IEM montre une incompatibilité entre le milieu et les usages qui en sont faits, des mesures de gestion doivent alors être mises en place afin de rétablir cette compatibilité. Ces mesures de gestion pérennes sont choisies, dimensionnées et mises en place dans le cadre d'une action désigné par « *Plan de Gestion* ». Plan de Gestion et IEM sont cadrés par les recommandations de la Note au Préfet (et ses annexes) du Ministère de l'Écologie du 08 février 2007.

6.2 ÉVALUATION QUALITATIVE DES RISQUES SANITAIRES (EQRS)

6.2.1 Méthodologie

On distingue deux types de relations entre la dose d'exposition et les effets induits par ces dernières sur la Santé humaine. Un composé peut présenter pour une même voie d'exposition ou deux voies d'exposition différentes, l'un ou les deux modalités d'effets. Ces effets sont systémiques, c'est-à-dire que les organes affectés ne sont pas nécessairement ceux à l'origine de l'exposition. Les expositions considérées sont dites chroniques : de faibles doses mais répétées sur de longues périodes de temps (à compter de 6 mois d'exposition).

6.2.2 Substances à effets de seuil

Pour les substances à effets de seuil, on considère que la survenue d'un effet néfaste sur la Santé dépend du dépassement d'un seuil de dose dans l'organisme, appelé la dose journalière admissible (DJA, en $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$) qui est la VTR (Valeur Toxicologique de Référence) spécifique, pour un composé donné, pour les effets toxiques. Les effets sont réversibles (avec l'arrêt de l'exposition) et, une fois la dose dépassée, plus le dépassement est grand plus la gravité de l'effet est sévère.

L'évaluation des risques sanitaires se fait *via* un quotient de danger (QD), qui est le rapport entre l'exposition d'une personne à une substance (Dose Journalière d'Exposition (DJE) et la VTR pour la voie d'exposition considérée.

$$QD = \frac{DJE}{VTR}$$

Où DJE est la Dose Journalière d'Exposition (en $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$).

6.2.3 Substances sans effets de seuil

Pour les substances sans effets de seuil, on considère que les effets néfastes sur la Santé peuvent survenir quelle que soit la dose d'exposition (substances cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques).

Le risque pour la santé est alors exprimé en probabilité supplémentaire de survenue d'un effet (par rapport à un individu non exposé), au cours de la vie entière d'un individu. À très faible dose, cette probabilité est considérée comme proportionnelle à la dose absorbée (relation linéaire entre la dose et l'effet). Les effets sont irréversibles.

L'estimation du risque sanitaire pour les substances sans seuil est exprimée par un Excès de Risque Individuel (ERI) :

$$ERI = DJE \times ERU$$

Où DJE est la Dose Journalière d'Exposition (en $\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$).

ERU est l'excès de risque individuel (ou VTR) (en $[\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}]^{-1}$).

6.2.4 Critères d'évaluation de l'acceptabilité des risques

Les critères (bornes de comparaison) retenus pour qualifier l'acceptabilité ou non des risques calculés sont présentés dans le diagramme suivant, qui fixe par ailleurs les positions à tenir selon la position du risque calculé par rapport aux 2 bornes d'interprétation.

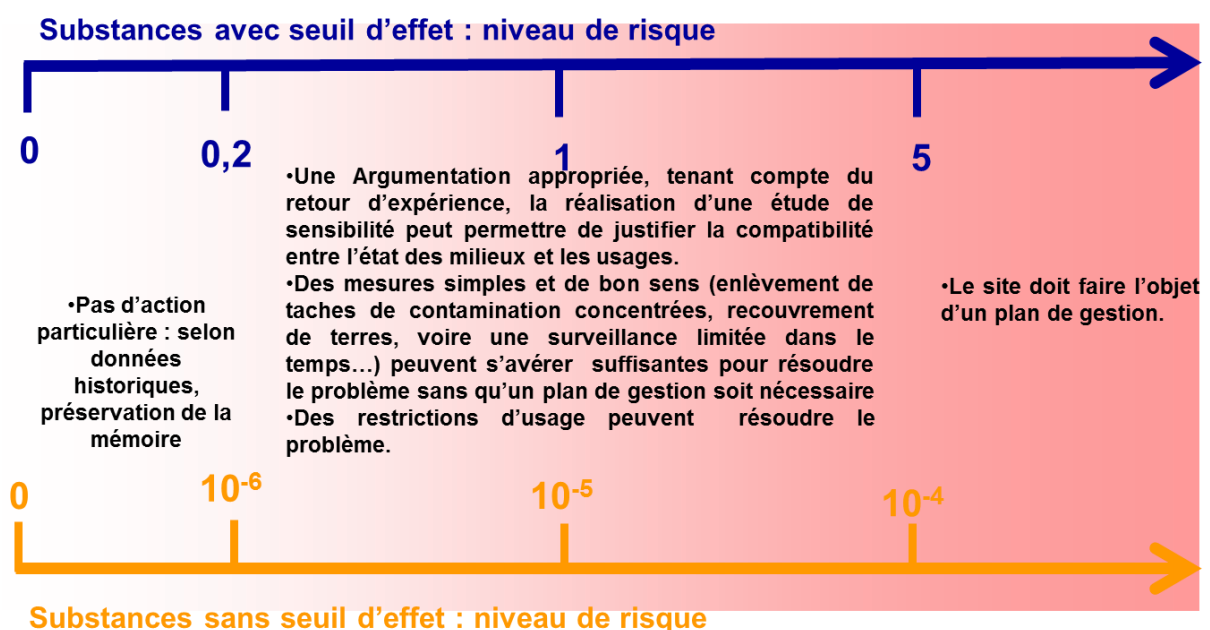


Figure 68 : Critères d'évaluation de l'acceptabilité des risques (source : Ministère de l'Écologie).

6.2.5 Milieux d'exposition et usages considérés

a) *Analyse des enjeux sur les ressources en eau et les eaux superficielles*

L'étude du contexte géologique et hydrogéologique et les résultats du diagnostic ont montré que :

- la « Place à gaz » est implantée au droit des argiles de la Woëvre du Callovien, qui atteignent dans la zone près de 100 m d'épaisseur. Les calcaires du Bathonien (« Dalle d'Étain ») sous-jacents, qui sont aquifères, sont donc bien protégés ;
- si les argiles sont essentiellement imperméables, elles peuvent aussi favoriser l'installation d'un réseau non structuré de niveaux d'eau potentiellement temporaires et discontinus à certaines périodes entre 1 et 2 m de profondeur au droit de la Place (Bausinger, 2009). Ces réseaux n'ont pas été observés lors des différentes phases d'investigations, et notamment celles réalisées en octobre 2014, période relativement pluvieuse ;
- la migration verticale des polluants identifiés dans les résidus de combustion reste limitée dans les 4-5 premiers mètres d'argile et principalement dans le premier mètre (ceci 100 ans après la fin de l'utilisation du site) ;
- la migration horizontale est également limitée vers les autres milieux (sédiments et eaux superficielles) puisque l'impact mesuré s'arrête vers 500 m en aval.

