

ONERA : Soufflerie de Modane - Avrieux (France) – Renforcement de sol en milieu gypseux

ONERA : Modane - Avrieux (France) wind tunnel – Soil reinforcement in formation containing gypsum

Bruno MAZARÉ¹, Patrick Wagner², Clément BROUILLAT-FARGIER³, Jérémy VOIRON⁴

¹ Egis SE – Géotechnique, Grenoble, France

² ONERA, Palaiseau, France

³ Spie Fondations, Cergy, France

⁴ Terrasol, Lyon, France

RÉSUMÉ – Le bâtiment M1 de la soufflerie S1MA d'Avrieux subit d'importants tassements différentiels depuis sa construction en raison de son implantation dans un contexte géologique et hydrogéologique défavorable. Une procédure de dialogue compétitif a permis de retenir une solution de confortement qui allie injections et colonnes de jet grouting. L'importance des tassements enregistrés jusqu'à présent, ainsi que la structure existante du bâtiment a conduit à rechercher les méthodes de travaux les moins impactantes. Les travaux sont en cours et font l'objet d'adaptations au jour le jour en fonction des constatations faites sur site (méthode observationnelle).

ABSTRACT – The M1 building hosting the S1MA wind tunnel in Avrieux has suffered significant differential settlements since its construction, due to its location in an unfavorable geological and hydrogeological context. A competitive dialogue procedure has made it possible to retain a reinforcement solution which includes injections and jet grouting columns. The extreme sensitivity of the site to settlements led to the search for the least penalizing work methods for the existing building. Work is in progress and has to be adapted in a continuous mode according to the observed settlements (interactive method).

1. Introduction

L'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aéronautiques) possède 12 souffleries aéronautiques dont 3 souffleries continues de très grande taille. Parmi ces dernières la soufflerie S1MA de Modane Avrieux en Savoie (cf. Figure 1) est dotée d'une veine d'essai de 8 m de diamètre et d'un circuit aéraulique de 24 m de diamètre dans sa partie la plus grande. La vitesse maximale de l'air en veine d'essai est celle de la vitesse du son. Le débit d'air dans la section d'essais est alors de 10t d'air/seconde. Cette soufflerie, alliant grandes dimensions et vitesse d'écoulement élevée est la plus puissante soufflerie transsonique au monde. Elle a été construite près de Modane en bordure de l'Arc à partir de 1946.

Le bâtiment M1 de la soufflerie S1MA, immense bâtiment en béton armé (structure poteaux – poutres de grande hauteur en forme de croix, cf. Figure 2a), est fondé sur des semelles de répartition reposant sur des pieux battus moulés de type Franki ou Simplex, de 400 à 500 mm de diamètre arrêtés entre 6 et 10 m de profondeur dans les alluvions fluvioglaciales de l'Arc. Le bâtiment abrite notamment 3 chariots mobiles constituant les veines d'essai de 500 tonnes chacun (cf. Figure 2b), où sont placées les maquettes à tester. Pour la réalisation d'un essai, un chariot doit être déplacé puis lié par verrouillage au circuit aéraulique.



Fig. 1 : Vue panoramique du centre d'Avrieux (à gauche le bâtiment M1 en forme de croix)

