

REALISATION D'UN DEBLAI DE GRANDE HAUTEUR DANS LA CADRE D'UN MARCHE DE CONCEPTION-REALISATION ROUTIER

DEEP EXCAVATION FOR A ROAD IN A DESIGN AND BUILT CONTRACT

Eric ANTOINET¹, Renaud BOURGUET¹, Vincent L'Heure², Daniel PLAINDOUX² & Denis SAUTEREY³

¹ Antea Group, Orléans, France

² Roland, Montargis, France

³ Conseil Départemental d'Eure-&-Loir, Chartres, France

Eric ANTOINET – Antea Group , eric.antoinet@anteagroup.com

Renaud BOURGUET – Antea Group , renaud.bourguet@anteagroup.com

Vincent L'HEURE – Roland SAS, vincent.lheure@eiffage.com

Daniel PLAINDOUX – Roland, daniel.plaindoux@eiffage.com

Denis SAUTEREY – Conseil Général d'Eure-&-Loir, denis.sauterey@eurelien.fr

RÉSUMÉ – La déviation de Nogent-le-Roi (Eure-&-Loir) a nécessité la réalisation d'un déblai de grande hauteur dans des terrains sableux recouvrant l'horizon crayeux du bassin parisien, avec une pente forte afin d'équilibrer les volumes de remblai et de déblai. Les conditions géologiques particulières découvertes lors des travaux de terrassement ont conduit à une adaptation de la conception qui a néanmoins démontré sa robustesse.

ABSTRACT – The bypass road around Nogent-le-Roi (France) needs the digging of a deep excavation in sand soil and chalk rocks. The best balance between the cut and the filling volumes induces a steep slope with nailing at the base. Special geological context has been observed during earth works, generating an adaptation of the initial design.

1. Le projet de déviation

La déviation de Nogent-le-Roi (Eure-et-Loir) permettra de réduire le transit routier au sein de cette petite ville. Cette déviation est construite par tronçons successifs. Après un premier tronçon mis en service entre la RD26- et la RD104, le Conseil Départemental d'Eure-&-Loir a engagé la construction du prolongement de la déviation jusqu'à la RD 983.

Ce tronçon de déviation recoupe une colline séparant deux petits cours d'eau, affluents de l'Eure, la Vacheresses à l'ouest et le Roulebois, à l'Est. Le tracé de la route entre les deux giratoires présente une déclivité minimale afin d'avoir un tracé conforme aux règles du guide de l'ARP et présentant la meilleure sécurité pour les usagers. Le profil routier retenu impose donc une excavation de grande hauteur de la colline.

Compte tenu de la complexité de la conception géotechnique de ce grand déblai, le Conseil Départemental d'Eure-&-Loir a retenu une procédure de marché en « conception-réalisation » pour ce tronçon, qui comporte également deux ouvrages d'art, un giratoire et un remblai en zone compressible permettant de stocker l'excédent de déblai tout en préchargeant les terrains d'assise de la route pour le tronçon ultérieur qui franchira la vallée de l'Eure. Ce marché de conception-réalisation a été attribué au groupement Roland (mandataire), Eiffage TP, Demathieu Bard et Antea Group.