L'ensemble de ces éléments montre que les **eaux souterraines présentes au droit de la « Place à gaz » ne sont pas vulnérables aux polluants formant les résidus de brûlage** de la clairière, des fosses satellites et du « Dépôt nord ». En effet, la protection de la nappe d'eaux des calcaires de la Dalle d'Étain est protégée par l'épaisse couverture argileuse très peu perméable. **Vis-à-vis des eaux souterraines, aucune mesure de gestion n'apparaît nécessaire.**

Concernant plus spécifiquement les eaux de surface (et leurs sédiments), un impact modéré et limité à l'aval immédiat du site a été constaté pour les eaux de surface, lors des épisodes pluvieux et de fort ruissellement (impact temporaire, occasionnel). Cet impact se traduit par la présence de traces d'arsenic et de zinc dissous. Les sédiments ont par ailleurs imprimé un marquage par les dioxines & furannes (lié certainement à l'entraînement de matière organique particulaire ayant sorbé les PCDD & PCDF). Toutefois, aucun usage de ces milieux n'a été identifié ; **il s'agit donc de milieux légèrement anomaux, sans usages, pour lesquels aucune mesure de gestion ne se justifie.**

b) *Analyse des enjeux concernant le milieu sol de surface*

La « Place à gaz » et les dépôts satellites identifiés sont isolés en milieu forestier. Le site et son environnement sont toutefois accessibles par les chemins forestiers carrossables qui sont fréquentés en toutes saisons par des promeneurs occasionnels et des ramasseurs de champignons, au cours de la saison automnale. Le milieu sol de surface constitue donc potentiellement un milieu au contact duquel ces populations peuvent être occasionnellement exposées. Ainsi, le scénario d'exposition le plus plausible pris en compte dans le cadre de l'analyse des risques et de l'IEM est un scénario de type « *promenade familiale* » sur la base d'une périodicité mensuelle (1 jour par mois) avec un temps de présence dans la zone concernée de 1 heure par jour et en considérant que cette famille comprend un enfant qui va participer systématiquement à ces promenades pendant les 6 premières années de son enfance. Ce scénario intégrant un enfant est volontairement retenu, de façon sécuritaire, puisqu'il représente la population la plus sensible.

Les voies d'exposition pertinentes retenues dans le cadre de ce scénario sont les suivantes :

- ingestion occasionnelle et non intentionnelle (porté main-bouche) de sols et de poussières de sols, sur lesquels seraient adsorbés les polluants (cas de l'enfant en bas âge) ;
- ingestion de végétaux et notamment de champignons (promeneurs) ou d'animaux (chasseurs).

La voie d'exposition percutanée, au contact des sols, n'a pas été retenue conformément aux recommandations de la note d'information de la DGS N° DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 (relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre des études d'impact et de la gestion des sites et sols pollués) et compte tenu de l'absence de Valeurs Toxicologiques de Références (VTR)⁵² spécifiques à cette voie pour les substances considérées.

6.2.6 Composés et teneurs d'exposition retenus

Les composés retenus sont ceux pour lesquels les teneurs mesurées sont supérieures aux valeurs de référence (fond géochimique local) et qui possèdent une VTR pour la voie et le type d'exposition retenus (exposition chronique par voie orale). Il s'agit de l'arsenic, du plomb, du zinc, du mercure, du cadmium, des PCDD & PCDF. D'autres composés mesurés dans les sols superficiels, à savoir les composés pyrotechniques, les résidus de toxiques de guerre et les dioxines et furannes bromées ne sont pas pris en compte en l'absence de VTR. Le risque calculé est donc minorant.

Le Tableau 40 présente les principaux résultats en métaux, métalloïdes, dioxines et furannes obtenus dans les sols superficiels.

Les teneurs retenues dans le cadre du calcul de risques sont les moyennes mesurées pour chacun des composés retenus. Ce choix permet de rendre compte d'une exposition aux sols de surface d'une personne en mouvement (et non statique) évoluant sur la surface considérée.

Les teneurs d'exposition sont présentées dans le Tableau 41. À titre conservatoire, les teneurs des sols situés au sein du périmètre clos ont été considérées pour le calcul de la teneur d'exposition.

⁵² Valeurs permettant d'établir la relation entre la dose d'exposition (la quantité de polluant intégrée à l'organisme par unité de poids corporel sur la durée de l'exposition) et ses effets sur la Santé

	Unité	Teneur moyenne retenue
Tache centrale (périmètre clos)		
Arsenic	mg/kg	14 429
Cadmium	mg/kg	45
Mercure	mg/kg	7
Plomb	mg/kg	34 920
Zinc	mg/kg	10 576
PCDD&PCDF	ng TEQ/kg/j	4 806
Environnement proche de la « Place à gaz »		
Arsenic	mg/kg	261
Cadmium	mg/kg	1
Mercure	mg/kg	0.389
Plomb	mg/kg	129
Zinc	mg/kg	394
PCDD& PCDF	ng TEQ/kg/j	54

Tableau 40 : Teneurs d'exposition retenues pour l'EQRS. Paramètres d'exposition retenus.

Le scénario d'exposition pris en compte dans le cadre de cette étude considère un scénario promenade, 1 heure par jour, 1 jour par mois, pour des adultes, mais aussi un jeune enfant pendant les 6 premières années de l'enfance (période durant laquelle le « *porter main - bouche* » est le plus vraisemblable). Étant donné qu'il s'agit d'une fréquentation occasionnelle, la quantité ingérée par un enfant retenue dans le cadre de cette étude est de 24 mg/j, soit la médiane de la distribution préconisée par l'InVS et l'INERIS⁵³.

6.2.7 Choix des VTR

Le choix des VTR a été effectué conformément aux recommandations précisées dans la Circulaire du 31 octobre 2014.

En l'absence de VTR pour le contact cutané, et conformément aux recommandations de la circulaire du 31 octobre 2014, le risque pour cette voie d'exposition ne peut être déterminé.

Pour le plomb, l'ANSES⁵⁴ retient, dans son rapport de janvier 2013 sur les « *Expositions au plomb : effets sur la santé associés à des plombémies inférieures à 100 µg/L* », une plombémie critique de 15 µg/L (et non 12 µg/L comme le HCSP⁵⁵). Cette valeur est exprimée en dose interne. Dans ce même avis, l'ANSES propose une méthode de détermination de la dose externe, qui sera utilisée dans le cadre de cette étude pour le calcul d'exposition via l'ingestion de sols, définie selon laquelle « *une exposition journalière à une concentration de plomb pour la voie orale (en supposant que l'exposition par contact avec le sol est négligeable) de 0,63 µg/kg de poids corporel par jour, entraînerait une plombémie de 15 µg/L.* »

⁵³ Selon le Guide pratique des « Quantités de terre et de poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants », INERIS, InVS, 2012

⁵⁴ ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, Alimentation, Environnement, Travail

⁵⁵ HCSP : Haut Conseil de la Santé Publique, Détermination de nouveaux objectifs de gestion – synthèse et recommandations, juin 2014

6.2.8 Détermination de l'exposition et calcul des risques

a) Exposition par ingestion non intentionnée de sols

L'évaluation de l'exposition par ingestion a été réalisée à partir de la grille IEM du Ministère de l'Écologie. Les grilles de calcul pour l'ensemble des substances considérées sont présentées dans le Tableau 41. Ce tableau présente les résultats d'exposition pour le scénario d'ingestion de sols considéré.

Scénario ingestion de sols	Teneurs de la substance dans le sol / mesures du diagnostic	Indices de risque calculés	
	mg/kg sol	Quotien de Danger	Excès de Risque Individuel (ERI) / sans seuil
Moyenne Tâche centrale			
Arsenic	18 000	2,92	1,13E-04
Plomb	34920	3,36	-
Zinc	28 000	2,14E-03	-
Cadmium	52	7,66E-03	-
Mercuré	10	4,13E-03	-
PCDD & PCDF	4806	0,42	-
1,2,3,6,7,8-HxCDD + 1,2,3,7,8,9-HxCDD	1,03E-03	-	3,33E-08
Moyenne Environnement proche de la Place à gaz			
Arsenic	100	5,29E-02	2,04E-06
Plomb	129	1,24E-02	-
Zinc	130	7,97E-05	-
Cadmium	<0,5	2,29E-04	-
Mercuré	0,200	2,36E-04	-
PCDD & PCDF	54	4,68E-03	-

Tableau 41 : Résultats de l'exposition pour le scénario d'ingestion de sols.