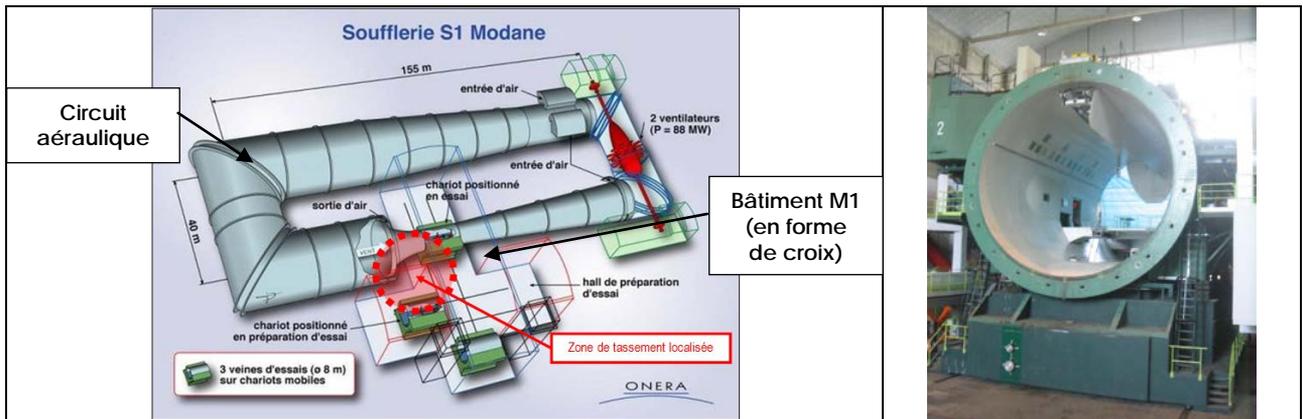


Fig. 2a : Schéma du bâtiment M1, de la veine et des chariots (un d'entre eux positionné en veine)
 Fig. 2b : Chariot veine d'essai en cours de préparation

Peu après la construction du bâtiment, des tassements sont apparus. Ces tassements n'ont pas été suivis de façon régulière. De 1953 à 2009 l'amplitude des tassements a été de 37 mm ; ces derniers se sont brutalement accélérés fin 2009 (environ 15 à 20 mm supplémentaires en 6 mois). Ils affectent principalement la zone circonscrite en rouge sur les figures 2a et 3.

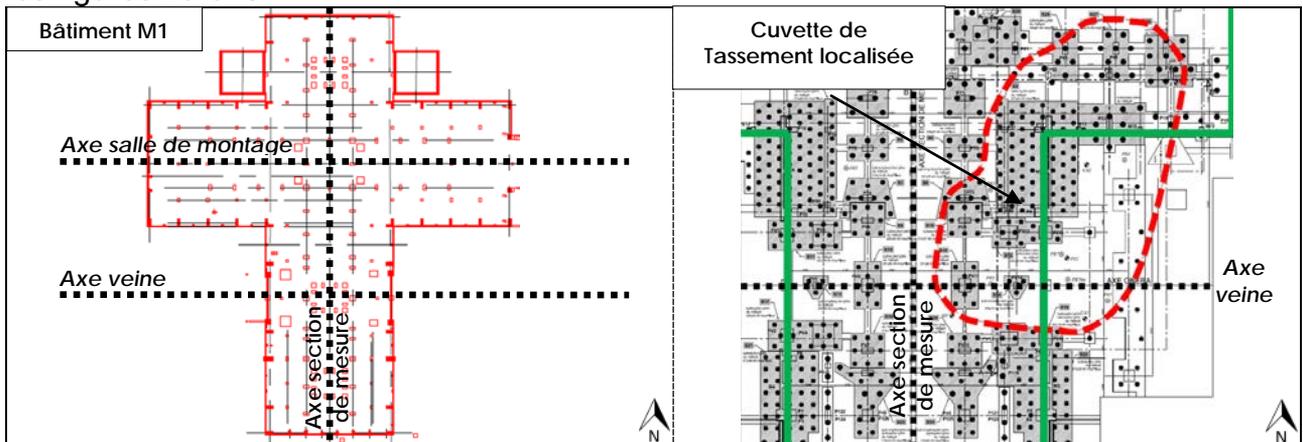


Fig. 3 : Vue en plan des fondations existante du bâtiment M1 ; cuvette de tassement maximum

2. Procédure de dialogue compétitif

Devant les difficultés rencontrées pour positionner le chariot d'essai dans l'axe de la veine à partir du début des années 2000, et devant la complexité à comprendre, diagnostiquer et proposer des solutions adéquates face à ces désordres, l'ONERA a initié une procédure de dialogue compétitif afin d'obtenir l'expertise d'une entreprise spécialiste du domaine et de mettre en œuvre une solution de stabilisation du bâtiment M1. En parallèle, l'ONERA a lancé un appel d'offres d'AMO géotechnique à la suite

duquel Egis Géotechnique a été retenu, et un appel d'offres d'AMO structure qui a été attribué au BE structure SGI Ingénierie.

Le dialogue s'est organisé en 4 phases qui se sont déroulées de 2012 à 2014. Lors de chaque phase, des reconnaissances spécifiques ont été réalisées afin de répondre aux interrogations des candidats et afin d'affiner le diagnostic. Quatre entreprises étaient en lice en phases 1 et 2, trois en phase 3 et deux en phase 4.

