

## Table des matières

<b>I. Description et localisation des types de talus étudiés</b> .....	3
• Talus 1.....	3
• Talus 2.....	3
• Talus 3.....	4
<b>II. Catégories géotechniques en fonction des classes de conséquence</b> .....	5
<b>III. Propriétés des matériaux</b> .....	7
• Sable GA 39.....	7
• Sable correcteur .....	8
• Marno-calcaire .....	9
• Craie .....	10
• Formation résiduelle à silex .....	10
• Limon .....	10
• Remblai .....	10
<b>IV. Calculs</b> .....	12
• Talus 1.....	12
• Talus 2.....	14
• Talus 3.....	15
<b>V. Conclusion</b> .....	17
<b>VI. Bibliographie</b> .....	18

## Tables des illustrations

Figure A : Localisation des talus 1 et 2 sur le plan d'état final de la carrière .....	3
Figure B : Localisation des talus 1 et 2 sur une coupe .....	4
Figure C : Localisation du talus 3 sur le plan de creusement maximal de la carrière .....	4
Figure D : Description du talus 3 en coupe .....	5
Figure E : Description du talus 3 bis en coupe .....	5
Figure F : Essais de cisaillement direct sur le sable GA39 .....	7
Figure G : Essais de cisaillement direct sur le sable correcteur .....	8
Figure H : Essais d'Atterberg sur le Marno-calcaire.....	9
Figure I : Modèle géotechnique du talus1 .....	12
Figure J : Calculs de stabilité pour le talus1 .....	13
Figure K : Modèle géotechnique du talus 2 .....	14
Figure L : calcul de stabilité pour le talus 2.....	14
Figure M : Modèle géotechnique du talus 3.....	15
Figure N : Modèle géotechnique pour le talus 3bis.....	15
Figure O : Calculs de stabilité pour le talus 3.....	16
Figure P : Calculs de stabilité pour le talus 3bis.....	16

## I. Description et localisation des types de talus étudiés

La stabilité de 3 types de talus a été calculée.

- **Talus 1**

Ce talus est localisé dans le futur bassin prévu pour un usage agricole (talus à l'est de la Figure A et Figure B).

Ce talus est situé à côté des terrains en place proche de la limite d'autorisation. Il n'est pas encore créé. Pour créer le bassin à usage agricole, il est prévu de creuser dans les remblais existants (appelés remblai\_1). Ce bassin sera imperméabilisé donc sans infiltration d'eau dans le sous-sol. De haut en bas, les matériaux adjacents sont : limon, marno-calcaires, sables correcteurs et sables GA39. Ces 2 couches de sables appartiennent à la formation « sables de Fontainebleau ». De la craie est localisée sous le sable, avec une couche de « formation résiduelle à silex » au sommet de la craie.

- **Talus 2**

Ce talus sera comme pour le talus 1 localisé dans le futur bassin d'irrigation. Ce talus est situé à l'ouest du bassin sur la Figure A et la Figure B. Il n'existe pas actuellement. Ce talus se différencie du talus 1 par la nature des matériaux adjacents. Ce sont des remblais\_1 déjà en place et des remblais appelés remblai\_2 qui seront mis en place ultérieurement.

