



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة العربي التبسي - تبسة
Université Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et de la géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master académique

Filière : Génie minier

Option : Géotechnique

Etude géotechnique de l'aménagement de Oued El Harrach

Présenté et soutenu par

Rima TOBAL

Devant le jury:

| | Grade | Etablissement |
|--------------|-----------------------|------------------------------------|
| Président : | Faouzi MEBROUK MAA | Université Larbi Tebessi - Tébessa |
| Encadreur : | Zied BENGHAZI MAA | Université Larbi Tebessi - Tébessa |
| Examineurs : | Ali HAMDANE MAA | Université Larbi Tebessi - Tébessa |

Promotion 2019-2020



Année universitaire : 2019-2020

Tébessa le : 29/09/2020

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1 Rima TOBAL

Niveau : 2^{ème} année Master Option : Géotechnique

Thème : Etude géotechnique de l'aménagement de Oued El Harrach

Nom et prénom de l'encadreur : Zied BENGHAZI

| Chapitres réalisés | Signature de l'encadreur |
|---|--------------------------|
| - Généralités sur l'aménagement des cours d'eau | |
| - Projet d'aménagement de Oued El Harrach | |
| - Etude géotechnique des Travaux et des ouvrages d'aménagement. | |
| - Modélisation Numérique. | |

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة العربي التبسي - تبسة

مقرر رقم 244 مؤرخ في 2020/05/21 يتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة ماستر.

إن مدير جامعة العربي التبسي - تبسة،

- بمقتضى القرار الوزاري رقم 351 المؤرخ في 29 أوت 2019 والمتضمن تعيين السيد بودلاعة عمار مديرا بالنيابة لجامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 المؤرخ في 8 أكتوبر 2012، المعدل والمتمم للمرسوم التنفيذي رقم 09-08 المروج في: 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي - تبسة،

- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفايات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما المادتان 10 و 11 منه،

- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل جامعة العربي التبسي - تبسة لضمان التكوين لنيل شهادة الماستر تخصص جيوتقني بعنوان السنة الجامعية 2019 / 2020،

- وبعد الاطلاع على محضر المجلس العلمي لمعهد المناجم المؤرخ في 2020/05/20،

يقرر ما يأتي:

المادة الأولى: تُعيّن بموجب هذا المقرر لجنة مناقشة مذكرة الماستر المحضرة من طرف الطالب (ة):

طوبال ريمة، المولود (ة) بتاريخ 1996/09/21 ب بني عزيز - سطيف، والموسومة ب

Etude géotechnique de l'aménagement de Oued El Harrach

والمسجل (ة) بمعهد المناجم

المادة 2: تتشكّل اللجنة المشار إليها في المادة الأولى من الأعضاء الآتي ذكرهم:

| رقم | الاسم واللقب | الرتبة | مؤسسة الانتماء | الصفة |
|-----|--------------|-----------------|----------------------------|--------|
| 1 | فوزي مبروك | أستاذ مساعد - أ | جامعة العربي التبسي - تبسة | رئيسا |
| 2 | زياد بن غازي | أستاذ مساعد - أ | جامعة العربي التبسي - تبسة | مشرفا |
| 3 | علي حمدان | أستاذ مساعد - أ | جامعة العربي التبسي - تبسة | ممتحنا |

المادة 3: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يُسلم نسخة عنه إلى كلّ من الطالب المعني والمشرّف على المذكرة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه.

المادة 4: تحفظ نسخة عن هذا المقرر في الملفّ البيداغوجي للطالب المعني، وينشر في النشرة الرسمية لجامعة العربي التبسي - تبسة.

حرّر بتبسة، في: 2020/05/21

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير معهد المناجم بالنيابة
د. عولمي زهير



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة العربي التبسي - تبسة

مقرر رقم 279 مؤرخ في 2020/05/21 يتضمن الترخيص بمناقشة مذكرة ماستر.

إن مدير جامعة العربي التبسي - تبسة،
- بمقتضى القرار الوزاري رقم 351 المؤرخ في 29 أوت 2019 والمتضمن تعيين السيد بودلاعة عمار
مديرا بالنيابة لجامعة العربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم: 12-363 المؤرخ في 8 أكتوبر 2012، المعدل والمتمم للمرسوم التنفيذي
رقم 08-09 المروج في: 04 جانفي 2009 والمتضمن إنشاء جامعة العربي التبسي - تبسة،
- وبمقتضى المرسوم التنفيذي رقم 08-265 المؤرخ في 17 شعبان عام 1429 الموافق 19 غشت سنة 2008 الذي
يحدّد نظام الدراسات للحصول على شهادة الليسانس وشهادة الماستر وشهادة الدكتوراه، لاسيما المادة 9 منه،
- وبموجب القرار رقم 362 المؤرخ في 09 جوان 2014 الذي يحدّد كفاءات إعداد ومناقشة مذكرة الماستر، لاسيما
المادة 7 منه،
- وبموجب القرار رقم 1080 المؤرخ في 13 أكتوبر 2015 والمتضمن تأهيل جامعة العربي التبسي - تبسة
لضمان التكوين لنيل شهادة الماستر تخصص جيوتقني بعنوان السنة الجامعية 2019 / 2020،
- وبموجب المقرر رقم 244 المؤرخ في 2020/05/21 والمتضمن تعيين لجنة مناقشة مذكرة الماستر،
- وبعد الاطلاع على تقرير لجنة المناقشة المؤرخ في 21 أيار 2020،
يقرر ما يأتي:
المادة الأولى: يُرخص للطالب (ة) طوبال ريمة، المولود (ة) بتاريخ 1996/09/21 ب بني عزيز - سطيف،
بمناقشة مذكرة الماستر والموسومة ب

Etude géotechnique de l'aménagement de Oued El Harrach

المادة 2: يكلف رئيس قسم المناجم والجيوتكنولوجيا بتنفيذ هذا المقرر الذي يسلم نسخة عنه إلى الطالب
المعني بالمناقشة وأعضاء لجنة المناقشة فور توقيعه، وبضمن نشره عبر فضاءات المؤسسة المادية والرقمية.
المادة 3: تُحفظ نسخة عن هذا المقرر ضمن الملف البيداغوجي للطالب المعني وينشر في النشرة الرسمية
لجامعة العربي التبسي - تبسة.

حرر بتبسة، في: 2020/05/21

عن المدير، وبتفويض منه

مدير المعهد

مدير المعهد المنجم بالنيابة
ب. عولبي زويير

إهداء

الشكر لله بدايةً، خريج أنا أمضي ودربي ساطع تشدو به الآمال في وجداني خريج أرنو إلى درج العلا بعزائم الإقدام والإيمان إنني قطعت العهد أن أرقى السماء أزهو وروح الجد في شرياني، اهداني لنفسني على مانالته بعد عناء طويل وإلى قهوتي العذبة أيقونة الفرح في عالمي.

أهدي تخرجي هذا وثمره جهدي وفرحتي التي انتظرتها طوال حياتي إلى من أضاء أول قنديل في حياتي إلى عقب طفولتي الرائع إلى دفء حياتي وإلى من تحمل كل لحظه ألم مررت بها ولم يتركني بل وحولها إلي ورود، إلى من حماني من عواصف الأقدار، إلى من تربيته على يديه ومن علمني القيم والمبادئ والأخلاق لأرتقي بها في درج الحياة، إلى من لا ينفصل اسمي عن اسمه أبداً، إلى روحك الطاهرة أبي الغالي “مراد”.

أهدي تخرجي إلى دقائق قلبي غير المزيفة، إلى التي أرضعتني الإرادة مع فيض حليب الطفولة، إلى أمي “الهام” التي أرادت وسهرت وعانت ونالت ما أنا عليه الآن، إليك أيتها العالية الهمة، إليك أيتها الراقية الحنون لن يكفيك الشكر ولا العرفان، أسأل الله لك دوام الصحة والعافية.

إهداء لـ “خواني” “زكرياء” و “إبراهيم الخليل”، إلى أختي وسندي “ميرهان” التي طالما كانت ولا زالت تدفعني دائماً إلى الأمام، وإلى كل صديق ورفيق في كل مراحل الدراسة.

خاص جداً اهداني إلى أستاذي الفاضل “زيد بن غازي” إلى أسلوبك معي الذي كان له تأثير واضح في تكوين شخصيتي المستقبلية والذي علمني أن للنجاح أسرار، وأن المستحيل يتحقق بالعزم والمثابرة، لك مني كل الشكر والتقدير لمجهوداتك السامية.

أهدي تخرجي إلى أساتذتي في جميع الأطوار الدراسية وإلى أساتذتي في “جامعة العربي التبسي”، الذين تعلمنا منهم الكثير وأصبحوا لنا مثلاً يحتذى به، ليس فقط بالعلم بل وبالخلق والتفاني في العمل و لمسنا من خلالهم الحياة بمنظور آخر لأنهم شمعة إضاءة لنا الكثير من الطرق في حياتنا. إلى معهد هندسة المناجم الذي احتضنني في جنابته، نحن بالنسبة لك دفعة ومررت وأنت بالنسبة لنا منارة شامخة وخلدت للأبد في ذاكرتنا.

REMERCIEMENT

Je remercie en premier lieu, mon DIEU qui m'a donné la volonté et la force pour effectuer ce travail.

En second lieu, mon promoteur Mr. 'Zied BENGHAZI', qui m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Mes chaleureux remerciement à Mr. 'Faouzi MEBROUK' et Mr. 'Ali HAMDANE' pour avoir examiné mon mémoire.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont fourni des données précieuses sur le projet de l'oued El Harrach:

- Mme. Zahira KADI (Chef de projet);
- Mme. Karima KOVADRI (Ingénieur civile);
- Mlle. Rahma KHETIB (Ingénieur DW).

Et également mes remerciements sont exprimés: A tous les enseignants du 'Génie des Mines, option « Géotechnique » et dont je suis honorée d'avoir été leur étudiante.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'études.

LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

| | |
|------------------|--|
| BET | Bureau d'études techniques. |
| bi | Largeur d'une tranche. |
| C | Cohésion. |
| Cc | Indice de compression. |
| Cg | Indice de gonflement. |
| CU | Consolidé non drainé (consolidated undrained). |
| Cv | Coefficient de consolidation. |
| D _{max} | Diamètre maximal. |
| Em | Module pressiométrique. |
| Fs | Facteur de sécurité. |
| GTR | Guide des terrassements routiers. |
| H | Hauteur de la pente. |
| hi | Hauteur d'une tranche. |
| Ic | Indice de consistance. |
| Ip | Indice de plasticité. |
| K | Coefficient de rendement du compactage. |
| L | Largeur unitaire. |
| m | Températures minimales annuelles moyennes. |
| M | Températures maximales annuelles moyennes. |
| n | Nombre de passes du compacteur. |
| N | Nombre de coups (essai de pénétration dynamique). |
| N' | Nombre de coups corrigé pour tenir compte de la profondeur (essai de pénétration dynamique). |
| N'' | Nombre de coups corrigé pour tenir compte de la présence d'une nappe d'eau (essai de pénétration dynamique). |
| O | Centre du cercle critique. |
| OMM | Organisation météorologique Mondiale |
| P | Précipitation moyennes annuelle. |
| Pc | Pression de consolidation du sol naturel. |
| Pl | Pression limite. |

| | |
|-------------------|---|
| Q2 | Quotient pluviométrique d'Emberger. |
| Q/L | débit théorique. |
| Q/S | rapport entre le volume du matériau compacté pendant un temps donné (Q), et la surface balayée par le compacteur sur ce volume pendant le même temps (S). |
| Q _{prat} | Débit pratique du compacteur. |
| R | Rayon du cercle critique. |
| R' | Brad de levier de la force de pression de l'eau du oued. |
| RN | Route nationale. |
| RPA | Règlementation parasismique algérienne. |
| SPT | Standard penetration test (essai de pénétration dynamique). |
| Sr | Dégré de saturation. |
| T | Température moyenne. |
| Ui | Pression interstitielle agissant sur une tranche. |
| UU | Non consolidé non drainé (unconsolidated undrained). |
| V | Vitesse du compacteur. |
| Wi | Poids d'une tranche. |
| wl | Limite de liquidité. |
| w _n | Teneur en Eau naturelle. |
| w _p | Limite de plasticité. |
| Y | Ordonnée de l'axe du cercle critique. |
| α, α' | Angle d'inclinaison des efforts. |
| β | Angle de la pente. |
| γ_d | Poids volumique sec. |
| γ_h | Poids volumique humide (naturel). |
| γ_w | Poids volumique de l'eau. |
| φ | Angle de frottement interne. |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|--|------|
| Figure 1. Schéma d'espace de mobilité des cours d'eau. | 5 |
| Figure 2. Photo satellitaire de site du projet. | 17 |
| Figure 3. Extrait de la carte géologique d'Alger. | 19 |
| Figure 4. Formations géologiques dans la région d'étude (source ANRH). | 20 |
| Figure 5. Carte de situation des sondages électriques (CGG) . | 21 |
| Figure 6. Coupe géo-électrique « T »(CGG). | 22 |
| Figure 7. Coupe géo-électrique «U » (CGG). | 22 |
| Figure 8. Carte des formations post-nappe de la Mitidja. | 23 |
| Figure 9. Coupe géologique du bassin de la Mitidja passant par le massif de Bouzareah, Birtouta et l'Arbâa (Glangeaud, 1952). | 24 |
| Figure 10. Schéma structural simplifié du Sahel. | 26 |
| Figure 11. Carte de zonage sismique du nord algérien (RPA 2003). | 27 |
| Figure 12. Les variations des précipitations en millimètre dans la région d'étude. | 29 |
| Figure 13. Moyenne mensuelle des précipitations (mm) dans la région d'étude. | 30 |
| Figure 14. Diagramme Ombrothermique de la région d'Alger (PH: période humide, PS: période sèche). | 31 |
| Figure 15. Localisation de la région d'Alger sur le Climagramme d'Emberger. | 32 |
| Figure 16. Réseau hydrographique de la région d'étude. | 33 |
| Figure 17. Parcours des eaux excédentaires en cas de crue. | 35 |
| Figure 18. Localisation du tronçon d'étude (1-3) au niveau d'El Harrach. | 42 |
| Figure 19. Photographie d'un atelier de sondage carotté. | 42 |
| Figure 20. Plan d'implantation des essais in-situ au niveau du tronçon (1-3). | 43 |
| Figure 21. Types de compacteurs selon le GTR. | 51 |
| Figure 22. Cercle du pied. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figure 23. Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche. | 57 |
| Figure 24. Illustration des forces appliquée dans la méthode des tranches. | 58 |
| Figure 25. Profil en travers. | 61 |
| Figure 26. Abaque de détermination du cercle critique. | 62 |
| Figure 27. Détermination du cercle critique de la rive. | 62 |
| Figure 28. Détermination du cercle critique de la digue. | 63 |
| Figure 29. Pression de l'eau reliée à la stabilité des pentes. | 65 |
| Figure 30. Settings. | 72 |
| Figure 31. Slip surface. | 72 |
| Figure 32. FOS Distribution. | 73 |
| Figure 33. Set page. | 73 |
| Figure 34. Set units and scale. | 74 |
| Figure 35. Grid. | 74 |
| Figure 36. Zoom. | 75 |
| Figure 37. Sketch Axes. | 75 |
| Figure 38. Le Model géométrique. | 76 |
| Figure 39. Les propriétés de la première couche. | 76 |
| Figure 40. Les propriétés de la deuxième couche. | 77 |
| Figure 41. Slip surface Entry and Exit Range. | 77 |
| Figure 42. Piezometric lines. | 78 |
| Figure 43. Le model final. | 78 |
| Figure 44. Draw contours. | 79 |
| Figure 45. Affichage des résultats. | 80 |
| Figure 46. Draw Digue. | 80 |
| Figure 47. Les propriétés de la digue. | 81 |
| Figure 48. Le model final. | 81 |
| Figure 49. Affichage des résultats à court terme. | 82 |
| Figure 50. Les propriétés de la digue. | 82 |
| Figure 51. Affichage des résultats à long terme. | 83 |
| Figure 52. Le modèle final après l'élévation de niveau d'eau. | 83 |
| Figure 53. Affichage des résultats en cas de crue. | 85 |
| Figure A1. Forage: BBH-161 (P1/2). | II |

| | |
|--|--------|
| Figure A2. Forage: BBH-161 (P2/2). | III |
| Figure A3. Forage: BBH-162 (P1/2). | IV |
| Figure A4. Forage: BBH-162 (P2/2). | V |
| Figure A5. Forage: BBH-163 (P1/3). | VI |
| Figure A6. Forage: BBH-163 (P2/3). | VII |
| Figure A7. Forage: BBH-163 (P3/3). | VIII |
| Figure A8. Forage: BBH-164 (P1/3). | IX |
| Figure A9. Forage: BBH-164 (P2/3). | X |
| Figure A10. Forage: BBH-164 (P3/3). | XI |
| Figure A11. Forage: BBH-165 (P1/3). | XII |
| Figure A12. Forage: BBH-165 (P2/3). | XIII |
| Figure A13. Forage: BBH-165 (P3/3). | XIV |
| Figure A14. Forage: BBH-166 (P1/2). | XV |
| Figure A15. Forage: BBH-166 (P2/2). | XVI |
| Figure A16. Forage: BBH-168 (P1/2). | XVII |
| Figure A17. Forage: BBH-168 (P2/2). | XVIII |
| Figure A18. Forage: BB-45 (p1/2). | XIX |
| Figure A19. Forage: BB-45 (p2/2). | XX |
| Figure A20. Forage: BBH-171 (P1/2). | XXI |
| Figure A21. Forage: BBH-171 (P2/2). | XXII |
| Figure A22. Forage: BBH-172 (P1/4). | XXIII |
| Figure A23. Forage: BBH-172 (P2/4). | XXIV |
| Figure A24. Forage: BBH-172 (P3/4). | XXV |
| Figure A25. Forage: BBH-172 (P4/4). | XXIV |
| Figure B1. Localisation du Sondage BBH-161. | XXVI |
| Figure B2. Caisse du Sondage BBH-161 de 0,0 0m à 10,95 m. | XXVI |
| Figure B3. Caisse du Sondage BBH-161 de 10,95 m à 19,80 m. | XXVII |
| Figure B4. Localisation du Sondage BBH-162. | XXVIII |
| Figure B5. Caisse du Sondage BBH-162 de 0,00m à 7.65 m. | XXVIII |
| Figure B6. Caisse du Sondage BBH-162 de 7,65 m à 15,40 m. | XXIX |
| Figure B7. Localisation du Sondage BBH-163. | XXX |
| Figure B8. Caisse du Sondage BBH-163 de 0,00m à 8,00 m. | XXX |
| Figure B9. Caisse du Sondage BBH-163 de 8,00 m à 14,20 m. | XXXI |
| Figure B10. Caisse du Sondage BBH-163 de 14,20 m à 20,05 m. | XXXI |

| | |
|---|---------|
| Figure B11. Caisse du Sondage BBH-163 de De 20,05 m à 27,10 m. | XXXII |
| Figure B12. Caisse du Sondage BBH-163 de 27,10 m à 31,30 m. | XXXII |
| Figure B13. Localisation du Sondage BBH-164. | XXXIII |
| Figure B14. Caisse du Sondage BBH-164 de 0,00m à 7,00 m. | XXXIII |
| Figure B15. Caisse du Sondage BBH-164 de 7,00 m à 13,70 m. | XXXIV |
| Figure B16. Caisse du Sondage BBH-164 de 13,70 m à 20,05 m. | XXXIV |
| Figure B17. Caisse du Sondage BBH-164 de 20,05 m à 30,20 m. | XXXV |
| Figure B18. Localisation du Sondage BBH-165. | XXXVI |
| Figure B19. Caisse du Sondage BBH-165 de 0,00m à 6,35 m. | XXXVI |
| Figure B20. Caisse du Sondage BBH-165 de 6,35 m à 11,75 m. | XXXVII |
| Figure B21. Caisse du Sondage BBH-165 de 11,75 m à 17,25 m. | XXXVII |
| Figure B22. Caisse du Sondage BBH-165 de 17,25 m à 22,70 m. | XXXVIII |
| Figure B23. Caisse du Sondage BBH-165 de 22,70 m à 26,60 m. | XXXVIII |
| Figure B24. Localisation du Sondage BBH-166. | XXXIX |
| Figure B25. Caisse du Sondage BBH-166 de 0,00m à 6,10 m. | XXXIX |
| Figure B26. Caisse du Sondage BBH-166 de 6,10 m à 12,05 m. | XL |
| Figure B27. Caisse du Sondage BBH-166 de 12,05 m à 18,90 m. | XL |
| Figure B28. Caisse du Sondage BBH-166 de 18,90 m à 20,35 m. | XLI |
| Figure B29. Localisation du Sondage BBH-168. | XLII |
| Figure B30. Caisse du Sondage BBH-168 de 0,00m à 6,00 m. | XLII |
| Figure B31. Caisse du Sondage BBH-168 de 6,00 m à 13,60 m. | XLIII |
| Figure B32. Caisse du Sondage BBH-168 de 13,60 m à 18,20 m. | XLIII |
| Figure B33. Localisation du Sondage BB-45. | XLIV |
| Figure B34. Caisse du Sondage BB-45 de 0,00m à 6,20 m. | XLIV |
| Figure B35. Caisse du Sondage BB-45 de 6,20 m à 12,30 m. | XLV |
| Figure B36. Caisse du Sondage BB-45 de 12,30 m à 20,05 m. | XLV |
| Figure B37. Localisation du Sondage BBH-171. | XLVI |
| Figure B38. Caisse du Sondage BBH-171 de 0,00m à 8,45 m. | XLVI |
| Figure B39. Caisse du Sondage BBH-171 de 8,45m à 13,85 m. | XLVII |
| Figure B40. Caisse du Sondage BBH-171 de 13,85 m à 20,60 m. | XLVII |
| Figure B41. Localisation du Sondage BBH-172. | XLVIII |
| Figure B42. Caisse du Sondage BBH-172 de 0,00m à 7,50 m. | XLVIII |
| Figure B43. Caisse du Sondage BBH-172 de 7,50 m à 14,20 m. | XLIX |
| Figure B44. Caisse du Sondage BBH-172 de 14,20 m à 19,70 m. | XLIX |

| | |
|--|----|
| Figure B45. Caisse du Sondage BBH-172 de 19,70 m à 25,60 m. | L |
| Figure B46. Caisse du Sondage BBH-172 de 32,00 m à 25,60 m. | L |
| Figure B47. Caisse du Sondage BBH-172 de 25,60 m à 36,00 m. | LI |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | Page |
|--|-------------|
| Tableau 1. Techniques d'aménagement. | 8 |
| Tableau 2. Moyennes mensuelles et annuelles de la température et des précipitations de la région d'Alger durant la période 2005-2016 (O.N.M 2017). | 28 |
| Tableau 3. Mesures piézométriques in-situ. | 38 |
| Tableau 4. Les résultats des essais SPT par formation. | 45 |
| Tableau 5. Résultats d'essai Lefranc au milieu du tronçon (1-3). | 46 |
| Tableau 6. Résultats d'essai préssiométrique Menard au milieu du tronçon (1-3). | 47 |
| Tableau 7. Résultats des essais en laboratoire au milieu du tronçon (1-3). | 48 |
| Tableau 8. Désignation des différents compacteurs et leur utilisation | 52 |
| Tableau 9. Détail des calculs par méthode de Fellenius pour la rive. | 66 |
| Tableau 10. Détail des calculs à court terme par méthode de Fellenius pour la digue. | 67 |
| Tableau 11. Détail des calculs à long terme par méthode de Fellenius pour la digue. | 68 |
| Tableau 12. Tableau comparatif entres les valeurs de Fs obtenues. | 85 |