Les calculs d'exposition montrent que les Quotients de Danger pour l'arsenic, le plomb et les dioxines et furannes sont supérieurs à 0.2 et que le Quotient de Danger global est supérieur à 1.

Par ailleurs, l'ERI calculé est supérieur à la borne supérieure (10^{-4}) de la grille d'interprétation pour les effets sans seuil.

Les risques liés à l'ingestion de sols sont donc inacceptables si l'on considère l'ensemble du site.

Les mêmes calculs, menés en considérant la moyenne des teneurs mesurées en dehors du périmètre clos de la « Place à gaz » (c'est-à-dire en excluant les sols de la zone clôturée) montrent que les Quotients de Danger pour chaque substance sont inférieurs à 0.2 et que l'ERI est proche et légèrement supérieur à la borne inférieure de la grille d'interprétation pour les effets sans seuil.

Les risques liés à l'ingestion de sols sont donc acceptables si l'on exclut la zone clôturée.

Les teneurs résiduelles des sols de surface (100 -1000 mg As/kg MS) hors de la zone clôturée et interdite d'accès sont acceptables ou conduisent à des risques résiduels calculés incertains par rapport au scénario d'usage considéré (promenade familiale récurrente avec de jeunes enfants).

Ce calcul valide donc le périmètre clôturé en date de janvier 2016.

b) Exposition par ingestion de végétaux

Les données disponibles ne sont pas suffisantes (une seule analyse sur matière sèche a pu être réalisée sur des champignons) pour établir un scénario pertinent pour évaluer l'exposition des cueilleurs par ingestion de végétaux.

Compte tenu des risques liés à l'ingestion de sols calculés, qui nécessitent que des mesures de gestion soient mises en œuvre, il n'a pas été jugé nécessaire d'approfondir l'exposition par ingestion de végétaux.

6.2.9 Analyse des incertitudes

Les résultats obtenus doivent être discutés, notamment vis-à-vis des différentes incertitudes associées à l'évaluation du risque.

Une évaluation des incertitudes est présentée, selon les différentes sources d'incertitudes identifiées.

Le risque pour la santé, pour le cas de l'ingestion de sols et de poussières de sols a été estimé en considérant que les résidus de combustion présents en surface étaient directement accessibles. Ce qui n'est pas le cas pour l'ensemble des sols puisqu'une partie est clôturée. Il s'agit donc là d'une hypothèse très majorante.

Le choix des substances retenues pour les calculs de risque est fondé en considérant d'une part des toxicités intrinsèques des composés présents dans les sols et d'autre part des niveaux de teneurs des polluants identifiés sur le site. Les effets sur la santé de certains composés identifiés sur le site ne sont soit pas connus soit pas quantifiés par une VTR. Ainsi, l'évaluation du risque, menée sans prise en compte de ces composés induit potentiellement une sous-estimation du niveau de risque. Néanmoins, la sélection des substances prises en compte dans le cadre de cette étude de risques est suffisamment large pour caractériser le niveau de risque le plus significatif.

Les teneurs en polluants considérés dans les sols n'étant pas homogènes au droit de la « Place à gaz » ou dans son environnement, les teneurs retenues pour l'évaluation du risque sont les teneurs moyennes. Les teneurs maximales dans les sols n'ont pas été prises en compte, pour palier au fait qu'il a été considéré que l'ensemble des sols était accessible par les promeneurs (alors que le site est partiellement clôturé) et pour tenir compte du fait que les promeneurs sont en mouvement sur l'ensemble du site et non pas statiques.

En l'absence de VTR pour le contact cutané, et conformément aux recommandations de la circulaire du 31 octobre 2014, le risque pour cette voie d'exposition n'a pu être déterminé.

Des incertitudes existent concernant le choix de la durée d'exposition choisie (1 heure par jour, 1 jour par mois, 6 années de l'enfance). Cette durée d'exposition peut être considérée comme majorante car elle considère que les mêmes promeneurs fréquentent la même zone forestière à chaque promenade, et qu'ils sont accompagnés à chaque fois du même enfant pendant sa période 0 à 6 ans) ce qui est peu vraisemblable.

7. Synthèse & conclusions

7.1 CONCLUSIONS DE L'EQRS

Au regard, des données relatives à la qualité des sols, des hypothèses et des éléments de calcul retenus, les risques calculés sont inacceptables pour le scénario retenu. Le risque est porté par l'arsenic et ses effets cancérigènes (VTR très basse) ; cet excès de risque est lié aux teneurs exceptionnellement élevées du site en arsenic, élément considéré de façon sécuritaire comme totalement assimilable par l'organisme.

Cette conclusion doit être pondérée par les incertitudes majeures liées d'une part à la présence dans les sols de substances et composés dont les effets potentiels sur la santé humaine ne sont pas connus (et n'ont pu être intégré aux calculs), mais aussi au caractère très pénalisant (voire peu vraisemblable) du scénario d'usage considéré et des durées d'exposition associées.

Par ailleurs, il faut souligner que **les teneurs à l'origine du dépassement du critère d'acceptabilité du risque sont celles des sols localisés au sein du périmètre clos** (en date de janvier 2016).

Il apparaît donc d'une part que **la mise en place d'un périmètre d'interdiction d'accès et la localisation de la clôture sont des dispositions pertinentes et d'autre part, qu'à l'extérieur de ce périmètre, les teneurs résiduelles des sols de surface de 100 - 1 000 mg As/kg MS sont acceptables ou conduisent à des risques résiduels calculés incertains.**

Au vu des résultats de l'évaluation des risques calculés, pour les substances à effet connu sur la santé, des incertitudes inhérentes à la présence de nombreuses substances d'effet inconnu et de l'impact (modéré) constaté du site sur le milieu des eaux de surface, **le BRGM préconise la réalisation de mesures visant à réduire ou à supprimer les risques et globalement à améliorer la situation environnementale du site et de ses abords.**

Cette démarche d'amélioration de la qualité des milieux est cohérente avec la position du Ministère de l'Écologie en termes de stratégie de gestion des sites et sols pollués.

7.2 MESURES ET ORIENTATIONS DE GESTION

7.2.1 Rappel

La réalisation d'un Plan de Gestion du site de la « Place à gaz » ne figure pas dans le mandat confié par la Préfecture de la Meuse au BRGM. Toutefois, afin de donner aux acteurs parties prenantes de la gestion de ce site, des éléments de visibilité sur le devenir de la « Place à gaz », le BRGM a réalisé une analyse technique et économique exploratoire et préliminaire portant sur les grands types de mesures de gestion pérenne du site qui pourraient être envisagées.

7.2.2 Orientations de gestion

Dans le Tableau 42 suivant, ont été identifiées (par colonne) toutes les solutions qui paraissent techniquement pertinentes, depuis la plus simple (laisser le site en l'état), jusqu'à la plus complexe (excavation de toutes les terres et matériaux pollués et leur évacuation vers des centres de traitement et de stockage définitif spécialisés).

Ensuite, différents critères d'évaluation des solutions (par ligne) ont été considérés, de manière permettre une analyse comparée de ces mesures de gestion en considérant l'État de l'Art, les ordres de grandeurs des coûts en vigueur (2015), les meilleures technologies disponibles et l'expérience de l'équipe Sites, Sols, sédiments Pollués du Centre technique du BRGM à Orléans.