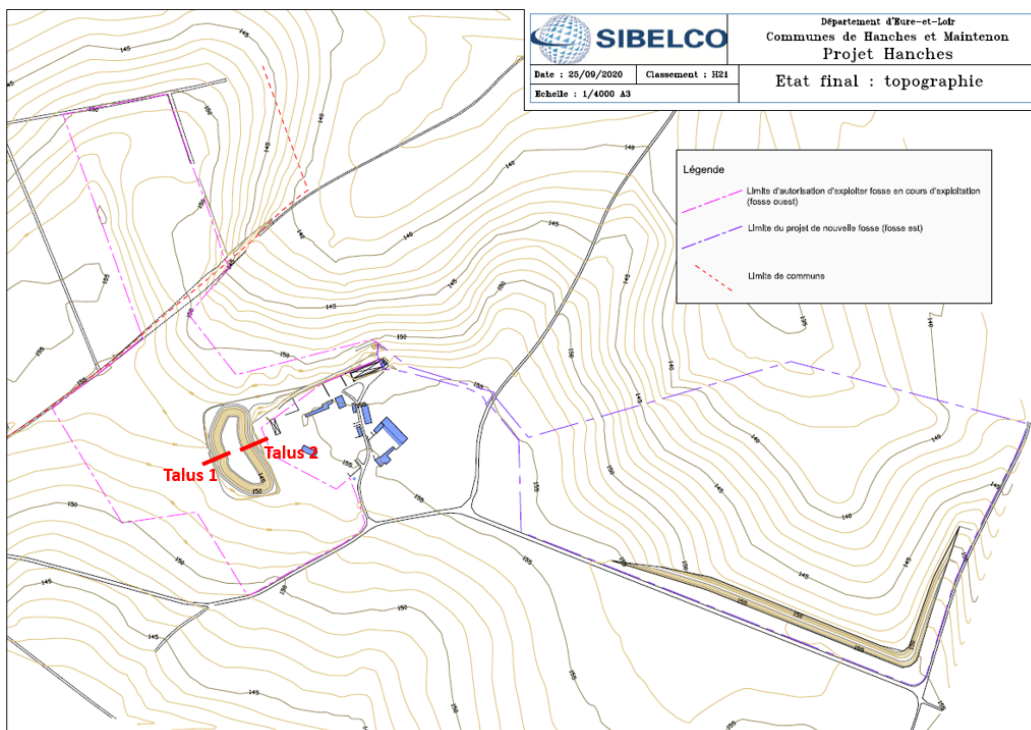


Figure A : Localisation des talus 1 et 2 sur le plan d'état final de la carrière

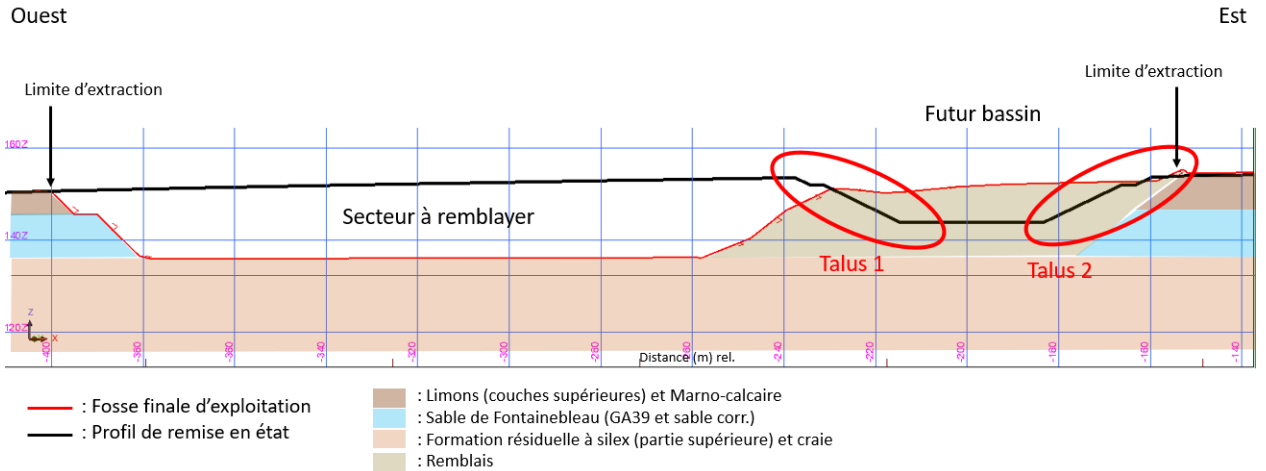


Figure B : Localisation des talus 1 et 2 sur une coupe

- Talus 3

Ce type de front n'existe pas actuellement et sera présent à l'issue de l'extraction, dans l'attente de la remise en état par remblaiement. Les matériaux seront des matériaux en place non perturbés, de haut en bas : marno-calcaires, sable jaune, sable correcteur, sable GA39 et comme pour les talus 1 et 2, au mur des sables, formation résiduelle à silex et craie.

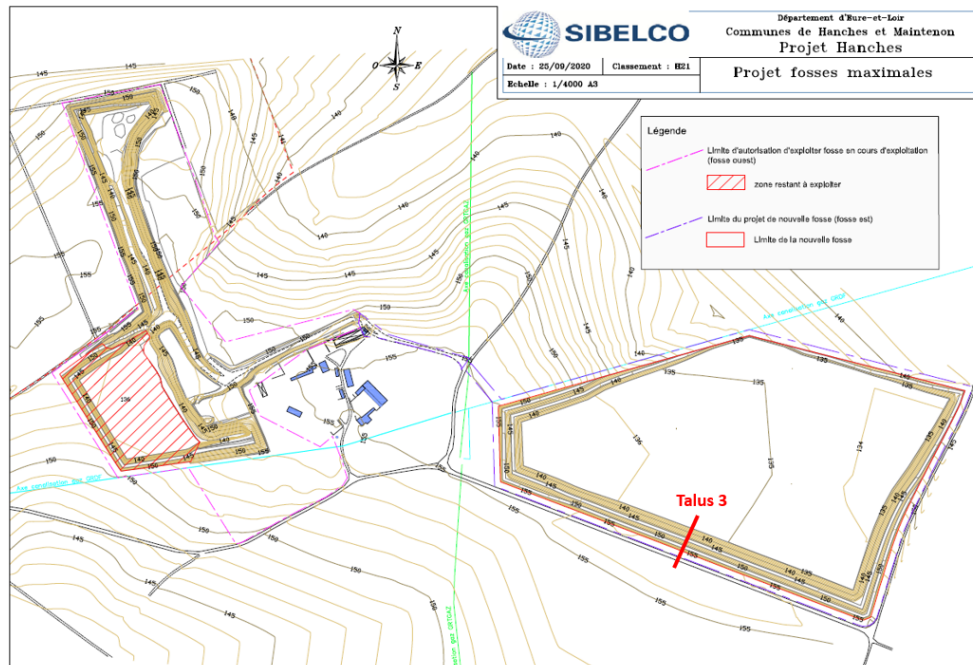


Figure C : Localisation du talus 3 sur le plan de creusement maximal de la carrière

La configuration habituelle des fronts d'exploitation d'après les modélisations géologiques issues des sondages est présentée sur la Figure D. Toutefois, une configuration exceptionnelle, rencontrée sur 1 sondage, peut présenter une épaisseur de 10m de sable GA39. En d'autres endroits, la découverte marno-calcaire peut atteindre 4m d'épaisseur. Cette configuration appelée talus 3 bis a été également modélisée (Figure E).

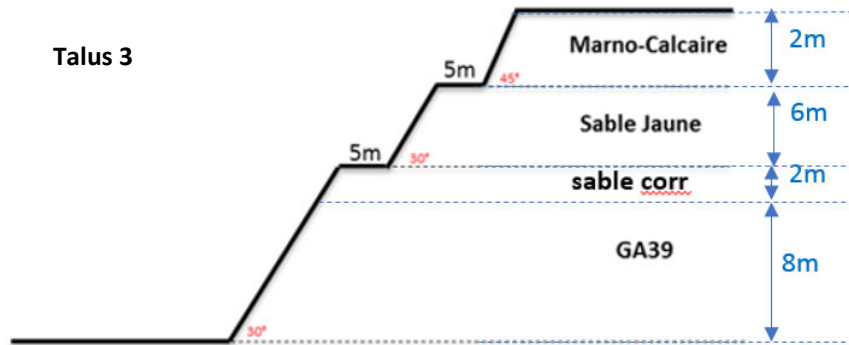


Figure D : Description du talus 3 en coupe

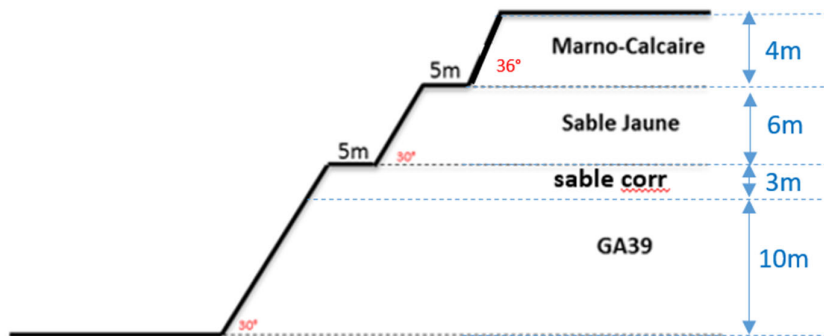


Figure E : Description du talus 3 bis en coupe

## II. Catégories géotechniques en fonction des classes de conséquence

Pour étudier les risques géotechniques des carrières, Sibelco a fait choix d'utiliser comme guide la norme Eurocode 7 (Schmitz 2020). Ce guide décrit les classes de risques. Les implications sur les talus 1, 2 et 3 sont décrites ci-dessous.

La carrière de Hanches est autorisée depuis 2006 mais l'activité d'extraction existe à l'est la carrière actuelle depuis plusieurs dizaines d'années. Le comportement et la stabilité des talus sont connus par cette longue expérience. Les gradins utilisés pour l'extraction et les pentes des remblais n'ont montré aucun signe d'instabilité ou de mouvement pendant toute la durée de d'extraction.

Des calculs préliminaires de stabilité ont été menés pour estimer l'extension d'une éventuelle instabilité des fronts. Ils ont montré qu'il n'y avait pas de risque de rupture de pente (pour les talus 1, 2 et 3) pouvant sortir de la limite d'autorisation d'exploitation. Ainsi, les effets d'une instabilité seraient "... faibles ou négligeables sur les personnes, sur les constructions avoisinantes, en termes sociaux, économiques ou d'environnement" (NF EM 1997-1/NA) ce qui correspond à la classe de conséquence CC1" (NF EM 1997-1/NA).

Selon la définition de cette classe, une étude basée sur l'"expérience et reconnaissance géotechnique qualitative admises" est autorisée (pour des situations "simples et connues" c'est-à-dire pour des talus usuels à l'intérieur de la carrière).

Toutefois, et en plus des recommandations, des échantillons ont été collectés le 22 septembre 2020 sur des affleurements de la carrière. Ils ont été testés au laboratoire géotechnique de Sibelco à Maastricht en octobre 2020.

Des calculs géotechniques ont ensuite été menés pour les talus 1, 2 et 3.

### III. Propriétés des matériaux

Les propriétés géotechniques utilisées pour les différentes couches sont décrites ci-dessous.

- Sable GA 39

Des essais de cisaillement direct ont été réalisés. L'angle de frottement interne effectif et la cohésion ont été mesurés. La densité in situ a été mesurée directement sur le terrain. Dans les carrières de Sibelco (d'après Schmitz et Schroeder 2020) une valeur faible de cohésion (apparente) est autorisée pour les calculs de stabilité des pentes.

Les caractéristiques sont (voir les résultats du test Figure F) :

Angle de frottement interne effectif : 32 degrés

Cohésion apparente : la valeur conservatrice de 5kPa a été retenue, le résultat mesuré 15 kPa n'a pas été utilisé dans les calculs.

La densité in situ mesurée est de 1,45 t/m<sup>3</sup>. Au laboratoire, le sable a été compacté pour tenter d'approcher la densité en place, mais seule une valeur de 1,4 t/m<sup>3</sup> a été atteinte.

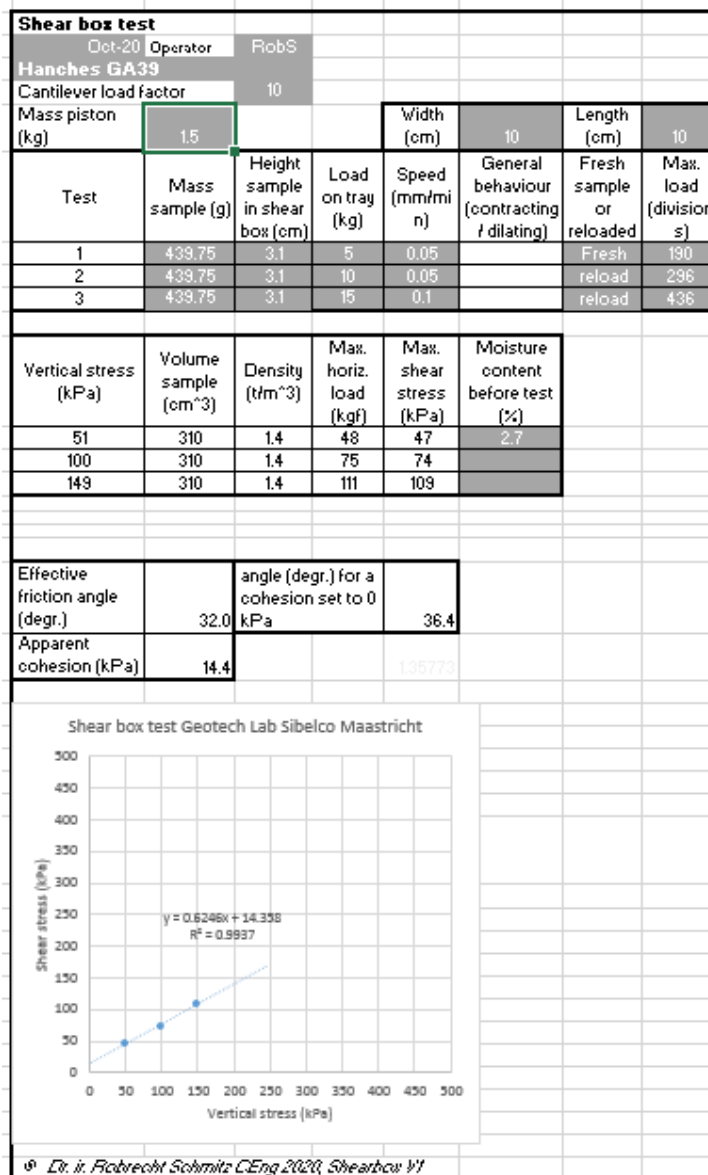


Figure F : Essais de cisaillement direct sur le sable GA39

- Sable correcteur

Des essais de cisaillement direct ont été réalisés. Les caractéristiques sont (voir résultats de l'essai sur la Figure G) :

Angle de frottement interne effectif : 30,8 degrés

Cohésion apparente : la valeur conservatrice de 5kPa a été retenue, le résultat mesuré 6,7 kPa n'a pas été utilisé dans les calculs.

Dans le cas où le sable GA39 et sable correcteur ne sont pas différenciés, et considérés comme une seule couche appelée alors sable de Fontainebleau, l'angle de frottement le plus faible des 2 couches (c'est-à-dire 30.8 degrés) et la cohésion de 5kPa ont été utilisés.

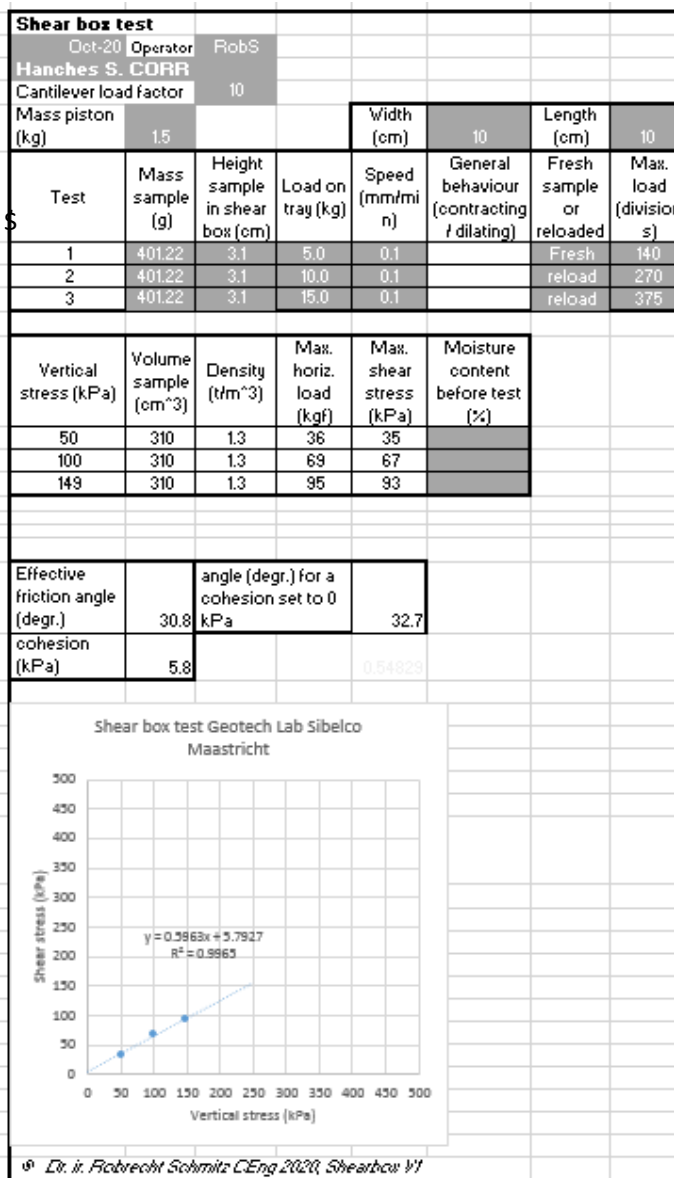


Figure G : Essais de cisaillement direct sur le sable correcteur

- **Marno-calcaire**

Le matériau marno-calcaire échantillonné et testé représente un affleurement très défavorable dans la carrière. L'échantillon était très humide avec une limite de liquidité plus élevée que la teneur en eau (voir Figure H). Il n'est pas représentatif du matériau marno-calcaire moyen. Cette consistance « mou » n'a pas permis la réalisation des essais de cisaillement mais les limites d'Atterberg ont été déterminées (Figure H).

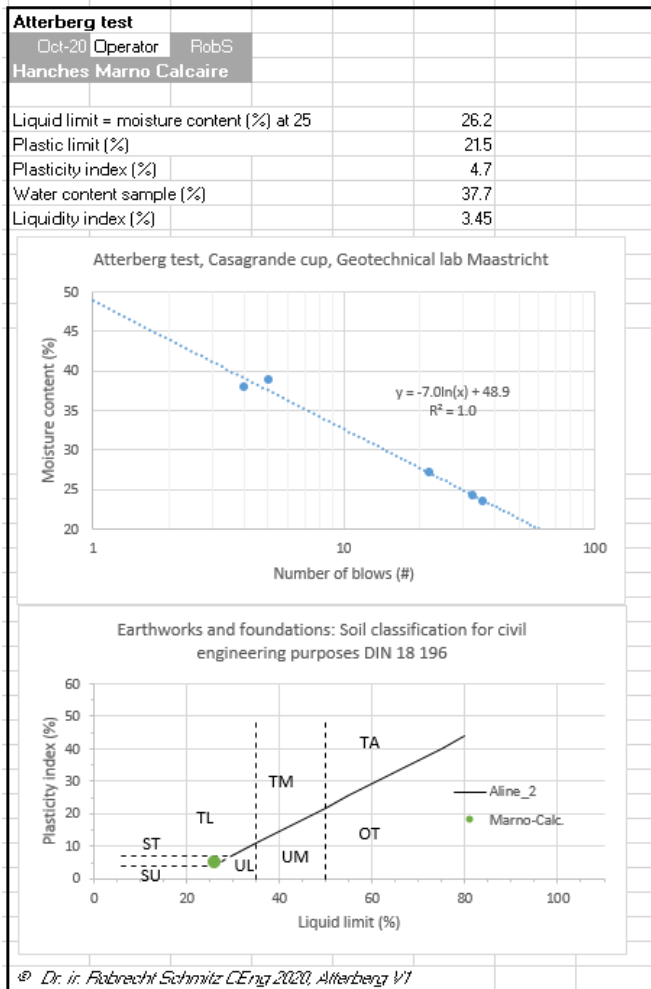


Figure H : Essais d'Atterberg sur le Marno-calcaire

D'après l'Eurocode 7 DIN , le matériau marno-calcaire peut être classé comme du matériau limon peu plastique Lp (SU sur la Figure H), un sol inorganique type limon cohésif avec de faibles propriétés plastiques. Pour un sol en place, non perturbé, comme dans le cas du talus, on considèrera que le sol est raide. D'après DIN 1055 et Kanji (dans Ortigao et al 2004), les caractéristiques suivantes ont été utilisées :

Angle de frottement interne effectif : 23,3 degrés

Cohésion apparente : 5 kPa



- Craie

La craie n'affleure pas dans la carrière de manière à prendre un échantillon représentatif. Des valeurs issues de la bibliographie ont été utilisées Bonvallet (1979) décrit la « classification géotechnique des craies » du nord du bassin parisien. Sur cette base et Goodman (1992) une estimation conservative a été déduite.

Les propriétés suivantes ont été utilisées :

Angle de frottement interne effectif : 30,5 degrés

Cohésion: 30 kPa

Densité: 1,8 t/m<sup>3</sup>

- Formation résiduelle à silex

La formation résiduelle à silex n'affleure pas dans la carrière de manière à prendre un échantillon représentatif. Le silex résiduel après lessivage a été considéré comme un matériau granulaire.

Les propriétés suivantes ont été utilisées :

Angle de frottement interne effectif : 32 degrés

Cohésion: 0 kPa

Densité: 1,7 t/m<sup>3</sup>

- Limon

Les propriétés des limons ont été estimées d'après Audric (1973) qui a établi les classes des sols et d'après DIN 1055 pour l'estimation des paramètres géotechnique.

Les propriétés suivantes ont été utilisées :

Angle de frottement interne effectif : 25 degrés

Cohésion: 5 kPa

Densité: 1,6 t/m<sup>3</sup>

- Remblai

#### **Remblai\_1**

Le remblai\_1 n'a pas été échantillonné. Les couches concernées par l'étude de stabilité sont situées en profondeur et ne sera accessible que quand le creusement du bassin aura démarré. Par contre les propriétés à atteindre ont été spécifiées sur la base de la DIN 1055 (annexe allemande de l'Eurocode 7).

Dans la carrière, le remblai est apporté par camions. Les camions déposent le matériau en tas qui sont ensuite repris à la chargeuse et mis en remblai dans la carrière. Le remblai est compacté par le poids de la chargeuse, du camion et celui du remblai lui-même.

D'un point de vue géotechnique, le remblai est hétérogène. Les matériaux, dans l'hypothèse la plus conservatrice, peuvent être considéré comme un matériau très plastique At (faible résistance au cisaillement d'après DIN 1055), ou comme un matériau peu plastique Ap. On considère que le matériau en remblai, qu'il soit At ou Ap est raide ou consistant (Magnan, 2012) car sinon les camions ne pourraient manœuvrer sur les matériaux. Les résultats utilisés proviennent des estimations conservatrices de sols At ou Ap consistant à raide :

Angle de frottement interne effectif : 17,5 degrés  
Cohésion: 2,5 kPa  
Density: 1,95 t/m<sup>3</sup>.

## **Remblai\_2**

Ce matériau n'est pas encore en remblai dans la carrière. Les propriétés (DIN 1055) qui pourront être atteinte (par exemple par compaction) quand ces couches seront remblayées dans le futur sont :

– Pour des matériaux At, avec une classe de consistance consistant à raide (Magnan, 2012) :  
Angle de frottement interne effectif : 17.5 degrés  
Cohésion effective : 2,5 kPa  
Densité : 2,00 t/m<sup>3</sup>

– Pour un sol Ap, avec une classe de consistance consistant à raide :  
Angle de frottement interne effectif : 22.5 degrés  
Cohésion effective : 10 kPa  
Densité : 2.05 t/m<sup>3</sup>

Pour les calculs, de la même manière, le cas le plus défavorable est retenu en utilisant la combinaison des plus faibles valeurs pour l'angle de frottement et la cohésion pour les matériaux de type At ou Ap avec une consistance raide :

Angle de frottement interne effectif raide : 17.5 degrés  
Cohésion effective : 10 kPa

## IV. Calculs

Pour les calculs de stabilité, le programme Stabilité de l'Université de Liège a été utilisé (Prof. Dr. ir. Ch. Schroeder and ir. P. Illing).

D'après l'annexe française de l'Eurocode (NF EN 1997-1/NA:2018-09), l'approche de calcul 3 peut être utilisée : combinaison A2+M2+R3. Il en découle des « facteurs partiels » pour l'angle de frottement interne : 1,25 ; et pour la cohésion effective : 1,25 ; et pour à la fois l'action permanente défavorable et l'action permanente favorable: 1,0.

- Talus 1

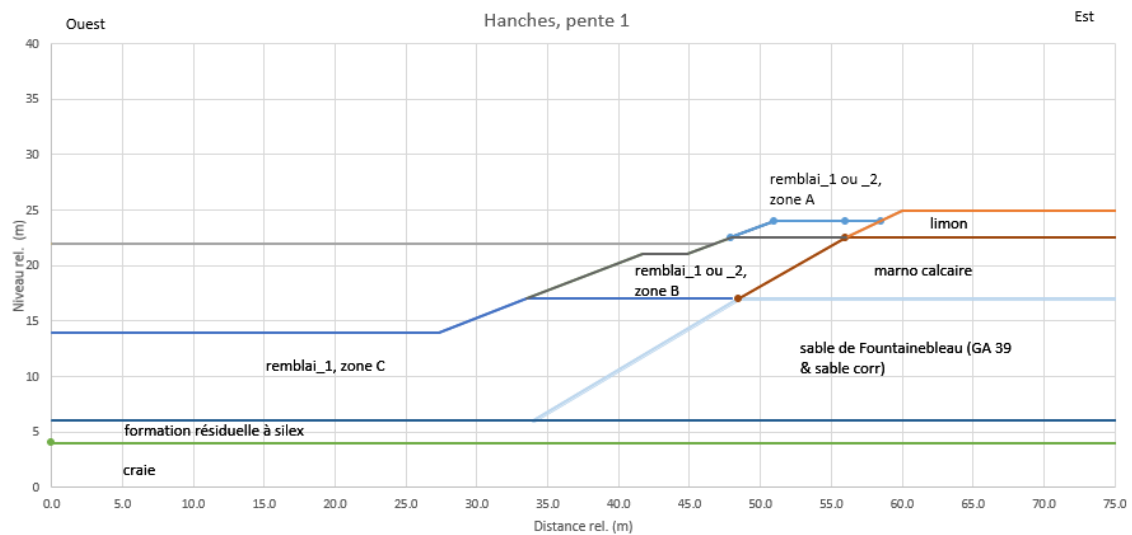


Figure 1 : Modèle géotechnique du talus1

Pente 1: A, B & C: remblai\_1

Pente 1: A: remblai\_1 ; B & C: remblai\_2

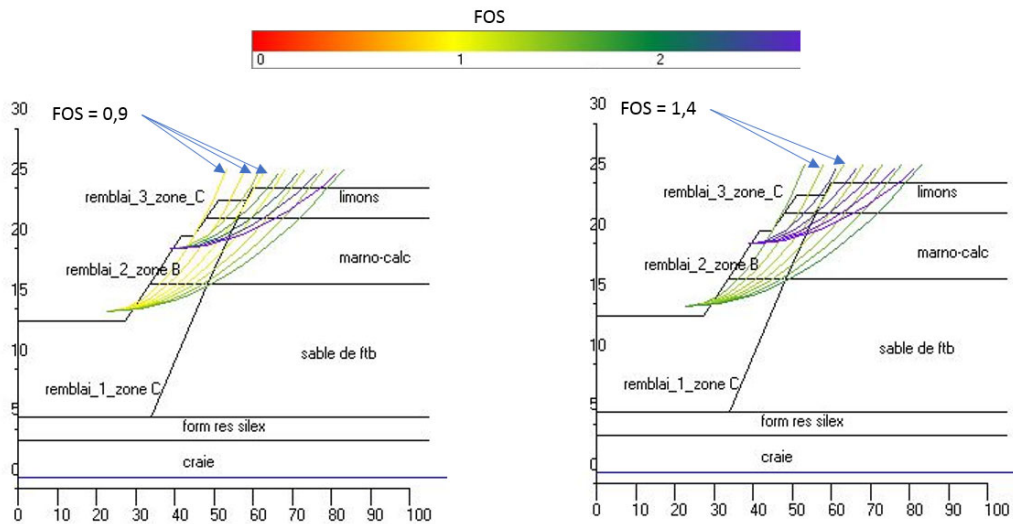


Figure J : Calculs de stabilité pour le talus1

Les facteurs de sécurité (noté FOS sur le schéma) les plus faibles sont indiqués. A gauche, la Figure J montre la stabilité avec l'hypothèse de propriétés des remblai 1 (faible valeur). La Figure J sur la droite montre la stabilité avec l'hypothèse de propriétés des remblai 2 (des zones B et C).

### Conclusion talus 1

Il n'y a pas de risque pour des infrastructures externes ou de glissement au-delà de la carrière. Une instabilité dans les remblais est peu probable et pourrait se produire seulement si les matériaux ont de très mauvaises propriétés (At ou Ap mou).

Si le matériau de remblai est de type At ou Ap (DIN 1055) avec une consistance consistant ou raide (Magnan, 2012) alors le facteur de sécurité est suffisant. La cohésion doit être au moins de 5 kPa, l'angle de frottement supérieur ou égal à 17,5 degrés.

Il est ainsi conseillé de tester les propriétés des remblai\_1 dans les zones A, B et C pendant le creusement, soit sur place, soit en testant des échantillons au laboratoire. Si le remblai est trop faible, il faudra procéder au remplacement des matériaux dans les zones A et B.

- Talus 2

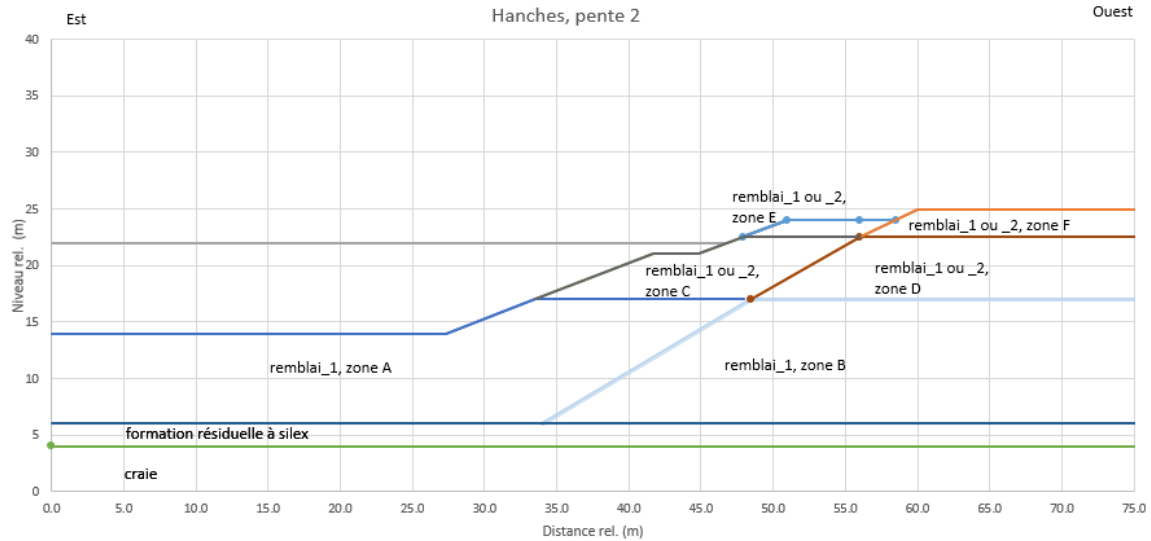


Figure K : Modèle géotechnique du talus 2

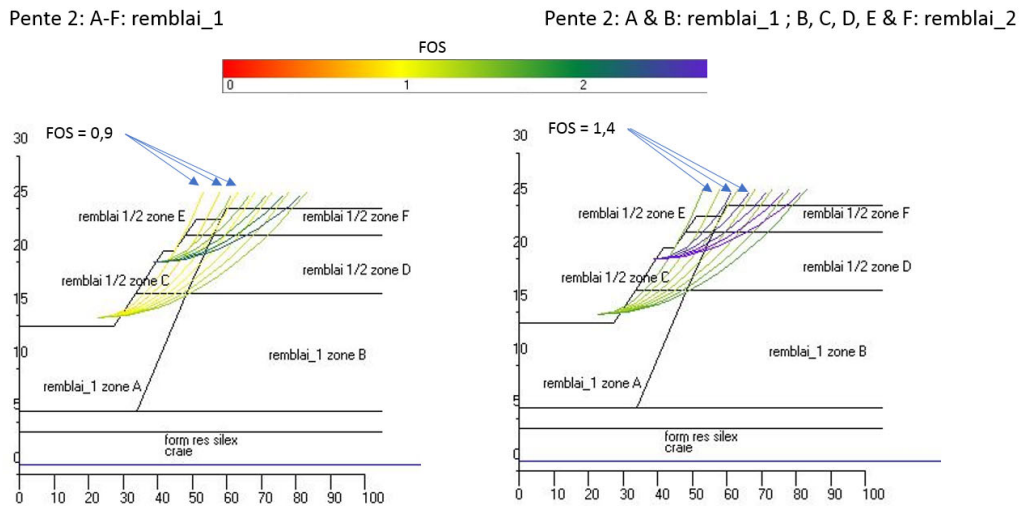


Figure L : calcul de stabilité pour le talus 2

Les facteurs de sécurité (noté FOS sur le schéma) les plus faibles sont indiqués sur la figure. A gauche, la Figure L montre la stabilité avec l'hypothèse des propriétés du remblai\_1 (approche conservative). La Figure L à droite montre la stabilité avec l'hypothèse des propriétés du remblai\_2 (des zones C, D, E et F).

## Conclusion Talus 2

Si des instabilités apparaissent, ce sera dans le remblai le plus proche du futur bassin mais seulement si les propriétés du remblai sont très mauvaises (At ou Ap mou). Si le matériau de remblai est de type At ou Ap (DN 1055) avec une consistance ferme ou raide alors le facteur de sécurité est suffisant. La cohésion doit être au moins de 5 kPa, l'angle de frottement supérieur ou égal à 17,5 degrés.

Il est ainsi conseillé de tester les propriétés des remblais\_1 dans les zones A, B, C et E (à noter que le remblai D et F existe actuellement partiellement) pendant le creusement, soit sur place, soit en testant des échantillons au laboratoire. Si le remblai est trop faible, il faudra procéder au remplacement des matériaux dans les zones C et E. Pour les nouvelles couches D et F, les matériaux doivent être testés et bien compactés.

- Talus 3

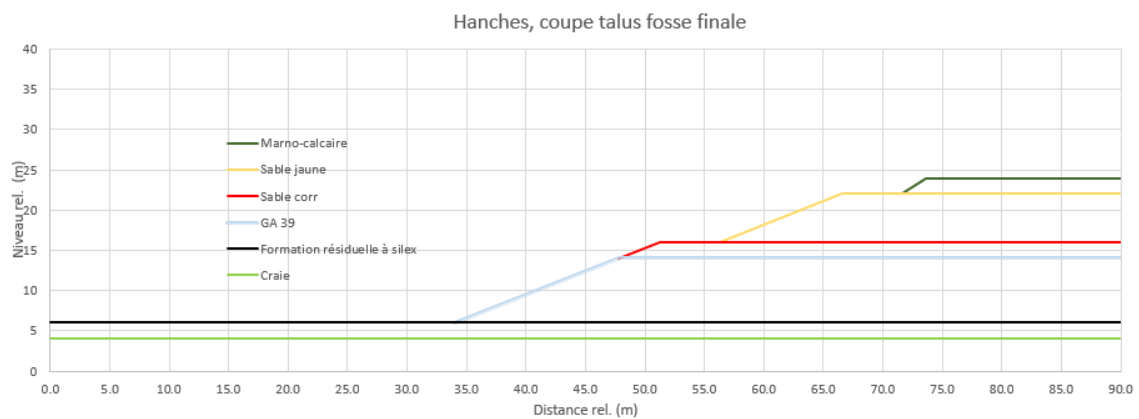


Figure M : Modèle géotechnique du talus 3

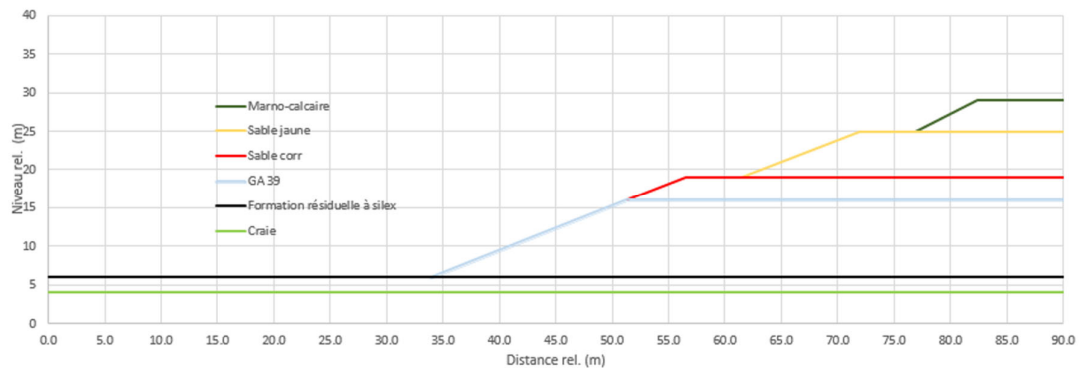


Figure N : Modèle géotechnique pour le talus 3bis

Le talus 3 représente le front d'exploitation le plus généralement attendu d'après les modèles géologiques (Figure M), en attente de remblai. Le talus 3bis (Figure N) a été modélisé pour vérifier une configuration plus exceptionnelle.

Tous les paramètres sont disponibles excepté pour le sable jaune, auquel il a été attribué les mêmes paramètres que le sable correcteur (sable corr.).

### Pente 3

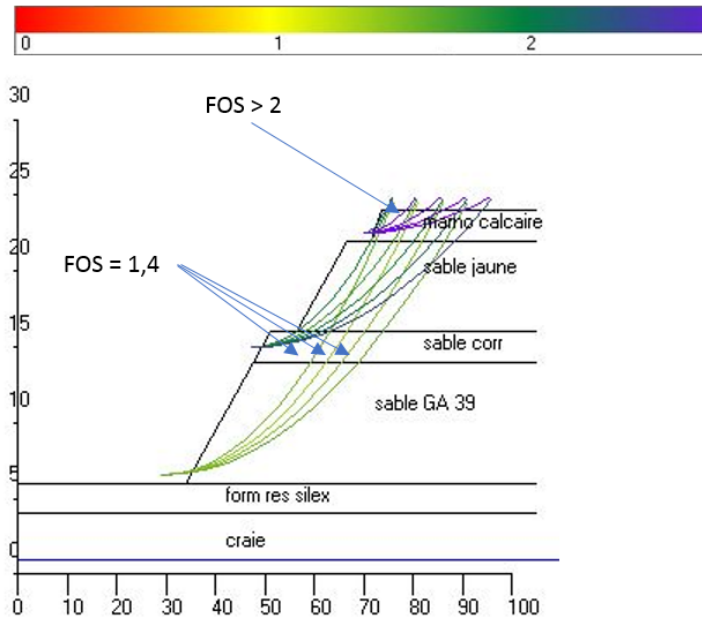


Figure O : Calculs de stabilité pour le talus 3

### Pente 3 bis

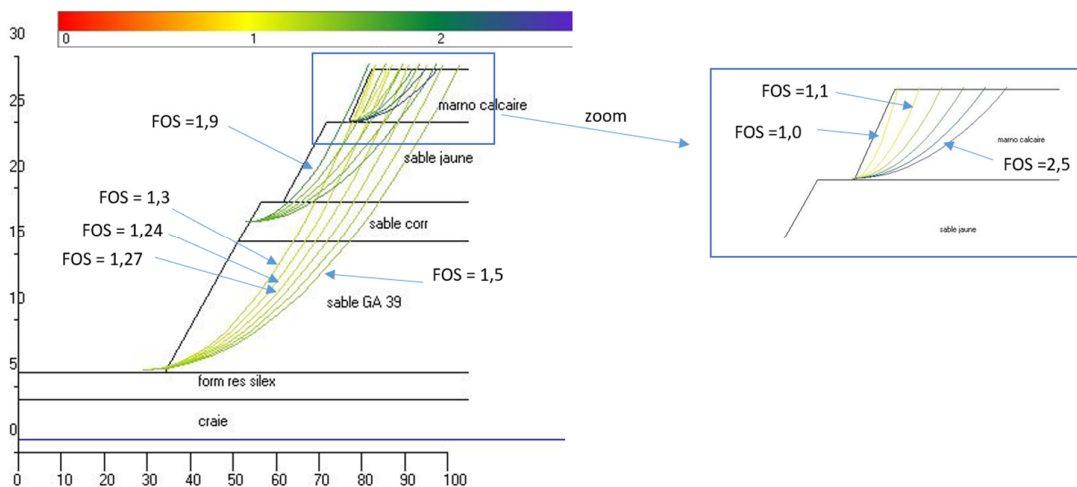


Figure P : Calculs de stabilité pour le talus 3bis

### **Conclusion Talus 3**

Les analyses de stabilité (Figure O) montre que le front d'exploitation moyen est très stable. Les calculs présentés sur la Figure P, démontre que le gradin dans son ensemble est stable, le talus de sable est très stable même pour une hauteur de 10m. Pour une épaisseur de 4m et un angle de 45°, la pente de matériau marno-calcaire, ne présente pas dans son ensemble de risque d'instabilité. Toutefois une faible instabilité, de petite échelle, peu profonde, pourrait se produire. Il est donc conseillé, quand le marno-calcaire est supérieur à 2m d'épaisseur, de vérifier la teneur en eau du matériau, l'échantillon utilisé étant très humide et peu représentatif. Dans le cas où le matériau est saturé en eau, une pente de 36° pour le marno-calcaire est préconisée (voir zoom Figure P).

Par ailleurs, dès que le sable jaune est accessible, des échantillons devront être pris et testés dans un laboratoire géotechnique pour confirmer les paramètres de stabilité retenus.

## **V. Conclusion**

La plupart des matériaux de la carrière de Hanches ont été échantillonnés et testés en laboratoire. Lorsque le matériau n'affleure pas suffisamment dans la carrière, des estimations conservatrices, basées sur des données bibliographiques, ont été utilisées. Des modélisations ont été calculées pour 3 types de fronts.

Les fronts nommés 1 et 2 sont les futurs talus du bassin agricole d'irrigation. Ils seront constitués de remblais existants (remblai\_1) actuellement en place et de futurs remblais (remblai\_2). Les résultats des calculs montrent que la stabilité est satisfaisante. Seulement dans les cas où les propriétés géotechniques des remblais sont très mauvaises, un facteur de sécurité de 0.9 a été calculé. Les conséquences d'une éventuelle instabilité sont locales et resteront dans le périmètre du bassin. Il est conseillé des tester les matériaux de remblais pendant les travaux pour s'assurer, dans ces zones, de qualités géotechniques suffisantes telles que définies dans le rapport.

Les fronts nommés 3 sont les fronts issus de la découverte et de l'exploitation des matériaux en attente de remblai. Ces fronts n'ont jamais montré de signes d'instabilité depuis le début de l'exploitation. Les calculs pour ce type de front d'exploitation, avec des valeurs conservatives, ont montré des facteurs de sécurité très sécuritaires pour la configuration générale. La stabilité de ces fronts est donc démontrée par l'expérience et par le calcul théorique. Lorsque l'épaisseur de marno-calcaire est supérieure à 2m, si le matériau est saturé en eau, l'angle du talus sera réduit à 36° pour éviter une instabilité mineure de surface.



## VI. Bibliographie

Audric, T. (1973) Etude géologique et géotechnique des limons de plateau de la région Parisienne. In: Bulletin de l'association Internationale de Géologie de l'Ingénieur. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. Krefeld, 1973, Nr.8, pp. 49-59.

Bonvallet, J. (1979) Une classification géotechnique des craies du not utilisée pour l'étude de stabilité des carrières souterraines. Revue Française de géotechnique. Numero 8. p. 5-14.

DIN 1055-2:2010-11 Actions on structures - Part 2: Soil properties (this norm was based on requirements from Eurocode 7 and based on DIN 4020 Geotechnical investigations for civil engineering purposes - Supplementary rules to DIN EN 1997-2.

DIN 18196:2011-05 Earthworks and foundations - Soil classification for civil engineering purposes.

Goodman, R. E. (1992) Rock mechanics. 2nd edition. Wiley.

NF EN 1997-1/NA Eurocode - Calcul géotechnique - Partie 1: Règles générales - Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005.

Ortigao, J.A.R., Sayao, A.S.F. (2004) Handbook of slope stabilization. Springer 2004.

Schmitz, R.M. (2020) Geotechnical risk management of slopes in quarries, mines and dredging operations of Sibelco: geotechnical monitoring. In: North of England Institute of Mining and Mechanical Engineering Newsletter 2/2020. 7 pages.

Schmitz, R.M., Schroeder, Ch. (2020) Apparent Cohesion and the Design of Slopes in Sand Quarries. The Professional Geologist, V. 57, N. 4, pp. 28-32.

Magnan, J.P. (2012) Description, identification et classification des sols. Dossiers Techniques de l'Ingénieur. Éditions techniques de l'ingénieur.

# **Cabinet LUKOWSKI Philippe**

**B.E. Environnement, Hydrogéologie, Assainissement**

\*

## **PEDOLOGIE**

Tests d'infiltration, Définition et Contrôle de filières d'assainissement autonome

## **GEOLOGIE**

Prospection de gisements, Sondages, Forages

## **HYDROLOGIE**

Etudes hydrauliques de bassins versants, dimensionnement d'ouvrages de gestion des eaux

## **HYDROGEOLOGIE**

Reconnaissance, Forages, Piézomètres, Pompes d'essai

## **AUDIT - SUIVI D'EXPLOITATION**

Environnement, Gisements, Contrôle de niveaux sonores

## **ETUDES D'IMPACT**

Défrichage, Extraction, Traitement de matériaux, Industries,  
Aménagements hydrauliques, Remembrement, Infrastructures routières

## **DOSSIERS REGLEMENTAIRES**

Installations classées, Loi sur l'eau, Code forestier  
Déclaration, Autorisation d'exploiter, Changement d'exploitant,  
modification de conditions d'exploitation ou de remise en état  
Abandon de travaux, Garanties financières

\*

**5, Le Castel  
50760 MONTFARVILLE**

**Tél. 02 33 43 50 85  
Courriel : [cabinetluko@free.fr](mailto:cabinetluko@free.fr)**