SOMMAIRE

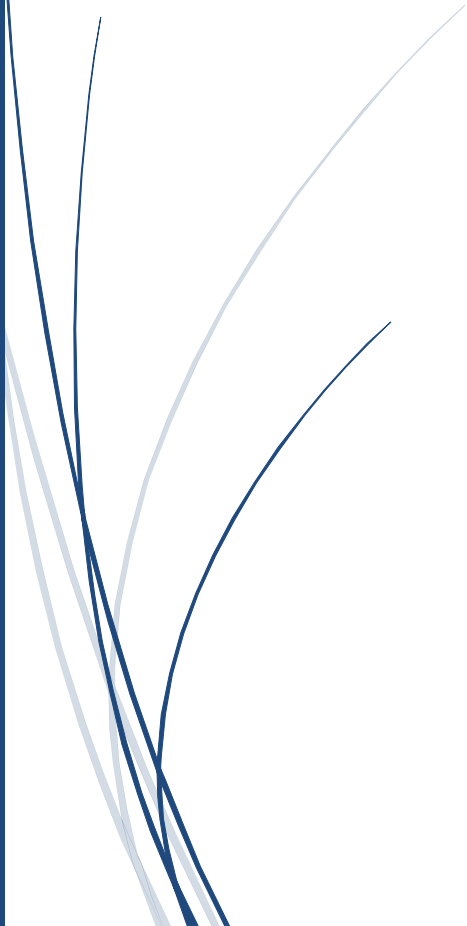
| Titre | Page |
|---|-------------|
| Liste des notations et abréviations | i |
| Liste des figures | iii |
| Liste des tableaux | viii |
| Sommaire | ix |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I: Généralité sur l'aménagement des cours d'eau | 3 |
| 1. Introduction | 4 |
| 2. Définitions | 4 |
| 2.1. Cours d'eau | 4 |
| 2.2. L'aménagement | 6 |
| 3. Les objectifs de l'aménagement des cours d'eaux | 6 |
| 4. Techniques d'aménagement pour la protection contre les crues | 7 |
| 5. Gestion écologique d'un cours d'eau | 13 |
| 6. Rôles de la géotechnique dans un projet d'aménagement d'un cours d'eau | 13 |
| 7. Conclusion | 14 |
| Chapitre II: Projet d'aménagement de Oued El Harrach | 16 |
| 1. Introduction | 17 |
| 2. Présentation du site du projet | 17 |
| 3. Géologie régionale et locale | 18 |
| 4. Géophysique | 21 |
| 5. Classification sismique de la région | 23 |
| 5.1. Le bassin de la Mitidja | 23 |
| 5.2. La région de Blida | 25 |
| 5.3. Sahel d'Alger | 25 |
| 6. Météorologie de la région | 27 |
| 6.1. Climatologie | 27 |
| 6.1.1. Température et précipitation | 28 |
| 6.1.2. Précipitation | 29 |
| 6.1.3. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953) | 30 |
| 6.1.4. Quotient pluviométrique d'EMBERGER | 31 |
| 7. Hydrogéologie et hydrologie du site | 33 |
| 7.1. Hydrologie | 33 |

| | |
|--|----|
| 7.2. Hydrogéologie | 36 |
| 7.2.1. Aquifère du Sahel d'Alger | 36 |
| 7.2.2 Aquifère de la Mitidja | 36 |
| 7.3. Piézométrie | 37 |
| 8. Conclusion | 38 |
| Chapitre III: Etude géotechnique des travaux et des ouvrages d'aménagement. | 39 |
| 1. Introduction | 40 |
| 2. Campagne de reconnaissance géotechnique | 40 |
| 2.1. Situation du tronçon choisi | 40 |
| Description des sondages | 43 |
| Essais in-situ | 44 |
| 2.3.1. Essai Standard pénétration test (SPT) | 44 |
| 2.3.2. Essai Lefranc | 47 |
| 2.3.3. Essai Préssiométrique Menard | 47 |
| 2.4. Essais au laboratoire | 48 |
| Construction des remblais | 48 |
| 3.1. Classification GTR du matériau utilisé | 49 |
| 3.2. Condition d'utilisation du matériau en remblai | 50 |
| 4. Le compactage | 51 |
| 5. La stabilité des pentes | 55 |
| 5.1. Causes de rupture des pentes | 55 |
| 5.2. Propriétés nécessaires à l'analyse | 55 |
| 6. Types de rupture (Nature de glissement) | 55 |
| 6.1. Détermination du type de glissement et le cercle critique (pour C et ϕ) | 56 |
| 6.2. Guide pour la localisation du cercle critique | 56 |
| 7. Méthode d'analyse de la stabilité des pentes | 57 |
| 8. Etude de stabilité des rives et de digue de l'oued | 61 |
| 8.1. Détermination du cercle critique | 61 |
| 8.2. Calcul par la méthode de Fellenius | 64 |
| 9. Conclusion | 69 |
| Chapitre IV: Modélisation numérique | 70 |
| 1. Introduction | 71 |
| 2. Présentation du logiciel Geoslope de Geostudio | 71 |

| | |
|---|-----|
| 3. Le fonctionnement du logiciel | 72 |
| 4. Cas d'étude | 72 |
| 4.1. Spécification de problème | 72 |
| 4.2. Cas de la rive (Calcul à court terme) | 72 |
| 4.3. Cas de la digue (Calcul à court terme) | 81 |
| 4.4. Cas de la digue (Calcul à long terme) | 82 |
| 4.5. Cas de crue | 84 |
| 5. Comparaison des résultats | 85 |
| 6. Conclusion | 85 |
| Conclusion générale et recommandations | 86 |
| Bibliographie | 87 |
| Annexes | I |
| Annexe A – Coupes des sondages carottés. | II |
| Annexe B – Photographie des caisses à carottes et sites de sondages carottés. | XXV |



Introduction générale



Introduction générale

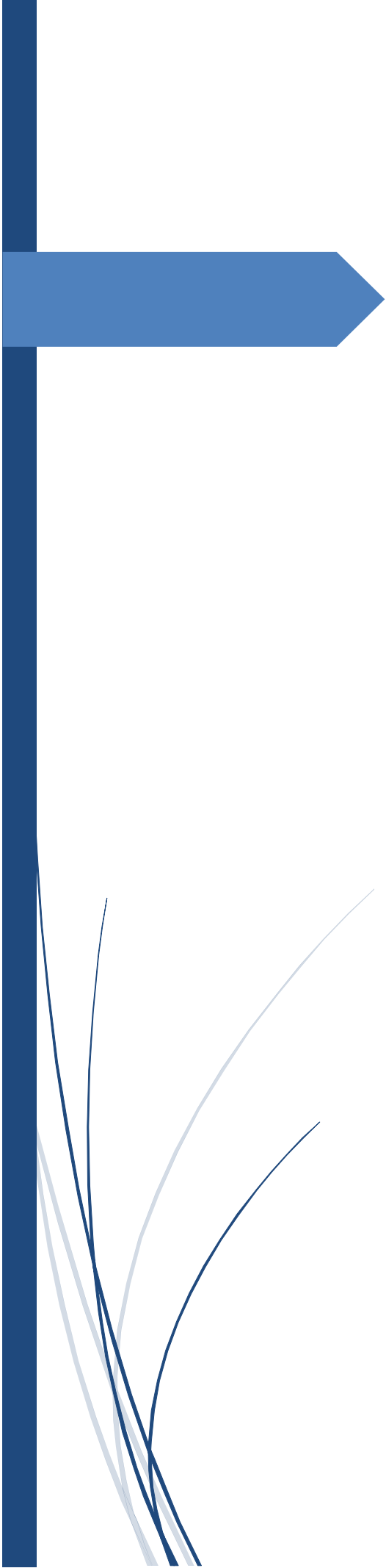
L'aménagement des cours d'eau, surtout celles qui traversent les zones urbaines, est devenu aujourd'hui une nécessité du point de vue environnemental et pour la protection du milieu urbain, ainsi que du point de vue esthétique et économique. Ce genre de projets joue un rôle important dans le développement durable du pays et de la société.

La géotechnique intervient dans ces projets dans ces différentes phases : la phase d'étude, le suivi des travaux géotechniques, le contrôle technique, et jusqu'à la réception du projet.

Ce mémoire entre dans le cadre de la géotechnique environnementale et de l'aménagement. L'étude géotechnique est faite dans ce travail, pour le projet de l'aménagement de l'Oued El Harrach.

Pour cela, cette étude a été répartie sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre, est une étude bibliographique sur le principe de l'aménagement des cours d'eaux et le rôle de la géotechnique dans ces projets.
- Le deuxième chapitre, présentera le projet cas d'étude choisi, son contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique.
- Le troisième chapitre sera consacré à l'étude géotechnique du projet. La classification du sol de remblaiement et les techniques de construction des digues de protection sont faites selon le guide des terrassement routiers (GTR).
- Le quatrième chapitre contiendra la modélisation numérique des pentes, en vue de l'évaluation de leur stabilité, et comparer les résultats avec ceux obtenus par calcul manuel.



Chapitre I Généralités sur l'aménagement des cours d'eau

1. Introduction

L'aménagement des cours d'eau a des buts et des techniques divers. Les travaux réalisés sont donc dépendants de la conception du projet et de leurs utilités.

Dans ce chapitre, va présenter les définitions des principaux termes utilisés dans le domaine de l'aménagement hydraulique, les différentes techniques employées, et enfin le rôle de la géotechnique dans ce type de projets.

2. Définitions

2.1. Cours d'eau

Les cours d'eau sont des milieux dynamiques évoluant perpétuellement en fonction des caractéristiques physiques et saisonnières. La qualité de vie d'un cours d'eau dépend de nombreux facteurs tels que la vitesse du courant, la sinuosité du lit, le débit, la qualité de la ripisylve, le taux d'oxygène dissous, ...etc [1].

Un cours d'eau est un système qui recueille et transporte vers l'aval, sous l'effet de la gravité, les eaux des pluies et des sources d'un même bassin versant. La pente et le débit en font un système énergétique. La grande diversité morphologique des rivières n'est nullement le fruit du hasard. Elle dépend du climat, de la géologie et du relief [2].

La morphologie des cours d'eau correspond à la forme que les rivières adoptent en fonction des conditions climatiques et géologiques (nature du sol, débit, pente, granulométrie du fond, ...etc.). Leur aspect évolue ainsi d'amont en aval, mais également de façon transversale: on parle alors de faciès d'écoulement [3].

Les principaux éléments constituant La morphologie du cours d'eau sont (figure1):

- Le lit (une pente, une largeur et un substrat);
- Les berges, constituées d'une partie végétale (ripisylve) et d'une partie minérale;

La ripisylve joue un rôle prépondérant dans la définition des caractéristiques morphologiques [4].

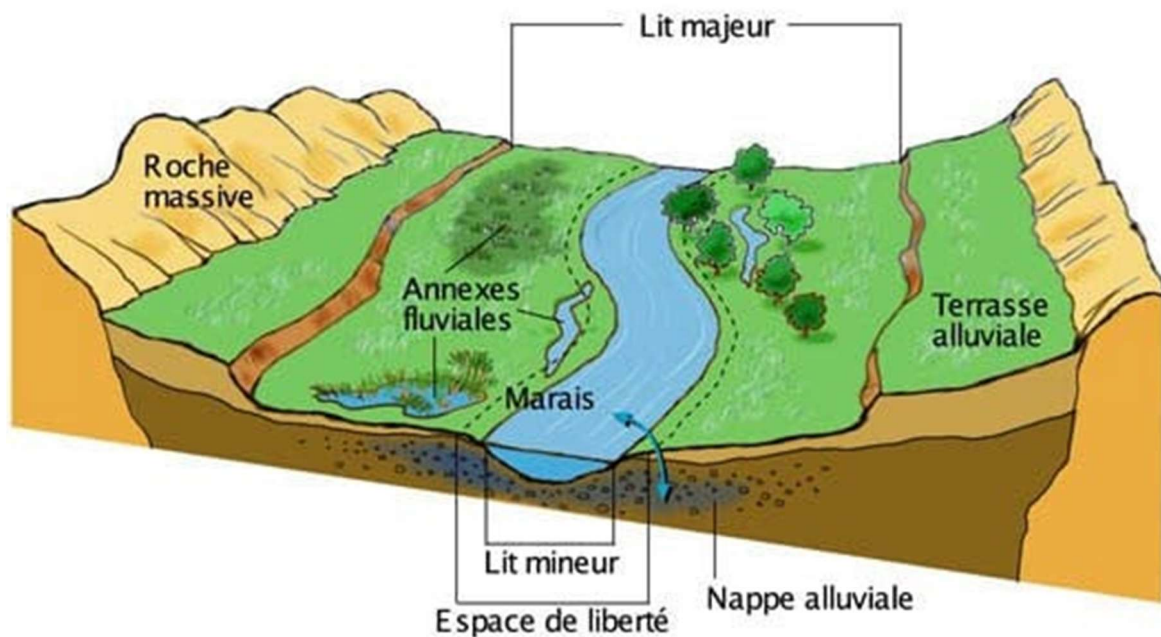


Figure 1. Schéma d'espace de mobilité des cours d'eau [5].

- **Roches massives:** sont des massifs rocheux qui contiennent des joints et des cassures, mais les blocs sont tellement intimement placés qu'ils ne requièrent pas de support vertical. Ces massifs délimitent le bassin de sédimentation qui contient le cours d'eau [6].
- **Annexes fluviales** (ou annexes hydrauliques): Ensemble de zones humides alluviales en relation permanente ou temporaire avec le milieu courant par des connections soit superficielles soit souterraines : îles, bancs alluviaux, bras morts, prairies inondables, forêts alluviales, ripisylve, sources et rivières phréatiques [7].
- **Lit majeur:** l'espace où circule la rivière lors des crues (forte élévation des débits suite aux précipitations) remarquables [5].
- **Lit mineur:** c'est un cours d'eau, l'espace où s'écoulent habituellement les eaux [5].
- **Marais** : sont des terrains dont le drainage naturel est imparfait. Même lorsqu'ils ont été drainés artificiellement, Selon leur situation à l'intérieur des terres ou sur le littoral, on les divise habituellement en marais intérieurs et en marais maritimes, bien que, dans les vallées inférieures des grands fleuves comme le Rhin, la limite ne soit pas toujours franche entre ces deux grandes catégories [8].

- **Espace de liberté:** Espace du lit majeur d'une rivière à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales permettant une mobilisation des sédiments ainsi qu'un fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres [9].
- **Nappe alluviale :** est un cas particulier de nappe libre (nappe peu profonde située sous un sol perméable), es nappes alluviales sont des nappes qui circulent dans les sédiments des rivières, c'est une masse d'eau se trouvant dans des terrains alluvionnaires. Elles se trouvent à faible profondeur et sont donc relativement faciles d'accès pour des prélèvements d'eau [10].
- **Terrasse alluviale :** est une zone plane, située sur les versants d'une vallée et constituée par des alluvions (sédiments) déposés par le cours d'eau à une certaine période [11].

2.2. L'aménagement

L'aménagement d'un cours d'eau est tous travaux ayant pour but de restaurer la qualité physique et fonctionnelle des cours d'eau afin d'améliorer le régime hydrologique et vise notamment le respect des débits minimaux en étiage (débits les plus faibles du cours d'eau) [1].

3. Les objectifs de l'aménagement des cours d'eaux

L'objectif essentiel est d'aménager les cours d'eau d'une façon à [2]:

- Améliorer l'aspect esthétique de la ville avec la renaissance de la structure urbaine s'harmonisant avec la zone riveraine;
- Amélioration de la vie et restauration de l'environnement naturel;
- Protéger des inondations les terres cultivables et les habitations;
- Produire de l'énergie, irriguer, alimenter en eau potable les hommes et le bétail;
- Lutter contre l'érosion des berges;
- Faciliter la navigation fluviale;
- Créer des bases de loisirs.

Sur cette base, on opte toujours pour des aménagements qui ont pour but de créer une ambiance agréable et dynamique des espaces riverains en se débarrassant de mauvaises images des cours d'eau: pollution, vétusté et fermeté [2].

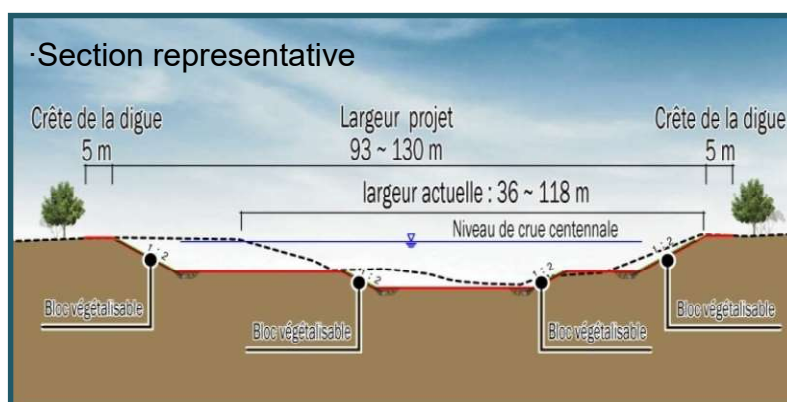
4. Techniques d'aménagement pour la protection contre les crues

L'aménagement des cours d'eau pour la protection contre les crues se fait selon différentes techniques (tableau 1) [2, 12]:

- Modifier le profil : en long ou en travers du cours d'eau;
- Couvrir ou buser un cours d'eau;
- Détourner ou dévier un cours d'eau;
- Consolider ou protéger les berges par des techniques de génie civil;
- Détruire les frayères ou perturber;
- Mettre en place un seuil, un barrage ou une digue en travers ou le long d'un cours d'eau;
- Remblayer en zone inondable d'un cours d'eau;
- Dragage (approfondissement du lit);
- Canalisation (bétonnage des berges et parfois du fond); Endiguement (augmentation de la hauteur des berges pour éviter le débordement des eaux);
- Rectification du cours (recoupement des méandres);
- Recalibrage (augmentation de la capacité du lit en modifiant sa profondeur et sa largeur).

Tableau 1. Techniques d'aménagement.

Modifier le profil: en long ou en travers du cours d'eau



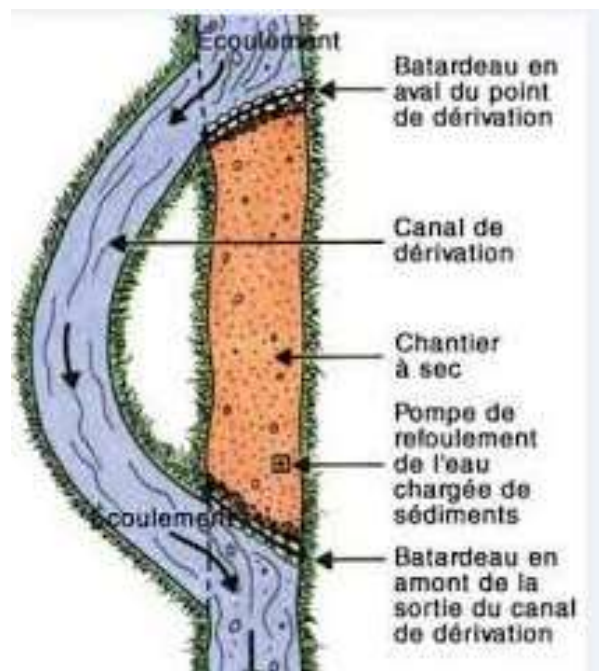
[13]

Couvrir ou buser un cours d'eau



[14]

Détourner ou dévier
un cours d'eau



[15]

Mettre en place un
seuil, un barrage ou
une digue en travers
ou le long d'un cours
d'eau



[16]

Remblayer en zone
inondable d'un cours
d'eau



[13]

Dragage
(approfondissement
du lit)



[17]

Canalisation
(bétonnage des
berges et parfois du
fond)



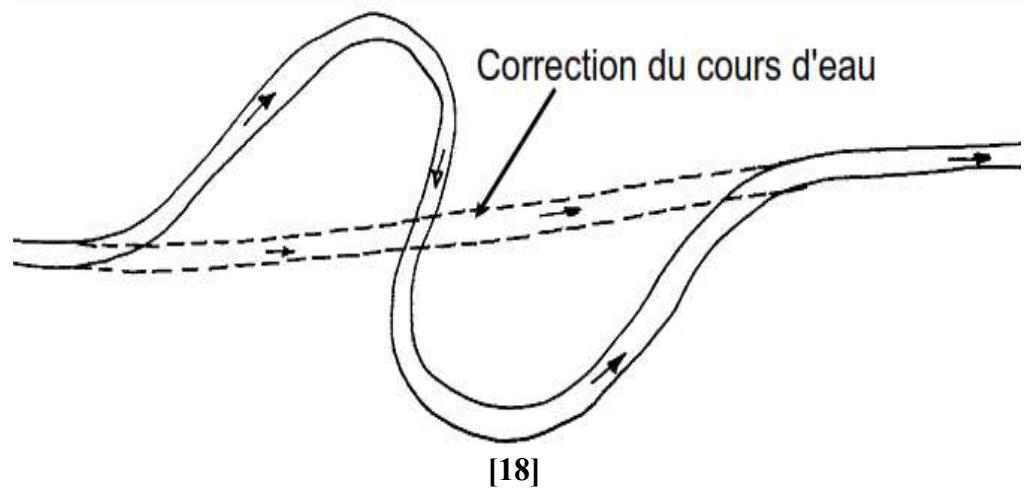
[2]

Endiguement
(augmentation de la
hauteur des berges
pour éviter le
débordement des
eaux)



[13]

Rectification du
cours (recouplement
des méandres)



Recalibrage
(augmentation de la
capacité du lit en
modifiant sa
profondeur et sa
largeur)



5. Gestion écologique d'un cours d'eau

Les cours d'eau favorisent l'installation des hommes. Ces derniers les ont aménagés pour s'en protéger ou pour s'en servir.

Le respect de la dynamique du cours d'eau contribue à l'atteinte du bon état écologique requis par la Directive cadre sur l'Eau (DCE). Le « très bon état écologique » requiert des conditions hydromorphologiques peu ou pas perturbées par l'activité humaine [3].

L'entretien régulier a pour objet:

- De maintenir le cours d'eau dans son profil d'équilibre;
- De permettre l'écoulement naturel des eaux;
- De contribuer à son bon état écologique ou le cas échéant, à son bon potentiel écologique, notamment par enlèvement des embâcles, débris et atterrissements, flottants ou non, par élagage ou recépage de la végétation des rives.

Le recours au curage doit alors être limité aux objectifs suivants [3]:

- Remédier à un dysfonctionnement du transport naturel des sédiments de nature à empêcher le libre écoulement des eaux ou à nuire au bon fonctionnement des milieux aquatiques;
- Lutter contre l'eutrophisation;

Aménager une portion de cours d'eau, canal ou plan d'eau en vue de créer ou de rétablir un ouvrage ou de faire un aménagement. Le dépôt ou l'épandage des produits de curage est subordonné à l'évaluation de leur innocuité vis-à-vis de la protection des sols et des eaux [3].

6. Rôles de la géotechnique dans un projet d'aménagement d'un cours d'eau

L'intervention du géotechnicien se divise généralement en deux phases [19]:

- 1) Une phase d'investigations réalisée sur le site étudié et permettant d'obtenir des informations relatives aux formations constituant le sous-sol. Différents moyens peuvent être utilisés pour obtenir ces informations : reconnaissance géologique visuelle, réalisation d'essais mécaniques en place (sondage par forage destructif

avec ou sans réalisation d'essai préssiométrique, sondage par forage carotté, sondage au pénétromètre, etc.), essais en laboratoire géotechnique sur des matériaux prélevés sur site...

- 2) Une phase d'ingénierie permettant d'analyser les résultats des investigations, de les synthétiser pour ne garder que les paramètres représentatifs et importants, de modéliser à l'aide de ces paramètres le comportement du futur aménagement sur le site d'implantation envisagé et d'étudier la faisabilité de solutions techniques permettant l'adaptation spécifique d'un aménagement à son site.