L'analyse des différentes solutions a été réalisée par l'ONERA et ses deux AMO.

Le projet de confortement proposé par l'entreprise SPIE Fondations, assistée de son BE d'ingénierie géotechnique Terrasol, a finalement été retenu fin 2014.

3. Reconnaissances géotechniques et diagnostic

Plusieurs campagnes de reconnaissances ont été réalisées à partir de 2009 (menées par Fondasol puis Geotec) ; elles ont consisté en la réalisation de sondages carottés, sondages destructifs avec enregistrements de paramètres et essais pressiométriques, sondages SPT, essais en laboratoire (identifications essentiellement). Des piézomètres associés à des essais de perméabilité et des essais au micromoulinet ont été réalisés pour repérer les passées les plus perméables. Ces reconnaissances ont été complétées par des panneaux électriques entre forages et des essais au cylindre électrique au droit de la zone affaissée.

On rencontre au droit de la zone affaissée du bâtiment M1 la lithologie suivante :

- Remblais et limons de surface sur quelques mètres,
- Alluvions fluvio-glaciaires, sablo-graveleuses, de la vallée de l'Arc présentes jusqu'à environ 25 m de profondeur,
- Substratum Triasique constitué de cargneules et de gypse très décomprimés (et localement dissous), présents sur une épaisseur variable mais localement importante (plus de 25 m).

Les principales observations géologiques sont reportées sur la figure 4. À noter la présence d'un éperon Triasique formé de Quartzite (tQ) et Dolomie (tD), roches dures qui barrent la vallée en aval immédiat du bâtiment M1 (côté Nord-ouest). En amont, présence d'un substratum Triasique formé de gypse et cargneules (tG), roches tendres en partie solubles dans l'eau (zone d'affaissement maximum).

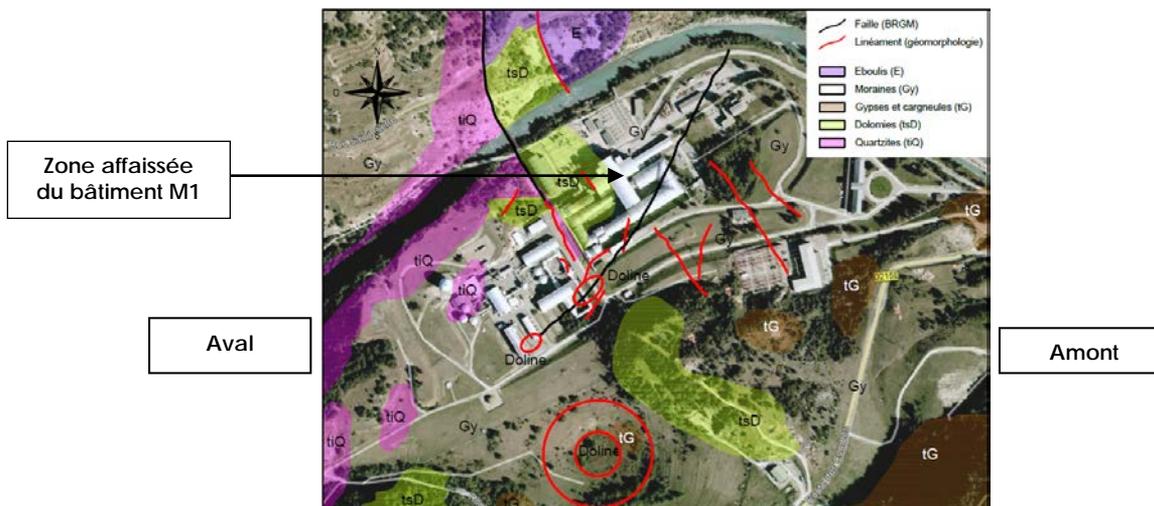


Fig. 4 : Carte géologique et géomorphologique simplifiée (repro. modèle Egis Géotechnique)

Le bâtiment M1 est donc implanté « à cheval » sur des formations quartzitiques et dolomitiques dans sa partie Ouest, et sur des cargneules et gypse plus à l'Est.