Les objectifs des mesures de gestion consistent à :

- **supprimer les possibilités de contact éventuelles entre les promeneurs et les matériaux (« sols ») qui présentent les plus fortes concentrations (plus de 1 000 mg As/kg MS) ;**
- **réduire ou supprimer les possibilités de ruissellement et d'entraînement des polluants vers les eaux superficielles et leurs sédiments ;**
- **s'inscrire globalement dans une approche d'amélioration de l'état des milieux.**

Parmi l'ensemble de mesures de gestion envisagées, celle qui permet, à ce stade de réflexion, de satisfaire aux objectifs fixés, dans des conditions techniques maîtrisées et un cadre économique supportable pour la collectivité et constitue donc à ce titre une mesure proportionnée au site et à ses enjeux, consisterait à rassembler au droit de la clairière centrale les dépôts et matériaux périphériques puis à les confiner sous une couverture pérenne et imperméable similaire à celle mise en place pour les centres de stockage de déchets. Une clôture pérenne de cette zone, associés à une servitude, viendraient compléter le dispositif. Dans le moyen et le long terme, Il conviendrait d'assurer l'entretien du site (clôture, végétation).

Ces dispositions permettraient d'empêcher l'infiltration des eaux (la couverture serait étanche), d'éviter l'entraînement des particules par ruissellement vers le réseau hydrographique proche) et d'empêcher tout contact avec les promeneurs (la clôture interdisant l'accès au site, et la couverture étanche tout contact direct).

Sur un plan opérationnel et pratique, il s'agirait de décaper 50 à 70 cm de matériaux et de sol pollués, pour ne laisser en place en surface que des sols présentant des concentrations inférieures à 1 000 mg As/kg MS. Ces mouvements de matériaux concerneraient tout ou partie du « *Dépôt nord* », les dépôts et fosses périphériques et les franges de la clairière (bordure de la tache centrale). Les volumes à déplacer à considérer dépendent étroitement du design du dispositif de capping qui reste à dimensionner.

Les sols laissés en place (terrain naturel) seraient recouverts par de la terre saine et forestière rapportée d'une zone proche du site ce qui permettrait d'une part de prévenir tout risque de contact (même si ces sols ne posent pas de problème au plan sanitaire) et d'autre part de favoriser la revégétalisation du site. Certaines plantes arseno-résistante, bioaccumulant l'arsenic (notamment les fougères), pourraient être utilisées pour refunctionaliser les sols. Une Servitude actera la présence de ces pollutions résiduelles. Le confinement sera interdit d'accès par une clôture pérenne et par affichage d'un Arrêté Préfectoral restreignant l'accès.

Les coûts d'opération (hors maintenance et entretien des alvéoles) seraient compris entre 200 k€ et 300 k€. Ces évaluations de première approche seront à affiner après un dimensionnement ad hoc du dispositif.

Critère	Place à Gaz en l'état / clôture provisoire	Place à Gaz en l'état / clôture pérenne	Couverture par des terres saines sur grillage avertisseur	Décapage des résidus des dépôts périphériques et des abords de la Tache centrale / alvéole de confinement sur site / clôture restreinte / refunctionalisation des sols	Décapage des résidus des dépôts périphériques et des abords de la Tache centrale et des fortes teneurs des sols / alvéole de confinement sur site / clôture restreinte	Décapage des résidus des dépôts périphériques et des abords de la Tache centrale / évacuation pour incinération	Décapage des résidus des dépôts périphériques et des abords de la Tache centrale / évacuation pour stabilisation et stockage ISDI
Efficacité (protection de l'environnement / amélioration de la situation environnementale)	☹☹	☹☹	☹	☺	☺	☺	☺
Efficacité (réduction / suppression des expositions)	☹☹	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Socio politique (acceptation par les tiers)	☹☹☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺
Coûts	☺	☺	☹	☹	☹☹	☹☹☹	☹☹☹
Pérenité de la mesure de gestion	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺
Adéquation avec les bonnes pratiques et méthodologie MEDDE	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺
				seuils portant sur la fraction extraite de l'éluat, exprimée en mg/kg de déchet stabilisé sec			As < 25 mg/kg ;
				Arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux			Pb < 50 mg/kg
							Zn < 200 mg/kg

Tableau 42 : Options de gestion des sols et matériaux du site de la « Place à gaz ».

Parmi les grands principes de gestion envisagés, un focus peut être fait, à divers titres, sur les mesures de gestion suivantes :

- l'excavation et l'évacuation hors site vers un lieu de stockage / confinement extérieur au site lui-même, par exemple vers un terrain dont l'État aurait la maîtrise foncière, constitue une variante coûteuse de la solution mise en avant (transport et construction des alvéoles de confinement), et dont la mise en œuvre nécessiterait que des aspects juridique (statut du stockage ?) soient étudiés ;
- l'excavation et le traitement hors site des terres (incinération, stabilisation / solidification et stockage final en installation de stockage de déchets dangereux nécessiterait de mobiliser des moyens économiques de l'ordre de 5 à 7 millions d'euros (à hauteur de 1 000 à 1 500 € HT/tonne de matériaux à traiter et à stocker) pour un bilan environnemental global qui pose question par rapport aux enjeux.

La Figure 69 page suivante est un schéma de principe illustrant l'orientation de gestion privilégiée par le BRGM.

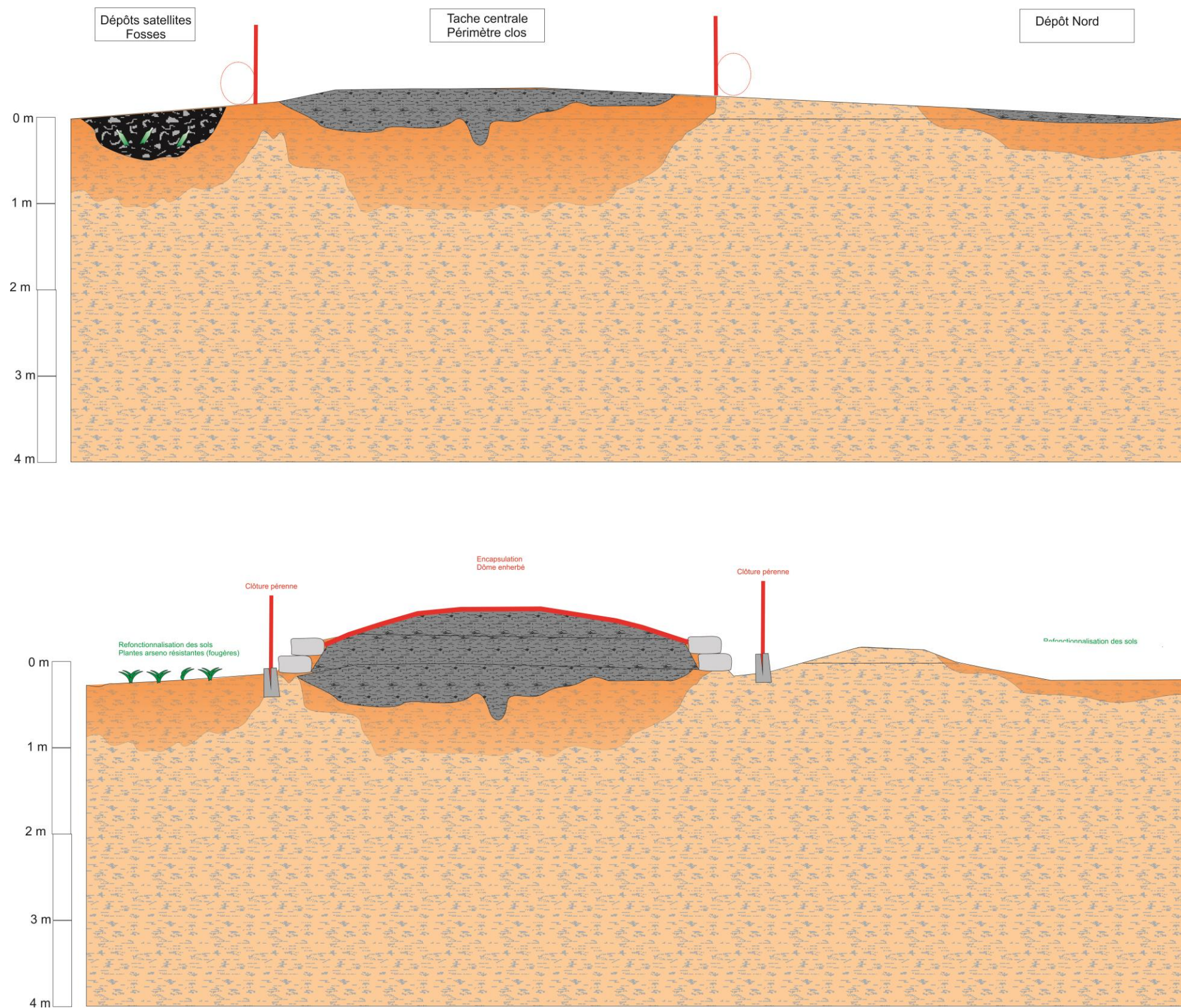
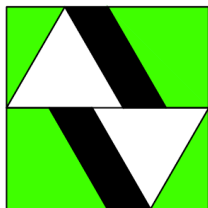


Figure 69 : Schéma de principe du « capping ».