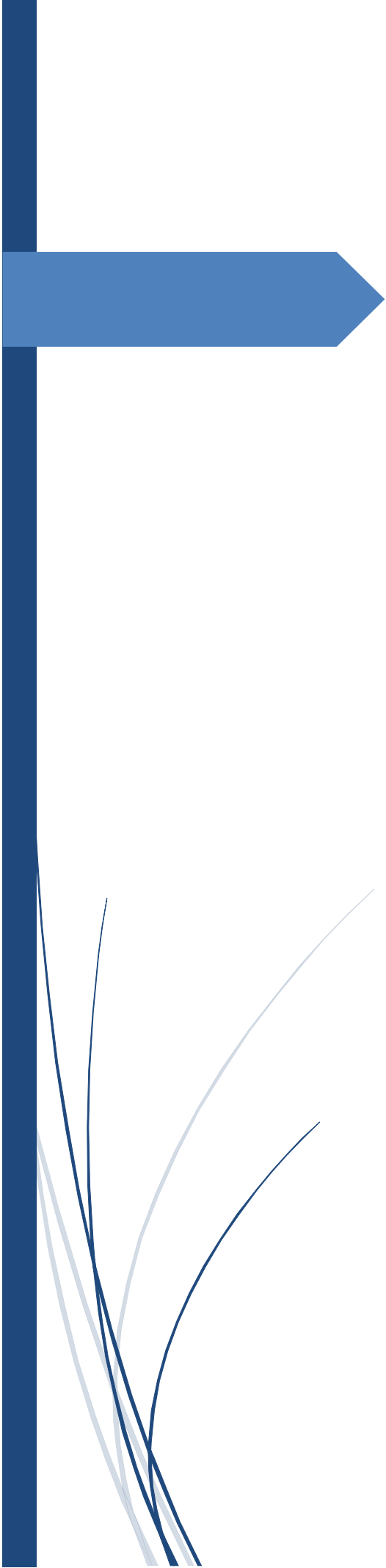
Le rôle de la géotechnique apparaît dans les points suivants [19]:

- Définition du cadre géologique, hydrogéologique et topographique général d'un site étudié et prise en compte des avoisinants du projet ;
- Définition des aléas existants vis-à-vis des risques naturels: détection des cavités, stabilité général d'un site (par rapport au glissement de terrain par exemple), sismicité.
- Définitions des terrassements: faisabilité, réemploi des matériaux, tenus des talus et parois des fouilles;
- Définition de l'influence de circulations d'eaux souterraines, agressivité de l'eau vis-à-vis des bétons;
- Définition de l'influence de la nature et de la répartition des formations géologiques sur la réalisation des travaux et sur la conception de l'ouvrage: détermination des sollicitations que sont capables de reprendre ces formations en fonction des projets, définition des types de fondations à envisager et évaluation des tassements sous ouvrages;
- Définition de l'incidence sur l'environnement avoisinant le projet: stabilité des pentes et des constructions voisines, nuisances liés aux futurs travaux [19].

7. Conclusion

L'aménagement des cours d'eau a des impacts très important dans le cadre économique et environnemental. Le rôle de la géotechnique est donc très important dans ces projets.

Dans ce qui suit, on va étudier le projet de l'aménagement de l'Oued El Harrach, de point de vue géotechnique.



Chapitre II

Projet d'aménagement de Oued EL Harrach

1. Introduction

Les objectifs de l'aménagement d'un cours d'eau sont liés à différents facteurs, tels que les conditions météorologiques de la région, le bassin versant, l'entourage urbain. Par conséquent, des solutions adéquates sont adaptés pour répondre à chaque objectif.

Dans ce chapitre, on va présenter le projet cas d'étude, la géologie de la région, l'hydrologie et l'hydrogéologie de la région, ...etc.

2. Présentation du site du projet

L'Oued El Harrach est une grande rivière puisque la superficie de son bassin hydrographique amont-aval atteint 1250 Km² [20].

L'Oued El Harrach est parmi les principaux oueds qui traversent la wilaya d'Alger, notre zone d'étude, concerne l'aménagement de l'oued El Harrach, sur **18,2Km**, dont **12,5Km** à l'amont de la RN05 et **5,7Km** à l'aval de la RN05 [21].

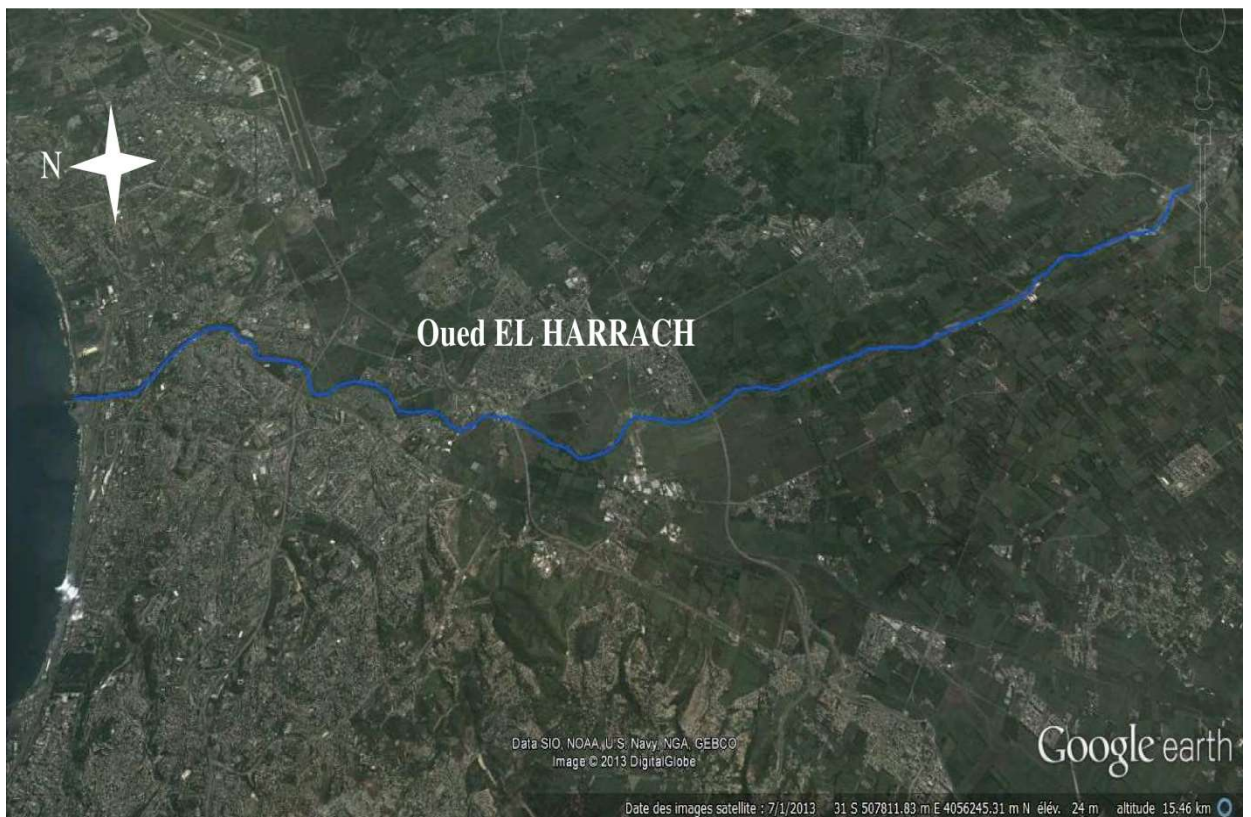


Figure 2. Photo satellitaire de site du projet (Google Earth) [21].

Il présente l'un des oueds qui sillonnent la Mitidja, prend source au Nord de l'Atlas Blidéen et se jette en mer Méditerranée après un parcours de 67 km environ. Il est formé par la confluence de deux principaux Oueds:

L'Oued Bou Maâne et l'Oued El Maktaa au Sud-Ouest de Hammam Melouane au niveau du « Rocher des pigeons » [22].

3. Géologie régionale et locale

En se basant sur les cartes géologiques d'Alger Bis, Arba, Kolea, Blida, au 50 000eme, la région d'étude prend sa source depuis le piémont de l'Atlas Blidéen jusqu'au Sahel d'Alger en traversant la plaine de la Mitidja [21].

Les formations géologiques mises en évidence lors de l'analyse des différentes cartes géologiques sont essentiellement (figure 3) [21]:

- Terrains sédimentaires

A : alluvions actuelles

a : Eboulis et dépôts de pentes.

- Alluvions récentes (Néopleistocène)

a³ : Alluvions marécageuses, caillouteuse et limoneuses, et partie inondable.

a² : Alluvions limoneuses.

- Pléistocène

q¹ : Alluvions de basses terrasses des vallées.

q^a 1 : Alluvions de moyennes terrasses des vallées.

qb' : Alluvions de hautes terrasses des vallées.

- Pliocène récent et Quaternaire Ancien

P²q'' : Marne et cailloutés de maison carrée.



Figure 03. Extrait de la carte géologique d'Alger [21].

L'Atlas Blidéen est formé en majeure partie d'une chaîne schisteuse avec quelques bancs de calcaire. À la limite Nord de l'Atlas dans la plaine de la Mitidja s'est accumulé un dépôt large de 9 Km, composé de gravier et de sable grossier. Au Nord ce dépôt est recouvert par les alluvions apportées par l'Oued, prévenants des régions inondables et composées d'argile. Ces alluvions forment le sol de la plaine de la Mitidja (**BOGARDI et LOSSEN 1974**) [20].

Le bassin néogène de la Mitidja, appartient aux zones internes de l'orogène alpin d'Afrique du Nord. Les alluvions de la plaine de la Mitidja, correspondent à un remplissage alluvial dont le réseau hydrographique complexe est caractérisé par des changements permanents des débits et des chenaux d'écoulements. Ceci apparait nettement dans la superposition des couches lenticulaires à granulométrie variable, latéralement et verticalement, dont la lithologie dominante est argilo-limoneuse. Dans les zones avales des cours d'eau principaux (Al Harrach, Mazafran) on trouve les poches et les lentilles d'argile organique (**DJEDIATE, 1996**) [20].

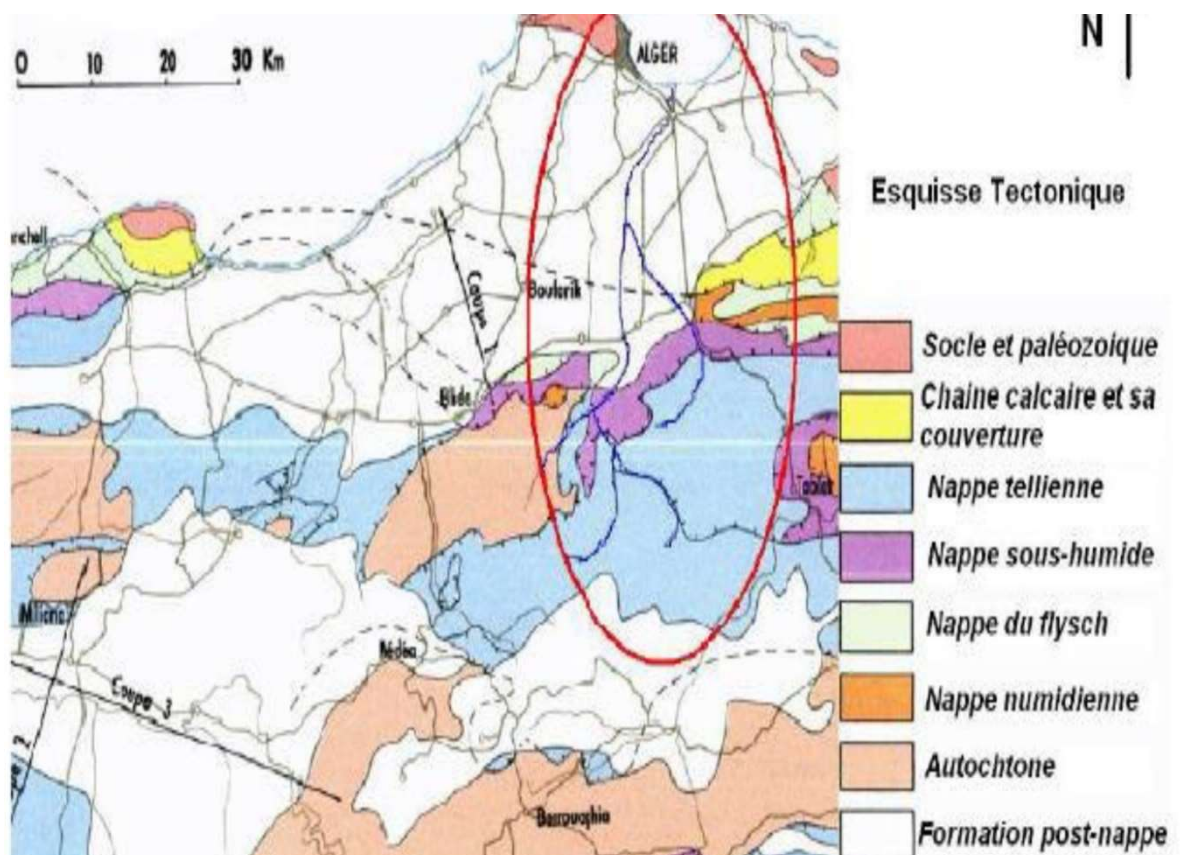


Figure 4. Formations géologiques dans la région d'étude (source ANRH) [20].

4. Géophysique

D'après l'étude géophysique réalisée par la Compagnie Générale de Géophysique CGG (Paris/France) dans la plaine de la Mitidja en 1967, des profils géo-électriques ont été réalisés suivant une direction Nord-Sud [23].

Les profils électriques (T et U) traversant la zone d'étude, ont été exploités dans le but de voir les différents terrains traversés par les quatre forages projetés [23].

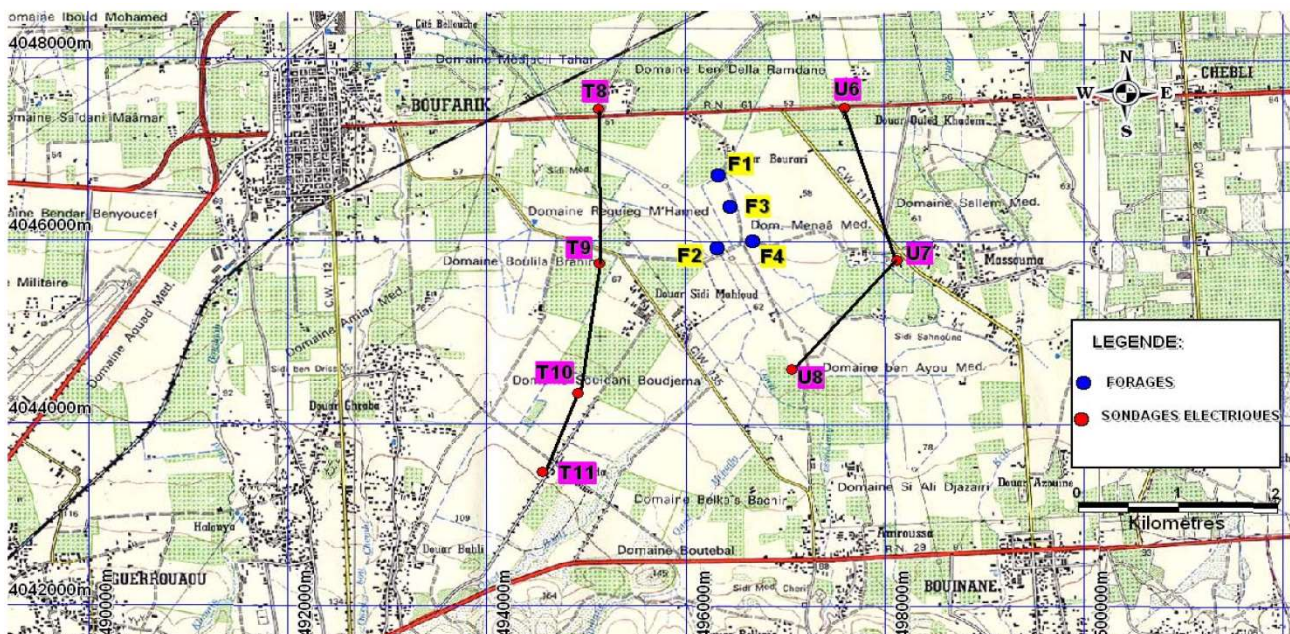


Figure 5. Carte de situation des sondages électriques (CGG) [23].

Les coupes géo électriques T et U montrent le biseautage du miocène au sud, ce dernier est surmonté par un substratum marneux du palais ancien présentant des résistances comprises entre 03et10 Ωm , le substratum est surmonté par l'astien gréseux avec des résistivités de l'ordre de 70 -100 Ωm , l'ensemble tertiaire est surmonté par un niveau quaternaire d'alluvion grossier argileux peu perméable dans la résistivité sont comprise entre 20-30 Ωm avec l'intercalation d'alluvions grossiers perméable présentant une résistivité de 50-100 Ωm . Alors que, le recouvrement alluvionnaire présent des variations de faciès d'où la corrélation entre les divers horizons s'avère très difficile. La sédimentation étant très hétérogène et les niveaux de sables et graviers étant souvent répartis irrégulièrement dans un ensemble généralement très argileux [23].

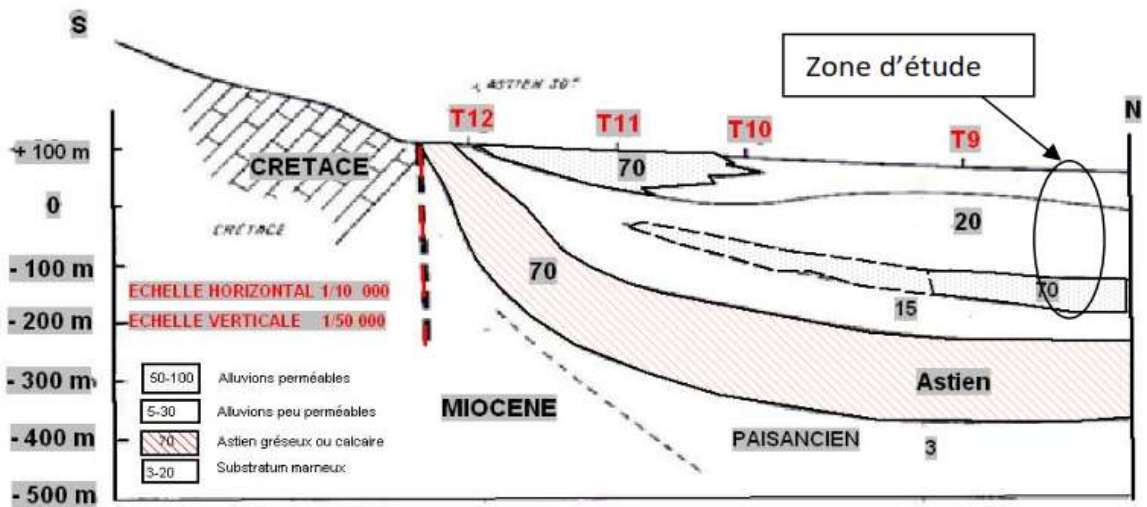


Figure 6. Coupe géo-électrique « T »(CGG) [23].

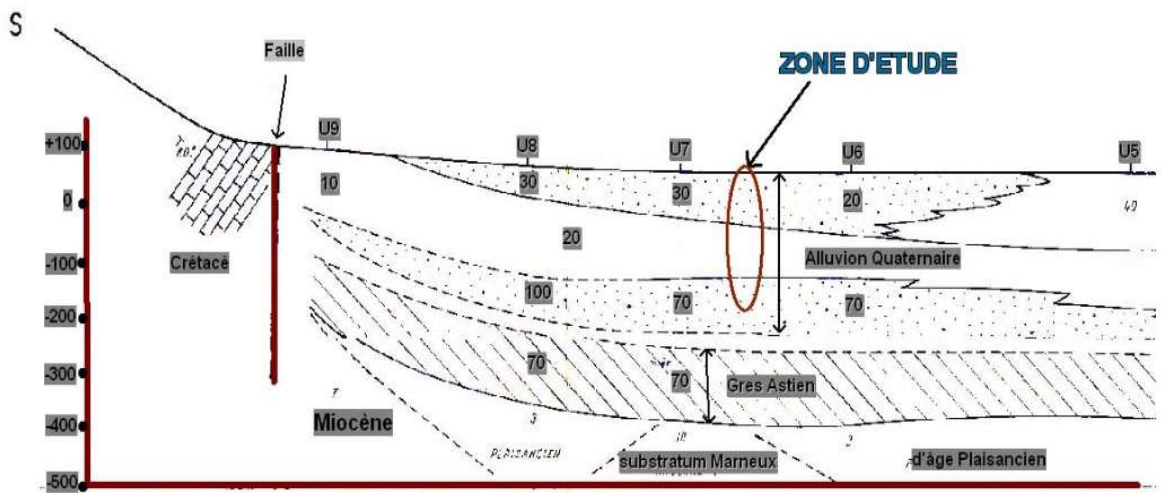


Figure 7. Coupe géo-électrique «U » (CGG) [23].

5. Classification sismique de la région

Le secteur d'étude, appartient au bassin de la Mitidja d'une part, et le Sahel d'Alger d'autre part nous sommes intéressés à l'aspect tectonique et sismique des deux zones [21].

5.1. Le bassin de la Mitidja

Située à l'ouest d'Alger, la plaine de la Mitidja se présente comme une vaste dépression recouverte par des dépôts alluvionnaires d'âge Quaternaire. Elle correspond à un bassin allongé Est-Ouest de 100 km environ de long et de 20 km de large (Figure 8). [21].

La bordure méridionale orientée E-W puis NE-SW, est représentée par l'Atlas Blidéen dont le relief est de 1500 m environ. Sa bordure nord est formée par l'anticlinal du Sahel dont l'altitude maximale n'excède pas 200 m [21].

Cette plaine est légèrement inclinée du Sud vers le Nord. L'altitude moyenne de la plaine dans la bordure sud est de 200 m environ alors que dans la cluse du Mazafran elle est de 14 m [21].

Cette pente est soulignée par le réseau hydrographique qui est dominé par les affluents de la bordure septentrionale de l'Atlas Blidéen qui s'écoulent en direction du Sahel vers la cluse de l'oued Mazafran [21].

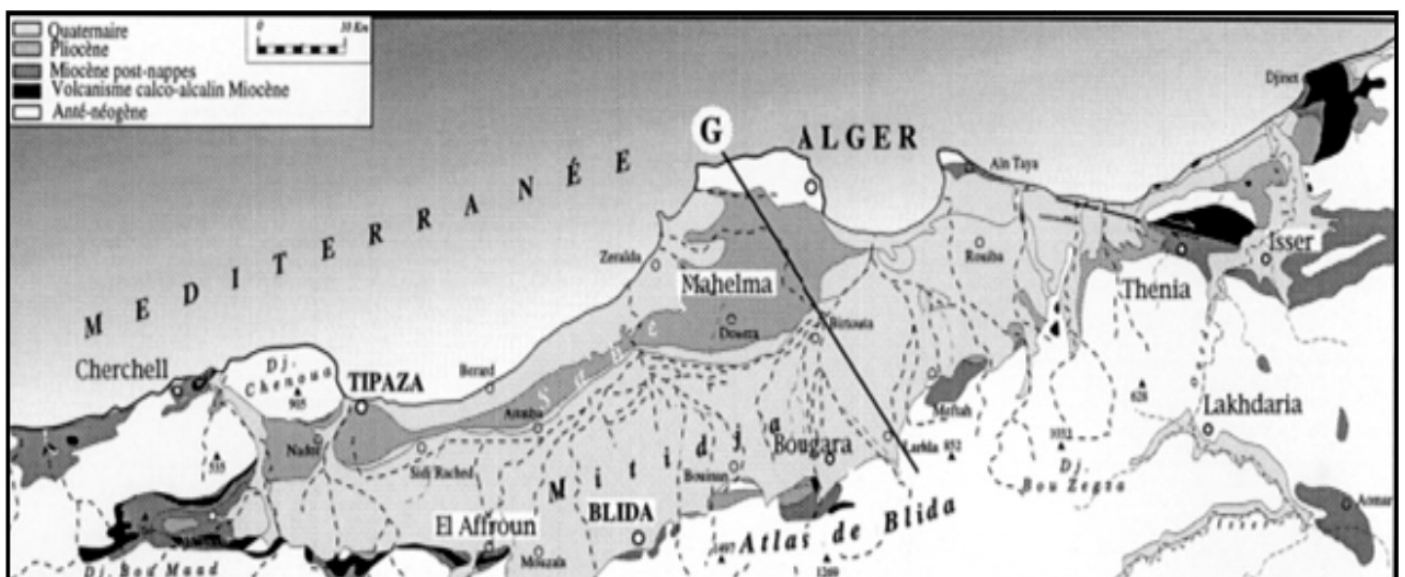


Figure 8. Carte des formations post-nappe de la Mitidja [21].

Glangeaud (1932 et 1952) a proposé une coupe transversale N-S du bassin de la Mitidja, en émettant des hypothèses sur la profondeur et la nature du substratum [21].

Il propose une coupe structurale montrant l'existence d'un large graben limité au Nord et au Sud par des failles normales (Figure 9) [21].

La couverture plio-quadernaire se continue en structure anticlinale et forme le Sahel. Sur l'ensemble du bassin, les failles normales sont reprises en compression N-S. Ces déformations sont bien marquées dans le synclinal de Ménaceur où elles attestent de l'ampleur des mouvements post-nappes [21].

Bonneton (1977 et 1979) a mis en évidence des accidents orientés sensiblement E-W qui affectent le bassin, et affecte la sismicité de la Mitidja à ces fractures profondes [21].

Sur les bordures méridionale et occidentale du bassin, l'existence d'un volcanisme calco-alcalin daté de 11 à 16 M.a., attestant de l'ouverture par effondrement E-W du bassin durant le Miocène, a été décrit par divers auteurs (Bellon, 1975; Lepvrier et Magné, 1975 et 1981; Aït Hammou, 1987) [21].

