

Sur le procédé

See&Shoot®

Famille de produit/Procédé : Procédé de renforcement du sol

Titulaire(s) : Société **GEOSEC FRANCE**

AVANT-PROPOS

Les avis techniques et les documents techniques d'application, désignés ci-après indifféremment par Avis Techniques, sont destinés à mettre à disposition des acteurs de la construction **des éléments d'appréciation sur l'aptitude à l'emploi des produits ou procédés** dont la constitution ou l'emploi ne relève pas des savoir-faire et pratiques traditionnels.

Le présent document qui en résulte doit être pris comme tel et n'est donc **pas un document de conformité ou à la réglementation ou à un référentiel d'une « marque de qualité »**. Sa validité est décidée indépendamment de celle des pièces justificatives du dossier technique (en particulier les éventuelles attestations réglementaires).

L'Avis Technique est une démarche volontaire du demandeur, qui ne change en rien la répartition des responsabilités des acteurs de la construction. Indépendamment de l'existence ou non de cet Avis Technique, pour chaque ouvrage, les acteurs doivent fournir ou demander, en fonction de leurs rôles, les justificatifs requis.

L'Avis Technique s'adressant à des acteurs réputés connaître les règles de l'art, il n'a pas vocation à contenir d'autres informations que celles relevant du caractère non traditionnel de la technique. Ainsi, pour les aspects du procédé conformes à des règles de l'art reconnues de mise en œuvre ou de dimensionnement, un renvoi à ces règles suffit.

Groupe Spécialisé n° 3.3 - Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure

Versions du document

Version	Description	Rapporteur	Président
V1	1 ^{ère} version de l'Avis Technique	PAYET Loïc	BERNARDIN-EZRAN Roseline

Descripteur :

L'application du procédé permet uniquement de récupérer les caractéristiques mécaniques et de portance du sol d'origine et de réduire la conductivité hydraulique.

La méthode de dimensionnement utilisée pour l'application du procédé repose exclusivement sur la méthode observationnelle de la norme NF EN 1997-1 (Eurocode 7).

Le procédé SEE&SHOOT® s'appuie sur un diagnostic géophysique par tomographie de résistivité électrique 3D et géotechnique par essais pressiométriques et au pénétromètre dynamique moyen complémentaires réalisés avant les injections et sur un suivi avec les mêmes outils en cours de traitement et à l'issue du traitement. Le diagnostic préliminaire permet de détecter les volumes de sol responsables des désordres et de définir un maillage d'injection horizontal et vertical visant à cibler les zones à traiter. La diffusion de la résine et les effets d'expansion dans le sol sont contrôlés grâce à des cycles de mesures E.R.T. et des essais au pénétromètre dynamique moyen intermédiaires jusqu'à validation du chantier.

Le procédé SEE&SHOOT® de GEOSEC® s'inscrit dans le cadre de :

- La norme NF EN 1997-1 (2.7 Méthode observationnelle, Eurocode 7) faisant usage d'enquêtes et monitoring géophysiques (E.R.T.3D) et géotechniques (au pénétromètre dynamique moyen) avant, pendant et après l'intervention ;
- La norme NF EN 12715 (Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Injection), avec et sans déplacement des terrains : une fois que la résine arrive dans le sol, après une première phase dite d'imprégnation sans déplacement de sol, les phases suivantes de fracturation/claquage produisent un déplacement des terrains impactés.

Table des matières

1.	Avis du Groupe Spécialisé	4
1.1.	Domaine d'emploi accepté	4
1.1.1.	Zone géographique	4
1.1.2.	Ouvrages visés	4
1.2.	Appréciation	4
1.2.1.	Aptitude à l'emploi du procédé	4
1.2.2.	Durabilité	5
1.2.3.	Impacts environnementaux	5
1.3.	Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé	5
2.	Dossier Technique.....	6
2.1.	Mode de commercialisation.....	6
2.2.	Description.....	6
2.2.1.	Principe.....	6
2.2.2.	Caractéristiques des composants	7
2.3.	Dispositions de conception.....	8
2.3.1.	Prescriptions.....	8
2.3.2.	Dimensionnement	9
2.4.	Dispositions de mise en œuvre	13
2.4.1.	Prescriptions	13
2.4.2.	Généralités	13
2.4.3.	Mise en place du procédé SEE&SHOOT® de GEOSEC®	15
2.4.4.	Contrôles.....	19
2.4.5.	Mesures de sécurité	20
2.4.6.	Après les travaux de confortement.....	20
2.5.	Traitement en fin de vie	20
2.6.	Assistante technique	20
2.7.	Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication.....	21
2.7.1.	Prescriptions	21
2.7.2.	Fabrication	21
2.8.	Mention des justificatifs.....	21
2.8.1.	Résultats expérimentaux	21
2.8.2.	Références chantiers.....	22
2.9.	Annexe du Dossier Technique – Schémas de mise en œuvre.....	23

1. Avis du Groupe Spécialisé

Le procédé décrit au chapitre II « Dossier Technique » ci-après a été examiné par le Groupe Spécialisé qui a conclu favorablement à son aptitude à l'emploi dans les conditions définies ci-après :

1.1. Domaine d'emploi accepté

1.1.1. Zone géographique

Cet avis est formulé pour les utilisations en France métropolitaine avec possibilité d'emploi en zones de sismicité 1 à 4 (selon l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié) moyennant le respect des dispositions prévues au §2.3.1.3.

1.1.2. Ouvrages visés

Le domaine d'emploi pour le procédé « See&Shoot® » est limité à la consolidation et au traitement du sol d'assise sous des fondations superficielles (semelles filantes et isolées), des fondations semi-profondes (massifs), au sens de la norme NF DTU 13.1, d'ouvrages existants.

Des données portant sur les sols, sur les fondations, sur la structure de l'ouvrage, sur les causes des désordres le cas échéant, doivent être fournies afin de préciser les conditions d'utilisation de ce procédé et les éventuels travaux complémentaires à y associer.

Lorsque la descente de charge de l'ouvrage génère une pression au niveau de la fondation supérieure aux capacités de la résine (pression de gonflement), l'utilisation du procédé pour le relevage de l'ouvrage n'est pas possible. Aucun relevage ne pourra être effectué s'il risque d'occasionner une aggravation des désordres existants du fait du tassement.

Lorsque la contrainte moyenne de confinement du sol est supérieure à la pression de gonflement maximale de la résine (10MPa), l'utilisation du procédé « See&Shoot® » pour consolider le sol n'est pas possible.

Le procédé est applicable dans tous les types de sols, en présence ou non d'une nappe (possibilité d'injection dans des sols saturés) à l'exclusion des types de sols suivants :

- Sols argileux dont les minéraux sont particulièrement sujets aux retraits gonflements inter-foliaires de forte amplitude (smectites, ...) : à défaut d'une analyse minéralogique, sol dont l'indice de plasticité I_p est supérieur à 40 ou la valeur de bleu VBS est supérieure à 8. ;
- Sols compressibles sensibles aux phénomènes de consolidation secondaire : sols à teneur en matière organique supérieure à 10% (tourbes, vases, ...) ;
- Sols rocheux ;
- Sols gelés ;
- Sols pollués ;
- Dallages et radiers.

En cas de présence d'une couche drainante et d'un réseau de drainage sous fondation, l'utilisation du procédé de traitement de sol par injection de résine est exclue.

L'injection de la résine est limitée à une profondeur de 8,00 m par rapport à la plate-forme de travail.

Le dimensionnement, la mise en œuvre et les autocontrôles de mise en œuvre sont réalisés exclusivement par la société GEOSEC France.

1.2. Appréciation

1.2.1. Aptitude à l'emploi du procédé

Stabilité

La consolidation et le traitement du sol d'assise des ouvrages existants par le procédé peuvent être considérés comme normalement assurés pour le domaine d'emploi accepté dans la mesure où la conception et la mise en œuvre respectent les prescriptions des §2.3 et §2.4.

Pose en zones sismiques

Etant donné que la récupération de la portance d'origine des sols par injection de résine expansive selon le procédé « See&Shoot® » a pour effet de consolider les sols par densification de la masse structurée du sol injecté (augmentation de la résistance au cisaillement du sol), l'utilisation du procédé de traitement par injection ne présente pas de risque d'amplification des sollicitations sismiques.

L'utilisation en zones sismiques 1 à 4 au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié est donc possible moyennant le respect des dispositions prévues au §2.3.1.3.

Aspects sanitaires

Le présent avis est formulé au regard de l'engagement écrit du titulaire de respecter la réglementation, et notamment l'ensemble des obligations réglementaires relatives aux produits pouvant contenir des substances dangereuses, pour leur fabrication, leur intégration dans les ouvrages du domaine d'emploi accepté et l'exploitation de ceux-ci. Le contrôle des informations et déclarations délivrées en application des réglementations en vigueur n'entre pas dans le champ du présent avis. Le titulaire du présent avis conserve l'entière responsabilité de ces informations et déclarations.

1.2.2. Durabilité

Conformément au §2.3 de la NF EN 1997-1, la durabilité de la résine doit tenir compte des agents agressifs de l'eau et du terrain (acides, ...), des attaques chimiques (percolation de l'eau et de l'oxygène, ...) et des attaques biologiques (champignons et bactéries).

La résine MAXIMA® a fait l'objet d'essais de dégradation chimique, d'essais de dégradation biologique, d'essai de perméabilité, ainsi que d'essais mécaniques à long termes sous charge constante et sous charge dynamique.

Les résultats de ces essais montrent le bon comportement de la résine par rapport aux champignons et bactéries (aucun développement biologique et aucune dégradation des caractéristiques mécaniques), une forte résistance de la résine aux agents chimiques (hormis aux acides concentrés), l'absence d'influence de l'eau sur le comportement et les caractéristiques de la résine ainsi que l'absence d'influence des chargements cycliques sur les caractéristiques mécaniques de la résine.

Les essais réalisés permettent de conclure sur le bon comportement de la résine dans le sol.

1.2.3. Impacts environnementaux

Le procédé ne dispose d'aucune Déclaration Environnementale (DE) vérifiée par tierce partie et ne peut donc revendiquer aucune performance environnementale particulière. Il est rappelé que les DE n'entrent pas dans le champ d'examen d'aptitude à l'emploi du procédé.

Il dispose néanmoins d'une évaluation des effets du produit « résine d polyuréthane MAXIMA » sur le sol et les eaux souterraines établie par le DIBt en 2019 (cf. §2.8.1). Il est attiré l'attention sur le fait que la résine n'est pas autorisée dans les zones de production d'eau potable.

1.3. Remarques complémentaires du Groupe Spécialisé

Le Groupe Spécialisé n°3.3 tient à souligner que le traitement de sol par injection de résine est une technique pour laquelle il n'est pas possible de garantir l'absence d'apparition de fissures sur les ouvrages en béton ou en maçonnerie durant les travaux d'injection.

Il est souligné que le traitement de sol par injection sous un ouvrage existant quelle que soit la technique d'injection utilisée, doit faire suite à un diagnostic préalable de qualification de cet ouvrage (identification de la nature et la cause des désordres observés, description du système constructif et de la nature des matériaux constructifs, détermination de la descente de charge, ...). L'attention du Maître d'œuvre est donc attirée sur la nécessité qu'il y a à faire effectuer un diagnostic aussi précis que possible, permettant de dimensionner et de mettre en œuvre le traitement de sol de manière pertinente.

L'application du procédé de consolidation du sol sous les fondations, ne confère pas à lui seul une rigidité supplémentaire à la structure de l'ouvrage qui peut parfois nécessiter des travaux complémentaires.

En cas de déficiences structurelles pouvant entraîner des risques au niveau de la stabilité de l'ouvrage, un bureau d'études spécialisé doit se prononcer sur les travaux de rigidification nécessaires devant être entrepris en complément des injections.

Le Groupe attire l'attention sur les essais de vieillissement réalisés qui ne permettent pas d'appréhender le vieillissement naturel de la résine dans le sol et d'en déduire une méthodologie de prédiction de la durée de vie du procédé.

Le Groupe attire l'attention sur l'absence de retour d'expérience sur les conditions de polymérisation de la résine dans les sols particuliers (ex. : sols pollués, ...).

Des dossiers d'ouvrages traités doivent être communiqués à minima une fois par an au CSTB par GEOSEC France pour vérification du respect des prescriptions de l'Avis Technique.

2. Dossier Technique

Issu des éléments fournis par le titulaire et des prescriptions du Groupe Spécialisé acceptées par le titulaire

2.1. Mode de commercialisation

Le procédé est commercialisé et mis en œuvre par GEOSEC France. Son application est assurée par nos propres équipes.