Annexe 1

Plan topographique de la « *Place à gaz* » et de ses abords



Thierry
DEHOVE

GEOMETRE-EXPERT

28 Avenue du Général De Gaulle
54800 CONFLANS-EN-JARNISY
Tél. 03.82.33.08.10 – Fax 03.82.33.28.84
Mail : scpdehove@wanadoo.fr

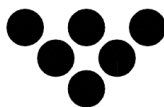
15 Rue Victor Schleifer
55100 VERDUN
Tél. 03.29.86.69.32 – Fax 03.29.86.12.98
Mail : scpdehove55@wanadoo.fr

COMMUNE DE GREMILLY

Place à gaz

PLAN TOPOGRAPHIQUE

Planimétrie rattachée en CC49



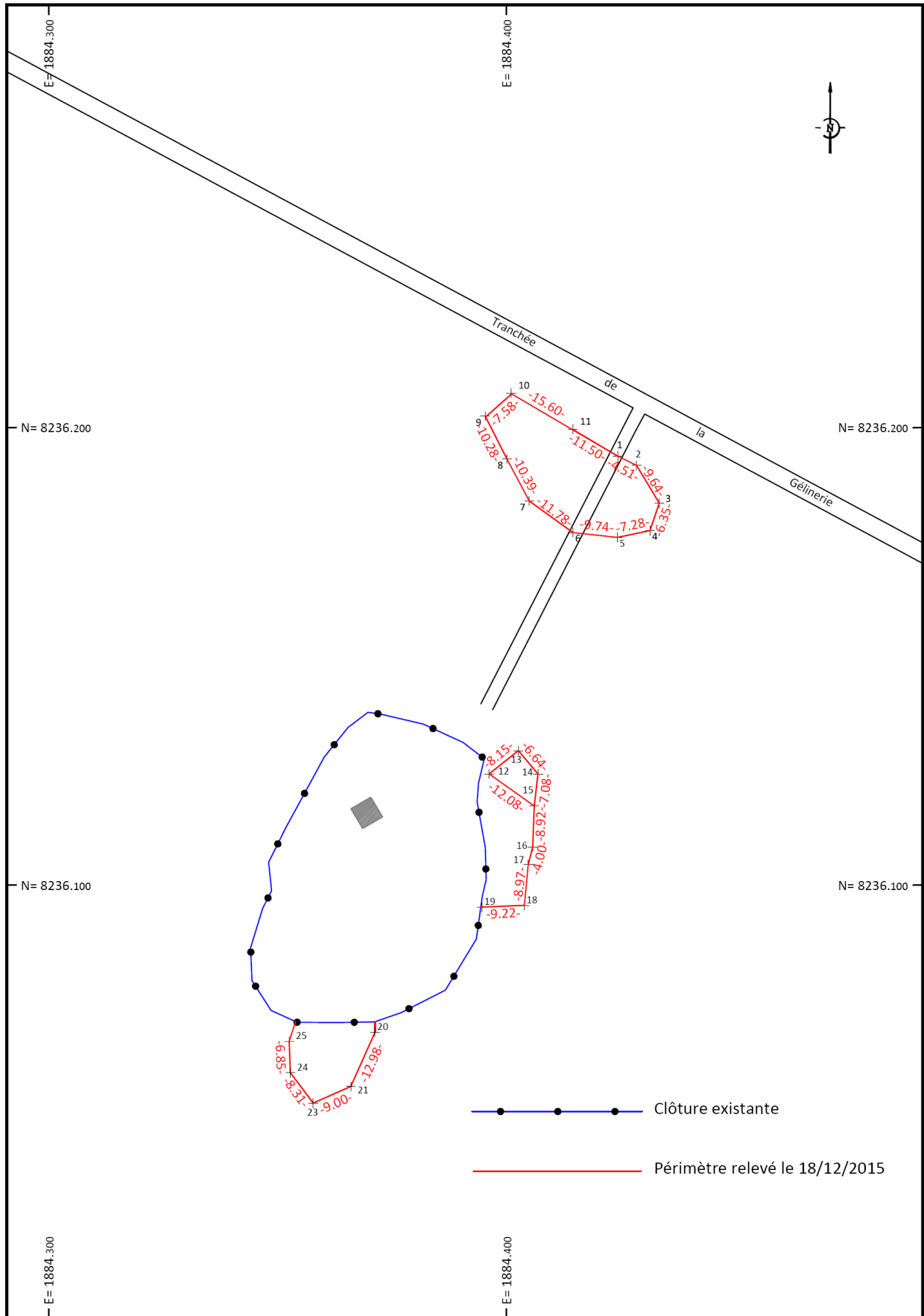
ECHELLE : 1/1000



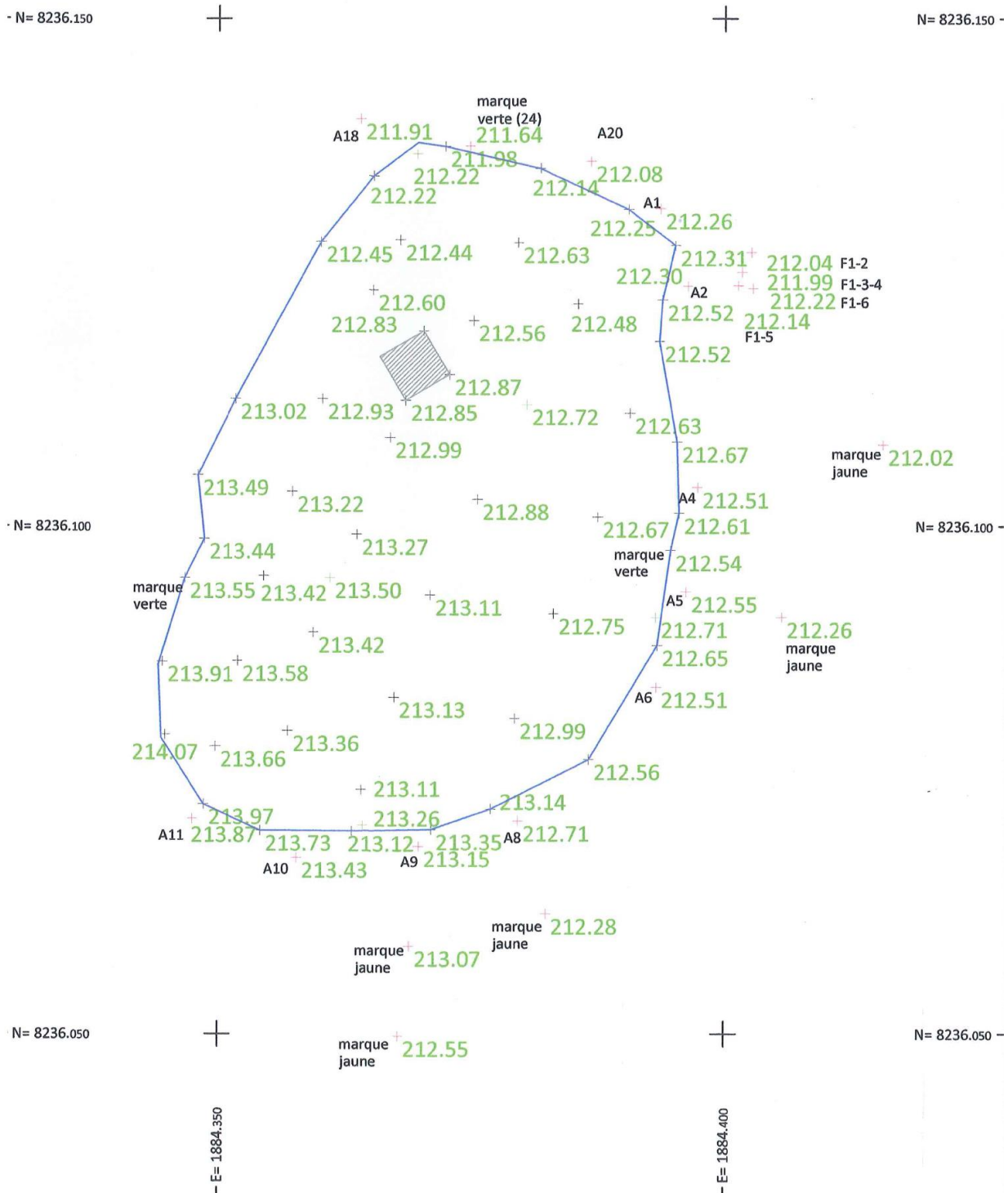
Référence

1	1	4	0	5	7	6	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
 Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux.