La limite septentrionale du bassin est marquée par des reliefs qui forment le Sahel d'Alger. Cette structure correspond à un anticlinal dissymétrique présentant un pendage plus fort sur le versant sud (Glangeaud et al. 1952; Saoudi, 1989).

Meghraoui (1988 et 1990) admet l'existence d'une faille inverse aveugle, à la limite nord du bassin depuis Nador à l'Ouest jusqu'à Alger à l'Est [21].

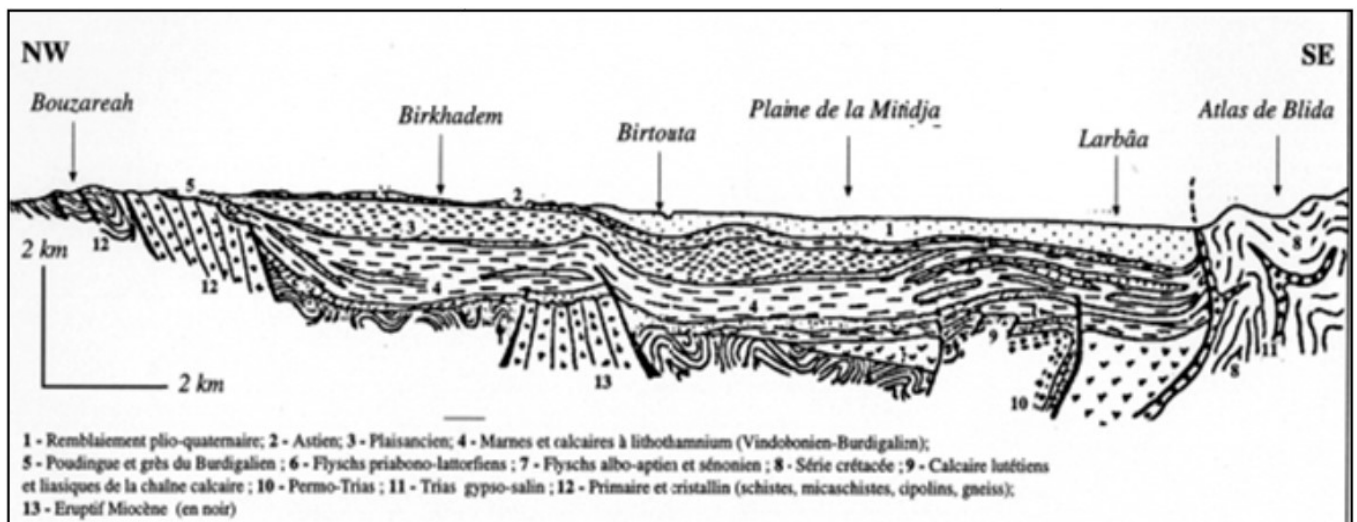


Figure 9. Coupe géologique du bassin de la Mitidja passant par le massif de Bouzareah, Birtouta et l'Arbâa (Glangeaud, 1952) [21].

5.2. La région de Blida

Dans la région de Blida la rupture de pente entre le massif de Blida et la plaine de la Mitidja se manifeste par un chevauchement des schistes ou flyschs créacés sur les différents niveaux du Miocène post-nappes. Ce dernier est en général affecté par des plis successifs déversés vers le Nord et orientés sensiblement Est-Ouest [21].

Dans cette même région, mis à part, la région de Soumâa où le Pliocène affleure avec un pendage de 45° vers le Nord, les affleurements du contact entre le Miocène et le Pliocène ne sont pas visibles [21].

Dans la région de Meftah le Miocène est moins plissé. C'est au niveau du contact par faille entre les niveaux miocènes et pliocènes que les plissements sont importants [21].

Le Pliocène moyen (Astien) et le Villafranchien présentent un fort pendage $60-70^\circ$ N vers le Nord attestant de l'importance des mouvements plio-quadernaire dans cette région [21].

5.3. Sahel d'Alger

Le Sahel d'Alger est situé à l'Ouest d'Alger. C'est un anticlinal asymétrique caractérisé par un flanc sud plus raide que le flanc nord. Son flanc Nord présente des terrasses marines disposées en gradins. Son flanc Sud forme la bordure nord de la plaine de la Mitidja [21].

Au pied du flanc sud au niveau de la rupture de pente entre la plaine de la Mitidja et les reliefs du Sahel, des affleurements de dalles calcaro-gréseuses astiennes présentent un pendage 27 à 35° S (mesures de pendage prises au pied du Sahel au sud de Koléa). Il est allongé sur plus de 80 km le long de la côte Ouest d'Alger, sa largeur est de 3 km environ [21].

Depuis le village de Nador (ex: Desaix) jusqu'à El Harrach correspondant respectivement à ses extrémités occidentale et orientale, cet anticlinal d'âge Plio-quadernaire est formé par six segments présentant des directions alternées E-W à NE-SW [21].

Entre les villages de Nador et de Sidi Rached (ex: Montebello) il est orienté NE-SW. Puis prend une direction E-W entre les villages de Sidi Rached et Attatba [21].

Depuis Attatba jusqu'à la cluse de l'oued Mazafran il reprend la direction NE-SW. De la cluse de l'Oued Mazafran jusqu'au village de Birtouta, il est orienté E-W. Et

enfin du village de Birtouta, jusqu'à El Harrach, il reprend à nouveau la direction E-W et disparaît dans cette région [21].

Cet anticlinal est marqué par plusieurs déformations post-pliocènes localisées dans la région de Tipasa, Berard-Attatba et Mahelma. A l'Est de la cluse de l'oued Mazafran, le Sahel s'élargit en direction d'Alger et forme les anticlinaux de Mahelma-oued Karma orienté E-W et de Mahelma-Ouled Fayet orienté NE-SW [21].

La région du Sahel d'Alger présente des déformations tectoniques récentes en compression NNW-SSE, affectant principalement les niveaux Plio-quaternaires. Les décrochements sont localisés principalement dans la région d'Attatba et de Mahelma [21].

L'asymétrie du Sahel serait en relation avec des failles aveugles chevauchantes vers le sud qui seraient localisées entre les décrochements (Figure 10) [21].

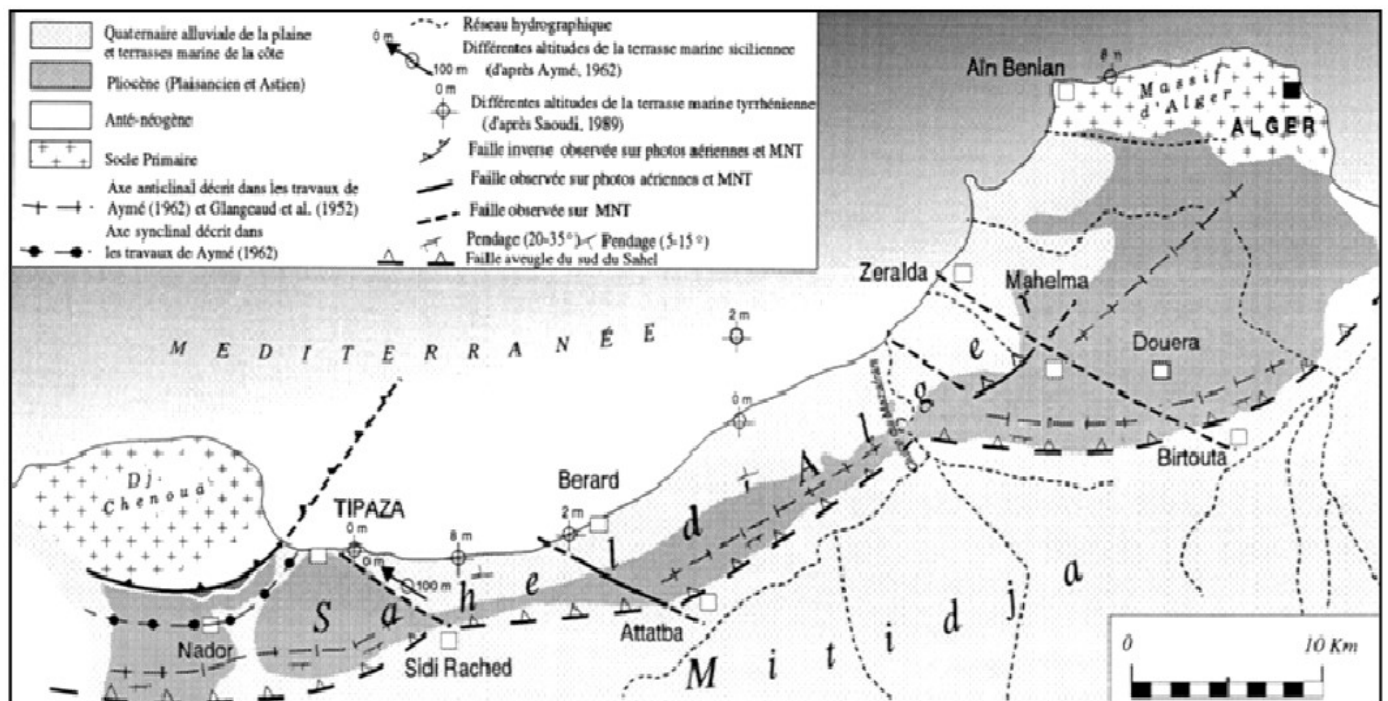


Figure 10. Schéma structural simplifié du Sahel [21].

Le secteur d'étude, appartient à la zone III, de forte activité sismique selon la carte de zonage sismique de l'Algérie, d'après le RPA 2003 (figure 11) [21].



Figure 11. Carte de zonage sismique du nord algérien (RPA 2003).

6. Météorologie de la région

Le climat est un phénomène global et complexe qui a un impact sur l'ensemble des formes de vie de la planète. Selon l'**Organisation Météorologique Mondiale(OMM)**, le climat est «la synthèse des conditions météorologique d'une région donnée caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère ». Le climat inclut un certain nombre de variables (la température, les précipitations, les vents) et se décrit comme un système ou l'ensemble de ses variables sont liées [20].

6.1. Climatologie

Chaumont et Paquin (1971) précisent que la pluviométrie en Algérie est sous l'influence de facteurs géographiques : l'altitude, la longitude et l'exposition. En effet, la pluviosité augmente avec l'altitude, mais elle est plus élevée sur le versant exposé aux vents humides. Elle augmente d'Ouest en Est, et diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral vers le Sud (**LOUNACI,2005**) [20].

Le climat reste le principal facteur de contrôle de la répartition de la dynamique des écosystèmes, il se manifeste par les échanges d'énergie et les échanges d'eau avec le milieu lacustre (**LEVEQUE, 1996**) [20].

Le taux de précipitation, la variation de la température, l'ensoleillement, l'humidité et la vitesse du vent sont les facteurs qui déterminent le climat [20].

6.1.1. Température et précipitation

Les données climatologiques telles que la température et la pluviosité s'avèrent être les variables les plus importants dans leurs actions sur les écosystèmes. Pendant les périodes sèches, le potentiel d'évapotranspirations est plus élevé que le taux de précipitation et par conséquent, il y a diminution du niveau d'eau, alors que pendant les périodes humides, l'effet inverse se produit (BALL et AL, 2000) [20].

La température est un facteur limitant qui intervient sur le rythme biologique, elle contrôle donc l'ensemble des processus métabolique et conditionne la répartition des espèces [20].

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| m (°c) | 5,6 | 5,8 | 7,5 | 10 | 12,8 | 16,2 | 19,6 | 20 | 17,9 | 14,7 | 10,3 | 6,8 |
| M(°c) | 17,1 | 17,1 | 19,5 | 22,2 | 25,4 | 29,2 | 32,3 | 32,6 | 29,6 | 27,1 | 21,4 | 18,1 |
| T=(M+m) /2 | 11,4 | 11,5 | 13,5 | 16,1 | 19,1 | 22,7 | 26 | 26,3 | 23,8 | 20,9 | 15,9 | 12,5 |
| P(mm) | 72,1 | 87,5 | 72,1 | 48,4 | 41,3 | 9,1 | 1,5 | 11,6 | 25,2 | 60 | 116,9 | 97,9 |

Tableau 2. Moyennes mensuelles et annuelles de la température et des précipitations de la région d'Alger durant la période 2005-2016 (**O N.M 2017**) [20].

m (°c) : températures minimales annuelles moyennes;

M (°) : températures maximales annuelles moyennes;

P (mm) : précipitation moyennes annuelle.

6.1.2. Précipitation

La figure 12 montre que l'Oued El Harrach appartient à des régions à précipitation différentes. De Sud (Atlas tellien) au Nord, en traversant la plaine de la Mitidja : les valeurs de précipitation varient de 1200 mm à 600 mm (moyennes annuelles) [20].

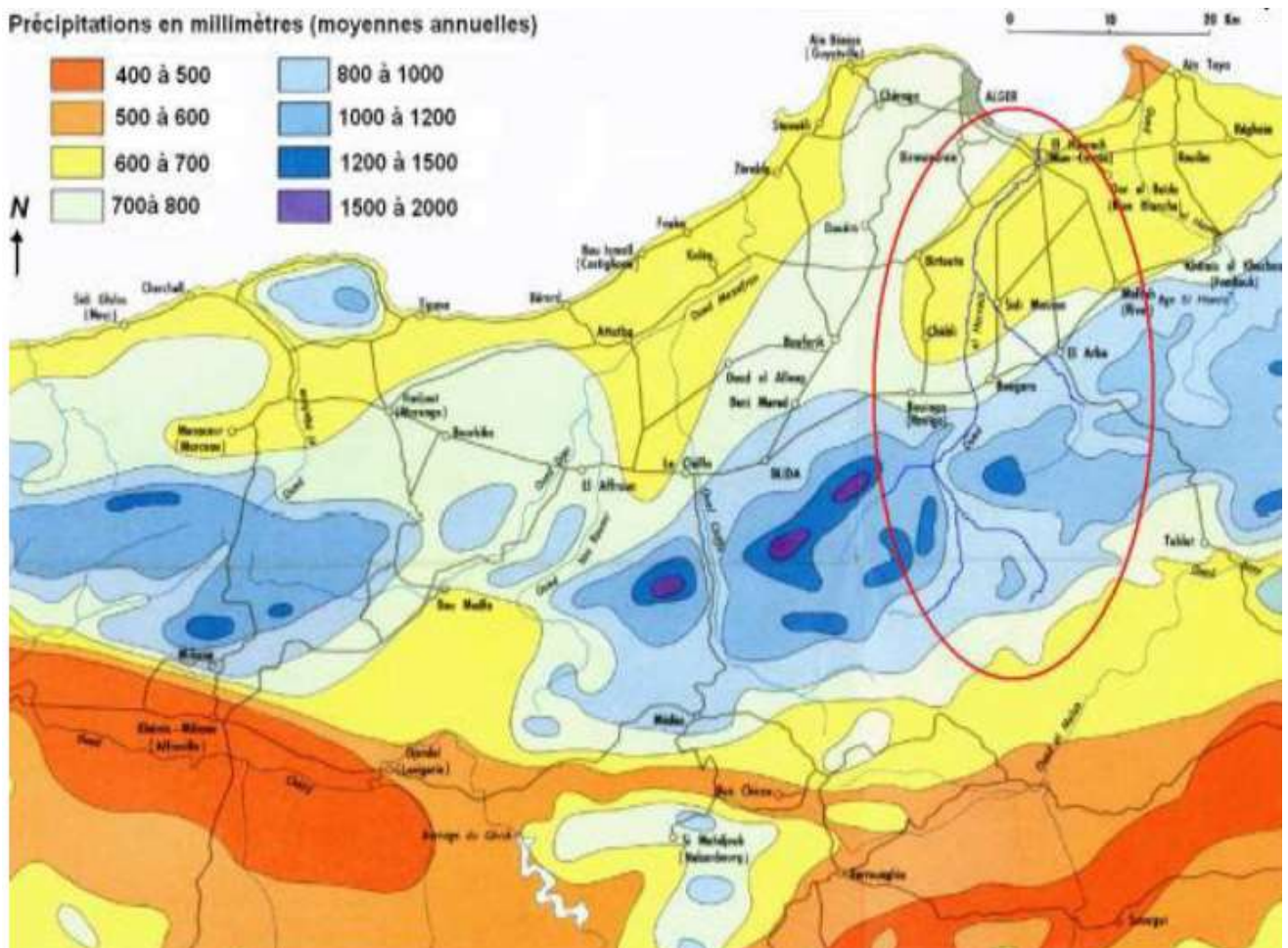


Figure 12. Les variations des précipitations en millimètre dans la région d'étude [24].

La moyenne mensuelle des précipitations la plus importante est enregistrée au mois de Novembre et Janvier avec respectivement 116,9 mm et 97,9 mm, alors que la plus basse est celle du mois de Juillet 1,5 mm. [20].

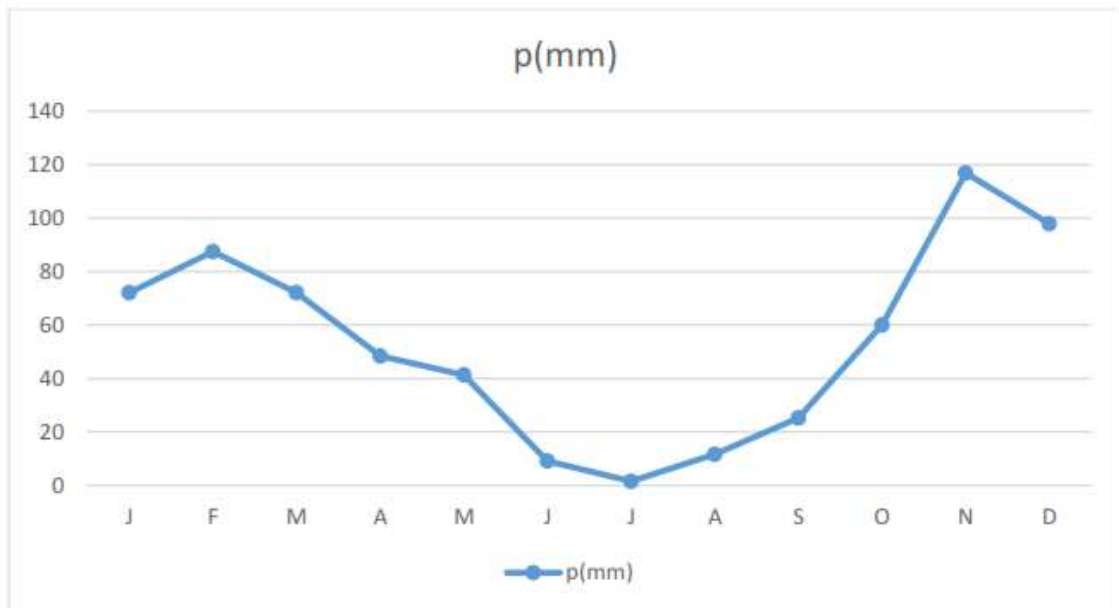


Figure 13. Moyenne mensuelle des précipitations (mm) dans la région d'étude [20].

6.1.3. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953)

Le diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN est une représentation qui consiste à déterminer les périodes sèches et les périodes humides d'une région donnée. [20]

Un mois biologiquement sec lorsque les précipitations mensuelles(p), exprimées en millimètres sont inférieurs au double de la température moyenne [20]:

$$T = (M+m) / 2 \text{ (C}^\circ\text{)}.$$

$$P \leq 2T$$

- Avec :
- P** : précipitation moyenne annuelle (mm);
 - T** : température moyenne (C°);
 - M** : température maximale de chaque mois (C°);
 - m** : température minimale de chaque mois (C°).

Le période sèche correspond à toute la partie pour laquelle la courbe thermique se trouve au-dessus de la courbe pluviométrique, et les deux zones extrêmes du graphe sont les périodes humides (PEGUY, 1970) [20].

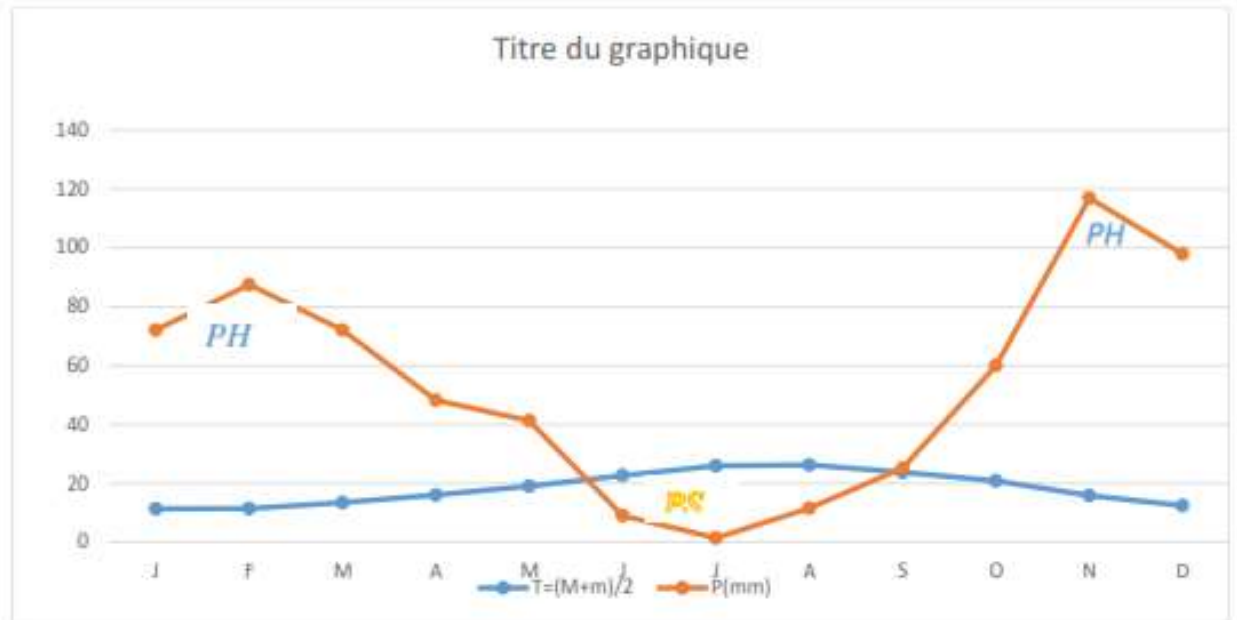


Figure 14. Diagramme Ombrothermique de la région d'Alger (PH : période humide, PS : période sèche) [20].

Notre région d'étude est caractérisée par une saison sèche de 06 mois (de la fin de mai jusqu'à la fin d'octobre) et une saison humide hivernale qui s'installe sur 06 mois (entre novembre et mars).

6.1.4. Quotient pluviométrique d'EMBERGER

Le climagramme d'EMBERGER permet la classification des différentes régions étudiées dans un étage bioclimatique distinct, il a été établi pour les régions méditerranéennes (DAJOZ, 2000) [20].

Le quotient pluviométrique d'EMBERGER (Q2) tient compte de variation annuelle de la température en fonction de l'évaporation [20]:

$$Q_2 = 2000 P / (M^2 - m^2)$$

P : pluviométrie moyenne en mm ;

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en °C ;

m : moyenne des minima du mois le plus froid en °C.

Mais le Q_2 n'est pas suffisant, pour cela on le complète par la température des minimas (m) qui joue un rôle important que les autres facteurs.

Le Q_2 de la région d'Alger est de 104, pour $m = 5,6$ montre l'appartenance de la région à l'étage bioclimatique subhumide à hiver doux [20].