2.2. Description

2.2.1. Principe

La méthode See&Shoot® est un procédé conçu pour remédier aux tassements différentiels. Ce procédé exclusif fait l'objet des Brevets Européens N° EP1914350 et N° EP2543769 pour la consolidation des terrains sujets aux affaissements. Sa mise en œuvre s'appuie sur des outils relevant à la fois de la géotechnique et de la géophysique des sols.

Le dimensionnement et la mise en œuvre du procédé sont basés sur la méthode observationnelle telle que définie dans l'Eurocode 7. Le procédé d'injection « See&Shoot® » n'est possible qu'aux conditions suivantes :

La définition des paramètres instrumentés (résistivité et essais au pénétromètre dynamique) et contrôlés pendant la mise en œuvre est cohérente avec les autres informations du projet (diagnostics géotechnique et structure, etc...) ;

La définition de domaines admissibles pour ces paramètres est possible ;

Les dispositions mises en place en cas de sortie de ces paramètres des domaines admissibles, permettent de rentrer à nouveaux dans ceux-ci.

L'équipe GEOSEC® est dirigée par un géologue sur place et assistée par les ingénieurs du bureau d'études technique depuis le siège. Chaque intervention est personnalisée grâce à la tomographie électrique et aux essais pénétrométriques menés in situ.

Par le biais du monitoring géophysique électrique 3D (dit aussi tomographie électrique), le géologue est en mesure de planifier des injections ciblées, visant exactement les volumes de terrain qui montrent des anomalies ou des faiblesses, et qui donc ne sont plus aptes à garantir la stabilité de l'ouvrage.

La tomographie électrique a le grand avantage de pouvoir mettre en évidence, grâce à une image tridimensionnelle, les caractéristiques suivantes du sol :

- Toute anomalie résistive, qu'elle soit due à une concentration de porosité dans le sol, conséquence de la dessiccation, ou à la présence de cavités et vides, qui seraient conséquence de l'effet de ravinement entre autres ;
- Toute anomalie conductrice due à une saturation d'eau, conséquence par exemple de fuites de canalisation, de drainages inefficaces et/ou de variations du niveau de la nappe.

Les essais pénétrométriques dynamiques comparatifs (pénétromètre dynamique moyen) ont la fonction de déterminer les propriétés mécaniques du sol. Leur position étant choisie sur la base des indications de la tomographie, ils s'avèrent d'autant plus performants et efficaces. Ils permettent donc de cibler précisément, pendant les injections, les couches du terrain les plus affaiblies et les zones les moins aptes au soutien de la charge de la structure qui, par conséquent, sont prioritaires dans la consolidation.

Un cycle d'injection désigne une phase complète d'injection de résine expansive dans le sol jusqu'à ce que les paramètres géophysiques (comme la résistivité électrique mesurée par ERT) indiquent que la résine a correctement amélioré le comportement mécanique du sol. Chaque cycle comprend l'injection, le suivi des données géophysiques et mécaniques en temps réel, et la validation des résultats.

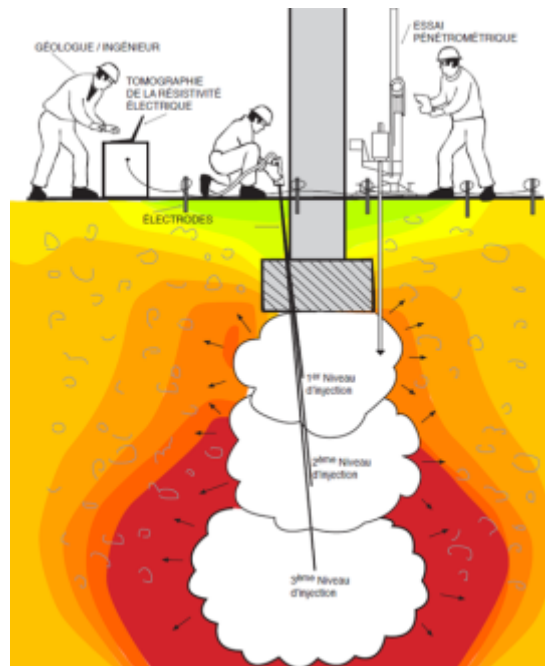


Figure 1 - Représentation schématique d'application du procédé SEE&SHOOT® sous fondation et sur plusieurs niveaux d'injection en fonction du croisement des données géophysiques (E.R.T.3D) et géotechnique (PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE MOYEN).

La principale valeur ajoutée de ce procédé réside en un monitoring géophysique pendant la durée du traitement de consolidation.

En effet, ceci permet de vérifier la réaction du terrain à la suite de chaque phase d'injections et de valider de manière fiable les résultats de l'intervention, conformément à la procédure du brevet.

2.2.2. Caractéristiques des composants

2.2.2.1. La résine

MAXIMA® est le nom commercial du système de polyuréthane de résine expansive à cellules fermées utilisé par GEOSEC® pour ses applications de consolidation et stabilisation des sols sous fondations et ouvrages affaissés. Il s'agit d'une résine de polyuréthane bi-composant, résultat du mélange de polyol et isocyanate.

Ces produits, stockés séparément dans deux cuves installées dans le camion-atelier (GEOLAB), sont mélangés au niveau du pistolet d'injection pour former la mousse polyuréthane expansive rigide et à cellules fermées. L'association des deux composants forme une mousse expansive qui se solidifie et acquiert les caractéristiques voulues, tout en sachant que ces caractéristiques peuvent être modifiées dans les plages de valeurs données en fonction de l'objectif final à atteindre.

Ci-après le tableau des valeurs caractéristiques de la résine MAXIMA® (pour un une masse volumétrique de 75-95 kg/m³) qui résume pour chaque essai réalisé, la norme de référence et la méthode d'analyse :

Type d'essais	Valeurs	Norme de référence	Méthode d'analyse
Résistance à la compression	501,4 kPa	NF EN 844	Courbe de tendance caractéristique
Module d'Young	22,63 MPa	NF EN 844	Courbe de tendance moyenne
Résistance à la traction	1,07 kPa	ISO 1926:2009	Courbe de tendance moyenne
Pression de gonflement maximale	397 kPa	Inexistante	Courbe de tendance moyenne
Résistance à la compression et module d'Young après chargement cyclique	0.93 MPa 26.59 MPa	Inexistante	Valeur individuelle
Fluage	0,5 à 2,5 %	ISO 7850:1987	Valeur moyenne
Résistivité	10[□] – 10¹² Ω·m	Inexistante	Valeur moyenne
Perméabilité	10⁻⁸ – 10⁻¹ □ m/s	Inexistante	Valeur moyenne

Tableau 1 - Type d'essai, normes de référence correspondante et méthode d'analyse et méthode d'analyse

2.2.2.2. Les tubes

Les tubes d'injection peuvent être installés manuellement ou à l'aide de perceuses électriques en mode percussion. Fabriqués en aluminium ou en acier, ils ont un diamètre de 10 mm et une épaisseur d'1 mm. Les tubes de 10 mm mesurent 5 m et peuvent être assemblés pour injecter à plus de 5 m de profondeur, avec une tolérance d'inclinaison de ± 10 cm. Équipés de connecteurs pour éviter les obstructions, ils sont abandonnés après utilisation et ne peuvent pas être réutilisés.

2.3. Dispositions de conception

La conception du procédé s'inscrit dans le cadre la norme NF P 94-500.

2.3.1. Prescriptions

Pour confirmer la faisabilité du procédé et définir la conception de mise en œuvre au niveau d'un projet, il doit être réalisé un diagnostic géotechnique et un diagnostic structural comprenant :

- Données du sol de fondation : caractéristiques physiques et mécaniques, la teneur en matière organique du sol, le niveau des eaux et leur variation dans le temps, l'emplacement et la nature des cavités éventuelles, la caractérisation de la sensibilité du sol aux variations hydriques (perméabilité et porosité, analyse sédimento-granulométrique, teneur en eau, limites d'Atterberg ou valeur au bleu, analyse minéralogique éventuelle) ;
- Données du système de fondation : Les fondations doivent faire l'objet d'une reconnaissance précise afin d'identifier leur nature, leurs caractéristiques géométriques (épaisseurs, débords, ...), leur implantation et leur profondeur d'assise.
- Il convient également de repérer l'existence, l'emplacement et l'état de toutes les structures adjacentes, par exemple bâtiments, routes, réseaux, infrastructures et leurs fondations. La descente de charge sur les fondations doit également être déterminée avec précision ainsi que l'état des contraintes en place dans le sol d'assise ;
- Données structurelles de l'ouvrage : la nature et la cause des désordres observés, la description du système constructif et la nature des matériaux constructifs en tenant compte de la destination de l'ouvrage et des contraintes particulières liées à son fonctionnement doivent être données. En cas de déficiences structurelles pouvant entraîner des risques au niveau de la stabilité de l'ouvrage, un bureau d'études spécialisé doit se prononcer sur les travaux de rigidification nécessaires devant être entrepris en complément des injections ;
- En complément de l'étude de sol, avant, pendant et après les travaux d'injection, comme prévu dans la mise en œuvre du procédé, des essais géophysiques géophysiques (E.R.T. 3D), mécaniques de diagnostic complémentaire et de contrôle in situ doivent être réalisés sur la profondeur de sol à traiter. Le plan d'implantation de ces essais est défini en fonction de la localisation des anomalies électriques descellées lors de l'analyse du modèle électrique E.R.T.3D obtenu avant les travaux. Le nombre d'essais minimum à mettre en œuvre devra respecter les prescriptions de l'article 2.4.

Avant toute intervention, il convient également de réaliser une détection préalable des réseaux enterrés (nature et emplacement) ainsi que des ouvrages en infrastructure (nature, caractéristiques géométriques, etc...) afin d'adapter en conséquence le positionnement des points d'injection.

Le procédé SEE&SHOOT® ne peut être appliqué que si la fondation présente une profondeur minimale assurant un recouvrement de sol suffisant au-dessus des points d'injection. Cette profondeur minimale devra être conforme au §8.2 du NF DTU 13.1 P1-1.

À ce titre, la garde hors gel doit impérativement être respectée, conformément aux exigences réglementaires locales (soit généralement ≥ 50 cm en France métropolitaine).

Cette condition est essentielle pour :

- garantir un confinement efficace de la résine expansive dans le sol,
- éviter tout risque de remontée en surface, notamment en cas de sols peu épais ou de faible pression latérale,
- permettre un développement optimal des effets mécaniques de stabilisation dans la zone traitée.

En cas de fondations trop superficielles, une reprise en sous-œuvre préalable devra être envisagée pour rendre le traitement par injection possible et sécurisé.

Le dimensionnement du procédé d'injection est basé sur la méthode observationnelle décrite dans l'Eurocode 7 et il doit être réalisé par le titulaire conformément aux prescriptions du §2.4 en tenant compte du maillage défini en fonction du diagnostic électrique et mécanique obtenu avant le traitement, des caractéristiques du sol (étude géotechnique) et de la descente de charge (diagnostic de l'ouvrage), afin d'estimer le volume de résine nécessaire et de déterminer les objectifs à atteindre en termes d'homogénéisation des valeurs de résistivité électrique, ainsi que le taux d'amélioration de la capacité portante du sol.

Ce prédimensionnement devra être vérifié et éventuellement ajusté au fur et à mesure du traitement sur la base des mesures et essais intermédiaires, afin de s'assurer que les objectifs de traitement à atteindre ont bien été atteints.

La nature de l'essai mécanique in situ réalisé (pénétrömètre dynamique, pénétrömètre statique, ou pressiomètre) doit être adaptée aux objectifs de récupération de la portance d'origine à atteindre (capacité portante, module de déformation pour le calcul des tassements, ...). Dans le cas où le tassement doit être estimé, il convient de réaliser des essais pressiométriques ou oedométriques.

Avant les travaux d'injection, des essais mécaniques de contrôle in situ doivent être réalisés sur la profondeur de sol à traiter. Il convient de prévoir un point de sondage tous les 20 ml de fondations avec au minimum deux points de sondage.

Le prédimensionnement doit être vérifié et éventuellement ajusté au fur et à mesure du traitement sur la base des mesures et essais intermédiaires géophysiques et mécaniques, afin de s'assurer que les objectifs de récupération de la portance d'origine à atteindre et d'homogénéisation du sol ont bien été atteints.