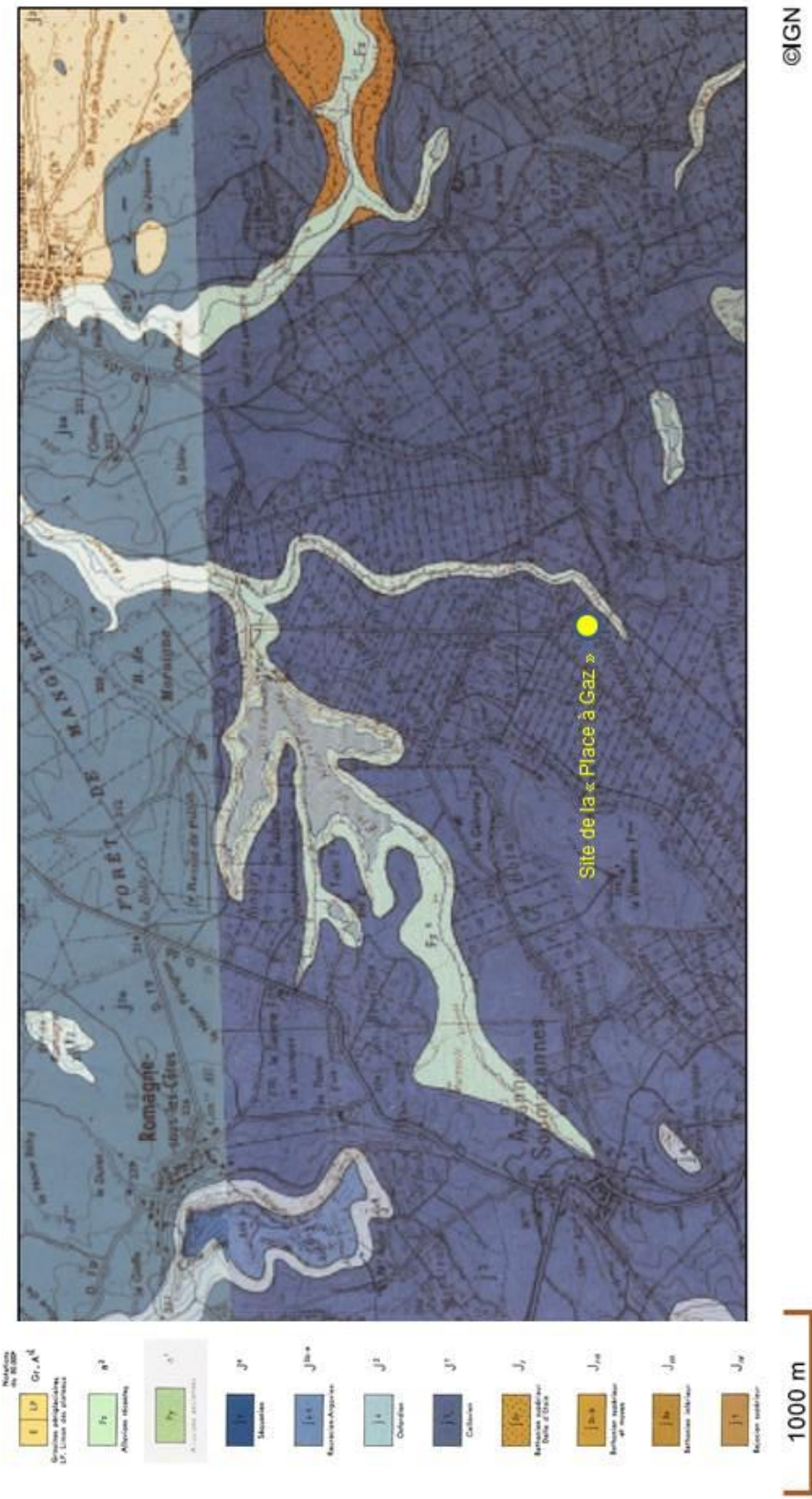


Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux



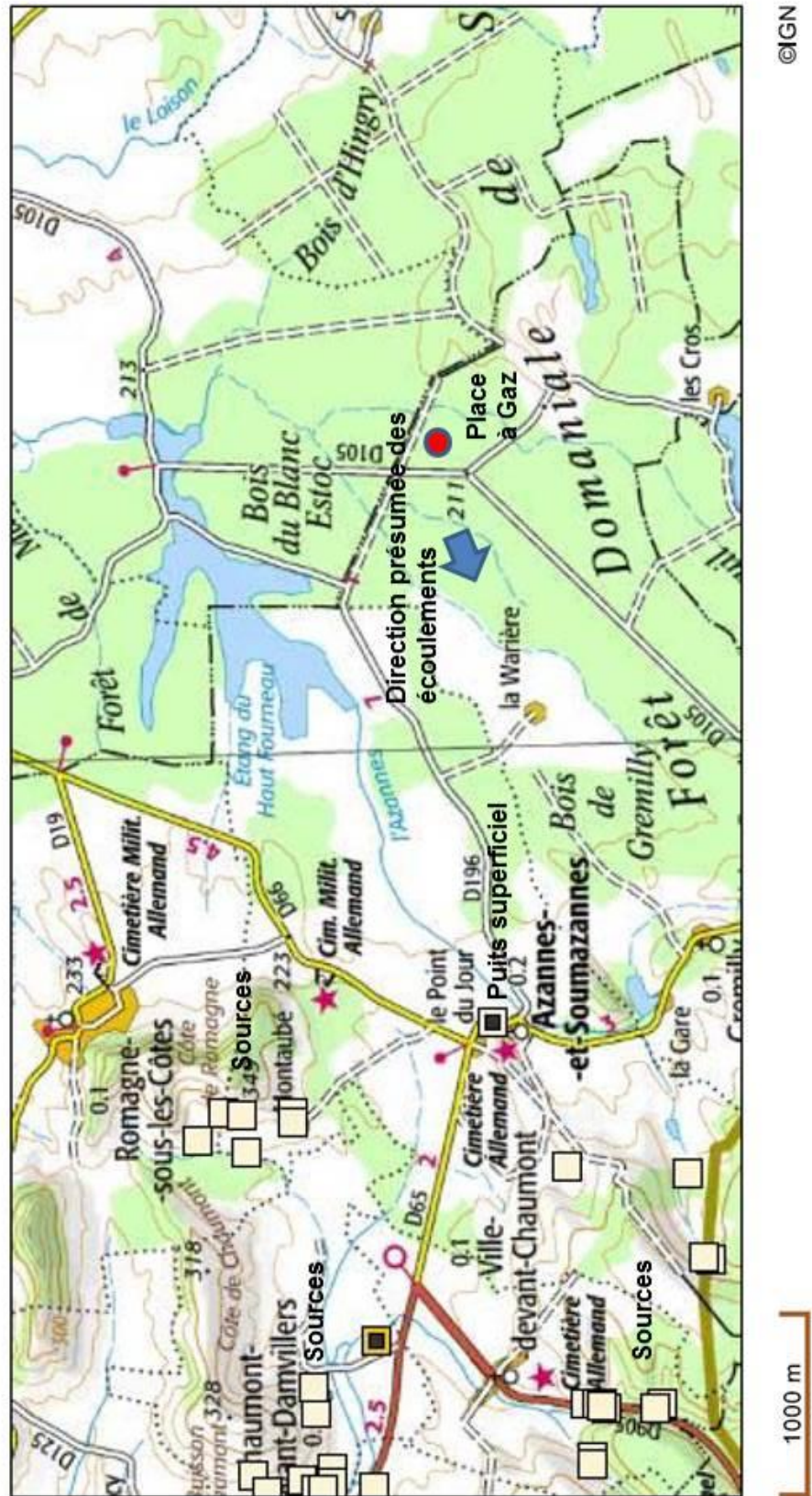
Annexe 2

Extrait de la carte géologique au 1/50 000



Annexe 3

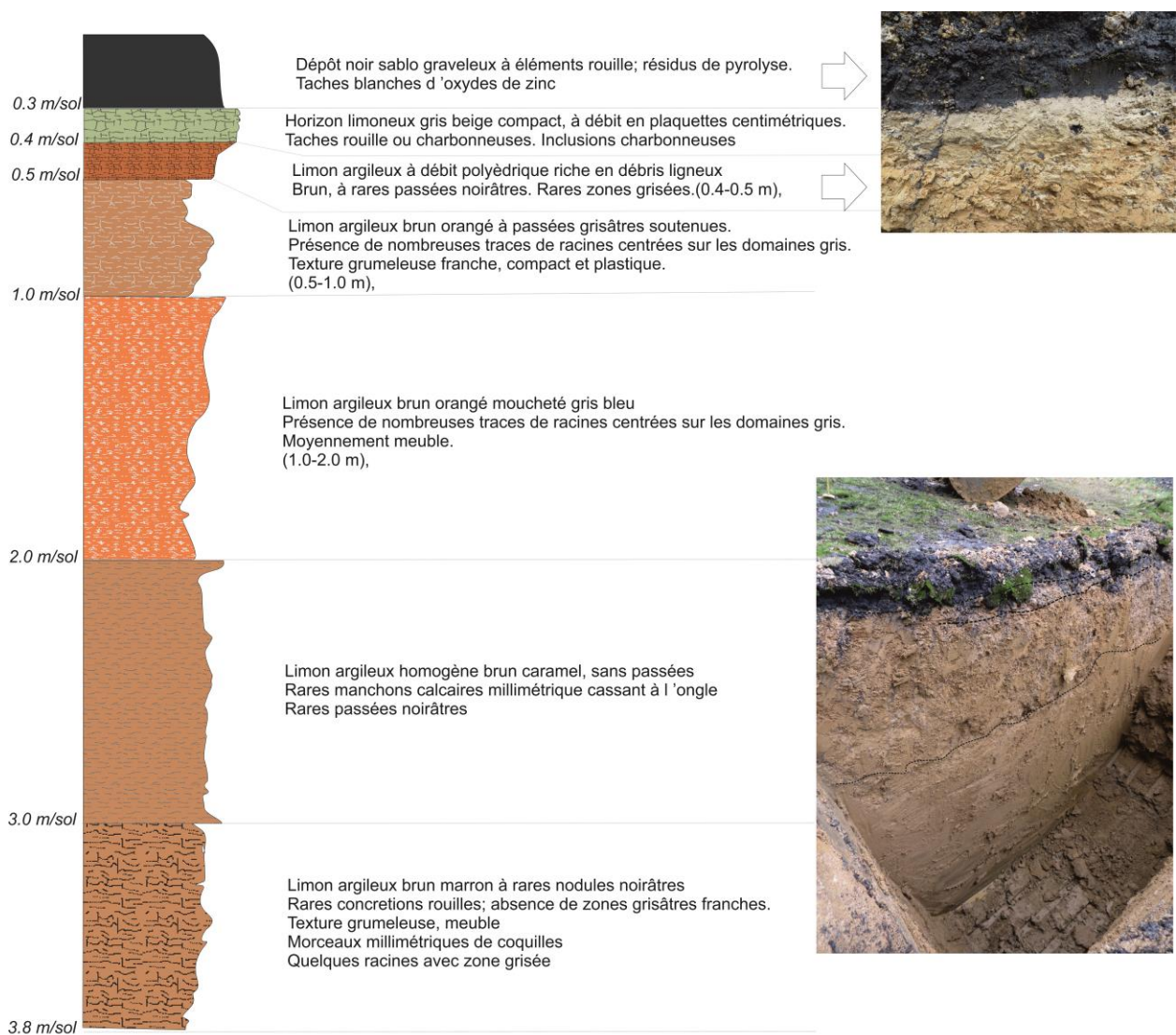
Localisation des puits, sondages et piézomètres du proche environnement de la « *Place à Gaz* »



Annexe 4

Profils des sondages réalisés à la pelle mécanique (octobre 2010) (SMP03, SP M06, SPM07)