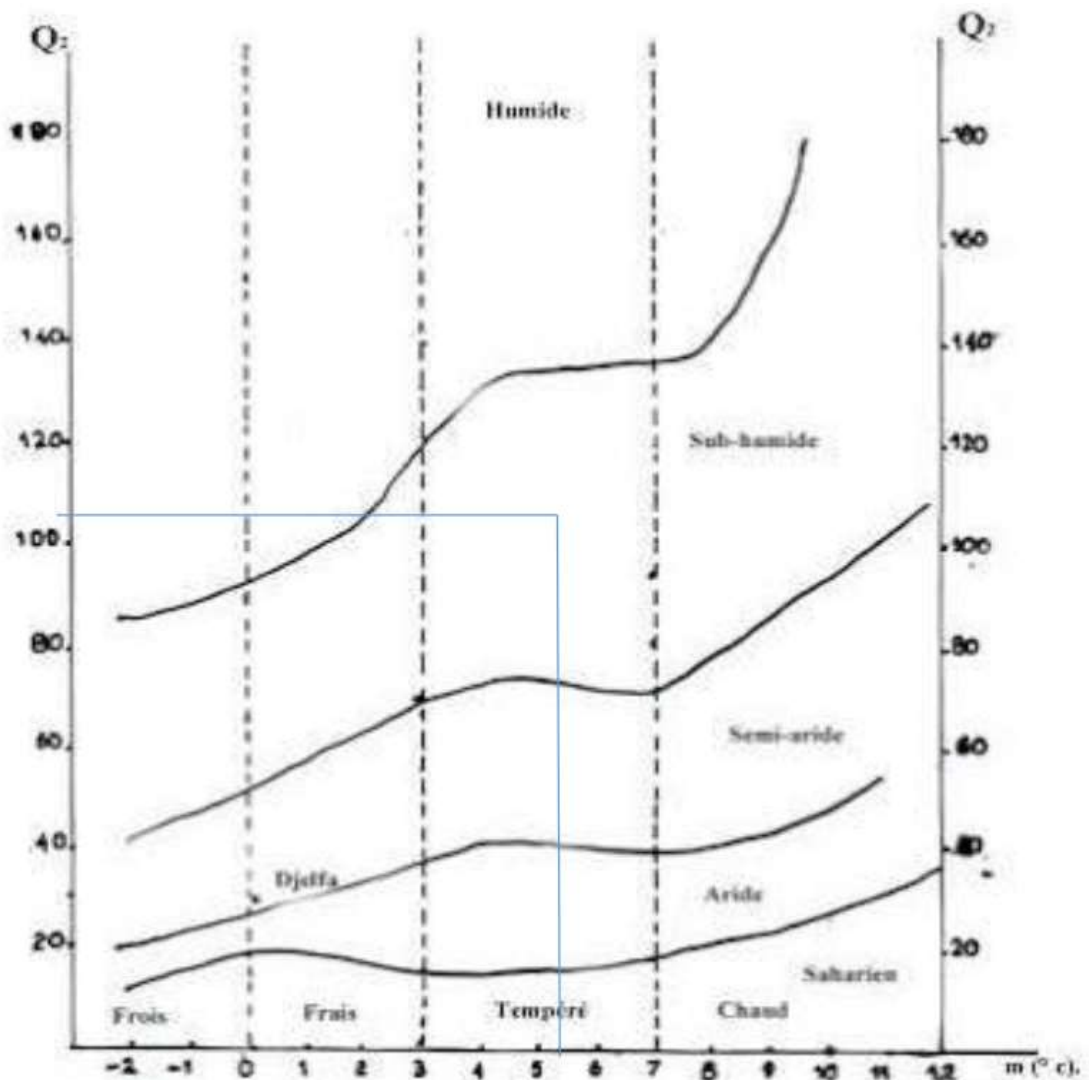


Figure 15. Localisation de la région d'Alger sur le Climagramme d'Emberger [20].

7. Hydrogéologie et hydrologie du site

7.1. Hydrologie

L'Oued El Harrach est parmi les principaux oueds qui traversent la wilaya d'Alger. Il prend sa source dans l'Atlas Blidéen et dans le Sahel, en passant par la plaine de la Mitidja, avant d'atteindre son exutoire naturel en mer Méditerranée [21].

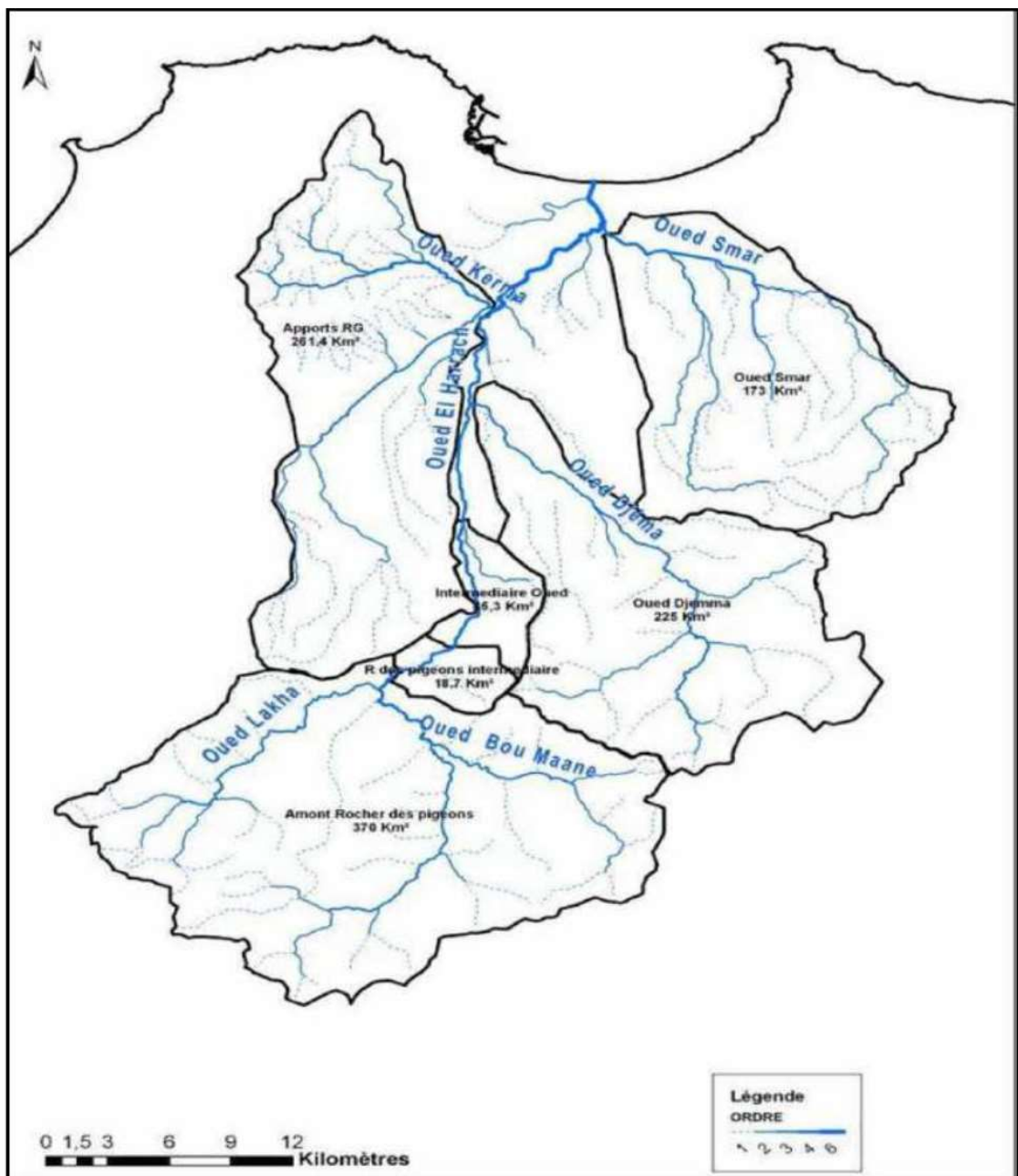


Figure 16. Réseau hydrographique de la région d'étude [21].

L’oued El Harrach prend naissance de deux oueds source, l’Oued Bou Maâne et l’Oued Lakhra, qui se rejoignent en amont de Hammam Melouane. Il se forge un passage hors de l’Atlas tellien par la percée du Rocher des pigeons puis élargit son cours dans la plaine de la Mitidja [21].

Au niveau de la plaine de la Mitidja, l’Oued El Harrach est connecté à sa rive droite par l’Oued Djemaa (3Km nord de Sidi Moussa), alors qu’au niveau de sa rive gauche, il est connecté à l’Oued baba Ali (issu de l’Oued Terro) [21].

Plus au Nord, l’Oued Kerma rejoint l’Oued El Harrach, en sa rive gauche, et à environs de 3Km avant d’atteindre son embouchure en mer, il reçoit en sa rive droite l’Oued Smar (issu de la Mitidja), et à environ 1 Km, il reçoit en sa rive gauche l’Oued Ouchaia [21].

7.1.1. Aspects principaux du régime hydrologique

De point de vue hydrologique, les cours d’eau algérien sont de type Méditerranéen, très irrégulier : alternance des crues dévastatrices et d’étiages sévères [20].

➤ Débit et apports

Le débit d’un cours d’eau représente le potentiel hydraulique brut, utilisable en partie dans le plan énergétique (ARRIGNON, 1998) [20].

Les tableaux (5 et 6 annexe I), représentent les valeurs des débits mensuels et liquides, maximum et minimum et apport annuel (donnés de l’ANRH), nous démontrent que les débits de l’Oued El Harrach sont irréguliers, importants dans la période hivernale, et faible en période estival et parfois nulle [20].

L’analyse des débits (1985-2005) montre que l’alimentation de l’Oued El Harrach est de type pluvionival car il est alimenté par les précipitations pendant la saison hivernale [20].

En comparant entre les années (tableau 6), nous remarquons un apport remarquable au cours de l’année 1991/1992 où il a atteint 725.16m³/s avec un débit

moyen annuel de 5.64 m³/s, par cotre l'apport de l'année 1992/1993 est le plus faible soit 0.01 m³/s [20].

Cette irrégularité est liée directement aux variations des précipitations d'une année à une autre [20].

➤ Crues

RENARD (2006), signale que le phénomène des crues correspond à une période d'écoulement anormalement élevée. Lorsque la quantité d'eau dépasse la capacité d'écoulement du lit mineur, l'eau s'écoule dans le lit majeur, provoquant ainsi des phénomènes d'inondation [20].



Figure 17. Parcours des eaux excédentaires en cas de crue [26].

➤ **Etiage**

L'étiage est le niveau moyen le plus bas d'un cours d'eau. L'étiage est plus important pendant la saison estivale jusqu'à l'assèchement [20].

7.2. Hydrogéologie

Au niveau de la région d'Alger, deux principaux aquifères sont bien distincts [21].

7.2.1. Aquifère du Sahel d'Alger

- **Aquifère du socle métamorphique:** il existe une présence notable d'eau, localisée dans les fissures, fractures, failles, diaclases et en zone d'altération. Cette présence d'eau se manifeste sous forme de sources ou de nappes aquifères [21].
- **Aquifère de l'Astien:** il représente l'aquifère principal de la région d'Alger, mis en évidence au niveau de la mollasse astienne, par les résurgences et les relevés piézométriques, au niveau de la formation des marnes du Plais ancien [21].
Cet aquifère est localisé soit au niveau des grès du Miocène, soit au niveau de la mollasse Astienne [21].

7.2.2. Aquifère de la Mitidja

Au niveau de la plaine de la Mitidja, il existe deux principaux aquifères: l'aquifère de l'Astien et la nappe Alluviale du Quaternaire (Nappe de Mitidja) [21].

Ils sont séparés sur presque toute la surface du bassin par la formation d'El-Harrach qui ne compte que des zones très localisées de matériaux perméables, et reposent sur les marnes du Plais ancien formant la limite inférieure imperméable [21].

• **Aquifère de l'Astien**

Il s'étend sous la majeure partie du bassin alluvial et affleure sur les collines du Sahel (Birkhadem) et localement sur la bordure Est de la plaine. Sa limite supérieure est constituée par les marnes d'El Harrach sauf dans la partie Est de la plaine où il est directement en contact avec l'aquifère de la Mitidja [21].

L'infiltration des eaux des précipitations et l'alimentation par la nappe alluviale sus-jacente constituent les ressources d'alimentation de cet aquifère, par contre, le pompage par les puits et les forages forment le principal exutoire [21].

• **Aquifère alluvial du Quaternaire (Nappe de la Mitidja)**

Deux petites unités géologiques ont été regroupées dans la formation de la Mitidja dans le concept d'aquifère de la Mitidja. Les sables dunaires récents, qui longent la baie d'Alger et les alluvions récentes des lits des Oueds. Son épaisseur est de 100 à 200 m sur la majeure partie de la plaine et va en s'amincissant vers le Sud, pour atteindre l'Atlas [21].

Les limites de l'aquifère de la Mitidja sont plus complexes que celles de l'Astien, son substratum est constitué par les formations marneuses d'El Harrach, à l'exception de la partie Est où c'est l'Astien qui forme cette limite inférieure [21].

La nappe alluviale est alimentée par les infiltrations des eaux des précipitations qui tombent sur la plaine, et par les oueds ayant une interaction avec l'aquifère [21].

Les formations quaternaires sont perméables et recouvrent un substratum épais et imperméable (les marnes du Plais ancien), cette disposition structurale et la forte pluviosité de l'Algérois expliquent l'infiltration d'une partie des eaux de pluie et leur stockage dans le quaternaire [21].

Les eaux de cette nappe phréatique s'écoulent vers la mer qui est l'exutoire naturel principal [21].

7.3. Piézométrie

Les mesures du niveau d'eau sont effectuées lors de la campagne d'investigation géotechnique in-situ (Juillet-Aout 2012), à l'aide d'une sonde piézométrique [22].

Il est à noter que le niveau d'eau mesuré est à titre indicatif, car les sondages ne sont pas dotés de tubes piézométriques. Le niveau d'eau mesuré dans le sol est susceptible de fluctuer selon les saisons et/ou conditions climatiques [22].

Les différentes mesures sont regroupées dans le tableau 3.

Tableau 3. Mesures piézométriques in-situ [22].

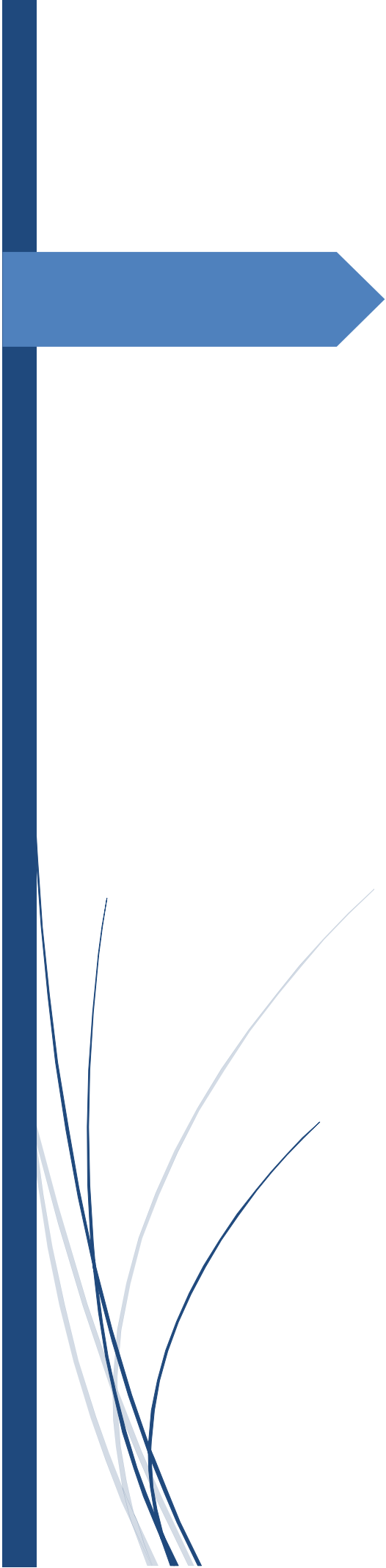
| N° de Sondage | Niveau d'eau | N° de Sondage | Niveau d'eau | N° de Sondage | Niveau d'eau |
|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| BH01 | 4,16 | BH15 | 6,00 | BH27 | 4,60 |
| BH02 | 5,05 | BH16 | 5,20 | BH28 | 6,80 |
| BH03 | 4,30 | BH17 | 5,05 | BH29 | Eboulement |
| BH04 | 6,90 | BH18 | 3,35 | BH30 | Eboulement |
| BH05 | 4,75 | BH19 | 6,30 | BH31 | Eboulement |
| BH06 | 4,00 | BH20 | Annulé | BH32 | Eboulement |
| BH07 | 6,10 | BH21 | 4,65 | BH33 | 1,60 |
| H08 | 5,30 | BH22 | Annulé | BH34 | Eboulement |
| BH09 | 4,00 | BH23 | 6,45 | BH35 | Annulé |
| BH10 | 5,00 | BH24 | 3,10 | BH36 | Eboulement |
| BH11 | 2,30 | BH25 | Annulé | BH37 | Sec |

| | | | | | |
|-------------|------------|-------------|--------|-------------|------------|
| BH12 | Eboulement | BH26 | Annulé | BH38 | Eboulement |
| BH13 | Annulé | BH27 | 4,60 | BH39 | 8,16 |
| BH14 | 3,15 | BH28 | 6,80 | BH40 | 6,02 |

8. Conclusion

Les données climatiques hydrologiques et hydrogéologiques indiquent la nécessité de reprofiler le cours de l'Oued El Harrach, et de construire des digues de protection pour protéger le milieu urbain et les terres agricoles, en cas de cures dues aux fortes précipitations.

C'est travaux doivent faire objet d'une étude géotechnique adéquate.



Chapitre III

Etude

géotechnique

des travaux et

des ouvrages

d'aménagement

1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter la campagne de reconnaissance géotechnique réalisée dans le cadre de l'étude du projet, et les résultats obtenus. Ensuite, on procèdera à la classification du sol et l'étude du compactage, selon le GTR.

La stabilité des pentes en déblai (des rives) et de la digue construite, sera vérifiée à court et à long terme.

2. Campagne de reconnaissance géotechnique

Il s'agit d'un programme géotechnique établis et arrêté par le client **DAEWOO**. Le programme de sondages carottés ainsi élaboré, a été réalisé par **GEOMAG**, approuvé par DAEWOO et son BET [22].

Les points des sondages ont été relevés par DAEWOO en présence de GEOMAG. Les travaux de forage ont été réalisés durant le mois de Juillet et Aout 2012, à l'aide de plusieurs ateliers de sondage (05 ateliers), avec un carottier de 101 mm de diamètre [22].

2.1. Situation du tronçon proposé

Notre cas d'étude est le tronçon (T : 1-3) qui appartient de la zone (I) de l'Oued El Harrach entre le **PK (1,44)** et **PK(2,58)** au niveau d'El Harrach centre [22].

L'investigation géotechnique consiste en la réalisation de [22]:

- Les sondages carottés, avec prélèvement des échantillons;
- Des essais SPT ont été réalisés au droit des sondages carottés;
- Des mesures piézométriques;
- Des essais au laboratoire sur les échantillons prélevés:
 - Mesures de teneur en eau;
 - Mesures de densité humide et sèche;
 - Analyses granulométriques et sédimentométriques;
 - Mesures de limites d'Atterberg;
 - Essais de cisaillement rectilignes de type UU et CU;
 - Essais de compressibilité à l'œdomètre, avec mesure de C_v ;
 - Des analyses chimiques du sol prélevé.



Figure 18. Localisation du tronçon d'étude (1-3) au niveau d'El Harrach [27].



Figure 19. Photographie d'un atelier de sondage carotté [28].

2.2. Description des sondages

Les sondages carottés sont réalisés avec prélèvement d'échantillons intacts de diamètre supérieur à 70mm. Un tubage est mis en place pour soutenir le terrain si nécessaire. Le fluide de forage sera fonction de la nature du sol rencontré (eau, bentonite, polymères). Les carottes des échantillons seront mises dans des caisses à carottes identifiées et répertoriées [28].

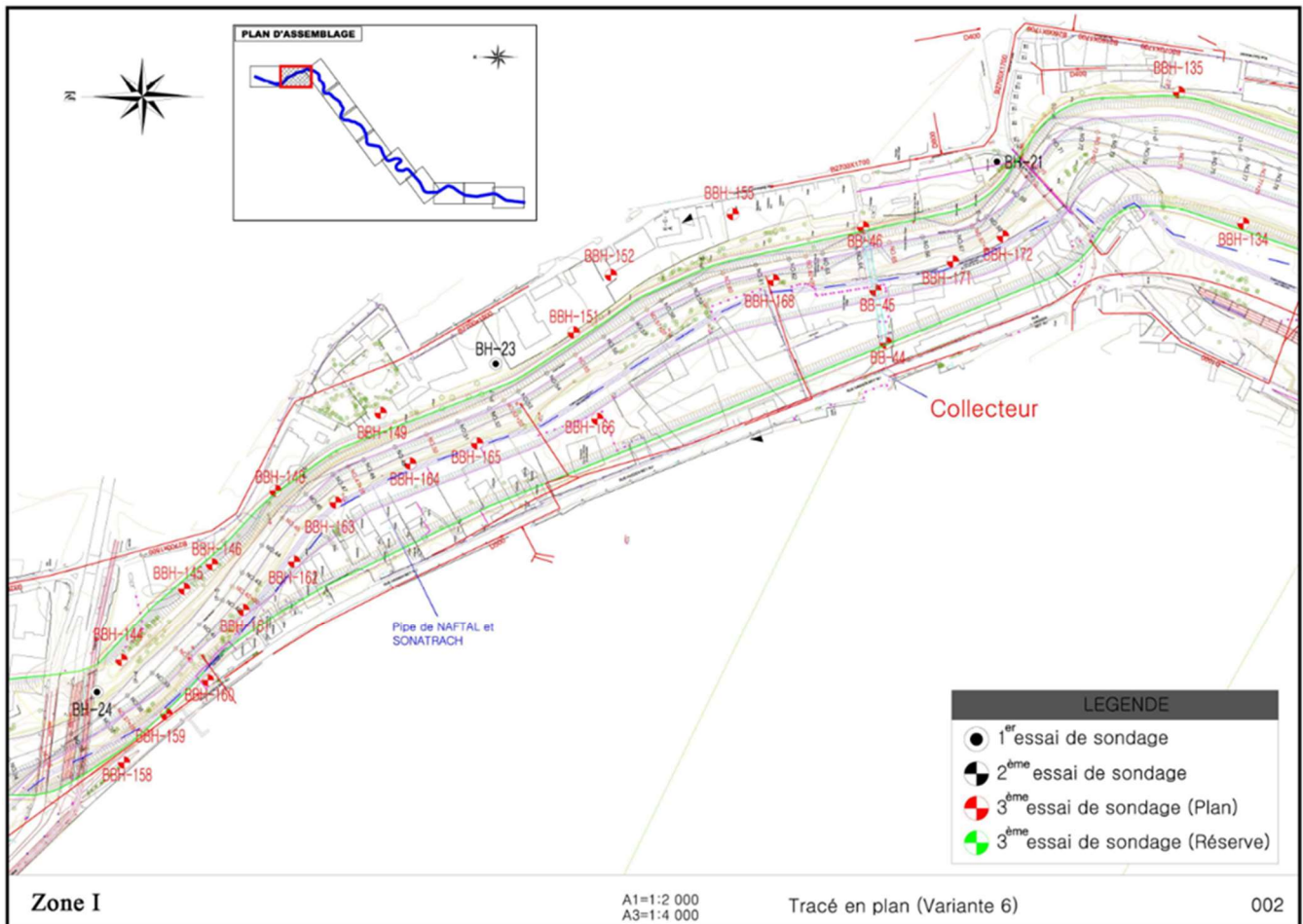


Figure 20. Plan d'implantation des essais in-situ au niveau du tronçon (1-3) [21].

Les logs de sondage associés à des photographies en couleur des caisses de carottes ouvertes, avec une échelle de distance et identification complète des carottes photographiées sont joints en annexe du mémoire [28].

Les différents sondages carottés ont mis en évidence, de haut vers le bas les formations suivantes [21]:

- des remblais hétérogènes présentés par des niveaux de sable, argile sableuse à limoneuse, renfermant des déchets et des débris de brique, plastique et béton, dont l'épaisseur varie de 1 à 6 m en amont de l'oued et de 3 à 12 m en aval;
- des dépôts alluvionnaires constitués de sable moyen à grossier, des graves et des cailloux, parfois à matrice argileuse, d'où la profondeur allant 1,5 à 20 m;
- une argile limoneuse, parfois sableuse, jaunâtre à brunâtre, molle à moyennement ferme, à trace d'oxydation et de concrétion carbonatée par endroit, dont la profondeur moyenne varie entre 1,5 à 10 m;
- une argile molle, plastique de couleur grisâtre à verdâtre, sableuse et graveleuse par endroit, renfermant parfois des passages de vase et de tourbe noirâtre, cette formation et prédomine toute la zone d'étude avec une profondeur allant de 5 à 42,5 m.

2.3. Essais in-situ

2.3.1. Essai Standard pénétration test (SPT)

Les essais SPT ont été réalisés au niveau de chaque sondage chaque 2 m, poussés jusqu'à la couche portante (alluvion) et qu'ils vérifient un nombre de SPT supérieur à 30 coups [21].