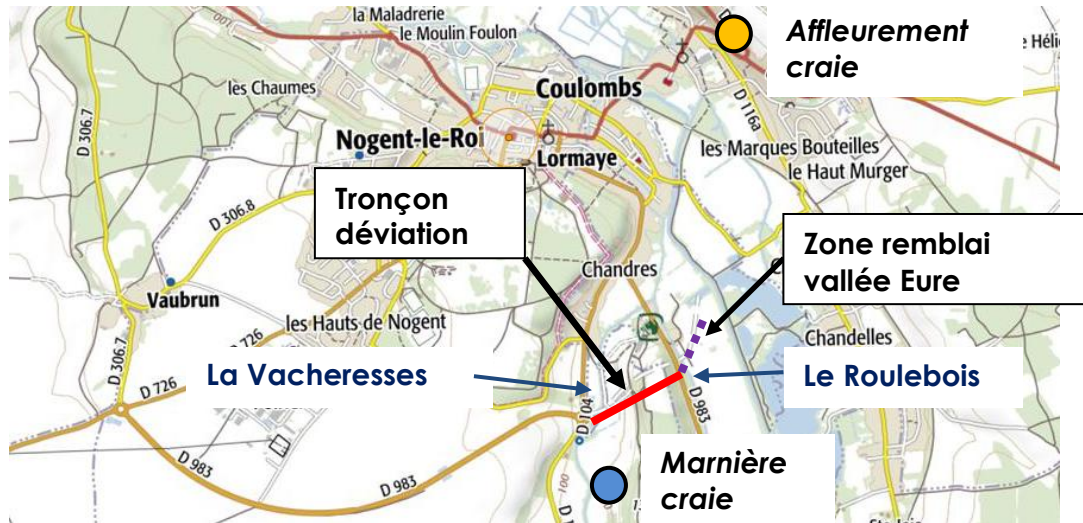


Figure 1. Vue générale du site (d'après fond de plan du site Internet www.geoportail.fr).

2. Le contexte géotechnique

Les investigations géotechniques préalables réalisées au droit du projet entre les vallées du Roulebois et de la Vacheresses, qui comportaient 3 sondages à la tarière et un sondage carotté, avaient mis en évidence la succession lithologique suivante au droit de la butte, les terrains étant décrits du plus récent au plus ancien :

- des terrains de couverture terre végétale et colluvions sur les pentes et des Limons des plateaux, sur une épaisseur métrique,
- les Sables de Fontainebleau, jusqu'à une profondeur de l'ordre de 15m. Il s'agit de Sables fins, ayant un fuseau granulométrique assez étroit, présentant un angle de frottement élevé (38 à 39°) et pratiquement pas de cohésion effective. Des lentilles légèrement plus argileuses sont parfois rencontrées.
- la Craie blanche à silex, du Sénonien (C6-4), sur une forte épaisseur. Des affleurements, anthropiques pour la plupart, sont observables à quelques centaines de mètres du projet. En particulier, une marnière (exploitation de la craie pour l'amendement des champs) avec accès horizontal par le flan du coteau est visitable à proximité du projet, environ 100 m au Sud. Cette marnière, constituée par une petite galerie, met en évidence une alternance de bancs de silex de 5 à 15 cm d'épaisseur et de couches de 30 à 50 cm d'épaisseur de craie. Quelques racines karstiques de petit diamètre, remplies d'argile marron avec des silex, sont observables dans la marnière.

Les affleurements du massif crayeux à proximité du projet mettent en évidence une craie très régulièrement litée par des bancs de silex. Sa stabilité verticale ne pose pas de problème sur une hauteur pouvant atteindre une quinzaine de mètres. Les caractéristiques de la craie saine ont été définies à partir d'une rétro-analyse de la stabilité des talus observés. Il s'agit a priori de valeurs minimales. Une frange altérée et de transition entre les Sables de Fontainebleau et le Craie, épaisse de 2 m, a été prise en compte dans le modèle géotechnique.

Les photos de la figure 3 présentent l'aspect de la craie aux environs immédiats du projet. L'implantation de ces photos est donnée sur la Figure 1.

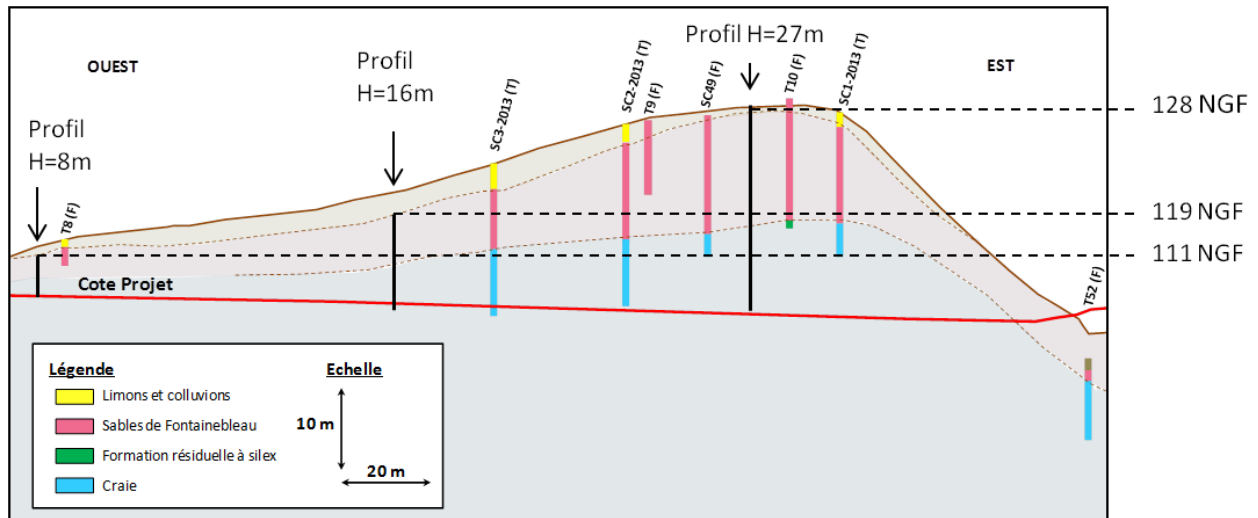


Figure 2. Vue générale du site (d'après site Internet www.geoportail.fr).



Figure 3. Affleurement de la craie (marnière à gauche et carrière à droite).

Un programme d'investigations complémentaires a été mis en œuvre, avec comme objectif principal de positionner la base des Sables de Fontainebleau. Ces sondages ont mis en évidence la très grande difficulté à carotter les matériaux sous les Sables de Fontainebleau, du fait d'une très grande densité de silex, avec des faibles taux de récupération associés à une importante usure des outils de foration.

La figure 2 présente une coupe géologique longitudinale prévisionnelle au droit de la butte établie à partir de l'ensemble des sondages (superficiels et profonds). Le modèle géotechnique retenue pour les calculs de stabilité est donnée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Modèle géotechnique en phase conception

Nature	γ_h (kN/m ³)	q_s (kPa)	Long Terme		Court Terme	
			ϕ' (°)	C' (kPa)	ϕ_u (°)	C_u (kPa)
Sables de Fontainebleau	19	-	38	0,5 ^(*)	10	30
Craie altérée	21	150	33	25	-	-
Craie saine		300	35	80	-	-

3. La conception du grand déblai

Les deux objectifs majeurs qui ont guidé la conception du déblai sont une minimisation des coûts de construction et une optimisation de l'équilibre des volumes de déblai et de remblai. La principale zone de remblai est constituée par un remblai dans la vallée de l'Eure, qui permet le préchargement des sols en vue du prolongement ultérieur de la déviation jusqu'à la rive droite de cette rivière. Des volumes moins importants sont nécessaires pour les remblais d'accès aux ouvrages d'art. Le solde des matériaux a été mis en place en partie sommitale de la déviation, afin de protéger au mieux les riverains (centre équestre) des bruits générés par le trafic routier. Cette conception a permis de minimiser les coûts de transport et les impacts environnementaux des travaux. Cependant une telle conception exigeait la réalisation d'un déblai fortement penté. Pour tenir compte du contexte géotechnique avec des matériaux à dominantes sableuses sur les quinze premiers mètres, recouvrant le massif crayeux, le déblai a été conçu avec la géométrie suivante (cf. Figure 4) :

- un talus penté à 2H/1V dans les Sables de Fontainebleau, sur environ 7 m de hauteur,
- Un talus penté à 1H/1V avec mise en place d'un masque de protection en matériaux traités au liant hydraulique sur 8 m de hauteur,
- Une paroi clouée, pratiquement verticale (1H/5V) dans les terrains crayeux, sur une hauteur maximale d'une douzaine de mètres dans la partie où l'excavation est la plus profonde.

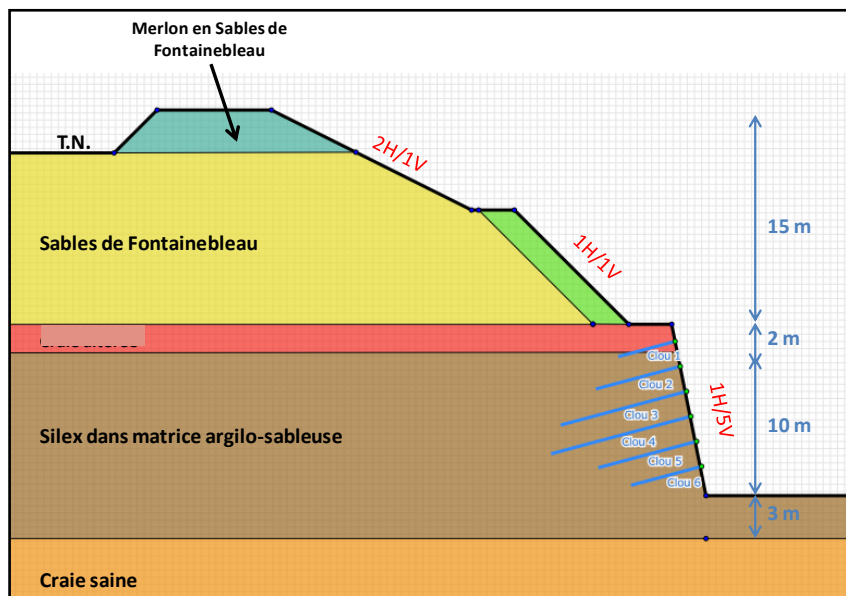


Figure 4. profil du talus en déblai dans sa plus grande hauteur

3.1. Le talus à 2H/1V

Avec un angle de frottement estimé à 38° pour les Sables de Fontainebleau, un talutage à 26° (2H/1V) ne présente pas de difficulté particulière. Le principal risque à moyen/long terme est dû aux effets de l'érosion des sables par les eaux de ruissellement. Un placage de terre végétale a rapidement été mis en place et ensemencé afin de limiter les risques d'érosion des sables. Quelques zones de venues d'eau très localisées ont conduit à la réalisation de masques drainants en enrochement, afin de collecter et canaliser les eaux souterraines vers les dispositifs de gestion des eaux pluviales.



Figure 5. Travaux de terrassement dans les Sables de Fontainebleau.

3.2. Le talus à 1H/1V

Lors de la phase de conception, il était envisagé de réaliser le placage de renforcement avec la craie traitée au liant hydraulique. Pour des questions de phasage général des terrassements avec un avancement horizontal, il a été préféré la réutilisation des sables traités à 4 % de liant routier Roc VDS, produit par EQIOM. Des essais de cisaillement ont été réalisés. Ces essais donnent un angle de frottement élevé (57°) associé à une forte cohésion (≥ 50 kPa). Un exemple de résultat d'essai de cisaillement de type CU+u à la presse triaxiale est fourni la figure 6 ci-après. Il également de signaler que les talus à 45° dans les Sables de Fontainebleau n'ont pas présenté de problème de stabilité durant les phases provisoires.

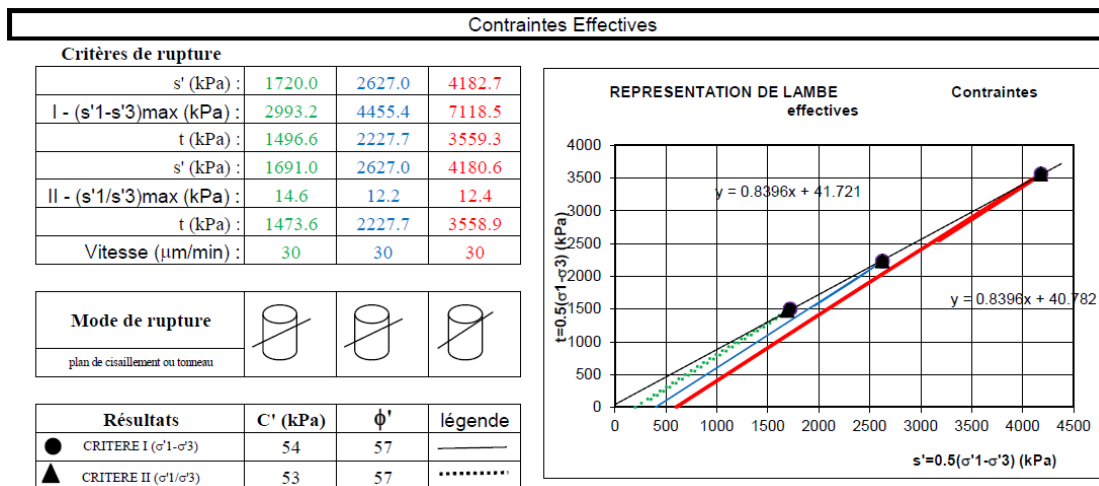


Figure 6. Essai de cisaillement de type CU+u sur sable traité au liant Roc VDS à 4 %.

3.3. Le talus subvertical cloué

Sur la base des informations disponibles initialement, le creusement du talus dans la craie aurait dû être réalisé dans des terrains rocheux présentant une nette amélioration des caractéristiques géotechniques. La conception de la partie inférieure du talus prévoyait un clouage relativement important de la partie sommitale de la craie, qui pouvait présenter une frange altérée. Cette conception permettait également de gérer le risque lié aux racines karstiques remplies de matériaux argileux que l'on rencontre souvent dans la craie (cf. photo de gauche de la Figure 3). La longueur des clous était adaptée à la fonction de

renforcement (clous de 8 à 10 m de longueur en partie sommitale) ou de simple épingleage de la couche de protection en béton projeté (longueur de 3 à 5 m).

3.4. Justification de l'ouvrage

Les calculs de justification de la stabilité du talus ont été menés sur la base de la norme NF P 94 270. Ils ont été réalisés avec le logiciel TALREN pour les calculs à la rupture, avec les coefficients de sécurité partiels définis dans cette norme. Afin de disposer d'une meilleure compréhension du comportement du talus, des calculs en déplacement ont été menés avec le logiciel FLAC (méthode des différences finies explicites), l'analyse de la stabilité étant dans ce cas réalisée par la méthode de l'analyse limite.

4. Les travaux de construction

Dans les Sables de Fontainebleau, les travaux de terrassement se sont déroulés conformément à ce qui avait été envisagé au stade des études. L'atteinte de la base des Sables de Fontainebleau a permis de réaliser des investigations à grande échelle à partir de fouille à la pelle mécanique. Il est apparu que la craie n'était présente que localement côté de la vallée du Roulebois, sous le niveau du projet, dans le secteur reconnu par le sondage carotté réalisé dans le cadre des investigations préliminaires. Sur le reste du tracé, la craie a été remplacée par un amas de silex de tailles variables, noyés dans une matrice argilo-sableuse. Il s'agit a priori de matériaux alluvionnés. La base du dépôt des Sables de Fontainebleau présentant une stratigraphie quasiment horizontale, il apparaît que l'érosion de la craie et le dépôt des silex s'est produit avant le dépôt des Sables des Fontainebleau. La quantité de silex a été évaluée visuellement entre 50 et 70 % du volume. La figure 7 présente un aperçu de ces matériaux.

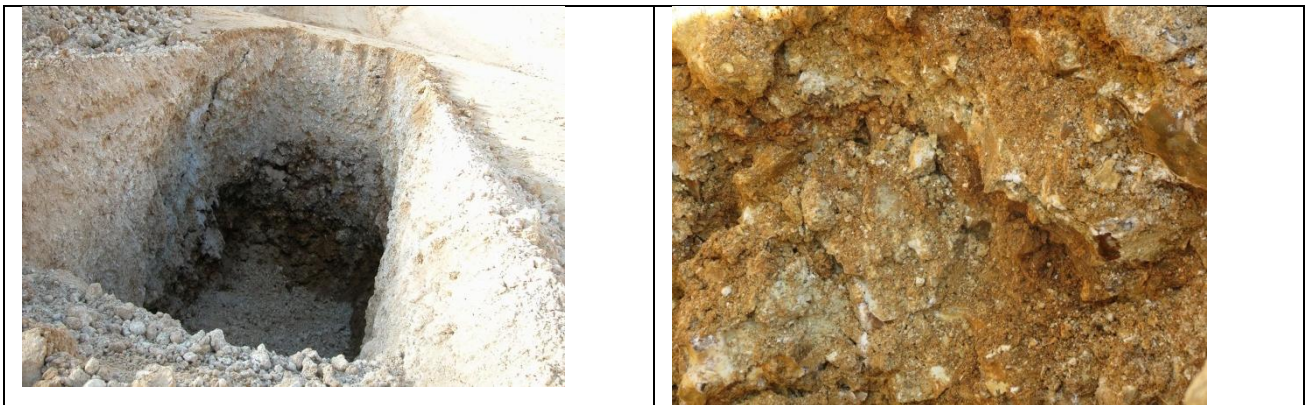


Figure 7. Vue de l'amas de silex à matrice argilo-sableuse.

Afin d'évaluer le frottement mobilisable dans ces matériaux, 6 essais d'arrachement des clous ont été réalisés, suivant deux procédures normatives différentes. Les résultats de ces essais sont donnés dans le tableau 2. L'effort d'arrachement mobilisable est important, du fait de l'imbrication des silex. Exprimé en termes de frottement latéral unitaire, la contrainte mobilisable par les clous est importante. De telles valeurs peuvent également être liées à une diffusion importante du coulis de scellement dans les terrains, constituant un bulbe de scellement plus large que celui retenu dans l'interprétation des essais.

Bien qu'aucun essai de cisaillement ne puisse être réalisé sur de tels matériaux, il a été déduit de ces investigations et essais d'arrachement de clous que cet amas de silex devait présenter une forte résistance au cisaillement ainsi qu'une cohésion à grande

échelle non négligeable. A petite échelle, en parement du talus, la résistance au cisaillement est liée à la matrice. Le modèle géotechnique de calcul actualisé en phase travaux est présenté au tableau 3.

Tableau 2. Résultats des essais d'arrachement (forage 123 mm)

	Clou 1	Clou 2	Clou 3	Clou 4	Clou 5	Clou 6
Norme utilisée	NF P 94-153	NF P 94-242-1	NF P 94-242-1	NF P 94-153	NF P 94-153	NF P 94-242-1
Longueur totale (m)	9	5	2	2	5	9
Formation d'ancrage	Silex à matrice argileuse	Silex à matrice argileuse	Couche de transition	Couche de transition	Silex à matrice argileuse	Silex à matrice argileuse
Longueur de scellement (m)	3	3	1,6	1,8	3	< 3
Surface latérale clou (m ²)	1,16	1,16	0,62	0,70	1,16	0,62
Effort de traction en pic (kN)	-	430	290	-	-	267
Effort de traction limite par rupture du scellement (kN)	428	-	-	428	428	-
Frottement latéral limite q _s (kPa)	370	370	470	620	370	430

Tableau 3. Modèle géotechnique actualisé en phase travaux

Horizon	γ_h (kN/m ³)	q _s (kPa)	Résistance au cisaillement	
			ϕ' (°)	C' (kPa)
Sables de Fontainebleau	19	-	38	0,5
Masque en sable traité	19	-	45	20
Couche de transition	21	250	33	10
Silex dans matrice argilo- sableuse		300	45	10
Craie saine		300	35	100

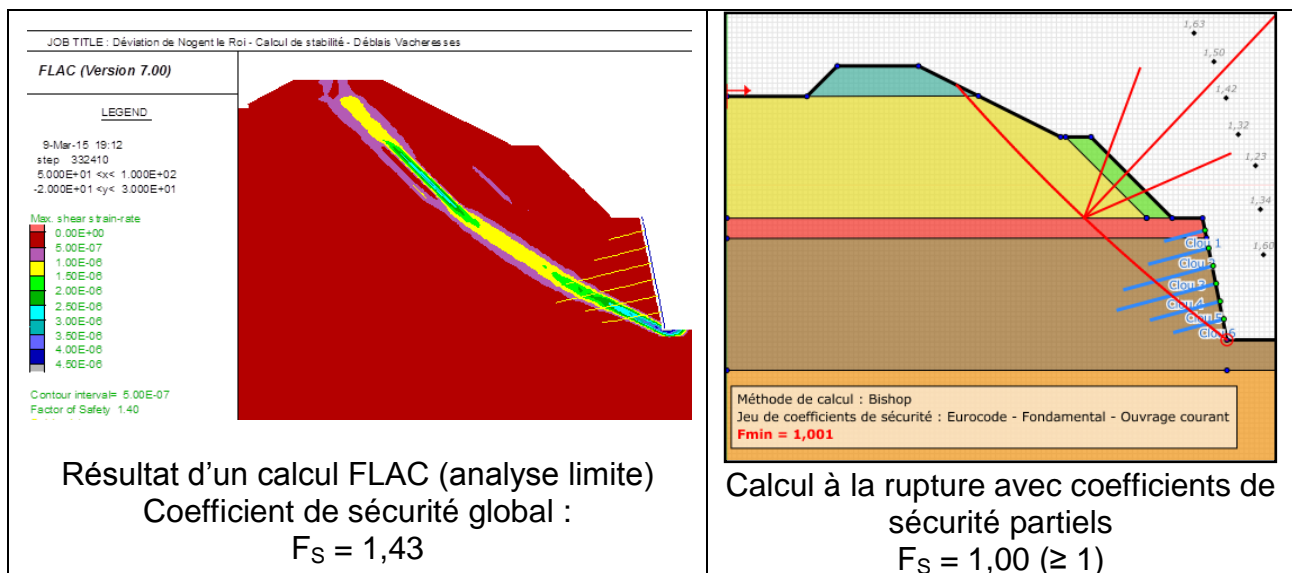


Figure 8. Résultats des calculs de stabilité par analyse limite et calcul à la rupture

La réalisation de la paroi clouée s'est globalement bien déroulée. Le principal problème a été la présence de nombreux hors profils en parement liés à la granulométrie des blocs de silex et à des instabilités ponctuelles des matériaux argilo-sableux, qui a conduit à des surconsommations importantes de béton projeté. La cadence de creusement a également été réduite par la limitation de la hauteur libre entre deux lignes de clous et la nécessité d'un gunitage très rapide du front de taille.



Figure 9. Vue des travaux de réalisation de la paroi clouée.

5. Conclusions

Les travaux de terrassement du grand déblai ont mis en évidence des conditions géologiques et géotechniques extrêmement particulières, avec un paléo relief de la craie comblé par des blocs de silex alluvionnés. Dans ces conditions, la solution technique retenue au stade de la conception a démontré sa robustesse : malgré l'aléa géologique, le profil initial du déblai avec un talus de plus en plus raide au fur et à mesure de l'approfondissement de l'excavation a pu être conservé. Cela est en partie dû aux bonnes caractéristiques géotechniques de l'amas de silex. Le principal problème rencontré pendant les travaux a concerné une augmentation de l'épaisseur de béton projeté liés aux hors profils en phase de terrassement par passes. L'équilibre entre les remblais et déblais a pu être optimisé, ce qui limité au strict minimum l'évacuation de matériaux à l'extérieur du site.