Site de la « Place à gaz », Forêt de Spincourt, commune de Gremilly (55).
Diagnostic et Interprétation de l'État des Milieux



SONDAGE SPM03:
Tache Centrale
22 octobre 2014





Résidus de pyrolyse sablo graveleux, noir
riche en éléments de manitons et tessons
+ présence d'encroûtement
chargés d'arsènes (CLARK)

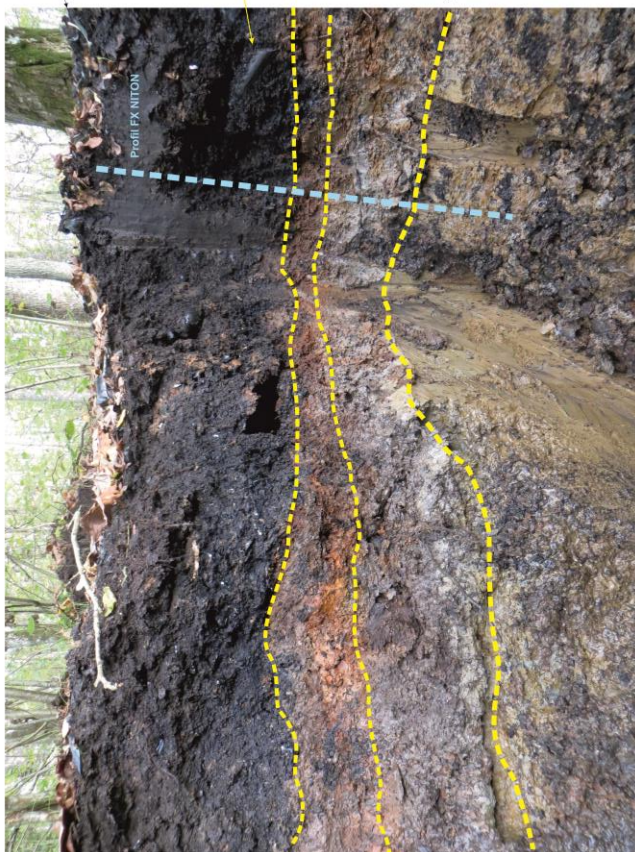
Foie en place

0.5 m
Horizons sablo argileux rouge brique
Très humide

0.7 m

1.2 m
Limon argileux jaune panaché gris à taches
rouilles et noires. Plastique, humide