- **Principe de l'essai**

L'essai S.P.T consiste à faire pénétrer dans le sol par battage, un carottier de dimensions normalisées, porté par un train de tiges et de compter le nombre de coups « N » nécessaire à l'enfoncement de 30 cm. le nombre « N », caractérise la résistance à la **pénétration** [21].

Les valeurs « N » de l'essai SPT, ont fait objet d'une correction de profondeur et de nappe selon la formule suivante, donnée par Terzaghi [21]:

- Correction de profondeur
$$N' = N + [35 / (7 + \gamma D)]$$

- Correction de nappe

$$N'' = N * 0.5 + 7.5$$

L'exploitation des résultats basée sur la méthode de TERZAGHI et MEYERHOFF, et le traitement des résultats est donnée par formation dans le tableau (X) [21].

Tableau 4. Les résultats des essais SPT par formation [21].

| Formation | Valeur de N | | Observation |
|------------------|-------------|-----|--------------------------------|
| | Min | Max | |
| Remblai | 9 | 31 | Lâche à peu compact |
| Argile limoneuse | 6 | 31 | Moyennement consistant à raide |
| Argile grise | 2 | 26 | Molle à moyennement consistant |
| Tourbe et vase | 2 | 8 | Molle à très molle |
| Argile brunâtre | 15 | 41 | Moyennement consistant |
| Argile sableuse | 8 | 42 | Lâche à Moyennement compact |
| Alluvion | 18 | 94 | Compact à très dense |

L'analyse des résultats SPT selon la classification de Terzaghi et Peck révèle [21]:

- Une argile limoneuse moyennement consistant à raide avec des valeurs de « N » allant de 6 à 31.
- Une argile grise molle à moyennement consistant dont les valeurs de résistances «N» varient entre 2 et 26.
- Une argile brunâtre moyennement consistant à raide avec des valeurs de « N » allant de 15 à 41.
- Les tourbes et les vases sont molle à très molle avec des valeurs de « N » allant de 2 à 8.

- L'argile sableuse à graveleuse est lâche à moyennement compact dont les valeurs de N varient de 8 à 42.
- Les alluvions sont compactes à très denses avec des valeurs de « N » allant de 18 à 94.

A partir des résultats des essais SPT et selon le RPA V 2003, le site est classé en deux catégories [21]:

- **S4** Un site très meuble ($N < 10$) dans la partie aval (Zone I.II.III.), constitué d'argile molle et de tourbe sur les 20 premiers mètres.
- **S3** Un site meuble ($10 < N < 50$) dans la partie amont (Zone IV), constitué d'alluvions et d'argile sableux à graveleux moyennement ferme à partir de 10 m de profondeur.

2.3.2. Essai Lefranc

L'essai Lefranc mesure la perméabilité d'un terrain pourvu d'une nappe au travers d'un forage d'essai. On obtient par cette méthode uniquement les coefficients de perméabilité ponctuels, soient au voisinage immédiat de la cavité du forage [21].

Tableau 5. Résultats d'essai Lefranc au milieu du tronçon (1-3).

| Sondage N° | Profondeur (m) | K (m/s) | Degré de perméabilité | Type de formation |
|----------------|----------------|-----------|-----------------------|-------------------|
| BB-45 | 1,50 - 2,00 | 1,16*E-05 | Mauvaise | Semi perméable |
| | 7,20 - 7,70 | 1,95*E-05 | Mauvaise | Semi perméable |
| | 19,10 - 19,60 | 1,36*E-05 | Mauvaise | Semi perméable |
| BBH-161 | 12,00 - 12,50 | 9,69*E-06 | Mauvaise | Semi perméable |
| BBH-162 | 4,10 - 4,60 | 8,71*E-06 | Mauvaise | Semi perméable |
| BBH-163 | 23,15 - 23,65 | 4,80*E-06 | Mauvaise | Semi perméable |
| BBH-165 | 26,10 - 26,60 | 3,12*E-05 | Mauvaise | Semi perméable |

| | | | | |
|----------------|---------------|-----------|----------|----------------|
| BBH-168 | 17,70 - 18,20 | 1,06*E-04 | Mauvaise | Semi perméable |
|----------------|---------------|-----------|----------|----------------|

2.3.3. Essai Préssiométrique Menard

L'essai préssiométrique Menard est un essai de chargement du sol en place. Il consiste à dilater radialement au sein du sol une sonde cylindrique et à déterminer la relation entre la pression appliquée sur le sol selon un programme de chargement imposé et le déplacement de la paroi de la sonde [29].

Les essais préssiométrique effectués dans les sondages, ont aboutis à définir le module préssiométrique (E_m), la pression limite (Pl) en fonction de la profondeur.

Les résultats obtenues à partir des essais préssiométriques nous a permet de faire une classification « selon Ménard » des différents formations rencontrés, dans le tableau suivant [21]:

Tableau 6. Résultats d'essai préssiométrique Menard au milieu du tronçon (1-3) [21].

| Formation | Prof (m) | Ep (Bar) | | Pl (Bar) | | E/Pl | | Etat de sol |
|-----------------------|-----------|----------|-------|----------|------|------|-------|--|
| Remblai hétérogène | 0 à 5m | 12.7 | 180.6 | 2.7 | 12.4 | 4.1 | 20.1 | Sous consolidé à normalement consolidé |
| Argile limoneuse | 2 à 12 m | 21.1 | 147.7 | 2.7 | 12.4 | 4.3 | 19.2 | Sous consolidé à normalement consolidé |
| Argile brunâtre | 10 à 11 m | 76.4 | 110.2 | 6.6 | 6.9 | 7.7 | 16 | Normalement consolidé |
| Argile molle grisâtre | 3 à 35 m | 1.9 | 195.9 | 1 | 14.2 | 1.9 | 23.32 | Sous consolidé à normalement consolidé |

2.4. Essais au laboratoire

Les échantillons prélevés à différentes profondeurs des sondages réalisés, ont été soumis à une série d'analyse en laboratoire afin de déterminer leurs caractéristiques physicomécaniques. Elles se résument comme suit:

Tableau 7. Résultats des essais en laboratoire au milieu du tronçon (1-3).

| Sondage N° | Profondeur (m) | Teneur en eau-densité | | | | | Analyse granulométrique (passant %) | Limite d'Atterberg | | | | cisaillement rectiligne (UU) | | Édomètre | | |
|----------------|----------------|-----------------------|----------|------------------------|------------------------|--------|-------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|------------------------------|---------|----------|----------|--------|
| | | Wn (%) | Wsat (%) | Yh (t/m ³) | Yd (t/m ³) | Sr (%) | | 0,08 (mm) | WL (%) | WP (%) | IP (%) | Ic (%) | C (bar) | φ (°) | Pc (Bar) | Cc (%) |
| SC01 (BBH-161) | 12,00 - 12,50 | 40,19 | 41,01 | 1,80 | 1,28 | 98,00 | 98,09 | 49,58 | 28,73 | 20,85 | 1,00 | 0,04 | 5,40 | / | / | / |
| SC02 (BBH-162) | 3,80 - 4,20 | 25,20 | 25,10 | 2,02 | 1,61 | 100 | 60,10 | 37,55 | 19,40 | 18,15 | 0,68 | 0,32 | 3,66 | / | / | / |
| | 8,20 - 8,40 | 33,95 | 33,80 | 1,82 | 1,36 | 100 | 73,02 | 34,99 | 18,90 | 16,09 | 0,06 | 0,17 | 5,80 | / | / | / |
| SC04 (BBH-164) | 2,70 - 3,80 | 26,18 | 27,11 | 1,97 | 1,56 | 96,55 | 88,60 | 39,36 | 18,90 | 16,09 | 0,06 | 0,31 | 19,90 | 4,04 | 20,81 | 4,09 |
| | 21,15 - 21,40 | 26,67 | 27,71 | 1,96 | 1,54 | 96,24 | 60,16 | 30,10 | 18,63 | 11,47 | 0,30 | 0,21 | 1,37 | / | / | / |
| SC05 (BBH-165) | 5,90 - 6,30 | 41,50 | 39,00 | 1,78 | 1,26 | 100 | 96,10 | 49,73 | 24,80 | 24,93 | 0,33 | 0,17 | 2,75 | 0,77 | 20,59 | 2,74 |
| SC10 (BBH-172) | 2,50 - 2,70 | 18,00 | 21,80 | 2,01 | 1,70 | 82,50 | 60,80 | 40,52 | 21,80 | 18,72 | 1,20 | 0,35 | 10,31 | / | / | / |
| | 17,60 - 18,05 | 37,05 | 37,00 | 1,85 | 1,35 | 100 | 96,18 | 46,20 | 23,30 | 22,90 | 0,40 | 0,23 | 0,61 | / | / | / |

3. Construction des remblais

Un remblai est un ouvrage en terre qui provient de la mise en place de matériaux pour rehausser ou niveler le terrain naturel. Il doit pouvoir supporter les sollicitations

ultérieures (trafics routier ou ferroviaire, bâtiments, superstructures...), sans déformation préjudiciable (tassements, glissements...) [30].

La qualité d'un remblai dépend de la nature des matériaux qui le compose et de leur mise en œuvre. Les matériaux, issus des déblais du site ou d'un emprunt, doivent être mis en place à une teneur en eau correcte (pour assurer une portance suffisante) et compactés (pour garantir leur stabilité) [30].

3.1. Classification GTR du matériau utilisé

Le **GTR 92** (Guide de Terrassement Routier) permet de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais. On distingue trois catégories d'essais [31]:

- Les essais d'identification ou de nature;
- Les essais d'états;
- Les essais de comportement mécanique.

La norme **NF_P11-300** définit la classification des sols répartie entre 4 classes [31]:

- Classe A: Sols fins;
- Classe B: Sols Sableux et Graveleux avec fines ;
- Classe C: Sols comportant des fines et des gros éléments;
- Classe D: Sols insensibles à l'eau.

Concernant le projet de l'oued El Harrach ; ils ont réutilisé les sols issus des déblais du site d'étude, pour la construction des remblais.

Nous avons procédé à la classification GTR de la couche supérieure, entre 2,50 et 4,20 m d'épaisseur (la couche qui subira généralement les travaux de terrassement). Selon les tableaux du guide du terrassement routier (GTR) ; la classification des sols se fait à partir de différents paramètres. Ces paramètres sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

On utilise pour chaque paramètre la moyenne des 3 sondages (BBH 162 ; BBH 164 ; BBH 172).

a. Selon la nature (paramètres de nature)

- Détermination de D_{max} et le tamisât à $80\mu m$

La lecture des % de tamisât montre que $D_{max} = 10 \text{ mm}$;

La lecture des % de tamisât montre que le passant au tamis de $80\mu m$ est de **60,80%** ;

Donc ; $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et le tamisât à $80\mu m \geq 35 \%$: On en déduit que le sol est de type **A** (sols fins).

- Détermination d' I_p

La valeur de $I_{p_{moy}} = 17,65\%$

Donc ; $12 < I_p < 25$, alors la sous classe du sol en fonction de la nature est : **A2** (Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes, ...).

b. Selon l'état hydrique (paramètre d'état)

On prend la valeur **moyenne** de l'indice de consistance parmi les différents échantillons prise en considération :

- $I_{c1} = 0,68\%$; $I_{c2} = 0,82 \%$; $I_{c3} = 1,20 \%$

Donc ; $I_c \leq 0,9$; la sous classe en fonction de l'état hydrique est : **A2th** (très humide).

Selon le GTR ; On déduit que notre sol est de type **A** (sols fins), de nature **A2** (Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes ...), et d'état hydrique **A2th** (très humide).

3.2. Condition d'utilisation du matériau en remblai

Le matériau du remblai est de la classe **A2th**, qui est selon l'annexe 2 du GTR, normalement inutilisable en l'état (Très humide). On doit donc le ramener à l'état humide (**A2h**).

Pour des garanties de qualité suffisantes, la mise en remblai du matériau doit être dans les conditions de non présence de pluie.

➤ **Les solutions**

a. Condition de ni pluie ni évaporation importante

- **Solution 1** : Traitement

T : traitement à la chaux ;

C : compactage faible.

- **Solution 2** : Utilisation en l'état

C : compactage faible ;

H : remblai de faible hauteur ($\leq 5\text{m}$).

b. Condition d'évaporation importante

- **Solution 1** : Aération

E : extraction en couche ;

W : réduction de la teneur en eau par aération ;

R : couches minces ;

C : compactage moyen ;

H : remblai de hauteur moyenne ($\leq 10\text{m}$).

- **Solution 2** : Traitement

T : traitement à la chaux ;

C : compactage moyen.

4. Le compactage

Le compactage est l'action de tasser un matériau à l'aide de moyens mécaniques (pour réduire les vides et augmenter sa cohésion). Il est réalisé soit au moyen de compacteurs statiques (à pneus ou à pieds dameurs) qui agissent uniquement par leur poids, soit de compacteurs vibrants (à bille lisse ou à pieds dameurs) qui agissent par leur

pois et leur vibration. En fonction de la nature des matériaux et de l'objectif de compacité recherché, on détermine le type de compacteur (avec sa vitesse et le nombre de passes) et l'épaisseur de la couche à compacter.

Le contrôle du compactage est réalisé soit par des mesures ponctuelles de densités (nucléo densimètre), soit par une mesure en continu de l'énergie de compactage [30].

Il existe plusieurs types de compacteurs selon le type de sol à compacter.

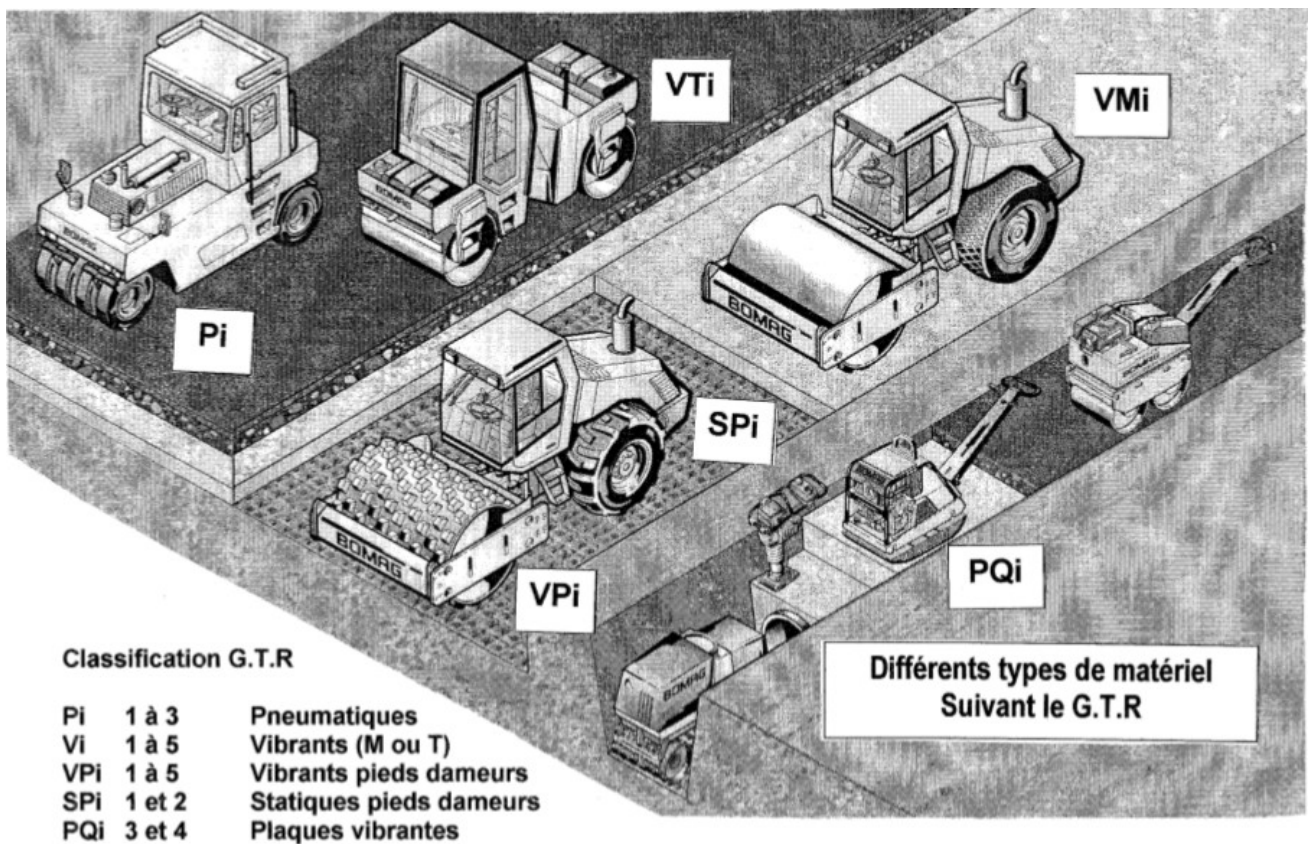


Figure 21. Types de compacteurs selon le GTR [32].

La description et l'utilisation des compacteurs sont présentées dans le tableau 8.

Concernant notre projet d'étude, nous avons un remblai ; donc, les compacteurs qui conviennent sont : **Les compacteurs Vibrants (Vi-cylindres lisses ou Vpi-cylindre à pieds dameurs).**

D'après le tableau, il se trouve deux Compacteurs: **mono axe tracté** ou

| Désignation | Description | Utilisation |
|--------------------------------|---|--|
| Mono axe tracté | Un seul cylindre lisse ou à pieds dameurs relié à un châssis avec moteur thermique pour la vibration. | Remblais en forte épaisseur. |
| Automobile monocylindre | Un seul cylindre lisse ou à pieds dameur accouplé à un essieu sur pneus. | Assises de chaussées ; couche de forme ; remblais. |
| Tandem | Deux cylindres vibrants reliés par une articulation centrale. | Assises de chaussées ; Enrobés. |
| Mixte vibrant-pneus | Automobile monocylindre avec un train arrière de 3 ou 4 pneus. | Assises de chaussées ; Enrobés. |

Automobile monocylindre.

Tableau 8. Désignation des différents compacteurs et leur utilisation [32].

3.1. Calcul du débit de compactage

Le compacteur qui convient pour le type de matériau utilisé et ses conditions de mise en œuvre est le compacteur vibrant à pieds dameurs (**Vpi**) ; on recommande un compactage moyen (code **c:1**) sur des couches minces d'épaisseur **e= 0,20 m** pour assurer le bon compactage et avoir des meilleures propriétés mécaniques.

Alors, d'après le guide de terrassement routier, notre compacteur est de classe: **Vp1**.

- **Calcul du débit par unité de largeur de compactage (Q/L)**

Il correspond au débit théorique (avant application de coefficient de rendement K), exprimer en (m³/h) pour les terrassements.

D'après le tableau de compactage pour l'utilisation des matériaux en remblai ; on utilise les données spécifiques de l'énergie de compactage moyenne :

$$\frac{Q}{L} = 1000 \cdot \left(\frac{Q}{S}\right) \cdot V$$

Q/L : le débit théorique (m³/h.m);

L: la largeur unitaire (m);

V : la vitesse du compacteur (Km/h);

Q/S : le rapport entre le volume du matériau compacté pendant un temps donné (Q), et la surface balayée par le compacteur sur ce volume pendant le même temps (S). (L'épaisseur théorique compactée en une application de la charge du compacteur) (m).

➤ **Application**

On a : V = 2 Km/h ; Q/S = 0,035

Q/L = 1000 × 0,035 × 2 = **70 m²/h**.

• **Calcul du débit pratique par méthode (GTR)**

IL prend en considération le rendement de l'appareil, et correspond aux manœuvres, arrêts...etc.

$$Q_{\text{prat}} = K \cdot \left(\frac{Q}{L}\right) \cdot L \cdot \left(\frac{N}{n}\right)$$

Q_{prat} : le débit pratique (m³/h);

K : Coefficient de rendement, compris entre (0,5 – 0,75);

L : la largeur du compacteur utilisé sur chantier (m);

N : le nombre d'application de charge;

n : nombre de passe (une passe : un aller et retour).

➤ **Application**

On a: **K** = 0,7; **L** = 2 m; **N/n** = 1; **Q/L** = 70 m³/ (h.m); **N** = 6.

Q_{prat} = 0,7 × 70 × 2 × 1 = **98 m³/h**

5. La stabilité des pentes

4.1. Causes de rupture des pentes

Les causes de rupture des pentes sont [33]:

- Pente plus abrupte;
- Augmentation de la hauteur d'une pente;
- Enlèvement du sol aux pieds de la pente;
- Ajout d'une charge au sommet;
- Abaissement du niveau d'eau à l'extérieur de la pente;
- Augmentation de la pression d'eau dans les fissures de traction;
- Augmentation de γ par saturation;
- Séisme ou charge dynamique. [33]

4.2. Propriétés nécessaires à l'analyse

- Géométrie et stratigraphie (évaluation possible);
- Poids volumique;
- Charges externes;
- Pression interstitielle [33].

Le mode de glissement le plus fréquent pour les remblais en matériaux considérés homogènes, est **le glissement circulaire**.

6. Types de rupture (Nature de glissement)

On peut distinguer deux cas parmi ces cercles, suivant que le point le plus bas est situé au-dessus ou au-dessous du niveau du pied [34].

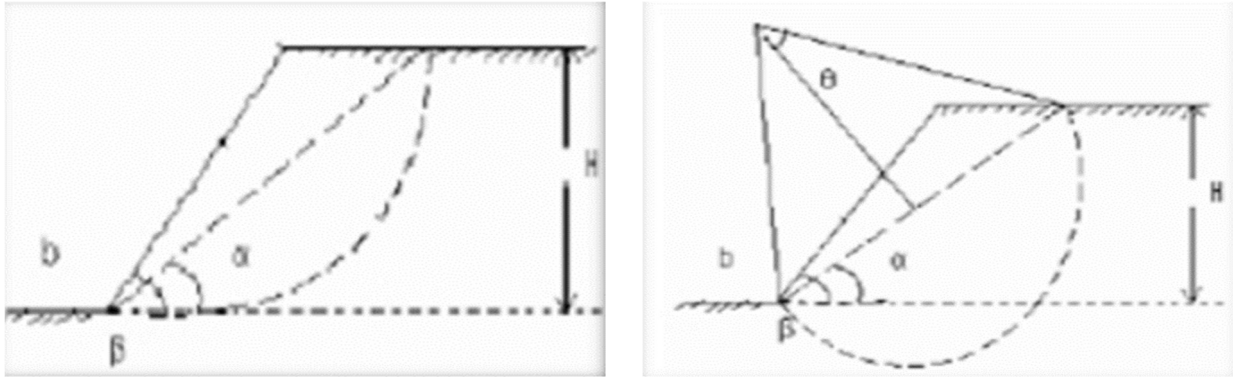


Figure 22. Cercle du pied [34].

5.1. Détermination du type de glissement et le cercle critique (pour C et φ)

Il s'agit d'essayer plusieurs cercles pour être certain qu'à un moment donné on a trouvé le cercle de rupture critique. Méthode pour s'assurer que nous avons le minimum [34].

Localisation approximative du centre de cercle critique. Une bonne méthode pour s'assurer que nous avons le cercle critique est de tracer des lignes de contour de F_s . Afin de donner des contours, ces cercles doivent avoir quelque chose en commun (une restriction commune) [34]:

- Tous les cercles passent par un même point;
- Tous les cercles tangents à une même élévation;
- Tous les cercles ont le même rayon.

5.2. Guide pour la localisation du cercle critique

- Le cercle de rupture passe souvent par les pieds de la pente [33]:
 - Si la friction est grande par rapport à la cohésion : Cercle élevé (cercle en pieds);
 - Si $\varphi = 0$, mais C_u augmente rapidement avec la profondeur;
 - Si la pente est abrupte: $\beta > 53^\circ$.
- Cercle profond dans d'autre cas [33]:

- S'il y a présence d'une couche molle, cercle au fond de la couche molle;
 - Si $\varphi = 0$ et C_u diminue avec la profondeur, cercle au fond de la couche molle.
- Position du centre du cercle critique [33] :
- $Y = 1 \frac{1}{2} H$ si la cohésion est forte;
 - $Y = 6 H$ si friction forte ;
 - En fait si $C=0$, R tend vers l'infini \rightarrow la surface de rupture devient une droite.

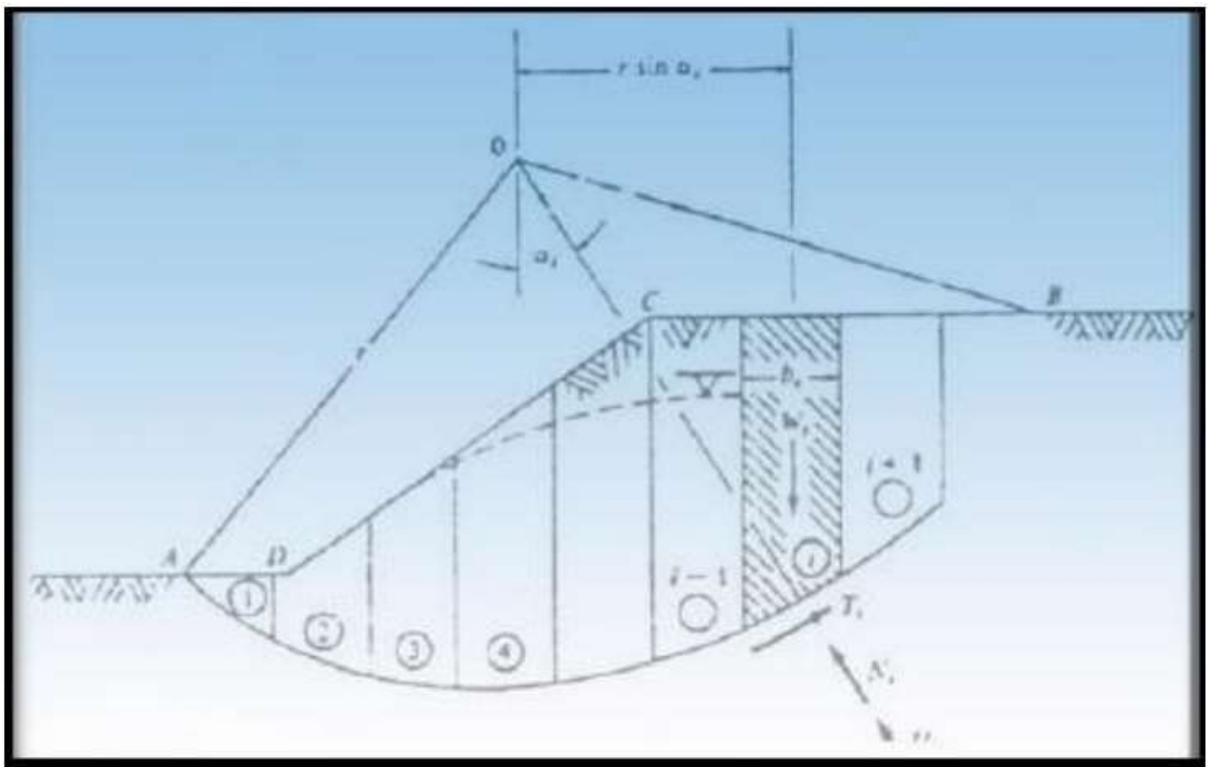


Figure 23. Découpage d'un talus en tranches et les forces agissantes sur une tranche [34].

7. Méthode d'analyse de la stabilité des pentes

• Méthode des tranches

La méthode des tranches consiste à découper le volume du sol étudié en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux, et d'appliquer les différentes forces comme il est montré dans la figure 23 [34].

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on vérifie la sécurité vis-à-vis du risque de glissement.

En l'absence d'eau, une tranche (n) est soumise à [34]:

- Son poids $W_n = \gamma_n \cdot h_n \cdot b_n$
- Les efforts inter-tranchent décomposés en effort horizontaux H_n et H_{n+1} et en effort verticaux V_n et V_{n+1} .
- La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB (résistance de cisaillement). Elle se décompose en une composante normale et tangentielle.

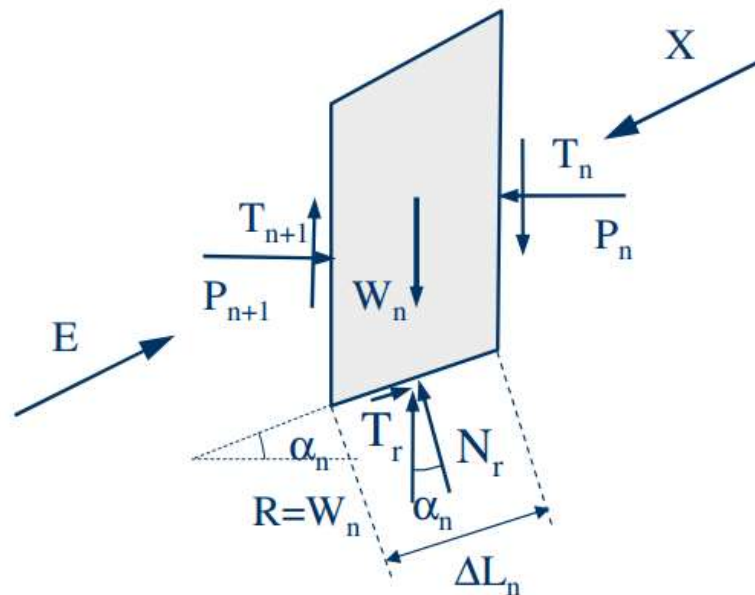


Figure 24. Illustration des forces appliquée dans la méthode des tranches [33].

- **La méthode de Fellenius**

Les forces entre tranches sont négligées, parce qu'elles sont parallèles aux base des tranches. Ce faisant, on ne respecte cependant pas le principe de Newton d'égalité de l'action et de la réaction, et suggère que la résultante des forces qui agissent sur chaque

tranche est nulle dans la direction normale on peut voir dans la figure ci-dessous. Les équations de translations donnent respectivement [34]:

- Verticalement : $W - N \cos \alpha - S m \sin \alpha = 0$
- Horizontalement : $S m \cos \alpha - N \sin \alpha + K w = 0$

Où les termes: $(S m \sin \alpha, S m \cos \alpha)$ présentent l'effet de l'eau à l'amont et à l'aval $K w$ l'effet des séismes. Ces termes seront négligés par la suite pour des raisons de simplifications des calculs, ce qui donne l'expression de La méthode de Fellenius simplifiée [34].

Long de la ligne de glissement, sont devenues possibles et on a [34]:

$$N_i = W_i \cos U_i L_i$$

La connaissance de la valeur de N_i et les paramètres C, ϕ du sol nous permet d'évaluer la force en chaque point d'élément du massif [34].

Si :

$$N_i \operatorname{tg} \phi + C \Delta L_i = (W_i \cos \delta_i - U_i L_i) + \frac{C b}{\cos \delta_i}$$

Par conséquent le moment autour du centre de cercle des forces résistantes à:

$$\sum_{i=0}^n S_i R = R \sum_{i=0}^n (W_i \cos \delta_i - U_i L_i) + \frac{C b}{\cos \delta_i}$$

Et le moment autour du centre de cercle des forces motrices à:

$$\sum_{n=0}^n W_i x_i = \sum W_i \sin \delta_i R = R \sum_{i=1}^n W_i \sin \delta_i$$

Le coefficient de sécurité relatif au cercle de rupture choisit est défini comme le rapport entre les moments résistants et les moments moteurs par rapport à " O ", il vaut donc [34]:

$$F_s = \frac{\sum_{i=0}^n c l_i + (W_i \cos \delta_i - U_i L_i) \operatorname{tg} \phi}{\sum_{i=0}^n W_i \sin \delta_i}$$

$W_i = A_i$; A_i est la superficie de chaque tranche tel que ;

$A_i = h_i b_i$; h_i hauteur de la tranche.

γ : Densité Par contre à la méthode de Fellenius, Bishop prend en considération les forces entre tranches

Dans cette méthode l'expression de coefficient de sécurité est obtenue en écrivant les deux équations d'équilibre statique [34]:

- L'équilibre des forces verticales qui sont appliquées à chaque tranche.
- L'équilibre global des moments.

U_i : Pression interstitielle pour chaque tranche égale:

$U_i = \gamma_w \cdot h_i$; γ_w : Densité de l'eau.

h_i : La hauteur de la lame d'eau dans chaque tranche.

i : Angle formé par la tangente à la base de chaque tranche avec l'horizontal [34].

- **Méthode de Fellenius à court terme ($\phi_u = 0$ et $c_u \neq 0$)**

Dans ce cas la répartition des pressions interstitielles le long de la surface de glissement n'est pas connue au moment de la rupture du sol. Le calcul est effectué en contraintes (ou forces) totales et en prenant en compte les caractéristiques mécaniques du sol mesurées avec des conditions d'essai non consolidé, non drainé (essai triaxial UU) : c_u et ϕ_u (ϕ_u étant généralement nul dans ces conditions). Le coefficient de sécurité devient alors [35]:

$$F_s = \frac{\sum_{i=0}^n (C_{ui} \frac{b_i}{\cos \delta_i})}{\sum_{i=0}^n W_i \sin \delta_i}$$

8. Etude de stabilité des rives et de digue de l'oued

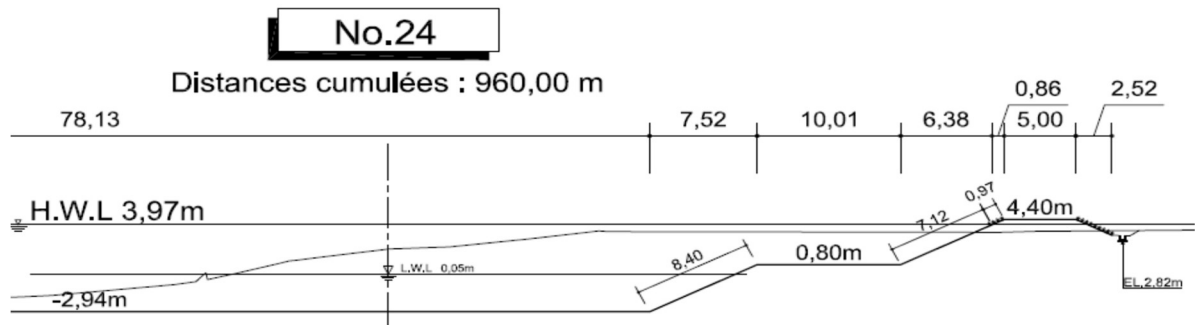


Figure 25. Profile en travers.

8.1. Détermination du cercle critique

➤ Rive

- D'abord, on détermine la hauteur et l'angle de talus:

$$H = \sqrt{8,40^2 - 7,52^2} = 3,74 \text{ m}$$

$$\cos \beta = 7,52/8,40 = 0,90$$

$$\Rightarrow \beta = 25,84^\circ$$

- On trace la forme géométrique du talus;
- D'après les résultats de laboratoire ; on a obtenu (valeur de C et ϕ):
 $C = 32 \text{ Kpa}$; $\phi = 11,29^\circ$
- On utilise l'abaque de la figure 26, qui représente pour déterminer β_0 et α_0 en fonction de l'angle de talus β et l'angle de frottement interne ϕ , on obtient les valeurs des deux angles β_0 et α_0 :

$$\Rightarrow \beta_0 = 22,22^\circ$$

$$\Rightarrow \alpha_0 = 42,22^\circ$$

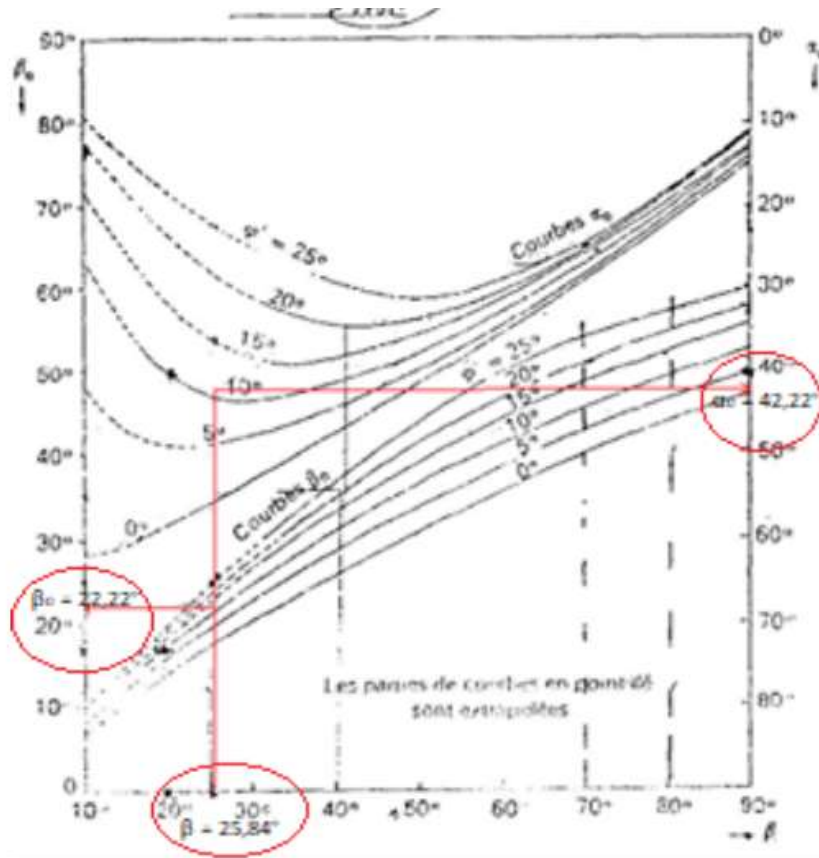


Figure 26. Abaque de détermination du cercle critique.

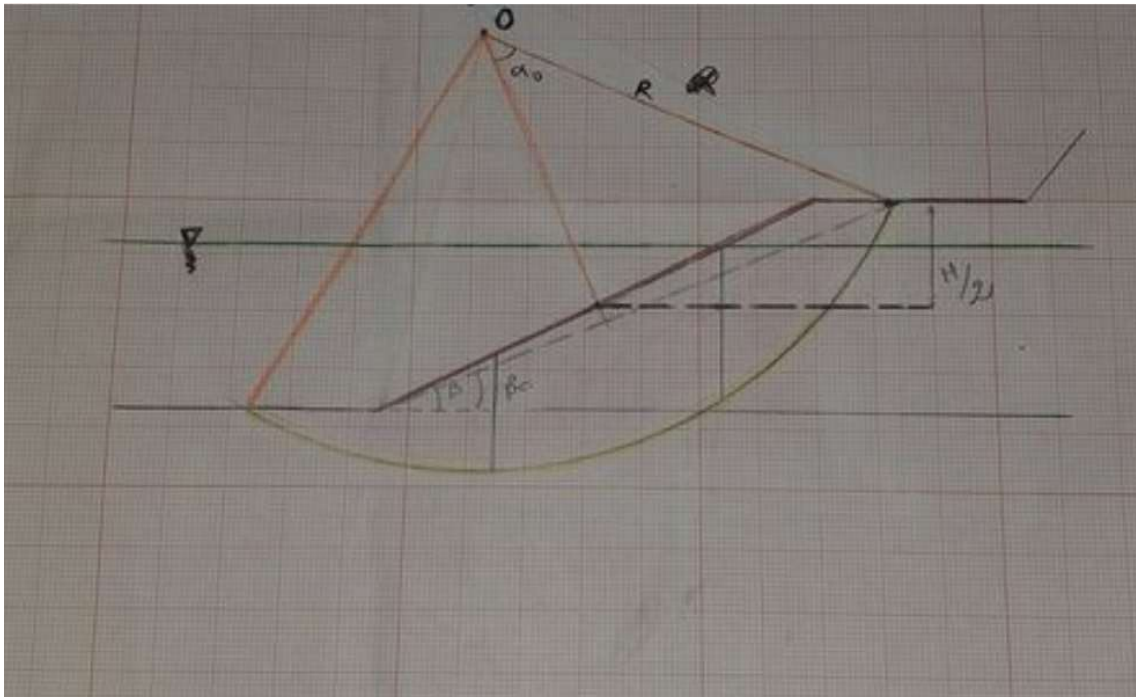


Figure 27. Détermination du cercle critique de la rive.

- On définit la forme géométrique de la zone susceptible à glisser avec le couple (β_0 et α_0) et on trace le cercle de glissement de rayon R à partir du centre O .
- On découpe la zone susceptible à glisser en trois tranches de largeurs presque égales b_i .
- Le cercle de glissement est avec un rayon $R = 7,80$ m et $\beta = 25,84^\circ$.

➤ Digue

- Les mêmes étapes que la rive:

$$H = \sqrt{8,09^2 - 7,24^2} = 3,61 \text{ m}$$

$$\cos \beta = 7,24/8,09 = 0,89$$

$$\Rightarrow \beta = 26,50^\circ$$

- D'après les résultats de laboratoire ; on a obtenu (valeur de C et φ)
 $C = 32 \text{ Kpa}$; $\varphi = 11,29^\circ$

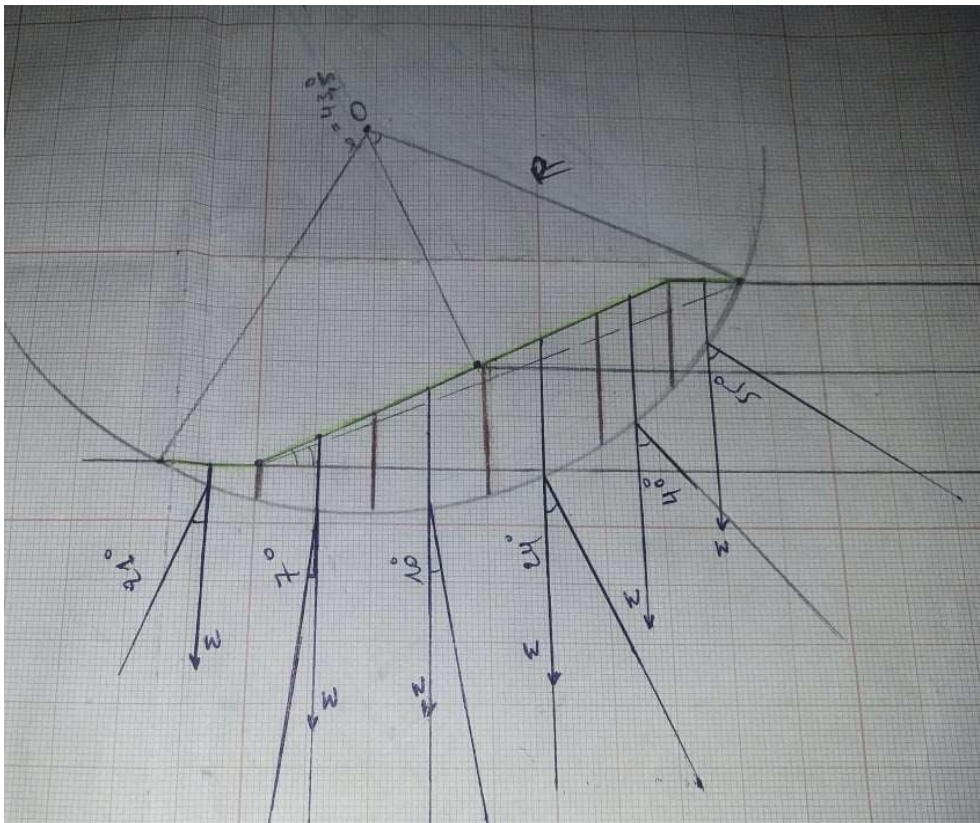


Figure 28. Détermination du cercle critique de la digue.

- D'après l'abaque de détermination du cercle critique on définit:

$$\Rightarrow \beta_0 = 23^\circ$$

$$\Rightarrow \alpha_0 = 43,50^\circ$$

8.2. Calcul par la méthode de Fellenius

➤ Calcul à court terme de la rive

Pour calculer le facteur de sécurité on divise le talus en quatre tranches de largeurs ($b_1=3\text{m}$; $b_2=4\text{m}$; $b_3=2,1\text{m}$; $b_4=2,1\text{m}$). Puis on détermine la hauteur h de chaque tranche ($h_1=1,7\text{m}$; $h_2=2,6\text{m}$; $h_3=1,5\text{m}$; $h_4=0,6\text{m}$) (ses deux paramètres nous permettent de calculer le poids de chaque tranche).

Le Facteur de sécurité F_s est calculé pour chaque tranche d'où les résultats sont représentés dans le tableau suivant:

Avec :

- Les largeurs des tranches ($b_1=3\text{m}$; $b_2=4\text{m}$; $b_3=2,1\text{m}$; $b_4=2,1\text{m}$);
- Le Poids volumique humide du sol : 20 kN/m^3 ;
- Le degré de saturation : $S_r = 93,02\%$;
- Le poids volumique saturé $\gamma_{\text{sat}} = 21,50\text{ kN/m}^3$;
- La cohésion $C_u = 32\text{ kN/m}^2$;
- $W_i = \gamma_{\text{sat}} \cdot h_i \cdot b_i$;
- $U_i = \gamma_w \cdot z$; avec $\gamma_w = 10\text{ kN/m}^3$
- $R = 7,80\text{ m}$;
- $\Phi_u = 0^\circ$.

L'eau à l'extérieur de la pente vient ajouter une pression qu'on peut tenir compte: en incluant ces forces dans nos équations d'équilibre [33].

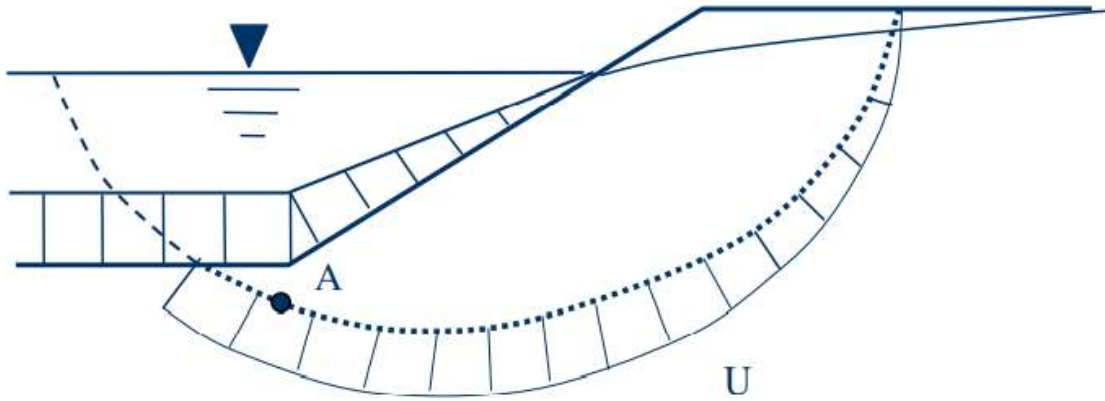


Figure 29. Pression de l'eau reliée à la stabilité des pentes [33].

- F_s obtenu dans le cas saturé, est calculé par cette formule:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[C_{ui} \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + U' i R' i \sin \alpha' i \right]}{\sum_{i=1}^n [W_i \sin \alpha_i]}$$

$$F_s = (424,27 + 97,54) / 191,49 = 2,72 \text{ (vérifiée)}$$

Tableau 9. Détail des calculs par méthode de Fellenius pour la rive.

| N° tranche | h_i (m) | b_i (m) | C_{ui} (kN/m ²) | α_i (°) | W_i (kN) | U'_i (kN/m ²) | $C_{ui}b_i/\cos$ α_i | $W_i*\sin\alpha_i$ | R'_i (m) | α'_i (°) | $U'_i.R'_i.$ $\sin\alpha'_i$ | Fs |
|---------------|--------------|--------------|----------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------------------------|------|
| 01 | 2 | 3 | 32 | 50 | 129 | 0 | 149,35 | 98,82 | 5,90 | 0 | 0 | 2,72 |
| 02 | 2,6 | 4 | 32 | 19 | 223,6 | 12 | 135,37 | 72,80 | 5,50 | 17 | 19,30 | |
| 03 | 1,5 | 2,1 | 32 | 9 | 67,73 | 23 | 68,04 | 10,60 | 6,40 | 5 | 12,82 | |
| 04 | 0,6 | 2,1 | 32 | 20 | 27,09 | 29 | 71,51 | 9,27 | 7,30 | 18 | 65,42 | |
| Σ | | | | | | | 424,27 | 191,49 | | | 97,54 | |

Le calcul à court terme d'un sol saturé des rives de l'oued par la méthode ordinaire résulte un coefficient de sécurité $Fs=2,72$; on remarque qu'il est supérieur à 1,50. Donc, la pente est stable.

➤ **Calcul à court terme de la digue**

- Le Poids volumique humide du sol : 20 kN/m³;
- Le degré de saturation : $S_r = 93,02\%$;
- Le poids volumique saturé: 21,50 kN/m³;
- La cohésion $C_u = 32$ kN/m²;
- $W_i = \gamma_{sat}.h_i.b_i$;
- $R = 7,50$ m;
- $\Phi_u=0^\circ$.