Les couches ont été fortement plissées et fracturées par la surrection alpine, ce qui explique qu'elles sont sub-verticales dans la zone d'étude.

Une faille régionale a été cartographiée par le BRGM ; elle est sensiblement d'orientation NE - SW. Elle recoupe l'éperon Triasique (tQ et tD) au Sud-ouest de M1 et permet ainsi l'écoulement des eaux profondes vers l'aval, dans l'axe de la vallée.

Les sondages réalisés ont permis de cartographier une gouttière (approfondissement du toit des cargneules et gypse) sur un linéament sensiblement parallèle à l'axe de la faille recensée par le BRGM, et centré sur la zone de tassement maximum constatée au droit du bâtiment. Cette faille régionale est à l'origine de la fracturation intense des terrains. Elle canalise sur son axe de façon préférentielle des écoulements d'eaux profondes, ce qui contribue à accélérer la dissolution du gypse.

Du point de vue hydrogéologique, il existe deux écoulements superposés : un écoulement peu profond transitant dans les alluvions fluvio-glaciaires et un écoulement profond transitant dans les cargneules et gypse. Ces derniers étant très altérés du fait de la présence de cavités, leur perméabilité est nettement supérieure à celle des alluvions. Le niveau de ces nappes est proche de la surface et fluctue en fonction des saisons (et notamment lors de la fonte des neiges au droit du bassin versant).

À l'issue des investigations menées lors du dialogue compétitif et d'une première planche d'essai réalisée en 2015, il a été mis en évidence que les tassements constatés sont en relation directe avec la présence des cargneules et du gypse altérés. Ces roches sont dissoutes par les circulations d'eau souterraines : il se forme alors des zones de décompression, pouvant évoluer en cavité. Elles engendrent une décompression des terrains sablo-graveleux sus jacents par soutirage des particules fines. Lors de cette décompression, des effets voûtes se forment dans les alluvions. Au fil de l'évolution naturelle des dissolutions, ces effets voûtes peuvent se rompre et provoquer ainsi une évolution plus ou moins brutale des tassements comme celle qui a été constatée en 2009. Ce mécanisme permet d'expliquer les tassements constatés (localisation et évolution). C'est un phénomène naturel, qui s'auto entretient. Les roches une fois partiellement dissoutes favorisent les circulations d'eau profondes, ce qui accélère encore le phénomène de dissolution. Ce dernier, du fait de son mécanisme, n'a pas de raison de s'arrêter naturellement. Si aucune action n'est entreprise le phénomène conduit irrémédiablement à une ruine totale des bâtiments en surface.

4. Solution retenue à l'issue du dialogue compétitif

L'objectif fixé par l'ONERA est de stabiliser les affaissements afin de conserver une capacité d'exploitation de la soufflerie en toute sécurité pour une période au-delà de 50 ans. La soufflerie S1MA étant essentielle pour l'industrie aéronautique civile et de défense, l'ONERA a exigé que la possibilité de maintenir une co-activité pendant les travaux, et de garantir une évolution des tassements inférieure au centimètre sur 10 ans. Sur la base du diagnostic, les travaux confortatifs ont pour premier objectif de combler les cavités présentes dans le gypse et de renforcer le massif de cargneule et gypse, afin tout d'abord de stopper le phénomène d'enfoncement, mais également de ralentir les dissolutions à venir. Le principe retenu pour les travaux est de reporter les charges apportées par la structure plus en profondeur dans des terrains à caractéristiques mécaniques améliorées.

La solution confortative proposée par l'entreprise SPIE Fondations et retenue au terme du dialogue compétitif est présentée sur la figure 5, elle consiste à :

- Injecter les cargneules et le gypse sur 25 m de hauteur, afin de rendre le massif plus homogène (suppression des points faibles), limiter le risque d'évolution des vides et créer ainsi un matelas de terrain renforcé,
- Reporter ensuite les charges du bâtiment (reprises actuellement par les semelles et pieux existants) au toit de la couche de cargneule et gypse améliorée par les injections, par l'intermédiaire de colonnes de renforcement réalisée par la technique du jet grouting.

Au préalable, la réalisation d'un radier créant un lien mécanique entre les différentes bases de poteaux situées dans la zone de tassement est retenue, cela dans le but de limiter les risques de tassement différentiel entre poteaux, en particulier en phase travaux, phase apparaissant critique vis-à-vis des tassements. Des colonnes de renforcement sont également projetées sous ce radier pour améliorer sa rigidité.

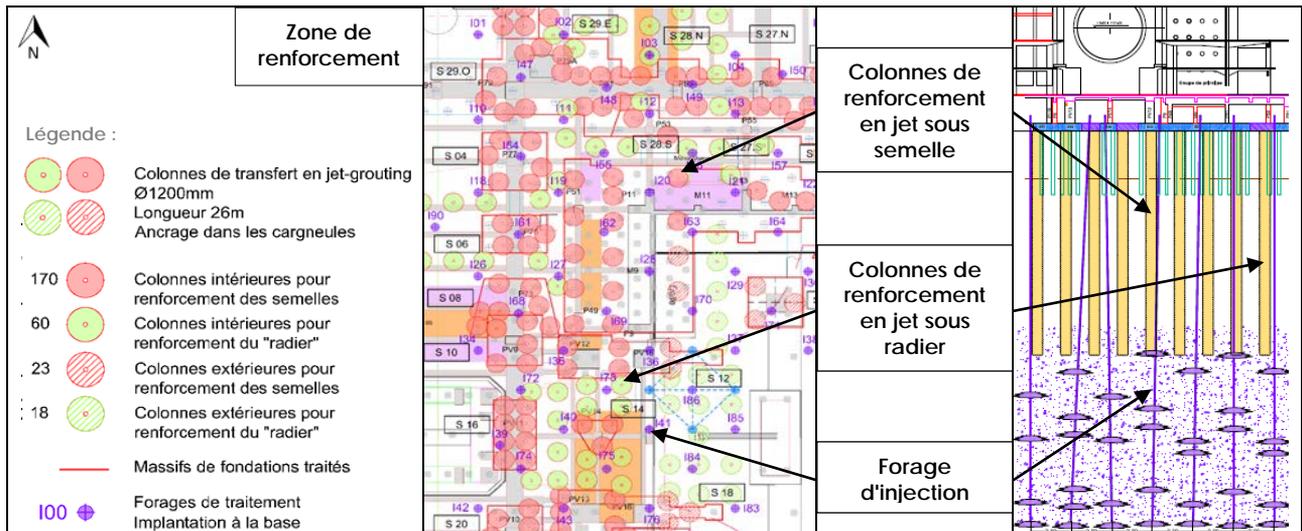


Fig. 5a : Vue en plan des fondations existantes et de la solution de confortement retenue
 Fig. 5b : Coupe simplifiée de la solution de confortement retenue au droit du bâti

5. Étude d'exécution et modélisation numérique

Un prédimensionnement du projet de renforcement a été réalisé avec le logiciel Foxta v3 selon les méthodes « classiques » d'interaction sol / structure. Il a eu pour objectif d'estimer la géométrie, la quantité et la répartition des colonnes de renforcement sous semelles et sous radier. Un approfondissement de cette étude, par la prise en compte de l'historique des tassements du bâti et du phasage de réalisation complexe des travaux de confortement, a conduit à réaliser une approche aux éléments finis.

Une première modélisation simplifiée réalisée avec le logiciel Plaxis 3D 2013 préalablement au plot d'essai, a permis de figer les hypothèses géotechniques et mécaniques à prendre en compte pour le projet, et de vérifier que les résultats respectaient les objectifs admissibles retenus en termes de tassements verticaux pour les semelles existantes et en termes de contrainte moyenne dans les colonnes.

Une seconde modélisation réalisée avec le logiciel Plaxis 3D 2016 a été développée à l'issue du plot d'essai. Elle avait pour but d'étudier le comportement du renforcement de sol retenu (injections des alluvions, traitement des cargneules, et réalisation des colonnes en jet grouting) et d'estimer son impact en termes de tassement vis-à-vis de la structure à l'échelle globale du bâtiment M1. Afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement global de l'ouvrage, une procédure de calage itérative a été effectuée en accord avec les modèles « structures » menés par le BE SGI et avec l'historique des tassements mesurés au droit de l'ouvrage.

L'étude a nécessité la prise en compte d'une géologie variable, en considérant la remontée du substratum dans l'angle Nord-ouest du bâtiment, et des variations significatives du toit et de l'épaisseur des cargneules et gypse comme mis en évidence sur la figure 6. Afin de permettre l'établissement d'un maillage aux éléments finis de bonne qualité, et de limiter les « effets de pics » occasionnés par une variation de géométrie importante, l'allure globale de la lithologie a été simplifiée à l'aide du logiciel de CAO Rhino 3D, en lissant les différents profils en surfaces curvilignes (connues sous le nom de NURBS : Non-Uniform Rational Basis Splines), et en veillant à maintenir un degré de précision suffisant.

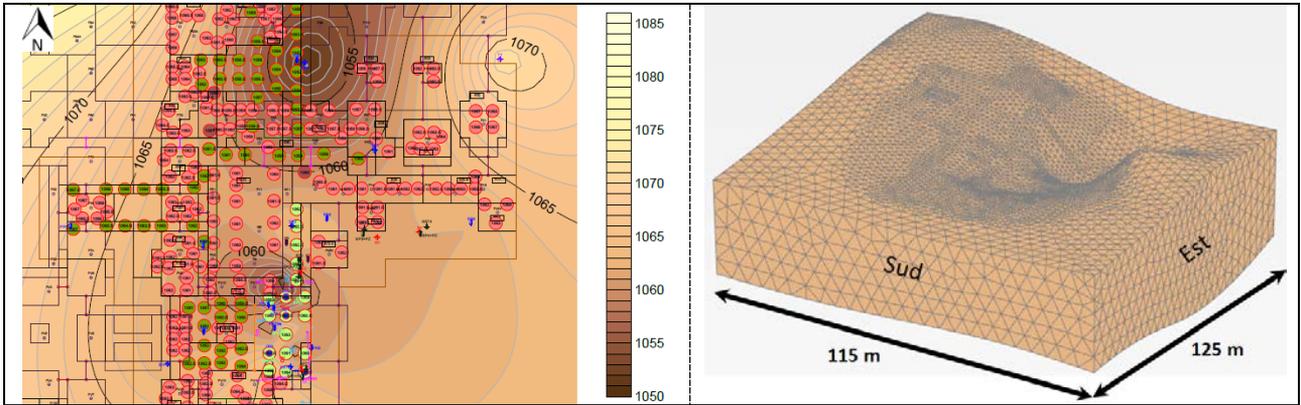


Fig. 6 : Toit des cargneules - Logiciel Surfer 12 ; Modélisation des cargneules Logiciel Plaxis 3D 2016

Un recalage précis de la modélisation, effectué à partir de l'historique des tassements, a permis de simuler l'allure et l'amplitude de la cuvette de tassement mesurée, et donc de reproduire le comportement général du bâtiment M1 de sa construction à la veille de la réalisation du radier de confortement. Ce recalage a montré que l'influence des cargneules serait à l'origine de près de 50 % des tassements observés en surface, ce qui conforte le modèle géotechnique retenu et l'importance du traitement de cette formation.

A l'issu de ce recalage, le phasage global de réalisation des travaux de confortement a pu être ainsi modélisé. Il a consisté à reproduire par zone les différentes étapes clefs du projet phasées selon le degré d'urgence retenu pour la mise en œuvre du dispositif de confortement, et pilotées en fonction des tassements observés.

On retiendra les trois grandes étapes suivantes :

- Injection des alluvions sur la quasi-totalité de la zone d'affaissement,
- Traitement des cargneules et réalisation des colonnes de renforcement en jet grouting en zone prioritaire (épicentre des tassements, cf. Figure 7a),
- Traitement des cargneules et réalisation des colonnes de renforcement en jet grouting en périphérie de la zone prioritaire (épicentre des tassements).

Mais la modélisation présentait des limites car elle ne permettait pas de reproduire exactement le comportement des cargneules et des alluvions pendant les phases d'injections. En effet, tout comme repéré sur la figure 7b, il a été mis en évidence des accélérations ponctuelles des tassements lors des phases de foration. De ce fait, les tassements estimés par la modélisation étaient plus faibles que ceux mesurés.

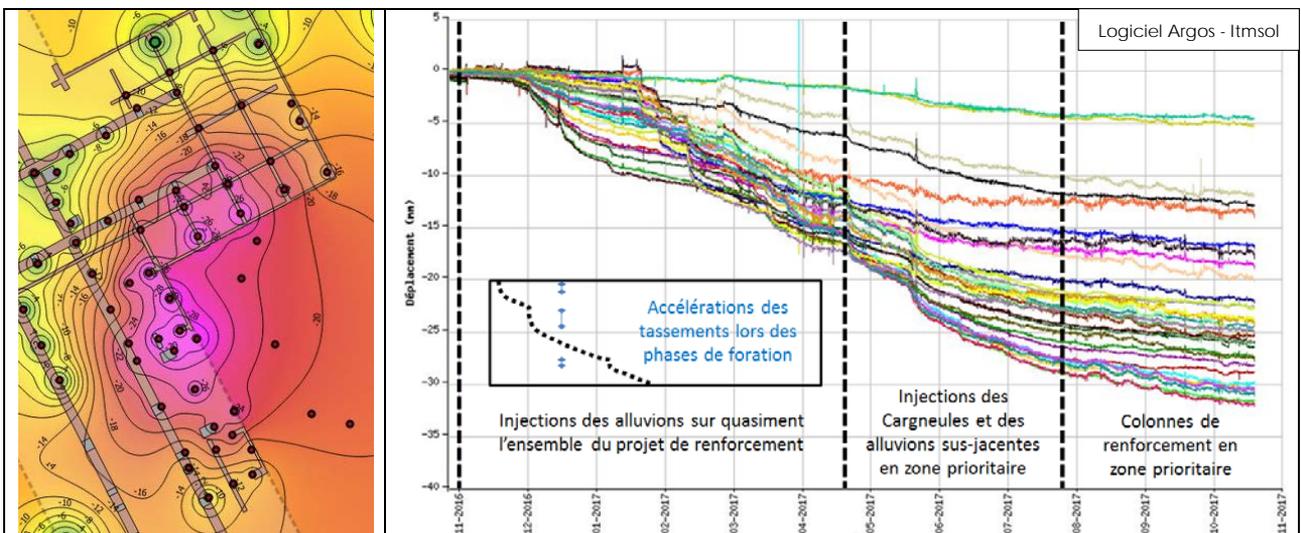


Fig. 7a : Cuvette de tassement mesurée au droit du bâtiment M1 (oct. 17 - Logiciel Argos, Itmsol)

Fig. 7b : Courbes de tassement au droit de la zone sensible du bâtiment M1 en fonction du temps

Ainsi, l'analyse, a été établie sur la comparaison des résultats calculés des tassements avec les données de suivi en temps réel de l'ouvrage à la fin de la deuxième grande étape du projet : « traitement des cargneules et réalisation des colonnes de renforcement en jet grouting en zone prioritaire », ceci afin de déterminer la part de tassement non modélisable (de l'ordre de 40%).

C'est donc à partir de cette estimation, qu'il a été possible de pondérer l'amplitude des tassements estimés par la modélisation à l'issue de la troisième grande étape du projet, et de proposer un ordre de grandeur des tassements pouvant être attendus à la fin des travaux de confortement.

6. Planches d'essai et démarrage des travaux

Trois planches d'essais successives ont été réalisées au cours de l'été 2015 et fin 2016 ; elles ont permis de mettre en évidence la complexité du site et d'ajuster les paramètres de jet grouting. Les techniques de forage et leur phasage, ainsi que les injections ont fait l'objet de multiples tests et d'adaptation des méthodologies.

Forages & Injections

La réalisation des planches d'essai d'injections a permis de révéler l'extrême sensibilité du site aux tassements lors des phases de perforation. Elle a conduit à des adaptations de méthodologie et de maillage consistant essentiellement à :

- Réaliser des forages soniques (forage à l'air écarté) de manière à limiter les tassements lors de cette phase de travaux ;
- Réaliser des forages d'injections en 2 phases successives et distinctes (traitement partie alluvionnaire puis approfondissement du forage à 50 m et traitement des cargneules), afin d'éviter un phénomène de soutirage des fines (type sablier) dans les alluvions lors du forage des cargneules et gypses ;
- Mettre en œuvre par passes remontantes sous tubage un mortier de comblement en pression ;
- Augmenter la densité de forages avec un maillage d'injections passant de 3,5 m par 3,5 m à 2,5 m par 2,5 m.

Jet grouting

Par précaution vis-à-vis de la très forte sensibilité du site aux tassements lors des travaux, et au regard de la nature des terrains en présence, la technique du jet simple a été retenue. Une attention particulière est apportée à la réalisation des colonnes au toit des cargneules et gypse et au clavage en tête avec les fondations.

Le principe général de confortement du bâtiment tel qu'envisagé lors du dialogue compétitif, avec la réalisation des injections préalablement à l'exécution des colonnes de jet grouting, reste inchangé. Néanmoins, plutôt que de réaliser l'intégralité des injections puis ensuite les colonnes de jet grouting sur l'ensemble de la zone à conforter, une zone prioritaire a été définie (épicerie des tassements) au droit de laquelle une phase d'injection puis une phase de jet grouting ont été exécutées. A la suite de quoi, la poursuite des travaux de confortement du bâtiment s'effectue progressivement par zones concentriques en alternant les phases d'injections et les phases de jet grouting.

7. Dispositif de surveillance du bâtiment

La méthode observationnelle est appliquée sur ce chantier depuis le démarrage des travaux, afin de s'adapter au mieux à l'hypersensibilité du site aux tassements, l'ordonnancement du chantier étant établi au jour le jour.

Le dispositif de surveillance automatique mis en œuvre par l'entreprise ITMSOL, permet de suivre les mouvements de l'ordre du dixième de millimètre (à raison d'une mesure par heure), au droit de 60 poteaux à l'aide de 67 capteurs à niveau liquide reliés à des réservoirs de référence implantés en zone stable selon le principe présenté en figure 8.

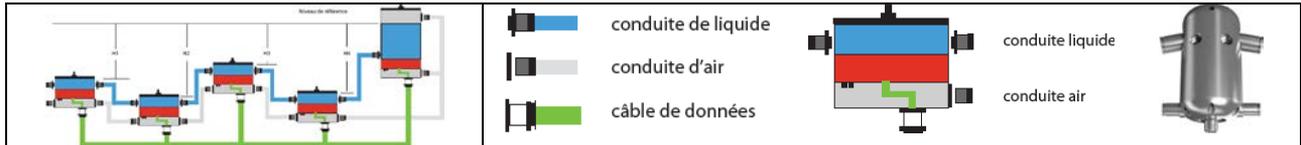


Fig. 8 : Schéma fonctionnel de capteurs à niveau liquide (Fiche technique N7, Itmsol)

Ce dispositif de surveillance est complété par la mise en œuvre de jauges de déformations implantées dans les structures très sollicitées du bâti (poteaux et radier) et par des mesures automatisées de largeur de fissure (cadence de mesure : 1 point toutes les deux minutes). Le suivi minutieux du dispositif de surveillance a confirmé l'extrême sensibilité du site aux tassements, notamment lors de la réalisation des phases d'injections avec des phénomènes d'accélération des tassements lors de certaines phases de forage. Certaines d'entre-elles contribuent à détruire des effets voûte existant dans les alluvions et à provoquer des accélérations brutales mais localisées des tassements. Pour limiter cet effet, le phasage et les méthodologies de travaux sont adaptés au jour le jour (méthode observationnelle).

8. Conclusion

Le bâtiment M1 de la soufflerie S1MA d'Avrieux est implanté dans un contexte géologique et hydrogéologique défavorable : présence de cargneules et gypse altérés par les circulations d'eau souterraines et pouvant évoluer en cavités. Ces dernières engendrent une décompression des terrains sablo-graveleux sus jacents par soutirage des particules fines en formant des effets voûtes. Au fil de l'évolution naturelle des dissolutions, ces effets voûtes peuvent se rompre et occasionner des tassements différentiels conséquents. La procédure du dialogue compétitif a permis de retenir une solution de confortement qui comprend l'injection des terrains et la mise en place de colonnes en jet grouting. Les travaux sont actuellement en cours. L'objectif est de poursuivre les travaux tout en limitant à quelques millimètres les tassements à venir liés aux travaux. Pour cela un suivi topographique rigoureux et une adaptation au jour le jour de l'ordonnancement des opérations de renforcement sont réalisés.