Dans tous les cas de figure, pour la détermination des caractéristiques mécaniques du sol après injection du procédé « See&Shoot® » :

- La vérification du taux de récupération des caractéristiques mécaniques du sol après les travaux d'injection doit systématiquement faire l'objet d'un contrôle par essais mécaniques in situ sur la profondeur des sols traités. Ces essais mécaniques de contrôle doivent être réalisés dans les mêmes conditions (types et nombre d'essais identiques) que les essais réalisés avant injections.
- Le plan d'implantation de ces essais est défini en fonction de la localisation des anomalies électriques descellées lors de l'analyse du modèle électrique E.R.T.3D obtenu avant les travaux. Ces essais de contrôles doivent être réalisés au plus près des fondations.
- Les essais doivent également être réalisés au plus près des zones de sondage géotechnique avant injection afin d'être en mesure de comparer les résultats.
- Seuls ces essais de contrôle permettent de valider les travaux d'injection et l'atteinte des objectifs de récupération de la portance d'origine du sol.

L'objectifs de ces essais de contrôle avant / pendant / après injection est une estimation comparative du traitement de sol et la validation de l'atteinte des objectifs fixés. Dans le cas où ces objectifs ne sont pas atteints, il convient de prévoir la réalisation d'injections complémentaires en introduisant des points d'injection intermédiaires par rapport au maillage initial (doublage du maillage). Des essais de contrôle doivent être à nouveau réalisés dans les conditions définies ci-dessus.

Des dossiers d'ouvrages traités doivent être communiqués à minima une fois par an au CSTB par GEOSEC pour vérification du respect des prescriptions de l'Avis Technique.

2.3.1.1. Traitement des sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement

Dans le cas de sols dont l'indice de plasticité I_p est inférieur à 40 et/ou la valeur de bleu VBS est inférieure à 8, ces critères sont vérifiés en réalisant un essai de gonflement à l'œdomètre sur échantillon de sol intact, prélevé à l'appui d'un profil de teneurs en eau en période de déficit hydrique, selon la norme XP P94-091 (Sols : reconnaissance et essais – Essai de gonflement à l'œdomètre – Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes) :

- $\sigma'_g < \sigma'_{vo} + \Delta\sigma_z$,
- $R_g \leq 5\%$,

Avec :

- σ'_g la contrainte de gonflement du sol,
- σ'_{vo} la contrainte effective des terres au repos,
- σ_z la contrainte apportée par la fondation dans sa zone d'influence,
- R_g le rapport de gonflement.

Dans le cas des sols argileux, les travaux d'injection doivent être réalisés uniquement après retrait du sol ayant entraîné des désordres sur la structure supportée, et être adaptés (maillages vertical et horizontal, profondeur et quantité de résine injectée) selon la configuration et la teneur en eau du sol.

Un diagnostic géotechnique doit être réalisé par un bureau d'étude géotechnique afin d'identifier les travaux complémentaires associés aux travaux d'injection (ex : drainage, dessouchage, ...).

La distance entre les points d'injection ne doit pas excéder 100 cm dans un sol cohésif compte tenu du fait que la résine MAXIMA® est une résine ayant une expansion lente et son rayon d'action peut atteindre 100 cm dans un sol cohésif et plastique afin de garantir une saturation à la résine du sol sur toute la zone traitée.

Les ouvrages traités devront faire l'objet d'une période d'observation sur au moins un cycle saisonnier. En cas de mouvement secondaire durant cette période, une nouvelle injection sera effectuée suivant le même processus que les injections initiales.

2.3.1.2. Prescriptions en zone sismique

Pour le calcul des actions sismiques suivant les prescriptions du §3 de la NF EN 1998-1 et son Annexe Nationale, la classe de sol devra être identifiée en considérant les caractéristiques du sol avant les travaux d'injection.

Ce procédé ne permet pas de réévaluer la classe de sol.

2.3.2. Dimensionnement

2.3.2.1. Visite initiale

L'application du procédé SEE&SHOOT® est toujours précédée par une visite technico-commerciale d'un des chargés d'affaire de GEOSEC®.

Pendant cette visite sont menées les activités suivantes :

- Analyse visuelle du contexte environnemental du site ;
- Analyse visuelle de l'ouvrage affecté par les désordres ;
- Constatation et analyse visuelle des désordres ;

- Analyse de l'état général du bâtiment ;
- Analyse des risques sur les avoisinants lié à l'intervention ;
- Analyse des documents fournis au préalable par le maître d'ouvrage (étude de sol, étude structurelle, diagnostic des réseaux, etc...) ;
- Définition des zones d'intervention en fonction des désordres et du type de sol ;
- Evaluation du niveau d'accessibilité et de stationnement du camion-atelier et des équipements nécessaires ;
- Poser toutes les questions susceptibles d'avoir un intérêt aux fins de l'analyse des désordres.

2.3.2.2. Etudes géotechniques et critères de faisabilité

Si le maître d'ouvrage n'est pas en possession d'une étude de sol, il en sera réalisé une conformément à la norme NF P 94-500.

Une mission géotechnique G3 est également nécessaire et réalisée par GEOSEC®.

2.3.2.3. Etude structurale

S'agissant d'un ouvrage fragile, ne pouvant pas subir les mouvements millimétriques inhérents à l'intervention de consolidation, un renforcement structurel et/ou l'installation d'étais peut s'avérer nécessaire avant l'intervention. En effet, les injections ne traitent que le sol et ne confèrent pas à la structure de la rigidité supplémentaire. L'état de rigidité du bâtiment devra être vérifié par un Bureau d'Etude spécialisé dans le cas d'insuffisance structurelle évidente. Si nécessaire, des travaux complémentaires de rigidification de l'ouvrage devront être réalisés.

2.3.2.4. Intervention en zone sismique

Etant donné qu'une amélioration des critères sismiques n'est pas revendiquée, une approche simplifiée et sécuritaire consistera à conserver (pour le calcul parasismique), au niveau des sols d'assise de l'ouvrage traité, les caractéristiques sismiques avant récupération de la portance d'origine.

2.3.2.5. Définition des zones d'intervention

La définition de la zone d'intervention est établie en fonction des désordres observés (position, allure et entité de la pathologie) et sur la base des éléments fournis par le maître d'ouvrage et/ou son maître d'œuvre (étude de sol, étude structurale, diagnostic des réseaux, etc...).

Lors de l'intervention, à travers l'analyse du diagnostic géoélectrique (croisement des données géophysiques E.R.T. et pénétrométriques à l'aide d'un pénétromètre au pénétromètre dynamique moyen), le technicien responsable d'équipe est en mesure de pouvoir détecter d'autres anomalies de résistivité et de portance dans une zone ne présentant pas de pathologies visibles sur la superstructure. Dans ce cas une extension de la zone d'intervention et un traitement en préventif est proposé après prise de connaissance des arguments techniques relevés et l'accord du maître d'ouvrage et/ou son maître d'œuvre.

2.3.2.6. Repérage, diagnostic et marquage des réseaux enterrés

Dans le cadre d'une intervention de GEOSEC®, afin de limiter le risque d'endommagement des réseaux enterrés, un repérage et un marquage au sol de ces derniers est souvent effectué par une entreprise spécialisée (il s'agit de sociétés partenaires intervenant sous un régime de sous-traitance).

En cas de découverte de réseaux défectueux, ceux-ci devront être réparés de manière à éviter toute infiltration dans le sol. Les opérations de perforations et d'injection peuvent être conditionnées par la position et l'état des réseaux interférents : possibilité de perforation d'un réseau, injection ou infiltration de résine dans des canalisations et obstruction.

Le technicien responsable d'équipe est formé pour prendre toutes les mesures nécessaires pour réduire au maximum ces risques. Normalement, les perforations sont réalisées à une distance d'environ 0,50m pour les réseaux secs et jusqu'à 1,00/1,50 m pour les réseaux humides, et 2m pour les réseaux sensibles (gaz, fibre optique...) (mesures par rapport à leurs entraxes). Dans certains cas une inspection caméra en cours d'injection peut s'avérer nécessaire pour éviter toutes infiltrations de produit pouvant endommager le réseau.

Dans le cadre de l'intervention de repérage réseaux, en fonction du type de réseaux et du contexte d'intervention, plusieurs techniques sont applicables. Le tableau 4 en annexe résume les principales méthodes utilisées avec les réseaux détectables et les instruments correspondants.

2.3.2.7. La méthode observationnelle

La mise en œuvre des travaux avec le procédé SEE&SHOOT® est basée sur la méthode observationnelle (Eurocode 7, §2.7 Méthode Observationnelle) et sur la norme NF EN 12715 (Travaux spéciaux – Injections). L'ensemble des paramètres contrôlés lors de la mise en œuvre du procédé SEE&SHOOT® est présenté en annexe (Tableau 5).

Les quantités prévisionnelles de résine (valeurs cibles $\pm 25\%$) sont définies en fonction du diagnostic géophysique et géotechnique initial, ainsi qu'en fonction du contexte géologique, structurel et environnemental d'intervention. En cours d'intervention ces quantités peuvent être ajustées en fonction des résultats obtenus et de l'objectif visé. D'après le retour expérience et l'analyse qualité des chantiers effectués, presque la totalité des interventions sont validées avec les plages de quantités suivantes :

8 à 37 kg/m³ dans les sols à granulaires,

6 à 28 kg/m³ dans les sols cohésifs.

2.3.2.8. Monitoring de la réalisation d'un ouvrage géotechnique

Une intervention de consolidation nécessite un monitoring des paramètres géotechniques les plus significatifs de l'ouvrage et d'en observer le comportement au fur et à mesure de l'avancement des opérations :

a) Essais mécaniques au pénétromètre

Grâce à plusieurs corrélations empiriques, il est possible d'estimer de manière plus ou moins fiable :

- La densité relative (DR),
- L'angle de résistance au cisaillement (ρ'),
- La résistance à la liquéfaction (σ'_{1}/σ'_{vo}) des sols granulaires,
- Le module de cisaillement pour des petites déformations (G0),
- La résistance à cisaillement non drainée C_u des sols fins.

Les essais au pénétromètre dynamique restent de toute façon ponctuels et donc limités à la verticale d'enquête.

Le croisement des essais pénétrométriques aux mesures géophysiques de résistivité permet l'étalonnage du modèle acquis et la définition spatiale de la stratigraphie.

Le critère de Schmertmann (1978) représente une corrélation valable entre les essais pénétrométriques statiques et les mesures de résistivité. Une fois les valeurs de résistance de pointe R_p et latérale R_L obtenues, il est superposé l'information mécanique à la section E.R.T. incluant la verticale d'enquête (Figure 3 voir annexe).

Dans le cadre d'une intervention de GEOSEC® les mesures sont acquises avec un pénétromètre dynamique moyen.

En cours d'essai, le technicien responsable d'équipe de GEOSEC® enregistre le nombre de coups nécessaire à enfoncer le train de tiges tous les 10 cm d'avancement. Pour déterminer la résistance dynamique de pointe (R_{pd}) en fonction du nombre de coup, la formule des Hollandais est utilisée :

$$q_d = \frac{M^2 H}{[A e (M + P)]} = \frac{M^2 H N}{[A \delta (M + P)]}$$

Équation 1 - Calcul de la résistance dynamique de pointe q_d

Où :

- e = enfoncement par coup = δ / N ,
- δ = pas d'avancement,
- M = poids de la masse frappante (mouton) (hauteur chute H),
- P = poids total tiges et système de battage.

Les modèles de chantier sont effectués à l'aide d'un logiciel de calcul automatique Static/Dynamic Probing (GeoStru). Le logiciel calcule le rapport des énergies transmises (coefficient de corrélation avec SPT) à travers les corrélations proposées par Pasqualini 1983 – Meyerhof 1956 – Desai 1968 – Borowczyk-Frankowsky 1981.

b) La tomographie de résistivité en support des injections de résine expansive

La réalisation de mesures géophysiques non invasives basées sur la résistivité électrique est en mesure de fournir des informations concernant la distribution et la localisation des fluides, de la porosité, des cavités souterraines, plus précisément, des caractéristiques du sol sensibles à la résistivité électrique. Ce type d'enquête, couplée à des essais mécaniques et une étude géotechnique préalable, permet d'améliorer et de mieux définir le niveau de connaissance du site et la lithologie du sol enquêté.

La majorité des lithologies existantes dans les sols superficiels (ex. argiles, limons, sables) sont caractérisées par des fourchettes de résistivité typiques. Cela permet une simple distinction d'une lithologie d'une autre.

Le même principe est valable pour la comparaison entre les sols et les matériaux composants les fondations. Ci-dessous un tableau résumant les fourchettes typiques des lithologies plus courantes :

Lithologie	Résistivité ($\Omega \cdot m$)
Eau douce (potable)	10 – 100
Eau de mer	0.2 – 0.3
Sables secs	~1000
Sables saturés en eau douce	80 – 150
Limons saturés en eau douce	15 – 50
Argiles saturées en eau douce	5 – 20
Gravier sec	>1000
Gravier saturé en eau douce	150-300

Tableau 2 - Fourchettes de valeurs de résistivité (source : Applied Geophysics – Second Edition, W.M. Telford et Al., 1990)

Lors de l'application du procédé SEE&SHOOT®, en intervention partielle sous ouvrage, les conditions électriques à atteindre sont celles du sol limitrophe non affaissée qui est pris comme repère ;

Lors de l'application du procédé SEE&SHOOT®, en intervention totale sous ouvrage, les conditions électriques à atteindre sont celles de minimiser les variations de résistivité à un différentiel $< \pm 5\%$.

c) Les résines expansives dédiées aux injections produisent un contraste avec les terrains de fondation

Une fois injectée et durcie, les hautes valeurs de résistivité électrique de la résine, conjointement aux effets induits par son expansion (compactage des grains et déplacement de l'eau interstitielle), produit un contraste avec les terrains de fondation. Des mesures de résistivité effectuées sur des polyuréthanes assimilable à la résine MAXIMA® utilisée par GEOSEC® ont montré des valeurs comprises entre 109 et 1012 $\Omega \cdot m$ (source : National Physical Laboratory, Kaye&Laby, Tables of Physical & Chemical Constants).

Avant les injections, la tomographie de résistivité permet d'effectuer une première classification des sols rencontrés (sols sableux, argileux, etc...) et la localisation des anomalies éventuelles du sol pouvant être en rapport ou en cause avec la pathologie affectant l'ouvrage (accumulation d'eau et/ou humidité, volumes de sols lessivés de leurs particules fines suite à des fuites des réseaux ou vibrations, discontinuité des lithologies d'argiles à roches ou de remblais à argiles).

L'imagerie de résistivité peut être superposée et intégrée à un éventuel suivi des mouvements structuraux dus à l'affaissement (surveillance de la pathologie par témoins et jauges par exemple). Associée à des essais mécaniques, la reconstruction en 2D et/ou en 3D permet de pouvoir reconstruire un profil et/ou un volume représentant la stratigraphie du sol enquêté, grâce à la possibilité de distinguer les différentes couches rencontrées.

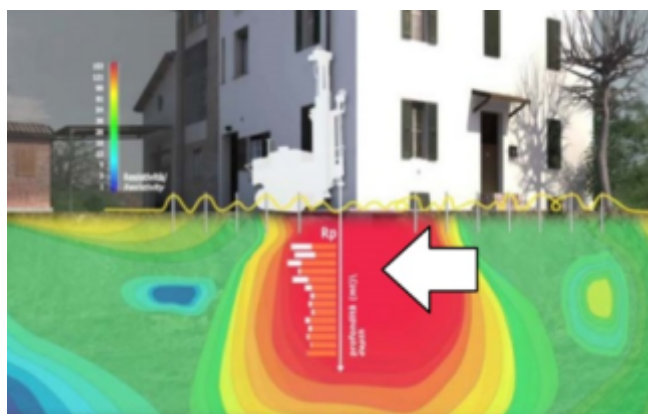


Figure 4 - Etalonnage de la tomographie de résistivité grâce à l'exécution d'essai pénétrométrique (GEOSEC®, 2009)

En cours de travaux, les tomographies de résistivité en temps quasi réel, peuvent vérifier l'état d'avancement des injections et si nécessaire induire le géologue à modifier les paramètres initiaux du projet (Eurocode 7 – article 2.7 Méthode observationnelle).

A la fin de l'intervention, les mesures acquises après les dernières injections, permettent de vérifier l'état final du sol consolidé.

2.4. Dispositions de mise en œuvre

2.4.1. Prescriptions

La mise en œuvre est effectuée exclusivement par le titulaire. Elle doit être effectuée dans les strictes conditions définies dans les articles suivants, notamment pour ce qui concerne le traçage des lignes et niveaux d'injection sur le secteur à traiter, la perforation (et le respect de leur inclinaison), la mise en place des tubes d'injection, le suivi de la phase d'injection par contrôle laser et par tomographie de la résistivité électrique, et essais pénétrométriques dynamiques et/ou statiques et/ou pressiométriques.

Afin de garantir le positionnement correct des points d'injection, des précautions particulières doivent être adoptées lors du repérage et du traçage des points d'injection ainsi que lors de la réalisation des perforations.

Le repérage et le traçage des points d'injection devront être réalisés à partir d'un plan d'exécution, établi pour chaque chantier, indiquant la localisation des zones d'injection, le maillage horizontal et vertical défini pour chaque zone. Un plan de recollement reprenant ces éléments après exécution doit être établi et complété par les points particuliers rencontrés tels que les zones n'ayant pu être traitées du fait d'obstacles par exemple.

Lors des travaux de perforations dans le cas d'injections sous fondations superficielles ou semi-profondes, une attention particulière doit être apportée sur la détermination et le maintien de l'inclinaison des percements. Selon le positionnement des points d'injection, l'inclinaison des percements doit être systématiquement déterminée en fonction de l'encastrement et de la géométrie des fondations (reconnaissance initiale des fondations) à partir d'un trait de niveau référence tracé sur les murs supportés par les fondations et de la localisation du point de percement au niveau de la plateforme de travail et des résultats des tests géoélectriques réalisés sur site (tomographie électrique 3d et test mécaniques pénétromètre DPM30).

L'implantation des points d'injection sera adaptée aux contraintes du site en recherchant le respect du maillage horizontal à +/- 20 cm.

Avant toute intervention, il conviendra de vérifier que le repérage des réseaux (nature et emplacement) a correctement été matérialisé et d'appliquer les dispositions définies en 2.4.2.

Dans le cas de la présence d'ouvrage en infrastructure à proximité des zones de sol à traiter (dénivellation de fondation, murs enterrés, ouvrages avoisinants, ...), les points d'injection devront être situés à une distance minimale d'environ 1 m vis-à-vis de ces ouvrages afin d'éviter toute dégradation sous l'effet de la pression de gonflement générée par le procédé.

En cas de présence de murs enterrés, un contrôle continu des déformations du mur lors des travaux d'injection devra être systématiquement mis en place afin de s'assurer du non-dépassement de la déformation admissible déterminée au préalable par le bureau d'étude structure dans le cadre du diagnostic initial de l'ouvrage.

Chaque injection doit obligatoirement être accompagnée d'un suivi de l'ouvrage par niveau laser afin de détecter tout mouvement vertical de l'ouvrage traité avec une précision de 0,5 mm. La réaction de l'ouvrage doit être mesurée en temps réel et l'ensemble de ces mesures doivent être consignées dans des fiches d'autocontrôle.

Afin de garantir une bonne consolidation du sol d'assise, chaque injection doit être systématiquement poursuivie, indépendamment du volume de résine consommé, jusqu'à détection d'un mouvement ascendant de l'ouvrage, ce que les valeurs de résistivité électrique (E.R.T.) et de résistance de pointe (au pénétromètre dynamique moyen) de la zone affaissée soient ramenées à celles non affaissée prise comme repère.

Dans le cas du traitement du sol d'assise d'une fondation superficielle avec présence d'un dallage, le dallage devra également faire l'objet d'un suivi par niveau laser afin de détecter tout mouvement vertical lors des injections.

En complément des contrôles demandés dans la norme NF EN 12715, les contrôles mentionnés au §2.4.4 doivent faire l'objet d'un enregistrement dans des fiches d'autocontrôle datées, numérotées et signées par le responsable du contrôle, avec identification du chantier et de la nature du contrôle réalisé, du résultat de contrôle et du traitement décidé en cas de non-conformité.

Ces fiches d'autocontrôle doivent notamment comporter : les mesures du contrôle laser avant et après injection par zone de 5 m au maximum, la vérification de l'inclinaison avant percement de chaque point d'injection, le suivi de l'état de dégradation de l'ouvrage supporté, le suivi de la déformation des réseaux et des murs enterrés éventuels, le volume de résine consommé pour chaque injection, le résultat du contrôle visuel quotidien de la polymérisation à l'air libre de la résine (couleur, texture, vitesse de polymérisation, absence de résidus...), le résultat de la vérification de la conformité de la pression et de la température au niveau du camion atelier.

À la suite des travaux de traitement du sol par injection de résine, il est nécessaire de respecter une période d'observation et de stabilisation d'une année avant travaux de reprise des fissures et des enduits.

2.4.2. Généralités

Le procédé SEE&SHOOT® est mis en œuvre conformément à la norme NF EN 12715 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Injection », sans ou avec déplacement des terrains. Dans certains cas il y a la combinaison des deux.

S'il s'avère nécessaire de réaliser un suivi et/ou la mise en œuvre des travaux (totale ou partielle) depuis la propriété mitoyenne, ils existent des procédures internes à tout niveau, de la phase commerciale à celle opérationnelle.

Les chargés d'affaires :

- Vérifient les conditions d'accès et de mise en œuvre chez le client et ses voisins ;
- Demandent aux clients une visite en contradictoire avec les voisins et/ou de sensibiliser ;
- Sensibilisent les clients et ses voisins sur cet aspect ;
- Rédigent une offre commerciale qui prend en compte cet aspect et mentionne cet aspect avec toutes les informations convenues et nécessaire ;
- Rédigent une note spécifique dans un compte rendu interne adressé aux ingénieurs du bureau technique de GEOSEC afin de leur permettre une correcte planification et mise en production du chantier ;

Les ingénieurs du bureau technique de GEOSEC :

- Planifient l'intervention en fonction des indications reçues par les chargés d'affaires ;
- Prennent en compte des éventuelles ressources humaines et matérielles additionnelles ;
- Se chargent systématiquement d'obtenir les autorisations nécessaires des voisins de nos clients ;
- Rédigent une note spécifique dans un compte rendu interne adressé aux techniciens responsables d'équipe afin de les prévenir sur le contexte d'intervention et les modalités de mise en œuvre du procédé et leur permettre une correcte installation ;
- Suivent à distance ou sur place que les géologues responsables d'équipes suivent les indications fournies.

Les techniciens responsables d'équipe :

- Prennent en compte les indications fournies par les chargés d'affaire par le biais des notes et des autorisations fournies du bureau technique ;
- Effectuent un état des lieux photographique en contradictoire avant le début de toute opération en présence du client et de son voisin tout en le formalisant par écrit ;
- Confirment la bonne installation du chantier selon les indications fournies avant le début des injections ;
- Partagent toute difficulté et/ou modification de l'installation de chantier ;
- Effectuent un état des lieux photographique en contradictoire en présence du client et de son voisin en phase de réception des travaux tout en le formalisant par écrit.

Dans une première phase dite d'imprégnation, les deux produits de base parfaitement mélangé étant encore à l'état liquide/fluide arrivent dans le sol et se diffusent par perméation sans déplacement de sol.

Pendant les phases suivantes, lors de l'expansion du produit jusqu'à sa complète polymérisation, la diffusion se fait par fracturation/claquage avec un déplacement associé des terrains impactés.

Il peut avoir des phases dans laquelle le mode de diffusion est une combinaison de deux cas susmentionnés.

Sans interférer avec les droits de brevet d'autrui, un relevé des niveaux est réalisé avant les injections pour fixer un « niveau zéro » et à l'issue du traitement pour vérifier si l'ouvrage a subi des soulèvements.

En fonction de la typologie de l'ouvrage et du contexte d'intervention, les systèmes suivants peuvent être utilisés :

- Niveau optique ;
- Fissuromètres ;
- Inclinomètres ;
- Accéléromètres.

2.4.3. Mise en place du procédé SEE&SHOOT® de GEOSEC®

Les procédures de réalisation et de contrôles décrites ci-après sont à réaliser lors des travaux initiaux et lors des travaux complémentaires éventuellement nécessaires à la fin de la période d'observation (cf. §2.3.1).

Typologie d'ouvrage	Études préalables obligatoires	Maillage d'injection	Profondeur d'injection	Techniques de suivi / validation	Spécificités / Contraintes
<i>Intervention partielle sous ouvrage</i>	- ERT 4D - Pénétrromètre dynamique (repère + à blanc)	0,5 m à 1,5 m (ajusté selon diagnostic)	Jusqu'à 8 m	- ERT 4D (avant, pendant, après) - Essais mécaniques comparatifs	Ajustements en temps réel via méthode observationnelle
<i>Intervention totale sous ouvrage</i>	- Étude géotechnique complète - Pénétrromètre dynamique et pressiométrique	0,5 m à 1,5 m (maille régulière)	Jusqu'à 8 m	- ERT 4D continue - Seuil de variation $\Delta\rho < \pm 5\%$ - Essais mécaniques comparés	Traitement homogène de l'ensemble du sol sous l'ouvrage
<i>Fondations superficielles (semelles, isolées)</i>	- Reconnaissance de fondation - Étude structure - Repérage des réseaux	Dépend des dimensions de fondations	Jusqu'à 8 m	- ERT 4D (avant, pendant, après) - Essais mécaniques comparatifs	Attention à la géométrie et inclinaison des percements
<i>Fondations semi-profondes (massifs)</i>	- Diagnostic structurel approfondi - Étude des avoisinants et infrastructures enterrées	Maille spécifique selon contraintes	Jusqu'à 8 m	- ERT 4D (avant, pendant, après) - Essais mécaniques comparatifs	Risques de soulèvement localisé : suivi rigoureux des réactions de l'ouvrage
<i>Sol argileux à retrait-gonflement modéré</i>	- $IP < 40$, $VBS < 8$ - Essai œdométrique - Profil hydrique	≤ 1 m (résine lente : MAXIMA®)	Jusqu'à 8 m	- Essais mécaniques comparés avant/après - Suivi ERT 4D homogénéité	Réaliser injection après retrait du sol gonflé

2.4.3.1. Procédé SEE&SHOOT® pour interventions partielles sous ouvrage (figure n°19 en annexe)

Avant les injections la tomographie de résistivité électrique permet de localiser tous les facteurs pouvant être cause de l'affaissement : de vides représentés comme des anomalies résistives, d'eaux stagnantes, de fluides en circulation et de fuites des réseaux d'écoulement représentés comme des anomalies conductrices. Elle permet aussi de déterminer les caractéristiques géoélectriques des zones stables limitrophes prises comme repère pendant l'intervention.

Des essais complémentaires réalisés au pénétromètre dynamique au pénétromètre dynamique moyen sont utilisés pour évaluer les propriétés mécaniques du sol, dans les zones affaissées et celles limitrophes non affaissées. Les propriétés mécaniques de ces dernières sont elles aussi prises comme repère.

Dans la pratique, avant les injections on réalise :

- une première acquisition des données géoélectriques de l'E.R.T. qui permet de connaître les caractéristiques géophysiques autant sur les zones affaissées (dite « à blanc »), que celles des zones non affaissées (dite « repère »),
- un ou plusieurs essais au pénétromètre dynamique moyen dits « à blanc », qui permettent de mesurer les valeurs de portance des volumes de sol affaissé,
- un ou plusieurs essais au pénétromètre dynamique moyen dits « repère », qui permettent d'établir les valeurs de portance du volume de sol non affaissé,
- Un ou plusieurs essais pénétrométriques statiques et/ou pressiométriques dits « à blanc », qui permettent de mesurer les valeurs de portance des volumes de sol affaissé si l'étude de sol réalisée avant l'intervention mentionne le manque de portance du sol comme la cause principale des désordres et/ou la récupération de la portance d'origine comme objectif fixé en amont du projet.

Sur la base du modèle géoélectrique du sol sous l'ouvrage, une série de petites perforations de diamètre maximal de 25-30mm est réalisée de façon ciblée pour injecter par la suite la résine MAXIMA®. Les tubes métalliques utilisés pour les injections sont introduits dans les perforations suivant un maillage horizontal avec entraxes compris entre 0,50 m et 1,50 m.



Figure 15 – (a) Perforation par le biais de perceuse manuelle ; (b) perforation de faible diamètre (25-30 mm) ; (c) tuyau en aluminium à diamètre réduit ; (d) mise en place des tuyaux en aluminium (dans ce cas 3 tuyaux pour 3 niveaux d'injection).

Les profondeurs et le nombre de niveaux d'injection sont définis sur la base de la méthode observationnelle (Eurocode 7 – par. 2.7 Méthode observationnelle), ainsi que sur la base des éléments suivants :

- Résultats de l'étude de sol des volumes à traiter ;
- Relevé visuel des zones avec affaissement plus important ;
- Relevé et examen des réseaux enterrés ;
- Relevé de l'implantation des fondations ;
- Définition du bulbe de répartition des charges ;
- Relevé de la profondeur et géométrie de la structure portante ;

Les profondeurs d'injection peuvent être modifiées par le chef de chantier GEOSEC® en cours d'intervention, suivant les résultats obtenus par le diagnostic géoélectrique.

Pendant les injections l'outil de monitoring géoélectrique E.R.T.4D (x, y, z, t) reste toujours en fonction afin de procéder à des injections ciblées de résine expansive MAXIMA®. La distribution des effets de la consolidation dans le sol est contrôlée par un relevé E.R.T. pour chaque cycle d'injection selon le contexte d'interventions (type de sol, type de structure, pathologie affectant l'ouvrage), ainsi que la taille du chantier. Il est préférable, par exemple, de réaliser une acquisition E.R.T. :

- à la fin du traitement d'une anomalie électrique relevée en phase de diagnostic, ce qui permet de vérifier les effets induits par le traitement en cours d'œuvre et pouvoir agir en conséquence,
- à la fin d'un traitement d'une zone spécifique de l'ouvrage (zone plus affaissée, zone moins affaissée, zone plus chargée, zone moins chargée, etc...),
- à la fin du traitement d'un niveau d'injection à une profondeur donnée (une acquisition pour chaque niveau d'injection).

Dans tous les cas, les mesures E.R.T intermédiaires doivent être en nombre suffisant pour pouvoir vérifier et maîtriser en cours d'œuvre l'effet du traitement selon la Méthode Observationnelle.

Les injections sont réalisées suivant les ajustements calculés à partir des résultats obtenus au fur et à mesure de l'avancement des travaux : réduction de la porosité, et/ou réduction de l'eau interstitielle, etc. (effets qui contribuent de manière efficace à compacter et stabiliser le terrain traité).

Dans certains cas, un suivi géotechnique pendant le traitement est réalisé par la réalisation d'essais pénétrométriques intermédiaires.

Après les injections, on procède à :

- l'exécution d'une dernière mesure géoélectrique E.R.T., afin d'évaluer les variations des valeurs de la résistivité électrique dans les volumes de sol traité et les comparer aux valeurs de la première acquisition,
- l'exécution d'essais pénétrométriques au pénétromètre dynamique moyen en proximité des essais réalisés avant les injections dans les volumes de sol traité. Cela, afin d'évaluer l'augmentation de la résistance de pointe et d'en comparer les valeurs obtenues à celles des essais repère,
- l'exécution d'essais pénétrométriques statiques et/ou pressiométriques à proximité des essais réalisés avant les injections dans les volumes de sol traité, si l'étude de sol réalisée avant l'intervention mentionne le manque de portance du sol comme la cause principale des désordres et sa récupération d'origine comme objectif fixé en amont du projet.

Il est bon de rappeler que la position des essais mécaniques est choisie en fonction du diagnostic : les essais mécaniques comparatifs avant et après injections sont positionnés dans la zone d'intervention en correspondance avec les anomalies ; l'essai repère dans une zone non affaissée et sans anomalies. Le pénétromètre de taille moyenne a l'avantage de pouvoir être positionné près du mur, à côté de la fondation. Quoiqu'il en soit il est positionné à l'intérieur du volume de terrain sondé avec l'enquête afin de pouvoir effectuer le nécessaire croisement des données.

Le nombre d'essais mécaniques à réaliser est établi selon la procédure GEOSEC® en fonction de l'intervention. Ces essais sont réalisés sur toute la hauteur du sol traité. On distingue 4 types de chantier de bâtiment, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Chantier TYPE⁽¹⁾	Linéaire de fondation à traiter [m]	Nombre de Pénétromètre Dynamique Repère	Nombre de Pénétromètre Dynamique Pré-Intervention	Nombre de Pénétromètre Dynamique Intermédiaires	Nombre de Pénétromètre Dynamique Post-Intervention	Nombre de Pénétromètre Statique et/ou Pressiométrique Pré-Intervention	Nombre de Pénétromètre Statique et/ou Pressiométrique Post-Intervention
A	≤20	1	1	-	1	1	1
B	20 m ≤ X < 40 m	1	2	-	2	1	1
C	40 m ≤ X < 60 m	1	3	3	3	1 tous les 20 ml	1 tous les 20 ml
D*	≥ 60	2	4	4	4	1 tous les 20 ml	1 tous les 20 ml
(1) Le type de chantier est uniquement lié au linéaire de fondation à traiter							

*1 pénétromètre dynamique moyen aux choix tous les 30,00ml supplémentaires réalisés.

Où :

Pénétromètre Dynamique Repère : pénétromètre dynamique moyen repère en zone non affectée par l'affaissement du terrain ;

Pénétromètre Dynamique Pré-Intervention : pénétromètre dynamique moyen pré-intervention en zone affectée par l'affaissement du terrain ;

Pénétromètre Dynamique Intermédiaires : pénétromètres dynamiques moyens intermédiaires en zone affectée par affaissements du terrain ;

Pénétromètre Dynamique Post-Intervention : pénétromètre dynamique moyen post-intervention en zone affectée par l'affaissement du terrain ;

Pénétromètre Statique et/ou Pressiométrique Pré-Intervention : essai pénétrométrique statique et/ou pressiométrique pré-intervention en zone affectée par l'affaissement du terrain ;

Pénétromètre Statique et/ou Pressiométrique Post-Intervention : essai pénétrométrique statique et/ou pressiométrique post-intervention en zone affectée par l'affaissement du terrain.

La typologie des essais supplémentaires (repère, pré-intervention, intermédiaire et/ou en phase de post-intervention) sera décidée par le technicien responsable d'équipe en fonction du contexte environnemental, du niveau de connaissance du site et des besoins du chantier.

L'équipe GEOSEC® exécute les injections de manière répétée et ciblée dans le terrain affaissé, suivant les quantités et les géométries établies par le géologue responsable d'équipe, avant et en cours d'intervention. Une fois les valeurs de résistivité électrique (E.R.T.) et de résistance de pointe (au pénétromètre dynamique moyen) de la zone affaissée sont ramenées à celles de la zone non affaissée prise comme repère, le TRE considère le traitement comme abouti et l'objectif de l'intervention atteint.

En cas de problème de portance avéré par l'étude de sol, un ou plusieurs essais pénétrométriques statiques et/ou pressiométriques sont réalisés aussi après l'intervention afin d'apprécier la récupération de la portance d'origine liée au traitement.

Si les résultats intermédiaires de la consolidation (sur la base des mesures géophysiques et/ou mécaniques) ne sont pas satisfaisants, des injections supplémentaires sont réalisées.

2.4.3.2. Procédé SEE&SHOOT® pour interventions totales sous ouvrage (figure n°22 en annexe)

Les valeurs de résistivité électrique attendues sont les valeurs obtenues lorsque la différence des variations de résistivité électrique, exprimées en pourcentage, entre la dernière mesure atteinte N et la précédente N-1 répond à l'équation 1.

Dans la pratique, avant les injections, on réalise :

- Une première acquisition des données géoélectriques de l'E.R.T. qui permet de connaître les caractéristiques géophysiques du sol à traiter sous l'ouvrage (dite « à blanc ») ;
- Un ou plusieurs essais au pénétromètre dynamique moyen dits « à blanc », qui permettent de mesurer les valeurs de portance des volumes de sol à traiter sous l'ouvrage ;
- Un ou plusieurs essais pénétrométriques statiques et/ou des essais pressiométriques qui permettent de mesurer les paramètres.

Sur la base du modèle géoélectrique du sol sous l'ouvrage, une série de petites perforations de diamètre maximal de 25-30 mm est réalisée de façon ciblée pour injecter par la suite la résine MAXIMA®. Les tubes métalliques utilisés pour les injections sont introduits dans les perforations suivant une géométrie et/ou un maillage horizontal avec entraxes comprise entre 0,50 m et 1,50 m.

Les profondeurs et le nombre de niveaux d'injection sont définis sur la base de la méthode observationnelle (Eurocode 7 – article. 2.7 Méthode observationnelle) ainsi que sur la base des éléments suivants :

- Résultats de l'étude de sol des volumes à traiter ;
- Relevé visuel des zones avec affaissement plus important ;
- Relevé et examen des réseaux enterrés ;
- Relevé de l'implantation des fondations ;
- Définition du bulbe de répartition des charges ;
- Relevé de la profondeur et géométrie de la structure portante ;

Les profondeurs d'injection peuvent être modifiées par le chef de chantier GEOSEC® en cours d'intervention, suivant les résultats obtenus par le diagnostic géoélectrique E.R.T.