Argile limoneuse, brun orangé
mouchetée de gris
Compact et plastique

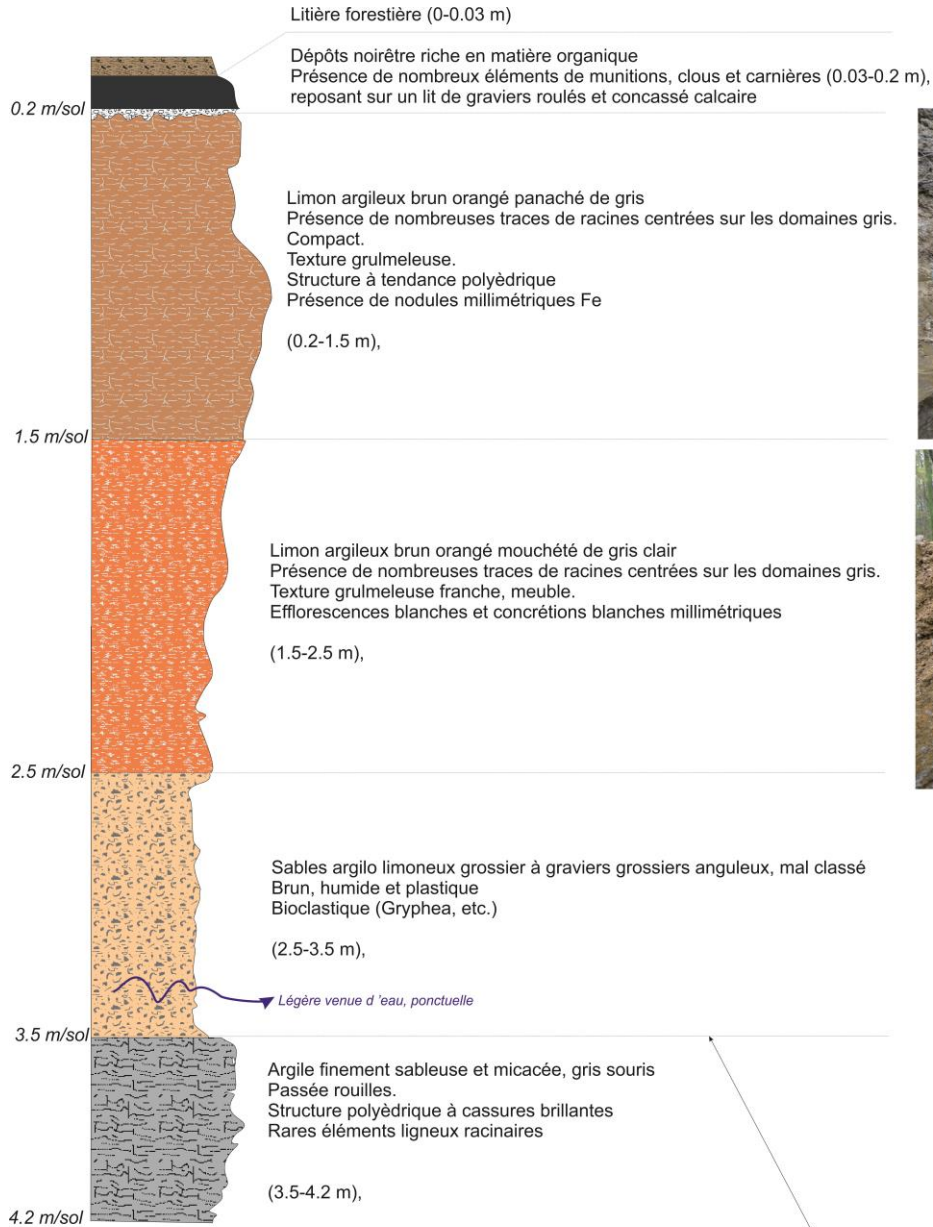


Plancher en bois



SONDAGE SPM06:
fosse satellite Nord-est
22 octobre 2014





SONDAGE SPM07:
Dépôt Nord
Octobre 2014



Annexe 5

Toxicologie des substances et éléments identifiés dans les sols et matériaux de la « Place à Gaz »

Famille / Substance	Toxicologie				Propriétés physico-chimiques					
	Effets non cancérogènes	Effets cancérogènes			Volatilité	solubilité dans l'eau	Persistance dans les sols de surface (lié au logKoc)	Mobilité vers les eaux souterraines	Odeurs (seuil en ppm)	Inflammabilité (classement et Point Eclair)
Substances	Organes cibles	US EPA	CIRC	UE						
METALLS										
Dénomination										
Arsenic	Foie, sang, tractus gastro-intestinal, peau, système cardiovasculaire	A	1	UE	cancers des poumons et de la peau (études animales et épidémiologiques)	insoluble à très soluble selon la forme			non concerné	
Cuivre	Rein, foie, système nerveux central, système cardiovasculaire, os	D	-	-	Non volatils	insoluble à très soluble selon la forme			non concerné	
Mercure élémentaire	Système nerveux central, reins	D	3	-	volatil	peu soluble	non concerné			non concerné
Plomb	Rein, système nerveux central, tractus gastro-intestinal, système cardiovasculaire, thyroïde, système immunitaire, os	B2	2B	-	tumeurs à l'estomac, aux poumons, au rein et au cerveau (études animales et épidémiologiques)	insoluble à très peu soluble selon la forme	non concerné	moyenne à immobile selon la forme et le milieu		
Zinc	Sang, tractus gastro-intestinal, système cardiovasculaire	D	-	-		insoluble à très soluble selon la forme			non concerné	
DIOXINES										
2,3,7,8 TCDD	Foie, peau	A (en cours de réévaluation)	1	-	Foie, thyroïde, poumons, cavité orale	Très peu soluble	Persistant	Immuable	Non concerné	446,5
1,2,3,7,8 PeCDD			3			Non dispo				
1,2,3,4,7,8 HxCDD			3							Non disponible
1,2,3,7,8,9 HxCDD			3							507,2
1,2,3,4,6,7,8 HpCDD			3							485-510
OctaCDD			3							Non disponible
FURANNES										
2,3,7,8 TCDF			3							
1,2,3,7,8 PeCDF			3							
2,3,4,7,8 PeCDF			3							
1,2,3,4,7,8 HxCDF			3							
1,2,3,6,7,8 HxCDF			3							
2,3,4,6,7,8 HxCDF			3							
1,2,3,7,8,9 HxCDF			3							
1,2,3,4,6,7,8 HpCDF			3							
1,2,3,4,7,8,9 HpCDF			3							
OctaCDF			3							
FURANNES										
1,2,3,7,8,9 HxCDF			3							
1,2,3,4,6,7,8 HpCDF			3							
1,2,3,4,7,8,9 HpCDF			3							
OctaCDF			3							

A : cancérogène pour l'homme

B2 : cancérogène probable pour l'homme (sur la base de preuves sur les animaux)

D : non classifiable comme cancérogène pour l'homme

3 : non classifiable comme cancérogène pour l'homme



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr