



INSPECTION GENERALE DES CARRIERES



# Notice technique

*Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien*



IGC - 31 janvier 2016

# Notice technique

## *Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien*

### Table des matières

1	Dispositions communes aux notices techniques de l'Inspection générale des carrières.....	2
1.1	Des prescriptions minimales.....	2
1.2	Des professionnels compétents .....	3
1.3	Utilisation des notices techniques.....	4
1.4	Choix de la méthode de confortation.....	5
1.5	Obligations du maître d'ouvrage.....	5
2	Reconnaissance de sol initiale.....	5
2.1	Caractère obligatoire de la reconnaissance de sol initiale .....	5
2.2	Nombre minimal de sondages en fonction de la parcelle et du projet.....	6
2.3	Exécution de la campagne de reconnaissance de sol .....	7
2.3.1	Sondage carotté .....	7
2.3.2	Sondages destructifs et mesures de la radioactivité naturelle .....	7
2.4	Interprétation des résultats et rapport de sol .....	8
3	Essais d'injection gravitaire .....	8
3.1	Objectifs des essais d'injection gravitaire .....	8
3.2	Exécution des essais d'injection gravitaire .....	9
3.3	Interprétation des essais d'injection gravitaire .....	9
4	Travaux de confortation par injection .....	10
4.1	Forages .....	10
4.2	Injection de comblement des anomalies et clavage .....	11
4.3	Injection de traitement des fontis et des cloches de fontis .....	11
4.4	Qualité des matériaux mis en œuvre .....	11
4.5	Sondages de contrôle .....	12
5	Documents à fournir à l'Inspection générale des carrières par le maître d'ouvrage .....	13

L'objet de la présente notice est de rassembler les règles de l'art des reconnaissances de sol minimales à réaliser dans les zones touchées par la dissolution du gypse antéludien ainsi que celles des travaux de confortation par injection à mener pour s'affranchir des risques de mouvement de terrain en résultant.

## 1 Dispositions communes aux notices techniques de l'Inspection générale des carrières

---

La prise en compte des risques de mouvement de terrain liés aux anciennes carrières et à la dissolution du gypse antéludien peut amener le maire à assortir les autorisations d'urbanisme délivrées de prescriptions ou de recommandations visant à garantir la sécurité des personnes et des biens face à ces risques. Dans le cadre de ses missions de conseil technique du maire, l'Inspection générale des carrières s'appuie sur des notices techniques qui fixent des règles minimales à respecter pour les reconnaissances de sol, ainsi que l'exécution et le contrôle des travaux de confortation.

Ces règles sont issues de la pratique des confortations de sols en région parisienne. Élaborées avec les professionnels du secteur, elles dressent les conditions générales de prise en compte des risques liés aux mouvements de terrains consécutifs à la présence d'anciennes carrières souterraines ou de poches de dissolution du gypse antéludien.

Les conditions particulières de prise en compte de ces risques dans le cadre spécifique de chaque projet, la conception, le dimensionnement et la bonne exécution des ouvrages, relèvent cependant de la seule responsabilité des acteurs de la construction : le maître d'ouvrage et ses prestataires (maître d'œuvre, entreprise, bureau de contrôle technique...).

En application de l'article 552 du code civil, la propriété du sol emporte la propriété du dessus et du dessous. Le propriétaire de la parcelle est donc responsable des dommages que le sous-sol peut causer. Par conséquent, la charge financière des études et des travaux de mise en sécurité des sols revient au propriétaire de la parcelle, même lorsqu'ils sont prescrits par l'autorité administrative compétente dans la délivrance d'une autorisation d'urbanisme.

### 1.1 Des prescriptions minimales

Les références quantitatives fixées dans les notices techniques sont des valeurs minimales à respecter dans le cadre des reconnaissances et des travaux de confortation du sous-sol en région parisienne. Cependant, les acteurs de la construction restent pleinement responsables de la conception et de l'exécution des travaux de confortation des sols, y compris de l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre de leur préparation et de leur exécution, notamment en ce qui concerne :

- Les valeurs quantitatives arrêtées
- Le contrôle des résultats obtenus

À ce titre, ils sont légitimes pour renforcer les prescriptions minimales prévues dans les notices techniques.

Les acteurs de la construction sont également responsables de la mise en œuvre des normes et règlements en vigueur, et notamment : eurocodes, documents techniques unifiés ou fascicules relatifs aux forages, aux essais pressiométriques, aux études géotechniques et de reconnaissance des sols, aux fondations profondes, aux liants hydrauliques et aux ciments, aux cendres volantes pour béton.

Enfin les notices techniques de l'Inspection générale des carrières ne traitent pas des mesures nécessaires à la sécurité lors de l'exécution des travaux de confortation et de confortation des sols, pour lesquelles des dispositions réglementaires existent et s'appliquent. Il en va en particulier ainsi :

- De la mise en œuvre des principes et des règles de prévention des risques en matière de conditions de travail, de prévention des chutes de hauteur ou des risques d'ensevelissement, d'utilisation de machines, d'exposition à des produits chimiques dangereux ;
- De la coordination des entreprises sur les chantiers ;
- De la préservation de la stabilité des avoisinants
- De la prise en compte de réseaux existants à proximité

## 1.2 Des professionnels compétents

De ce fait, le maître d'ouvrage doit s'entourer de professionnels compétents et ayant une police d'assurance garantissant l'activité exercée.

Il n'existe pas d'agrément ou de certification spécifique aux travaux de confortation des cavités. Toutefois les qualifications suivantes peuvent témoigner de l'expérience de l'entreprise:

- Pour les bureaux d'études et les géotechniciens : qualifications de l'organisme de qualification de l'ingénierie (OPQIBI) dans le domaine des techniques du sol ;
- Pour les entreprises de travaux : qualifications de la fédération nationale des travaux publics (FNTP) dans le domaine préparation des sites, fondations et terrassements, et de l'organisme de qualification des entreprises de la construction (QUALIBAT) dans le domaine fondations et soutènement.

Pour les bureaux de contrôle technique, et lorsqu'il y est recouru, l'agrément est obligatoire (article L 111-25 du code de la construction et de l'habitat). Le recours lui-même à un bureau de contrôle technique est obligatoire dans les cas prévus en application de l'article L 111-26 du code de la construction et de l'habitat. Le maître d'ouvrage peut également missionner un bureau de contrôle technique pour intervenir dans le cadre d'une mission de vérification technique relative aux travaux de confortation des carrières souterraines ou d'injection des poches de dissolution du gypse antéludien. Dans ce cas, son intervention doit débuter dès l'élaboration du projet et son avis est requis préalablement à la transmission du dossier de récolement à l'Inspection générale des carrières.

Il convient de souligner que la norme NF P 94-500 propose une classification et un enchaînement des missions types d'ingénierie géotechnique correspondant aux différentes phases du projet, permettant d'encadrer les missions confiées aux géotechniciens.

Les maîtres d'ouvrage peuvent obtenir des informations complémentaires auprès d'organisations professionnelles, et notamment :

- L'Union Syndicale Géotechnique (U.S.G.)
- Le Syndicat des Entrepreneurs de Sondages, Forages et Fondations Spéciales (SOFFONS)

### 1.3 Utilisation des notices techniques

Les notices techniques de l'Inspection générale des carrières s'appliquent en vue de la prévention des risques de mouvements de terrain liés :

- A la présence de vides ou de zones décomprimées consécutifs à l'exploitation de carrières souterraines
- A la présence de vides ou de zones fortement décomprimées consécutives à la dissolution du gypse antéludien

Elles ne traitent pas des risques sismiques, des risques de glissement de terrain, ni des risques liés au retrait-gonflement des argiles.

Trois notices techniques traitent de la confortation des sols au droit d'anciennes carrières souterraines :

- Travaux de consolidations souterraines exécutés par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne
- Travaux de consolidations souterraines exécutés par injection pour les carrières de calcaire grossier, de gypse, de craie et les marnières
- Injection gravitaire, clavage et traitement des fontis, préalables à la mise en œuvre de fondations profondes, de type pieux ou micropieux de type supérieur ou égal à II, en zone sous minée par d'anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert

Une notice technique traite de la confortation des sols dans des zones de dissolution du gypse antéludien :

- Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien

Elles abordent non seulement les conditions minimales à respecter dans le cadre des travaux de confortation, mais également :

- Les conditions de réalisation des études préalables visant à mieux cerner les risques. Ces études ont pour objectif de permettre au géotechnicien de conclure clairement sur les mesures de prévention à prendre dans le cadre du projet soumis à autorisation d'urbanisme.
- Le contenu des dossiers des ouvrages exécutés à fournir à l'Inspection générale des carrières avant la déclaration de conformité des travaux aux prescriptions de l'autorisation d'urbanisme. Ces éléments sont à transmettre par le maître d'ouvrage après leur validation par le maître d'œuvre et l'avis formulé par le bureau de contrôle technique s'il y est recouru dans le cadre de l'opération

Le vocabulaire utilisé au sein des notices techniques est celui défini dans la norme NF P 94-500. En complément, il est précisé que le terme de consolidation est réservé aux méthodes permettant de conférer au sol des caractéristiques mécaniques minimales (travaux de maçonneries souterraines, travaux d'injection de comblement-clavage-traitement). Pour désigner l'ensemble des travaux abordés dans les notices techniques techniques, il sera préféré le terme de confortation des sols.

## 1.4 Choix de la méthode de confortation

Dans certains cas, les prescriptions accompagnant l'autorisation d'urbanisme en zone d'anciennes carrières peuvent laisser aux acteurs de la construction le choix entre plusieurs méthodes de confortation. Il leur revient alors de vérifier leur pertinence technique, en fonction notamment de l'état et des caractéristiques de la carrière, de son ciel et des terrains de recouvrement. Les méthodes peuvent présenter par ailleurs des différences de coûts, de délais d'exécution (contrôles et reprises éventuelles incluses), de contraintes de réalisation, de conditions de contrôle des travaux... Le choix entre les différentes méthodes envisagées par la prescription est alors de l'entière responsabilité du maître d'ouvrage et des acteurs de la construction.

## 1.5 Obligations du maître d'ouvrage

Quel que soit le mode de confortation retenu, le maître d'ouvrage, soit directement, soit par l'intermédiaire de son maître d'œuvre, doit prévenir l'Inspection générale des carrières des dates prévisionnelles de commencement des travaux de confortation et en autoriser l'accès aux contrôleurs de l'Inspection générale des carrières afin de vérifier la conformité de leur mise en œuvre aux règles minimales prévues par les notices techniques. Les diagraphies des forages et les fiches de suivi d'injection seront tenues à disposition des contrôleurs de l'Inspection générale des carrières.

Par ailleurs, il est rappelé que les travaux d'injection doivent nécessairement prendre en compte la protection des galeries municipales ou départementales qu'il convient de préserver en l'état (constat contradictoire à établir préalablement aux travaux avec l'Inspection générale des carrières conformément aux arrêtés municipaux en vigueur). Plus généralement, toutes les dispositions doivent être prises pour éviter tout désordre et incident aux bâtiments riverains, aux ouvrages enterrés, aux plantations voisines du chantier, au cours de la mise en œuvre des injections. Ces mesures sont de la responsabilité exclusive du maître d'ouvrage et des acteurs à la construction.

## 2 Reconnaissance de sol initiale

---

### 2.1 Caractère obligatoire de la reconnaissance de sol initiale

Une reconnaissance de sol initiale doit être obligatoirement réalisée pour permettre de repérer les zones de dissolution des bancs de gypse contenus dans les différentes couches géologiques du terrain situées au-dessus de l'horizon du calcaire grossier.

Le programme des reconnaissances de sol initiales à effectuer sera conçu et réalisé sous la responsabilité entière du géotechnicien missionné par le maître d'ouvrage. Il devra définir le moyen d'arriver à posséder le maximum d'indications sur la présence des poches de dissolution de gypse et des décompressions du terrain, en fonction des constructions existantes, des constructions nouvelles et des utilisations du terrain projetées.

Il devra permettre de préciser sans ambiguïté la hauteur totale du terrain présentant un risque lié à la dissolution du gypse. L'examen des cas historiques de remontée de fontis montre l'importance que peut revêtir la dissolution du banc de gypse situé à la base des marnes et caillasses, même à relativement grande profondeur. L'étude de reconnaissance doit donc clairement identifier la cote du toit du calcaire grossier. Pour cette raison, il

appartiendra au géotechnicien, dans le cadre de sa mission, de déterminer exactement la cote du toit du calcaire grossier au besoin au moyen d'un sondage carotté réalisé sur les derniers mètres du forage, qui confirmera les informations qu'il aura pu recueillir sur la carte géologique du site.

Les mesures minimales décrites ci-après peuvent être complétées par des prospections sur les différents aquifères (mesures de niveaux d'eau, teneurs en sulfate...).

Les forages devront être rebouchés sur toute la hauteur à l'issue de la campagne de reconnaissance de sol.

En cas de présence de gypse, la validité des conclusions de l'étude géotechnique est limitée à 5 ans après la réalisation des sondages.

## 2.2 Nombre minimal de sondages en fonction de la parcelle et du projet

Le nombre de sondages à effectuer sera déterminé par le géotechnicien dans le but de rechercher les niveaux gypseux et les phénomènes de dissolution susceptibles d'affecter le projet.

Ce nombre permettra de circonscrire les risques, de détecter les anomalies potentielles et de définir un programme de travaux permettant de livrer au maître d'ouvrage, en fin d'opération, un terrain exempt de tout risque d'affaissement ou de remontée de fontis.

La base d'évaluation déterminant le nombre minimal de sondages pour la recherche des vides de dissolution du gypse antéludien sera de 2 minimum jusqu'à 500 mètres carrés de terrain bâti ou 1 000 mètres carrés de terrain non bâti, plus un sondage par tranche supplémentaire de 500 mètres carrés de terrain bâti ou de 1 000 mètres de terrain non bâti.

50% des forages destructifs feront l'objet d'une mesure de la radioactivité naturelle (gamma ray) (nombre arrondi à l'entier inférieur)

Le pourcentage de sondages équipés en gamma ray pourra être réduit si le maître d'ouvrage est en mesure de fournir une étude historique et géologique de la totalité de la parcelle, précisant sans ambiguïté l'existence et la hauteur de bancs de gypse inclus dans les différentes couches géologiques. La validité de cette étude sera appréciée par l'Inspection générale des carrières.

Cette base d'évaluation du nombre minimal de sondages de reconnaissance préliminaire demandé lors de l'instruction du permis de construire pourra être modifiée par l'Inspection générale des carrières, et conduire dans certains cas à une augmentation significative du nombre de sondages demandés en fonction de la sensibilité du site.

Ce nombre minimal peut être insuffisant pour permettre un dimensionnement du programme des travaux d'injection des anomalies détectées. Il est alors de la responsabilité du maître d'œuvre, s'il le juge nécessaire, de définir, en liaison avec le géotechnicien, un nombre de sondages supplémentaires lui permettant de définir le programme complet des travaux à réaliser pour assurer la mise en sécurité totale de la parcelle à construire.

## 2.3 Exécution de la campagne de reconnaissance de sol

### 2.3.1 Sondage carotté

Ce sondage peut être réalisé afin de déterminer la cote N G F exacte du toit du calcaire grossier sur la parcelle (orthométrique Ville de PARIS = N G F - 0,33). Son implantation et son exécution s'effectuent sous la responsabilité du géotechnicien.

### 2.3.2 Sondages destructifs et mesures de la radioactivité naturelle

Le but de ces investigations est de déterminer le plus précisément possible la présence et la cote (orthométrique Ville de Paris), des bancs ou lentilles de gypse antéludien, des vides francs de dissolution du gypse et des zones de terrain décomprimé.

La technique de forage doit être homogène sur l'ensemble du forage. La technique en rotation simple doit être privilégiée. Le passage en roto-percussion pour la traversée de bancs durs lorsque la machine a des caractéristiques contraintes par les conditions d'installation sur site est toléré si cela est clairement mentionné en commentaire sur la diagraphie.

Un minimum de quatre paramètres de forage sera enregistré :

- vitesse d'avancement de l'outil de forage ;
- pression sur l'outil de forage ;
- pression d'injection du fluide de refroidissement ;
- couple de rotation ou retenue.

En rotopercussion, la percussion réfléchie doit également être enregistrée.

Pour une meilleure interprétation des enregistrements, il est recommandé de régler la pression sur l'outil à une valeur constante et suffisamment élevée, pour pouvoir déceler les vides de faible importance.

Le diamètre de l'outil de forage doit être de 89 mm minimum. Un diamètre inférieur pourra être toléré dans les cas où les conditions d'accès au site nécessitent l'emploi de machines démontables et de faible puissance.

La valeur des paramètres, à partir desquels un vide franc peut être décelé doit être déterminée et étalonnée à partir d'essais à vide de l'outil de forage, réalisés à différentes profondeurs, avec enregistrement de la retenue le cas échéant. La vitesse d'avancement lors des essais à vides doit être au minimum de 500 m/h. Une vitesse inférieure pourra être tolérée dans les cas où les conditions d'accès au site nécessitent l'emploi de machines démontables et de faible puissance.

Dans certains terrains, des vitesses d'avancement proches de celles des essais à vide peuvent être observées malgré l'absence de vide. Dans ce cas, le géotechnicien précisera ce qui l'a conduit à conclure à la présence ou pas de vide et, le cas échéant, ce qui lui a permis de déterminer la hauteur de vide (analyse d'autres paramètres, témoignages du foreur, interruption de l'enregistrement pour des essais avec coupure de la rotation et de la pompe du fluide de refroidissement...).

Un certain nombre de ces forages seront équipés pour le passage d'une sonde permettant d'effectuer une diagraphie de radioactivité naturelle, couramment appelée gamma-ray ou



R.A.N., et consistant à mesurer le long de la paroi du forage l'émission radioactive naturelle du terrain.

Cette diagraphie permet de repérer les bancs de gypse, d'évaluer leur épaisseur et d'affiner la coupe lithologique. La procédure de forage doit permettre de s'assurer que la sonde mesure bien la radioactivité naturelle du terrain, et pas celle de boues apportées.

## 2.4 Interprétation des résultats et rapport de sol

Les résultats de la campagne de reconnaissance de sol seront obligatoirement interprétés par le géotechnicien dans son rapport. Il devra conclure sur la présence de phénomènes de dissolution susceptibles d'impacter le projet et sur la nécessité d'entreprendre des travaux de confortation. Le recensement des anomalies, l'évaluation du gypse restant et l'interprétation des diagraphies des sondages restent de la seule responsabilité du géotechnicien.

Dans sa version transmise à l'Inspection générale des Carrières, le rapport devra également présenter le plan d'implantation de l'ensemble des forages ainsi que les diagraphies des forages et des essais à vide, et de la mesure de radioactivité naturelle. Celles-ci préciseront et les cotes (NGF, nvp...) et les profondeurs. Les retours du foreur seront repérés sur les diagraphies : plage de vide, perte de fluide, retour de fluide, passage éventuel en rotopercussion.

Une description sommaire du matériel utilisé doit être fournie (type de foreuse, outil de perforation, système de forage, diamètre de l'outil foreur...).

Concernant la mesure de la radioactivité naturelle, le type de sonde utilisée, son identification et la date de son dernier étalonnage seront précisés dans le rapport de l'étude de reconnaissance. Le dernier étalonnage, effectué à partir de l'enregistrement de la réponse de la sonde par rapport à un sondage carotté, devra avoir été effectué depuis moins d'un an. À la demande de l'Inspection générale des carrières, le géotechnicien mettra à disposition la courbe d'étalonnage et la coupe du sondage carotté de référence.

## 3 Essais d'injection gravitaire

---

### 3.1 Objectifs des essais d'injection gravitaire

Dans le cas où la reconnaissance de sol aura décelé sur la parcelle une anomalie, un vide franc ou une décompression significative, et compte tenu de son analyse et de son interprétation des sondages, y compris du potentiel de gypse restant, il appartiendra au géotechnicien ou au maître d'œuvre spécialisé de décider, en accord avec le maître d'ouvrage, de l'opportunité de compléter la campagne de reconnaissance de sols par des essais d'injection gravitaire.

L'objectif de ces essais est de permettre d'apprécier la capacité d'absorption des terrains de la parcelle, de fournir les critères d'appréciation de la nécessité de réaliser des travaux d'injection dans les anomalies détectées, et d'affiner l'évaluation de l'ampleur des travaux de confortation à réaliser sous la parcelle. L'implantation et le nombre des essais seront déterminés par le géotechnicien.

La responsabilité de la conception et de l'exécution des essais d'injection gravitaire relève du géotechnicien ou du maître d'œuvre spécialisé. Il lui appartient de mettre en œuvre tous les moyens à sa disposition pour faire exécuter l'ensemble des essais prévus, de définir le nombre minimal d'essais à réaliser, d'en suivre la bonne exécution et d'en interpréter les résultats dans le rapport final de la reconnaissance de sol.

### 3.2 Exécution des essais d'injection gravitaire

L'Inspection générale des carrières sera tenue informée de la date prévisionnelle du début des essais d'injection gravitaire.

Les essais seront réalisés par une entreprise qualifiée, ou par un bureau d'études géotechniques qualifié s'il dispose du matériel permettant de les effectuer.

Les paramètres de forage seront enregistrés (voir 2.3.2 *Sondages destructifs et mesures de la radioactivité naturelle*).

Le diamètre de ces tubes sera adapté à la nature du coulis à mettre en œuvre ainsi qu'aux volumes et débits correspondants, avec un minimum de 60 mm intérieur.

Le comblement se fera par remplissage de chaque forage, au travers d'un tube crépiné, d'un volume prédéterminé par le géotechnicien. La profondeur du coulis dans le forage sera mesurée à l'issue de l'essai. Ces données permettront de comparer les diagraphies des forages avec la quantité de coulis absorbé pour une couche de terrain donnée.

Toutes les dispositions devront être prises pour éviter la dispersion du coulis hors de la parcelle concernée, en particulier, sa pénétration dans les ouvrages souterrains à conserver.

Le coulis aura la composition suivante en proportion : 865 litres d'eau, 360 kg de ciment, 30 kg de bentonite (pas de sablon). L'approvisionnement par des fournisseurs de béton prêt à l'emploi est proscrit.

### 3.3 Interprétation des essais d'injection gravitaire

Lorsque des forages consécutifs à la détection d'une anomalie auront été équipés pour la réalisation d'un essai d'injection gravitaire, les quantités réelles de coulis injecté ou absorbé jusqu'à résurgence éventuelle devront être consignées sur un tableau journalier. Ce tableau comportera au minimum la mesure du temps de remplissage et la mesure de la cote d'altimétrie du coulis à 24 heures.

Le rapport final de reconnaissance de sols intégrera :

- Les éléments du rapport de la reconnaissance de sol initiale
- Le plan d'implantation des forages de reconnaissance initiale et des essais d'injection gravitaire
- Les diagraphies des forages, des essais à vide, et des mesures gamma-ray
- Les tableaux récapitulatifs des essais d'injection gravitaire
- L'analyse et l'interprétation des différents résultats par le géotechnicien ou le maître d'œuvre spécialisé, avec une conclusion explicite sur la nécessité ou pas de réaliser des travaux d'injection des anomalies.

## 4 Travaux de confortation par injection

---

### 4.1 Forages

Les forages seront réalisés au moyen de foreuses travaillant de préférence en rotation simple à l'aide de boue bentonitique ou à l'eau claire ou par tout moyen permettant la tenue des parois du forage.

Au moins quatre paramètres seront enregistrés de manière à affiner les quantités prévisionnelles à injecter et éventuellement les renforcements à apporter au schéma prévisionnel d'injection: vitesse instantanée d'avancement de l'outil, pression d'appui exercée sur l'outil, pression d'injection du fluide de perforation, couple de rotation de l'outil.

La vitesse de pénétration devra être représentée sur une échelle correspondant à la vitesse de saturation constituant l'étalonnage de la vitesse d'avancement de la machine utilisée. Le cas échéant, elle devra également être représentée sur une deuxième échelle permettant une appréciation plus fine.

Des essais d'étalonnage à vide du matériel seront réalisés à différentes profondeurs, sans rotation ni injection.

Le maillage général maximum sur la parcelle sera de 5,00 m x 5,00 m pour les zones bâties et leurs abords (jusqu'à 5 mètres des façades, dans la limite de la parcelle ) et 7,00 m x 7,00 m pour les zones non bâties.

Ce maillage pourra être resserré à l'initiative du maître d'œuvre au regard des anomalies constatées lors de la campagne de reconnaissance de sol initiale.

Au niveau des remontées de décompression dans les terrains au-dessus des bancs gypseux (cloches de fontis), les dimensions du maillage sous le bâtiment projeté et ses abords immédiats seront réduites à 3,50 m x 3,50 m en fonction de l'analyse de l'ensemble des enregistrements des paramètres des forages déjà réalisés et de l'importance de ces anomalies ou des vides de dissolution détectés.

Les forages seront équipés soit de tubes lisses, soit de tubes crépinés, selon la nature du terrain traversé. Le diamètre de ces tubes sera adapté à la nature du coulis à mettre en œuvre ainsi qu'aux volumes et débits correspondants : 60 mm de diamètre intérieur minimal pour les mortiers de comblement.

Le diamètre du forage sera adapté à l'équipement prévu. Il ne sera pas inférieur à 100 mm.

La dimension des tubes crépinés doit être adaptée à la dimension des plus gros éléments du mortier. Pour les mortiers à base de sable fin ou de cendres volantes, il sera nécessaire d'avoir au minimum 6 perforations d'un diamètre minimal de 15 mm disposées en quinconce par mètre linéaire de tube ou une superficie de perforation équivalente.

Dans le cas de comblement de vides superposés en utilisant un seul forage, il y aura lieu d'adopter des dispositions spéciales pour assurer la mise en œuvre du clavage dans chaque étage de vide.

## 4.2 Injection de comblement des anomalies et clavage

Le comblement des vides francs et des zones décomprimées des couches profondes contenant ou ayant contenu du gypse antéludien est réalisé par injection gravitaire d'un mortier de ciment.

Celui-ci devra avoir une résistance minimale à la compression de 1,4 MPa à 28 jours.

Le ciment utilisé doit pouvoir résister à l'action chimique des eaux séléniteuses

Une fois que ce mortier a résurgé à la surface, les tubes seront soigneusement lavés.

Puis une injection de clavage des anomalies sera réalisée, à l'obturateur simple placé en tête, sous une pression minimale de 5 bars (pression en tête de forage), avec un mortier de ciment.

Celui-ci devra avoir une résistance à la compression de 2,2 MPa à 28 jours.

Un délai minimal de 7 jours calendaires à partir de la fin du comblement d'une zone déterminée doit être respecté avant le clavage.

## 4.3 Injection de traitement des fontis et des cloches de fontis

Le traitement des terrains décomprimés, dont l'origine est liée à l'évolution des poches de dissolution, doit être réalisé. Il sera effectué avec des injections sous pression par l'intermédiaire de tubes à manchettes dans un maillage resserré 3,5 m x 3,5 m ;

Ces tubes doivent avoir un diamètre intérieur minimal de 42 mm.

L'espace annulaire minimal pour le coulis de gaine sera de 20 mm.

## 4.4 Qualité des matériaux mis en œuvre

L'entrepreneur est tenu de pouvoir justifier à tout moment de la provenance des matériaux qu'il utilise. Les matériaux livrés seront accompagnés des lettres de voitures indiquant le lieu de provenance, le nom du fournisseur et les quantités approvisionnées.

Les ciments entrant dans les mélanges devront figurer sur la liste des produits admis à la marque NF «Liants hydrauliques » et être conformes aux normes en vigueur sur les ciments, notamment : normes NF EN 197-1 avril 2012 et NF 197-2 février 2001.

Ils devront également permettre leur utilisation en milieu agressif et être conformes aux normes NF P 15-319 janvier 2014 « Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eau à haute teneur en sulfate » et NF P 15-317 septembre 2006 « Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer ». Généralement, le ciment à utiliser est du type PM-ES, avec une centrale de production agréée N.F.V.P..

La bentonite sodique ou activée sera compatible avec les qualités de ciment indiquées ci avant.

Le sablon fin devra posséder une granulométrie de 0 à 2 mm maximum.

L'utilisation des coulis prêts à l'emploi, livrés sur site par camions toupies est possible sous réserve d'un engagement du fournisseur certifiant la qualité du produit mis en œuvre et l'absence de cendres volantes contenant des matières organiques, seules les cendres volantes des centrales thermiques au charbon étant acceptées.

Les cendres volantes proviendront exclusivement des centrales thermiques fonctionnant au charbon, et devront être conformes aux normes NF EN 450-1 octobre 2012 « Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité » et NF EN 450-2 « Cendres volantes pour béton - partie 2 : évaluation de la conformité », ou figurer sur la liste des produits NF « Additions pour béton hydraulique ».

Les cendres normalisées ne feront pas l'objet de contrôle.

Les cendres « conformes à la norme », feront préalablement l'objet d'une procédure de contrôle du Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de PARIS ou d'un laboratoire d'Essais agréé COFRAC.

Les cendres d'incinération d'ordures ménagères sont formellement interdites.

L'entrepreneur précisera la centrale d'origine de ses cendres et en donnera la composition moyenne. Il devra être en mesure d'assurer la traçabilité du transport des cendres depuis la centrale jusqu'au chantier, la maîtrise de la qualité des cendres étant de son entière responsabilité.

Des prélèvements et des essais de contrôle de la qualité des coulis seront réalisés en cours de chantier. Ils pourront être demandés par l'Inspection générale des carrières.

Tous matériaux employés autres que ceux décrits ci-dessus, en particulier les coulis prêts à l'emploi livrés sur site, devront être fournis par des centrales de fabrication agréées par le Laboratoire d'Essai des Matériaux de la Ville de Paris ou tout autre laboratoire d'essais accrédité par le Comité Français d'Accréditation - COFRAC - 37 Rue de Lyon - 75012 PARIS.

Ces matériaux ou produits prêts à l'emploi devront faire l'objet d'un agrément spécifique auprès du Laboratoire d'Essai des Matériaux de la Ville de Paris, (ou d'un autre laboratoire agréé COFRAC), du Maître d'œuvre et du Bureau de Contrôle technique avant de pouvoir être mis en œuvre.

#### 4.5 Sondages de contrôle

28 jours au moins après les travaux d'injection, des sondages destructifs seront réalisés dans le but de valider les travaux réalisés, sous la pleine et entière responsabilité du géotechnicien ou du maître d'œuvre spécialisé missionné par le maître d'ouvrage. Il est très fortement recommandé qu'ils soient réalisés ou conduits par le géotechnicien ayant réalisé la reconnaissance initiale. Le matériel utilisé devra être de performance équivalente à celui employé lors de la reconnaissance initiale.

Les modalités d'exécution des sondages de contrôle sont similaires à celles de la reconnaissance de sol initiale.

Le nombre de sondages destructifs de contrôle devra être au minimum de 1 pour 10 forages d'injection initialement prévus, arrondi à l'entier supérieur, sans pouvoir être inférieur au nombre de sondages destructifs de la campagne de reconnaissance.

En outre, un sondage pressiométrique sera effectué au droit de chaque fontis détecté et traité. Ces sondages devront permettre de s'assurer du bon niveau de confortation des terrains traités.

En cas de résultat non concluant des sondages de contrôle, il sera nécessaire de reprendre les travaux d'injection.

Dès les résultats connus, le maître d'ouvrage transmettra à l'Inspection générale des carrières le rapport des sondages de contrôle. Celui-ci devra conclure explicitement sur l'atteinte des objectifs poursuivis par la campagne d'injection définis par les maîtres d'œuvre de conception et d'exécution.

Le rapport final de reconnaissance de sols intégrera :

- Les éléments du rapport de la reconnaissance de sol initiale
- Le plan d'implantation des forages de reconnaissance, d'injection et de contrôle
- Les diagraphies des forages de contrôle et les essais à vide correspondants
- L'analyse et l'interprétation, par le géotechnicien ou le maître d'œuvre spécialisé, des éléments du dossier de récolement des travaux d'injection et des différents résultats des sondages de contrôle, avec une conclusion explicite sur l'atteinte des objectifs de confortation poursuivis dans le cadre du projet.

## 5 Documents à fournir à l'Inspection générale des carrières par le maître d'ouvrage

---

Suite à la réalisation des travaux, le maître d'ouvrage devra impérativement transmettre à l'inspection générale des carrières les éléments suivants, validés par le maître d'œuvre :

- Le dossier de récolement des travaux d'injection : plan de tir des forages, à l'échelle ou coté, et permettant de situer les travaux par rapport au site et aux projets bâtis ; diagraphies des forages ; tableaux récapitulatifs des forages et des quantités injectées en comblement, en clavage, et le cas échéant, en traitement, forage par forage ; composition des coulis ou mortiers utilisés ; comptes rendus d'essais contrôle qualité chantier, définis dans la présente notice ; certificat de l'origine des matériaux mis en œuvre, notamment en cas d'utilisation de cendres ou coulis prêt à l'emploi.
- Le rapport des sondages de contrôle
- Le cas échéant, l'avis du bureau de contrôle technique