Pendant les injections, l'outil de monitoring géoélectrique E.R.T.4D (x, y, z, t) reste toujours en fonction afin de procéder à des injections ciblées de résine expansive MAXIMA®. La distribution des effets de la consolidation dans le sol est contrôlée par un relevé E.R.T. pour chaque cycle d'injections. Ces dernières sont réalisées suivant les ajustements calculés à partir des résultats obtenus au fur et à mesure de l'avancement des opérations d'injection : réduction des grandes cavités et de la porosité, déplacement et/ou réduction de l'eau interstitielle, etc. (effets qui contribuent de manière efficace à compacter et stabiliser le terrain traité).

La distribution des effets de la consolidation dans le sol est contrôlée par un relevé E.R.T. pour chaque cycle d'injection selon le contexte d'interventions (type de sol, type de structure, pathologie affectant l'ouvrage) ainsi que la taille du chantier. Il est préférable, par exemple, de réaliser une acquisition E.R.T.

- À la fin du traitement d'une anomalie électrique relevée en phase de diagnostic, ce qui permet de vérifier les effets induits par le traitement en cours d'œuvre et pouvoir agir en conséquence ;
- À la fin d'un traitement d'une zone spécifique de l'ouvrage (zone plus affaissée, zone moins affaissée, zone plus chargée, zone moins chargée, etc...),
- À la fin du traitement d'un niveau d'injection à une profondeur donnée (une acquisition pour chaque niveau d'injection).

En tout cas, les mesures E.R.T intermédiaires devront être en nombre suffisante pour pouvoir vérifier et maîtriser en cours d'œuvre l'effet du traitement selon la Méthode Observationnelle.

Dans certains cas, un suivi géotechnique pendant le traitement est réalisé par la mise en place d'essais pénétrométriques intermédiaires en cours d'intervention comme décrit ci-après.

Afin de valider l'intervention, les injections seront réalisées jusqu'à ce que les mesures des diagnostics E.R.T. en cours d'intervention démontrent que les effets des injections ne produisent plus des valeurs appréciables de variations de résistivité. Ce procédé prévoit que les injections soient interrompues lorsque la différence des variations de résistivité électrique, exprimées en pourcentage, entre la dernière mesure atteinte N et la précédente N-1 répond à l'équation suivante :

$$\left| \left(\frac{\rho_N - \rho_0}{\rho_0} - \frac{\rho_{N-1} - \rho_0}{\rho_0} \right) \cdot 100 (\%) \right| \leq 5\%$$

Équation 2 - Calcul du pourcentage de variation existante entre la résistivité de la dernière et de l'avant dernier relevé

Avec,

- ρ_0 est la valeur de résistivité électrique du premier relevé (avant injections),
- ρ_N est la valeur de résistivité électrique du dernier relevé,
- ρ_{N-1} est la valeur de résistivité électrique de l'avant dernier relevé.

Une fois l'équation vérifiée, des essais pénétrométriques au pénétromètre dynamique moyen sont réalisés dans la zone consolidée afin d'évaluer la variation de résistance de pénétration à la pointe obtenue grâce aux effets des injections :

Des essais au pénétromètre dynamique moyen sont réalisés suite à cette vérification et dans la zone consolidée, afin d'évaluer la variation de résistance de pointe obtenue grâce aux effets des injections.

L'essai pénétrométrique, par nature ne peut pas être répété au même endroit. Comme déjà évoqué, sa position doit être au plus près du mur, à côté de la fondation affaissée et quoi qu'il en soit à l'intérieur du volume de terrain sondé avec l'enquête E.R.T.3D.

Le nombre d'essais mécaniques à réaliser est établi selon la procédure GEOSEC® en fonction de l'intervention. Ces essais sont réalisés sur toute la hauteur du sol traité. On distingue 4 types de chantier, comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Chantier TYPE⁽¹⁾	Linéaire de fondation à traiter [m]	Nombre de Pénétrromètre Dynamique Pré-Intervention	Nombre de Pénétrromètre Dynamique Intermédiaires	Nombre de Pénétrromètre Dynamique Post-Intervention	Nombre de Pénétrromètre Statique et/ou Pressiométrique Pré-Intervention	Nombre de Pénétrromètre Statique et/ou Pressiométrique Post-Intervention
A	≤20	1	-	1	1	1
B	20 m ≤ X < 40 m	2	-	2	1	1
C	40 m ≤ X < 60 m	4	4	4	1 tous les 20 ml	1 tous les 20 ml
D*	≥ 60	5	5	5	1 tous les 20 ml	1 tous les 20 ml
(1) Le type de chantier est uniquement lié au linéaire de fondation à traiter						

*1 pénétromètre dynamique moyen aux choix tous les 30,00ml supplémentaires réalisés.

Où :

Pénétrromètre Dynamique Pré-Intervention : pénétromètre dynamique moyen pré-intervention ;

Pénétrromètre Dynamique Intermédiaires : pénétromètres dynamiques moyens intermédiaires ;

Pénétrromètre Dynamique Post-Intervention : pénétromètre dynamique moyen post-intervention ;

Pénétrromètre Statique et/ou Pressiométrique Pré-Intervention : essai pénétrométrique statique et/ou pressiométrique pré-intervention en zone affectée par l'affaissement du terrain ;

Pénétrromètre Statique et/ou Pressiométrique Post-Intervention : essai pénétrométrique statique et/ou pressiométrique post-intervention en zone affectée par l'affaissement du terrain.

La typologie des essais supplémentaires (repère, pré-intervention, intermédiaire et/ou en phase de post-intervention) sera décidée par le technicien responsable d'équipe en fonction du contexte environnemental, du niveau de connaissance du site et des besoins du chantier.

A la fin de l'intervention un ou plusieurs essais pénétrométriques statiques et/ou pressiométriques seront réalisés à proximité des essais réalisés avant les injections dans les volumes de sol traité, cela afin d'évaluer la récupération des paramètres mécaniques associés à l'essai et mesurés avant les injections.

En cas de problème de portance avéré par l'étude de sol, un ou plusieurs essais pénétrométriques statiques et/ou pressiométriques sont réalisés aussi après l'intervention afin d'apprécier la récupération de la portance d'origine liée au traitement.

Si les résultats intermédiaires de la consolidation (sur la base des mesures géophysiques et/ou mécaniques) ne sont pas satisfaisants, des injections supplémentaires sont réalisées.

2.4.4. Contrôles

Le respect des procédures passe à travers des contrôles périodiques et tracés des matériaux, des instruments et des machines qui garantissent leur correcte utilisation et application.

Geosec France se base sur les recommandations fournies par les fiches techniques des produits polyol et isocyanate afin d'assurer la régularité de la résine. Les produits sont stockés dans deux cuves en inox séparées et équipées d'une résistance pour chauffer le contenu à la température précisé par le fabricant des composants. Le mélange est réalisé au niveau de la pompe d'injection selon les recommandations du fournisseur (température et proportion).

A chaque séance d'injection, le responsable d'équipe réalise un test de gonflement dans un double sac plastique. Ce test permet de contrôler visuellement la bonne réaction des deux composants.

Une fois sur chantier des opérations de contrôle sont réalisées au quotidien et cela concerne notamment :

- La pression du système d'injection,
- La température du système d'injection,
- La qualité de polymérisation des deux composants par le biais d'injections réalisé au préalable dans un sac (cf. §2.2 Caractéristiques des produits de base).

Le personnel de chantier est formé pour la gestion des dispositions mises en place en cas de sortie de paramètres instrumentés et contrôlés pendant la mise en œuvre.

Les essais pressiométriques sont réalisés par des partenaires spécialisés. Ces derniers garantissent la réalisation de l'essai selon la norme NF EN ISO 22-476.

GEOSEC ne dispose pas d'un laboratoire pour la réalisation d'essais à l'œdomètre. En cas de nécessité de réaliser ces essais cette activité est sous-traitée à des partenaires spécialisés. Ces derniers garantissent la réalisation de l'essai selon la norme NF EN ISO 17892-5.

2.4.4.1. L'instrumentation géophysique

Les géorésistivimètres multicanaux sont soumis à un contrôle d'étalonnage annuel par le constructeur ou distributeur agréé. Avant le début de chaque acquisition et afin de garantir une qualité correcte de la mesure, les TRE effectuent une opération de contrôle de fonctionnement du géorésistivimètre. Cette opération permet de détecter tout dysfonctionnement de l'instrument ainsi que des éventuels défauts de contact entre les câbles et l'électrode ou entre l'électrode et le sol. Le personnel de chantier est formé pour la gestion des dispositions mises en place en cas de sortie de paramètres instrumentés et contrôlés pendant la mise en œuvre.

2.4.4.2. Le système d'injection

Le personnel de chantier est formé pour la gestion des dispositions mises en place en cas de sortie de paramètres instrumentés et contrôlés pendant la mise en œuvre. Pour cette raison GEOSEC® garantit un contrôle et une maintenance du système d'injection régulier.

Avant chaque utilisation :

- Ouverture des robinets sur les cuves (Polyol et Isocyanate) ;
- Contrôle visuel d'éventuelles fuites (cuves, tuyaux de connexion, tuyau d'injection, terminal d'injection) ;
- Contrôle du niveau d'huile.

Avant le rechargement :

- Ouverture des robinets sur les cuves (Polyol et Isocyanate) ;
- Contrôle visuel du fonctionnement des robinets ;
- Contrôle visuel d'éventuelles fuites (cuves, tuyaux de connexion, tuyau d'injection – terminal d'injection).

Chaque six mois :

- Contrôle visuel du fonctionnement des robinets ;
- Le contrôle visuel des éventuelles fuites (cuves, tuyaux de connexion, tuyau d'injection, terminal d'injection) ;
- Nettoyage des filtres.

Chaque année :

- Contrôle visuel du fonctionnement des robinets et des raccords ;
- Le contrôle visuel des éventuelles fuites (cuves, tuyaux de connexion, tuyau d'injection, terminal d'injection) ;
- Révision de la pompe ;
- Révision du piston hydraulique ;
- Contrôle des boulons ;
- Contrôle visuel de la tuyauterie des deux produits ;
- Nettoyage des filtres.

2.4.5. Mesures de sécurité

Pour le contrôle et la maîtrise de la sécurité les membres de l'équipe de GEOSEC®, sont fournis des équipements de protection individuelle (EPI) pour réduire les risques auxquels ils sont exposés (ex. casque antibruit, lunettes, gants, chaussures de sécurité, etc...).

Selon les spécificités de chaque chantier des équipements de protection collective (EPC) sont installés afin d'assurer la sécurité des personnes qui gravitent autour des zones d'intervention (ex. passe câbles, barrières, etc...). Le personnel GEOSEC® est formé à la gestion de la sécurité de chantier.

Les risques identifiés et les solutions sont résumés dans le tableau 9 en annexe du Dossier Technique.

2.4.6. Après les travaux de confortement

Dans un cas standard, GEOSEC conseille la reprise des fissures tout de suite après les travaux de consolidation (sans intervenir sur les embellissements). Les travaux de reprise des fissures doivent être réalisés par une entreprise spécialisée et dans certains cas suivis par un BET. L'entreprise et/ou le BET doivent évaluer la technique de réparation la plus adéquate à la typologie des matériaux composant l'ouvrage et garantir la tenue dans le temps.

Après 12 mois à partir de la date de réception des travaux de consolidation, en l'absence d'évolution des fissures reprises et/ou d'apparition de nouvelle pathologie, le Maître d'Ouvrage pourra procéder à la réalisation des travaux d'embellissement (enduit, peinture, finitions, etc...).

2.5. Traitement en fin de vie

Un sol injecté peut être excavé, hors cas particuliers de type sols pollués par exemple, les déblais sont évacuables en décharges de type 3 (décharges usuelles qui accueillent principalement des déchets du bâtiment et des travaux publics (terres, gravats, déchets de démolition, etc)).

2.6. Assistante technique

GEOSEC est structuré et organisé pour fournir une assistance technique complète. A la demande des clients, un support technique est fourni de la phase de pré-intervention jusqu'à celle de post-intervention.

Souvent le client n'est pas en possession de la documentation technique relative au projet de consolidation (par exemple : rapport géologique, repérage réseau, conception des fondations, etc...). Dans ces cas, l'équipe de GEOSEC est en mesure de fournir tout le support nécessaire dans le processus de recherche de ces informations, par exemple :

- Enquêtes géophysiques (tomographie sismique et de résistivité électrique) ;
- Essais géotechniques in situ et prélèvements d'échantillons confiés à des laboratoires spécialisés ;
- Repérage et marquage au sol des réseaux ;
- Vérification de la profondeur des fondations grâce à la phase de perforation et aux résultats des enquêtes géophysiques ;
- Etude des désordres et suivi de l'évolution des fissures et des joints (installation des appareils de mesures nécessaires et acquisition des données avec possibilité d'effectuer un suivi et un contrôle à distance).

2.7. Principes de fabrication et de contrôle de cette fabrication

2.7.1. Prescriptions

La fabrication des composants de la résine doit faire l'objet d'un contrôle permanent portant notamment sur les caractéristiques des composants et la réaction du mélange. Il conviendra de prévoir systématiquement la réalisation d'un contrôle de validation, réalisé par le fabricant, de la réaction parfaite du mélange pour chaque lot du produit livré. Celui-ci doit garantir la conformité de la résine aux performances définies au §2.2.

Le matériel du camion atelier (générateur, appareillage spécifique pour le mélange des produits, système d'injection, ...) doit faire l'objet de la mise en place d'un autocontrôle systématique du titulaire.

Le bon fonctionnement des instruments géophysique (électrodes, câbles, géorésistivimètre, batteries, etc...) et géotechnique (composant du pénétromètre, composant du pressiomètre) doit être vérifié par le biais d'opérations de contrôle avant chaque utilisation. En cas de découverte d'un ou plusieurs dysfonctionnements des instrumentations pouvant provoquer la sortie des paramètres d'intervention du domaine admissible ou pouvant remettre en cause le niveau de précision des résultats, comme prévu par la méthode observationnelle, il faudra prévoir la mise en œuvre de toute disposition pouvant permettre de garantir la fiabilité des données et de rentrer dans le domaine admissible.

Un essai de gonflement ainsi que d'un correct mélange des produits doit être réalisé au moins une fois par jour avant le démarrage des injections.

L'étalonnage des appareils de mesure doit être vérifié au moins une fois par an. Une vérification complète du camion atelier (matériel électrique, pompes, systèmes de compression d'air, ...) doit être réalisée au moins une fois par an.

Les résultats des autocontrôles réalisés doivent être enregistrés dans des registres et des fiches d'autocontrôle prévus à cet effet.

2.7.2. Fabrication

Le groupe GEOSEC® est certifié NF EN ISO 9001 « Système de management de la qualité – Exigences », et respecte les normes NF EN 12715 « Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Injection » et NF EN ISO/CEI 17020 « Exigences pour le fonctionnement de différents types d'organismes procédant à l'inspection ».

Le respect de ces normes est traduit par des contrôles périodiques et tracés des matériaux, des instruments et des machines.

La résine MAXIMA® est produite selon des spécifications techniques provenant de l'expérience du groupe GEOSEC® par une société de l'industrie chimique sur la base d'un cahier des charges, dans une seule usine située à Reggio d'Emilie en Italie dont les coordonnées ont été communiquées au CSTB.

Les deux composants de la résine MAXIMA® sont contrôlés sur les points suivants dans le laboratoire de l'usine à chaque commande :

- Pour l'isocyanate : teneur en isocyanate (valeur cible entre 30 et 32 %) et acidité (valeur cible en HCl comprise entre 0 et 400 ppm) ;
- Pour le polyol : indice OH (valeur cible entre 343 et 388 mg/g) et teneur en eau (valeur cible comprise entre 1,98 et 2,14 %).

Chaque lot de production est vérifié, étiqueté et tracé par l'industriel afin de donner à l'applicateur toutes les informations nécessaires avant sa mise en vente et surtout son application.

Les deux composants de base sont stockés dans des Grands Récipients pour Vrac (GRV) conformément aux normes en vigueur dans les entrepôts de GEOSEC® selon les consignes et les indications du fournisseur.

Un système de pompage étanche permet le transfert séparé des deux composants à partir des GRV jusqu'aux deux citernes installées dans les camions-atelier.

2.8. Mention des justificatifs

2.8.1. Résultats expérimentaux

En plus des résultats des essais expérimentaux fournis par le producteur, depuis sa création GEOSEC® réalise périodiquement des essais de laboratoire sur ses produits d'injection.

Les résultats expérimentaux présents dans cet Avis Technique (§2.2. Caractéristiques de la résine expansive) ont été élaborés à partir de PV d'essais de laboratoire publics et privés et ont permis de déterminer les paramètres suivants :

- Pression de gonflement (absence de norme spécifique) - TecEuroLab, 2018
- Résistance à la compression (ISO 844:2014) - Résultats des essais fournis par le producteur, 2018

- Résistance à la traction (ISO 527-2:2012) - Résultats des essais fournis par le producteur, 2018
- Module d'élasticité (ISO 844:2014) - Résultats des essais fournis par le producteur, 2018
- Comportement sous charges dynamiques (absence de norme spécifique) - TecEurolab, 2018/2019
- Perméabilité - Université de Milan (Italie), 2015
- Résistance aux champignons et bactéries - 3A Laboratori, 2017
- Résistance aux agents chimiques - 3A Laboratori, 2017
- Compatibilité environnementale - Institut Giordano, 2017
- Evaluation des effets du produit « résine d polyuréthane MAXIMA » de GEOSEC Allemagne GmbH sur le sol et les eaux souterraines établie par le DIBt du 10/07/2019 n°II 63 5163.20#03/000-31. Il est attiré l'attention sur le fait que la résine n'est pas autorisée dans les zones de production d'eau potable

2.8.2. Références chantiers

Le groupe GEOSEC® exerce l'activité de consolidation de sol par injection de résine expansive depuis 2003. Depuis sa création il peut compter aujourd'hui plus de 15.000 interventions de consolidation de sol réalisées en Europe par le biais du procédé SEE&SHOOT®.

<i>Date</i>	<i>Code postal</i>	<i>Ville</i>	<i>Mode de fondation</i>	<i>Type de construction</i>	<i>Profondeur de traitement</i>
2019	13120	Gardanne	Semelles filantes	Maison individuelle R+1	-2,20 m/TN
2021	84100	Orange	Semelles filantes	Maison individuelle	-3.10 m/TN
2022	69400	Gleize	Semelles filantes	Maison individuelle R+1	-2,80 m/TN
2022	77280	Othis	Semelles filantes	Maison individuelle R+1	-2.00 m/TN
2022	47210	Rives	Semelles filantes	Maison individuelle R+2	-2.20 m/TN

Tableau n°3 : Quelques références chantier de GEOSEC

2.9. Annexe du Dossier Technique – Schémas de mise en œuvre







Méthode	Réseau détectable	Image type de l'outil
Radiodétection par passage d'une aiguille en fibre de verre émettrice d'un signal radio	CANALISÉS INTERIEURS EXTERIEURS EU/EV/EP/DRAIN	
Branchement d'Injecteur de signal radio	RESEAUX ELECTRIQUES (toute longueur)	
Branchement d'émetteur de signal radio	TOUS RESEAUX CONDUCTEURS (toute longueur)	
Repérage et localisation par récepteur de fréquence	TOUT SIGNAL EMIS JUSQU'À 93 kHz	
Repérage et localisation par scanner	RÉSEAUX MÉTALLIQUES PASSIFS	
Inspection des supports à la caméra thermique et pellicule thermique	TOUS RESEAUX EMETTEUR DE CHALEUR (NATURELLE OU FORCÉE) Particulièrement adapté pour le repérage des réseaux : plancher chauffant, chauffage central, Alimentations-Distribution ECS / EFS	

Tableau 4 - Principales méthodes utilisées avec les réseaux détectables et les instruments correspondants

Paramètre contrôlé	Fréquence du contrôle	valeurs admissibles	Dispositions complémentaires en cas de sortie des valeurs admissibles	Commentaires
Quantité de résine injectée par point d'injection	en continu	Valeur cible +/- 25%	1) Procédure de "mise en arrêt sécurisé", 2) Procédure de « Contrôle complémentaire à l'ERT »	La valeur cible est déterminé à partir d'un tableau de synthèse complété après chaque intervention qui constitue le retour d'expérience de l'entreprise GEOSEC®. Il donne une quantité de résine cible en fonction du type de sol, de la région, de l'état de la zone du projet et de l'état hydrique instantané du sol
Température de la résine	mesurée en continu par le système d'injection	T comprise entre 20°C et 30°C	1) Procédure de "mise en arrêt sécurisé", 2) Procédure de "Contrôle et maintenance du système d'injection"	Le système possède son propre système de régulation de la température permettant de revenir à l'état optimal d'injection. Un dysfonctionnement de cette régulation a pour origine un problème du système d'injection.
Pression d'injection	mesurée en continu par le système d'injection	Valeurs nominales du système d'injection	Si l'augmentation est rapide : 1) Procédure de "mise en arrêt sécurisé", 2) Procédure de "Débouchage de la buse". Si l'augmentation est progressive : 1) Procédure de "mise en arrêt sécurisé", 2) Vérification de la température de la résine, 3) Procédure de "Contrôle et maintenance du système d'injection".	En cas de sortie des valeurs nominales, le système d'injection se met en sécurité. L'augmentation de la pression est symptomatique des deux phénomènes distincts en fonction de la vitesse d'augmentation de la pression. Une augmentation rapide est liée à un bouchage du conduit d'injection, une augmentation lente correspond à une mauvaise réaction ou rhéologie de la résine.
Temps d'injection	contrôlé par l'opérateur	temps d'injection classique +/- 100%	1) Procédure de "Mise en arrêt sécurisé", 2) Vérification de la pression et de la température d'injection, 3) Si ces paramètres (température et pression) sont dans les valeurs admissibles, procédure de "Contrôle et maintenance du système d'injection".	Une injection trop lente correspond soit à un dysfonctionnement machine, soit à une rhéologie modifiée de la résine qui peut être liée à la température de la résine dans le système d'injection ou à une mauvaise réaction chimique.
Perception de l'opérateur pendant l'injection (bruit, visuel, ...)	contrôlé par l'opérateur en continu	N/A	Craquements : 1) Procédure de "Mise en arrêt sécurisé", 2) Vérification de l'état des fissures et des ouvrants et procédure d'« Contrôle complémentaire à l'ERT ». Remontée d'eau : 1) Procédure de "Mise en arrêt sécurisé", 2a) Si la remontée est liée à l'injection dans un sol imbibé ou humide, l'injection peut reprendre, 2b) Si la remontée continue après gonflement de la résine, vérification des réseaux humides. Remontée de résine : 1) Procédure de "Mise en arrêt sécurisé", 2) Procédure de "Gestion de la remontée de résine".	Les craquements apparaissent de manière normale dans la mise en œuvre des procédés de renforcement de fondation. La procédure correspond à identifier sur les bruits entendus correspondent au comportement souhaité de la résine ou si une partie de la structure ne répond pas tel que prévu.

Tableau 5 - Paramètres contrôlés lors de la mise en œuvre du procédé SEE&SHOOT® dans le cadre de la Méthode Observationnelle

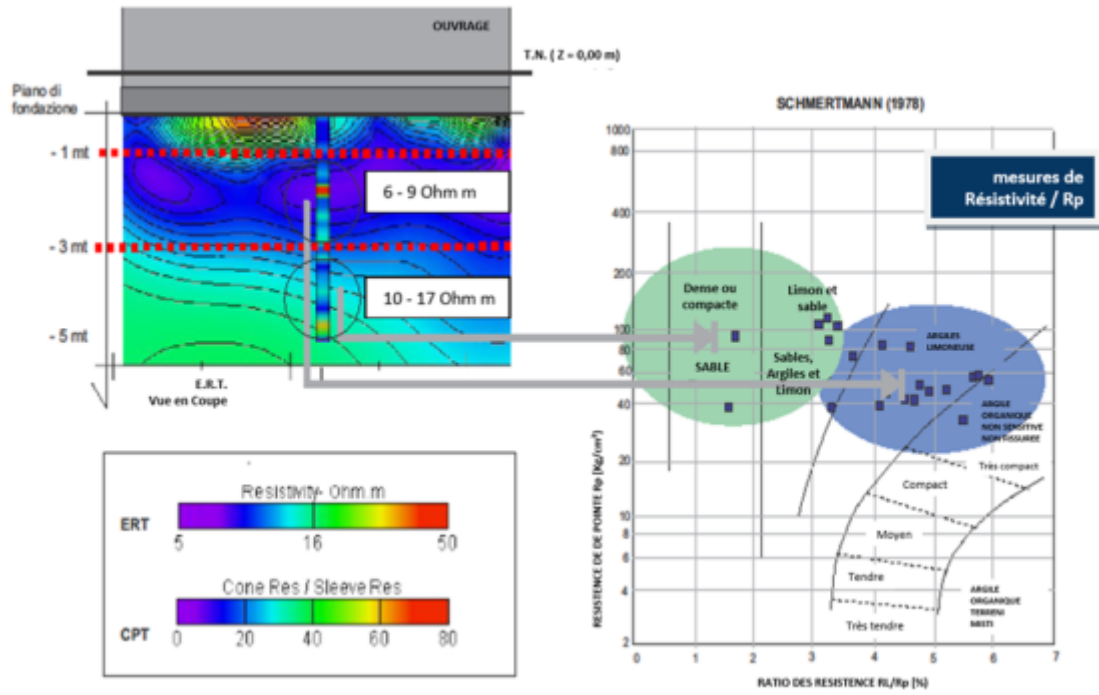


Figure 3 - Hologramme de résistivité dans le bulbe de pression et carte de classification pour le pénétromètre statique (Schmertmann, 1978). Corrélation locale des valeurs de résistivité et résistance de pointe.

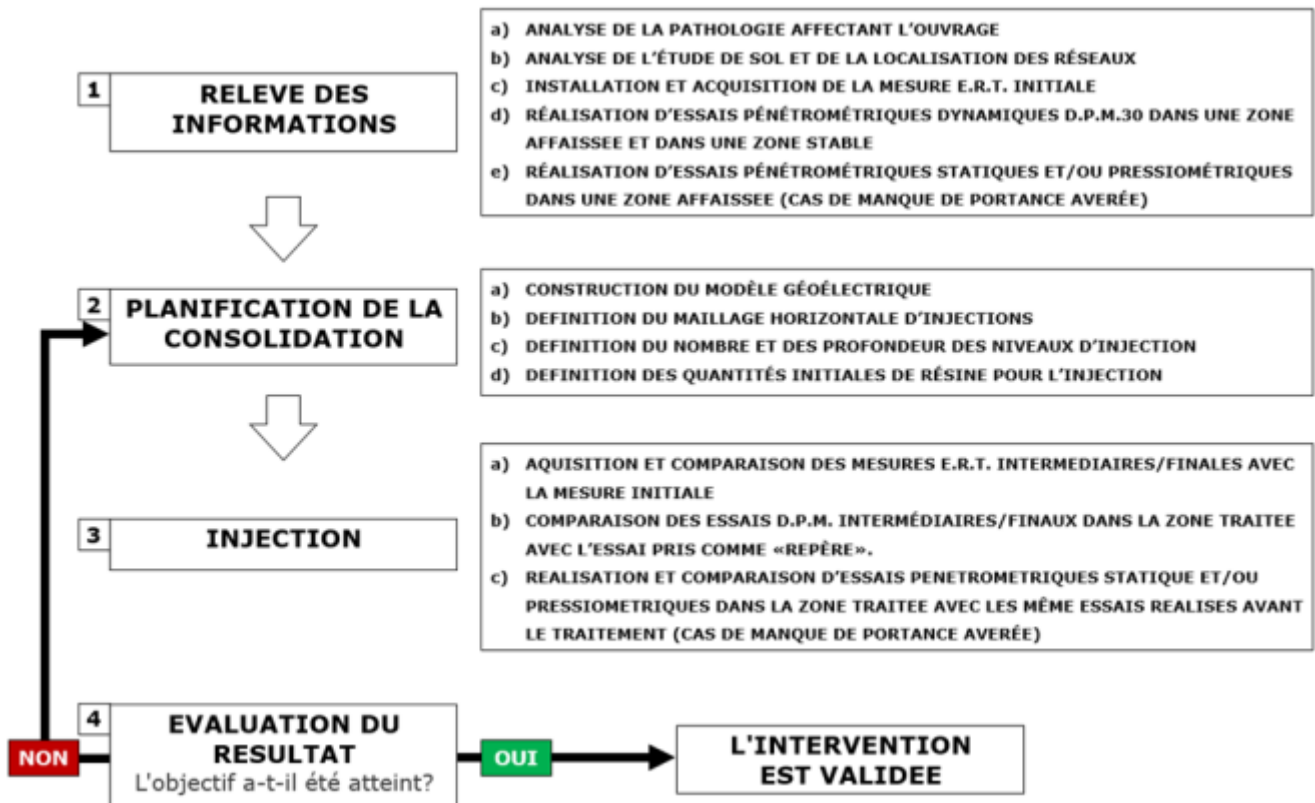


Figure 19 - Diagramme fonctionnel SEE&SHOOT®

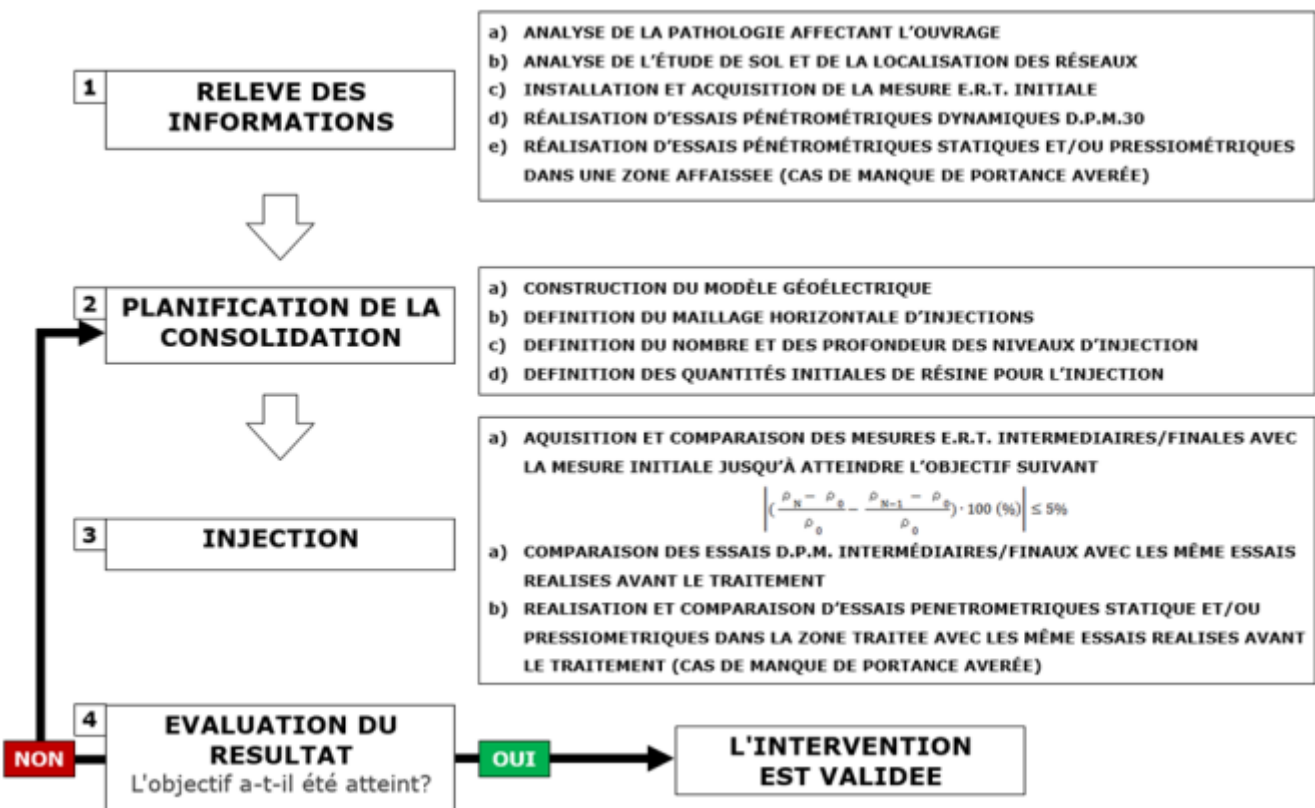


Figure 22 - Diagramme fonctionnel d'intervention SEE&SHOOT®

Phase et sous-phase de Travail	Risques	Procédures nécessaires
MISE EN PLACE DU CHANTIER	<ul style="list-style-type: none"> - Blessures et lésions pendant le transport/charge/décharge des équipements et des outils utilisés. - Blessures et lésions dues au glissement ou chute. - Risque chimique pour contact avec substances utilisées sur le chantier. - Lésion au dos lombaire lors de mouvements manuels de charges (assez modeste). - Incendie pendant la manipulation de substances présentes sur le chantier. <ul style="list-style-type: none"> - Electrocutation - Ecrasement pendant l'exécution de l'essai pénétrométrique. - Risque de trouble du système auditif pendant l'exécution des essais pénétrométriques. - Renversement de la part des véhicules qui circule dans le chantier. 	<ul style="list-style-type: none"> - En cas d'incendie se servir seulement des extincteurs portables présents sur le Geolab. - S'assurer de la mise en place des capuchons à la tête de chaque électrode. - Maintenir des distances de sécurité suffisante pendant la réalisation des essais pénétrométriques en évitant le contact direct avec l'instrument pendant l'opération de chute de la masse frappante - Utiliser les gants à prise améliorée pendant la réalisation des essais pénétrométriques. - Utiliser les EPI tels que casques et oreillettes pendant la réalisation des essais pénétrométriques. - Vérifier le trafic des engins avant tout mouvements et déplacements. Cette vérification devra être réalisée par le responsable d'équipe.
EXECUTION DES PERFORATIONS D'INJECTION	<ul style="list-style-type: none"> - Coupure ou égratignure pendant la réalisation des percements avec la perceuse - Vibration pendant l'utilisation prolongée de la perceuse <ul style="list-style-type: none"> - Inhalations de poussière (assez modeste) - Chute d'objets du plan de travail - Luxations et contusions au buste et avant-bras pendant la phase de percement <ul style="list-style-type: none"> - Etranglement et électrocutation - Explosion - Risque de trouble du système auditif pendant la phase de percement 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation des EPI antipoussière - En cas d'élévation excessive de poussière, se servir des masques antipoussière jetable. - Utiliser perceuses en dotation avec dispositif ROTO-STOP et poignée ergonomique antivibrations et utilisation des gants antivibrations. - Pendant le percement s'en tenir attentivement à la Fiche Formative 02 Usage de la perceuse rédigée par GEOSEC. - Exécution des percements de façon lente et nettoyage du fourreau tous les 15-20 cm d'avancement de la pointe - La poignée de la perceuse doit être solide et positionnée dans le sens contraire à la rotation de l'outil, pour assurer le soutien et l'aide du buste. - Aspirer les poussières avec aspirateur en dotation, afin d'éviter obstruction. - Arrêter temporairement l'installation électrique interférente et le réseau d'eau et gaz interférent avant le début de la phase de percement. - En cas d'impossibilité d'arrêter la distribution d'électricité utiliser un tapis en caoutchouc à mettre entre le sol et la chaussure. - Utiliser les EPI tels que casques et oreillettes pendant l'exécution des percements avec perceuse
INJECTION DE RESINE	<ul style="list-style-type: none"> - Contact accidentel avec la résine d'injection - Inhalation anhydride carbonique pour éventuelle sortie de résine du sol ou du raccordement des tuyaux d'injection. - Contact avec les parties chaudes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser l'habillement en tyvek intégral avec capuche. - Utiliser des masques contre les vapeurs organiques ABEK3. - Utiliser des lunettes/écran contre les éclaboussures <ul style="list-style-type: none"> - Utiliser les gants pendant l'opération de désamorçage de la tête du pistolet d'injection. Cette opération devra toujours être exécutée avec machine en sécurité et à robinets de flux fermé. - Effectuer le mélange des composantes à température max 35°C standard optimal T.25°C.
DEMOBILISATION CHANTIER	<ul style="list-style-type: none"> - Contact avec des parties tranchantes - Contusions par choc avec partie en pression (raccordement) 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser gants à prise améliorée pour opérations de coupe. - Avant de dévisser un raccord du tube d'injection, s'assurer d'avoir évacué l'air comprimé à l'intérieur en utilisant un bec mâle comme celui du terminal d'injection. Pendant la phase de dévissage du raccord, faire très attention à ne jamais tenir le visage et la tête sur la verticale de la poignée du tube afin d'éviter d'être touché par la partie encore en pression restante.

Tableau 6 – Tableau d'analyse des risques et solutions