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{ui} \frac{b_i}{\cos \alpha_i})}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \alpha_i)}$$

$$= 381,20 / 145,28 = 2,62 \text{ (v\u00e9rifi\u00e9e)}$$

Tableau 10. D\u00e9tail des calculs \u00e0 court terme par m\u00e9thode de Fellenius pour la digue.

| N\u00b0 tranche | C _{ui} (kn/m ²) | h _i (m) | b _i (m) | W _i (kn) | \u03b1 _i (\u00b0) | C _{ui} b _i /cos\u03b1 _i | W _i *sin\u03b1 _i | Fs |
|--------------------|---|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|--|--|------|
| 01 | 32 | 0,35 | 1,60 | 12,04 | 21 | 54,84 | 4,31 | 2,62 |
| 02 | 32 | 1,40 | 2,00 | 60,20 | 07 | 64,48 | 7,34 | |
| 03 | 32 | 2,20 | 2,00 | 94,60 | 10 | 64,99 | 16,42 | |
| 04 | 32 | 2,60 | 2,00 | 111,80 | 24 | 70,06 | 45,47 | |
| 05 | 32 | 2,40 | 1,30 | 67,08 | 40 | 54,30 | 43,12 | |
| 06 | 32 | 1,25 | 1,30 | 34,94 | 55 | 72,53 | 28,62 | |
| \u03a3 | | | | | | 381,20 | 145,28 | |

➤ **Calcul \u00e0 long terme de la digue**

- Le Poids volumique humide du sol : 20 kN/m³;
- Le degr\u00e9 de saturation : Sr = 93,02 % ;
- Le poids volumique satur\u00e9 : 21,50 kN/m³;
- Le poids volumique d\u00e9jaug\u00e9 : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 20 - 10 = 10 \text{ kN/m}^3$;
- La coh\u00e9sion C' = 32 kN/m² ;
- $W_i = \gamma' \cdot h_i \cdot b_i$;

- $U_i = \gamma_w \cdot z$; avec : $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$;
- $R = 7,50 \text{ m}$;
- $\Phi' = 11,29$.

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(W_i \cos \alpha_i - U_i) \tan \Phi' + \frac{C_i b_i}{\cos \alpha_i} \right]}{\sum_{i=1}^n [W_i \sin \alpha_i]}$$

$$U_i = 0 \text{ Kn/m}^2$$

$$F_s = (31,80 + 261,27) / 67,57 = 4,33 \text{ (v\u00e9rifi\u00e9e)}$$

Tableau 11. D\u00e9tail des calculs \u00e0 long terme par m\u00e9thode de Fellenius pour la digue.

| N\u00b0 tranche | C'_i (kN/m\u00b2) | h_i (m) | b_i (m) | W_i (kn) | α_i (\u00b0) | $\tan \varphi'$ | $C_i b_i / \cos \alpha_i$ | $W_i \cdot \sin \alpha_i$ | $(W_i \cdot \cos \alpha_i - U_i) \cdot \tan \varphi'$ | Fs |
|--------------------|------------------------|--------------|--------------|---------------|------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|---|------|
| 01 | 32 | 0,35 | 1,60 | 5,60 | 21 | 0,2 | 54,84 | 2,01 | 1,46 | 4,33 |
| 02 | 32 | 1,40 | 2,00 | 28,00 | 07 | 0,2 | 64,48 | 3,41 | 5,56 | |
| 03 | 32 | 2,20 | 2,00 | 44,00 | 10 | 0,2 | 64,99 | 7,64 | 8,67 | |
| 04 | 32 | 2,60 | 2,00 | 52,00 | 24 | 0,2 | 70,06 | 21,15 | 9,50 | |
| 05 | 32 | 2,40 | 1,30 | 31,20 | 40 | 0,2 | 4,07 | 20,05 | 4,75 | |
| 06 | 32 | 1,25 | 1,30 | 16,25 | 55 | 0,2 | 2,83 | 13,31 | 1,86 | |
| Σ | | | | | | | 261,27 | 67,57 | 31,80 | |

9. Conclusion

La campagne de reconnaissance géotechnique permet de récolter les données nécessaires pour l'étude géotechnique. Ces données ont été exploitées pour la classification du sol, le calcul du compactage, et la vérification de la stabilité des pentes par la méthode de Fellenius.

Les résultats de calcul montrent que les pentes du cours d'eau aménagé sont stables à court et à long terme.



Chapitre IV
Modélisation
numérique



1. Introduction

Le calcul analytique a montré la stabilité des rives et des digues de protections, à court et à long terme. La modélisation par outil informatique est un autre moyen pour étudier les phénomènes géotechniques.

Dans ce qui suit, on va refaire le calcul à l'aide du logiciel Géoslope, et comparer les résultats avec ceux du calcul analytique, pour valider le travail fait.

2. Présentation du logiciel Géoslope de Géostudio

Géostudio est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale du logiciel: **SEEP/W** ; **SIGMA/W** ; **SLOPE/W** [36].

Le programme de calcul **SLOPE** est un programme d'analyse de la stabilité des pentes, basée sur la théorie d'équilibre limite qui consiste à respecter les deux règles de la stabilité statique, c'est-à-dire il faut satisfaire les conditions d'équilibres des moments et d'équilibre des forces [36].

Cette analyse consiste à calculer un facteur de sécurité en visualisant les résultats graphiques du volume instable correspondant [36].

Les méthodes de calcul du facteur de sécurité intégrées dans **SLOPE** sont la méthode de Fellinius, de Morgenstern-price, de Jumbo et celle de Bishop simplifiée, et enfin 'la méthode des éléments finis' qu'on peut le trouver dans la partie logique "SIGMA/W" [36].

Elles permettent de calculer un coefficient de sécurité vis-à-vis d'un type de rupture bien défini. Le modèle géométrique est subdivisé en tranches verticales en 2D. Il exécute plusieurs méthodes de recherches automatiques du centre de rotation de la surface de glissement potentiel jusqu'à atteindre le plus faible coefficient de sécurité [36].

3. Le fonctionnement du logiciel

Le présent logiciel comme tous les autres programmes de calcul servent à fournir des résultats issus d'un nombre défini des paramètres, donc il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour l'achèvement de l'opération de calcul [36]:

- **Define:** Cette étape est très importante car on va définir le problème et introduire les différentes données spécifiques au problème en vigueur;
- **Solve:** C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et à partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité F_s ;
- **Contour:** C'est l'étape chargée de traduire les différents résultats sous une forme graphique; et afficher ces résultats.

4. Cas d'étude

4.1. Spécification de problème

On est choisi 3 modèles, dont :

- Le premier est une rive composée de deux couches de sol et de l'eau de l'oued située à un niveau (2,94 m) ;
- Le deuxième est une digue de protection se met sur la rive précédente avec le même niveau d'eau (2,94 m) ;
- Le troisième est le même modèle (digue+ rive) avec un niveau d'eau supérieur (cas de crue) ; avec : 3,97m.

On va étudier la stabilité des trois modèles avec la méthode de Morgenstern-Price.

4.2. Cas de la rive (Calcul à court terme)

Etape 01: Define

- **Keyin analyses**

Après l'ouverture de logiciel, on clique sur **New** → **Slope/W** pour créer un nouveau model, une boite de dialogue s'ouvre, on va choisir les paramètres correspondants au problème posé :

Dans **settings**, on choisit :

- Le type d'analyse : Morgenstern Price ;
- Les conditions hydrauliques : ligne piézométrique ;

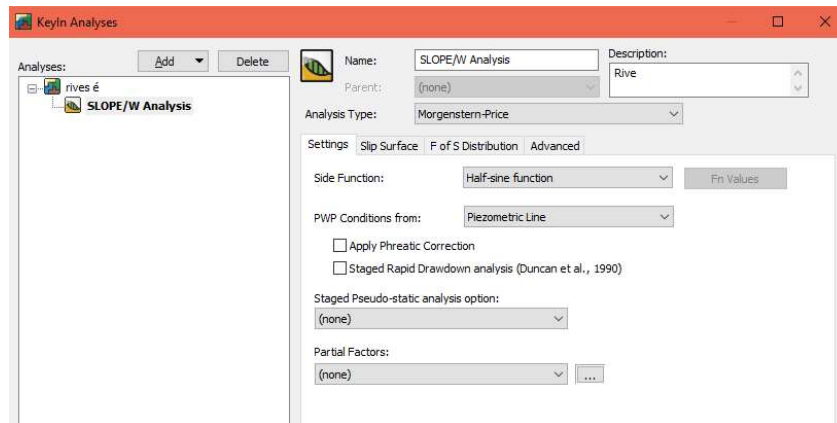


Figure 30. Settings.

Dans l'onglet **slip surface**, on choisit:

- La direction de mouvement : left to right;
- L'option de surface de glissement : Entry and exit;

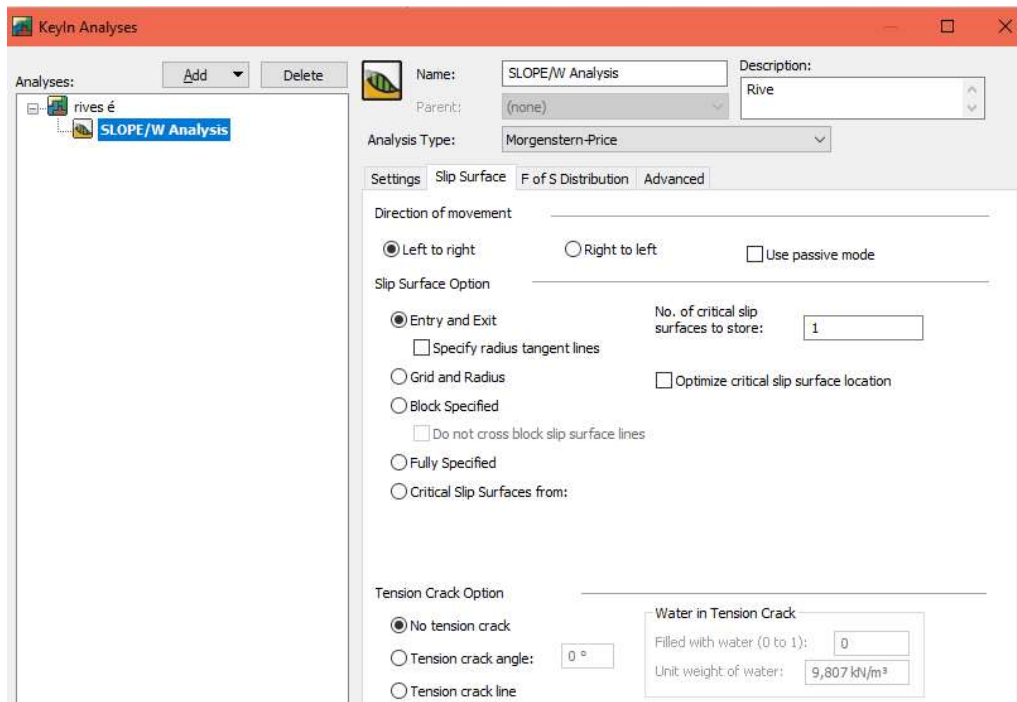


Figure 31. Slip surface.

Dans **FOS Distribution** on choisit:

- Calcul constant de **FS**

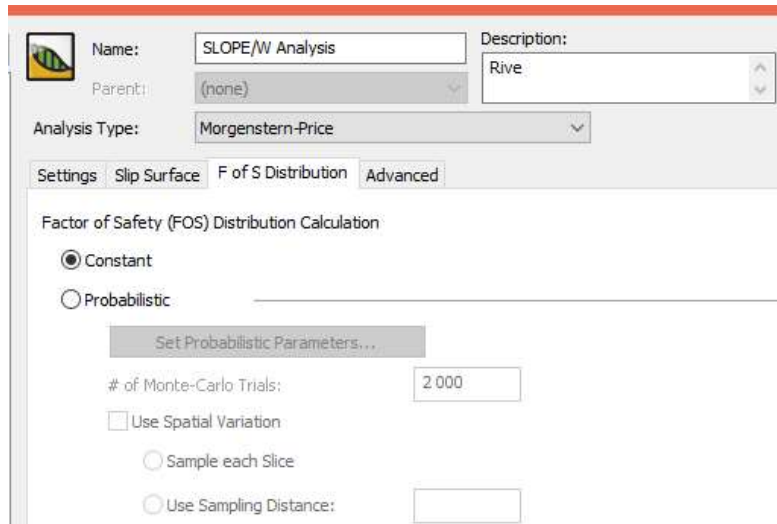


Figure 32. FOS Distribution.

- **Set**

Cette étape est la définition d'une situation ou le problème débutera par **la délimitation de l'espace de travail** en précisant **les dimensions de la page de dessin**, l'échelle et origine du **système de coordonnées** :

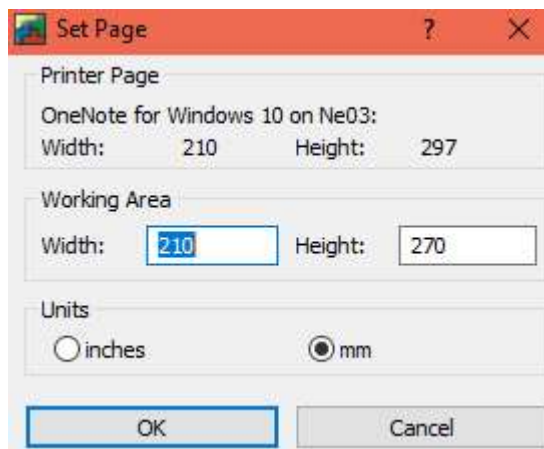


Figure 33. Set page.

Puis, on passe à la définition de l'échelle (**500*200**) et les unités géométriques (**Métrique**) :

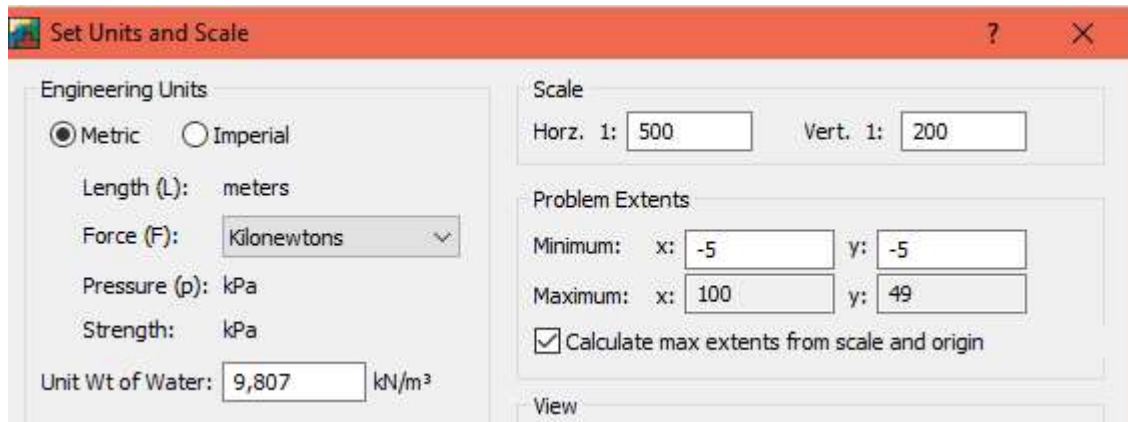


Figure 34. Set units and scale.

Dans l'onglet **Grid**, on sélectionne :

- L'affichage de la grille ;
- Le Snap de la grille.

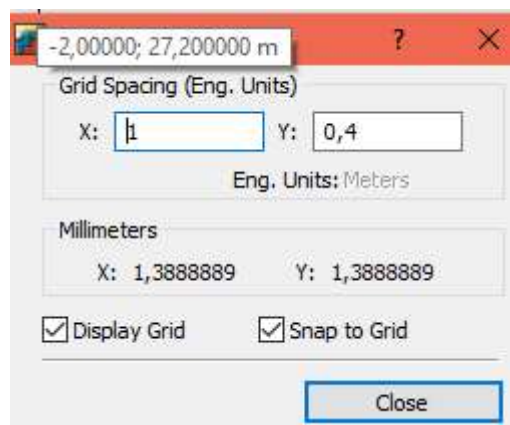


Figure 35. Grid.

Le pourcentage de Zoome : 100%

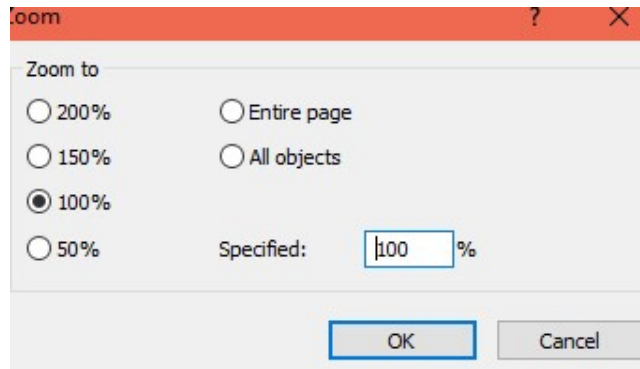


Figure 36. Zoom.

- **Sketch**

On définit les axes **x, y**:

- **Increment size: 10**

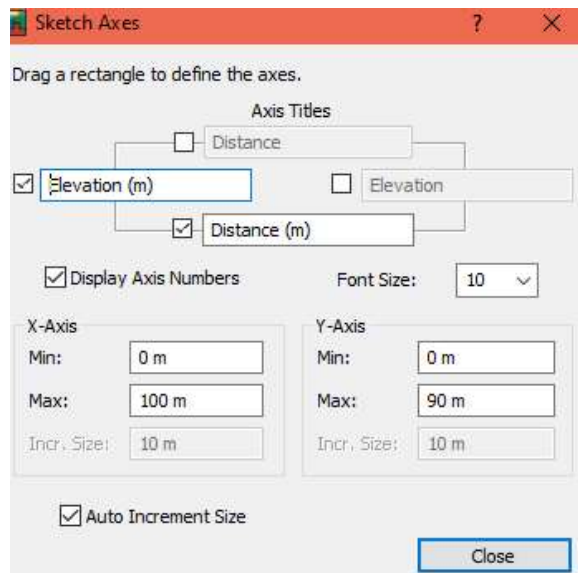


Figure 37. Sketch Axes.

Après la spécification de l'espace de dessin, on peut **dessiner le modèle** maintenant utilisant l'icône **Polylignes**:

- **Depth of Top soil : 3,98 m;**
- **Depth of Bottom soil: 3, 50 m.**

NB : Après le traçage des lignes de model, il faut passer à l'option **Régions** dans l'onglet **Draw** pour définir l'espace de chaque couche.

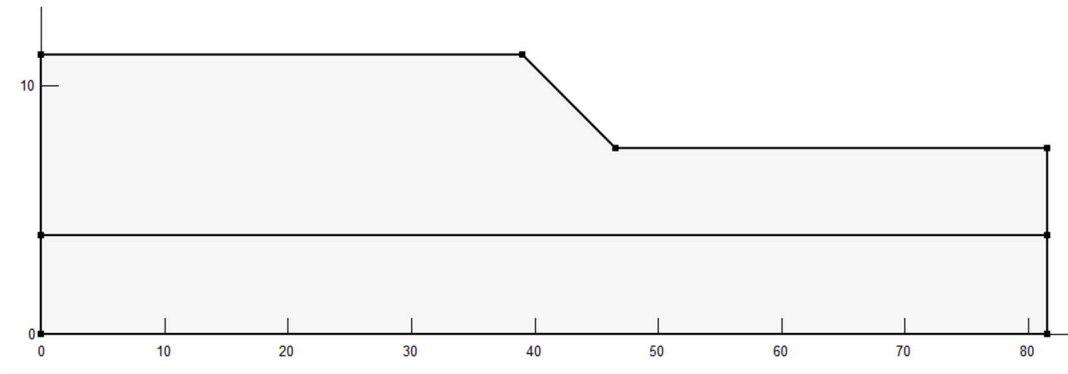


Figure 38. Le Model géométrique.

- **Draw**

On définit maintenant, **les propriétés du sol** de chaque couche, **le réseau** de la surface de rupture, les conditions **de pression interstitielle** (niveau piézométrique), ainsi que la spécification de **la méthode d'analyse**.

- **Les propriétés des couches :** le model est constitué de **2 couches** de sol, on entre les données dans l'onglet '**Materials**' et on n sélectionne les propriétés pour les mettre dans le modèle. Le comportement mécanique des matériaux suit undrained.

Figure 39. Les propriétés de la première couche.

Name: Argile

Color: Set...

Material Model: Undrained (Phi=0)

Basic | Advanced

Unit Weight: 18 kN/m³ Cohesion: 21 kPa

Figure 40. Les propriétés de la deuxième couche.

Slip surface : on sélectionne les deux parties supérieures et inférieures de la surface de glissement.

KeyIn Slip Surface Entry and Exit Range

Entry Range (Left Side) Exit Range (Right Side)

| Type: | Left Point: | Right Point: | Type: | Left Point: | Right Point: |
|-------|------------------------------------|--------------|-------|------------------------------------|--------------|
| Range | X: 0,0112 | X: 38,6608 | Range | X: 46,63333 | X: 81,43333 |
| | Y: 11,22 | Y: 11,22 | | Y: 7,48 | Y: 7,48 |
| | Number of increments over range: 4 | | | Number of increments over range: 4 | |

Number of radius increments: 4

Slip Surface Projection Angle

Use Left (Active) Projection Angle: 135

Use Right (Passive) Projection Angle: 45

Clear OK Cancel Apply

Figure 41. Slip surface Entry and Exit Range.

Pore water pressure : on trace le niveau piézométrique

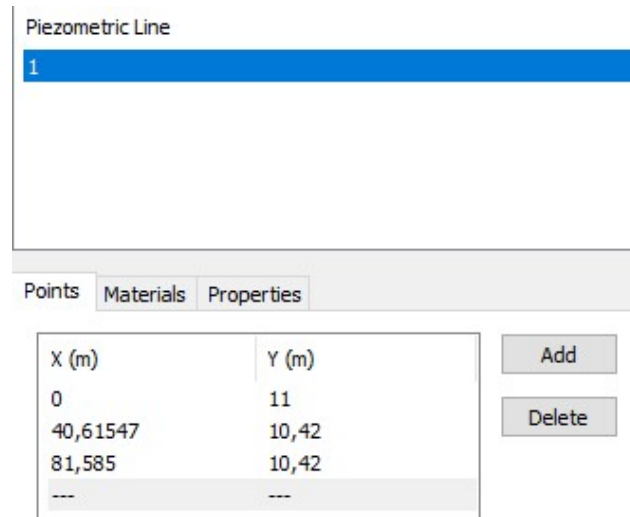


Figure 42. Piezometric lines.

A la fin, on obtient le model suivant:

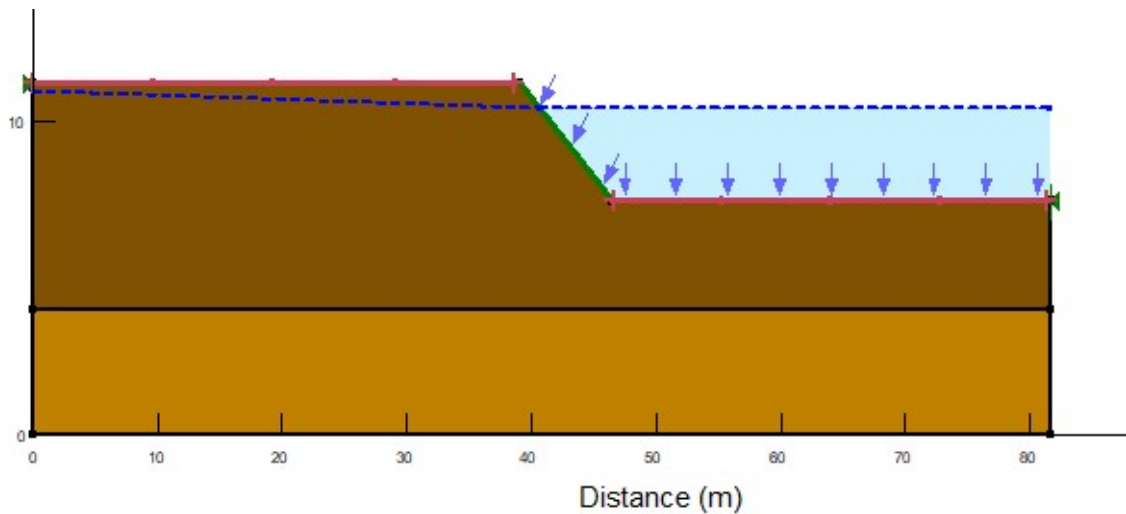


Figure 43. Le model final.

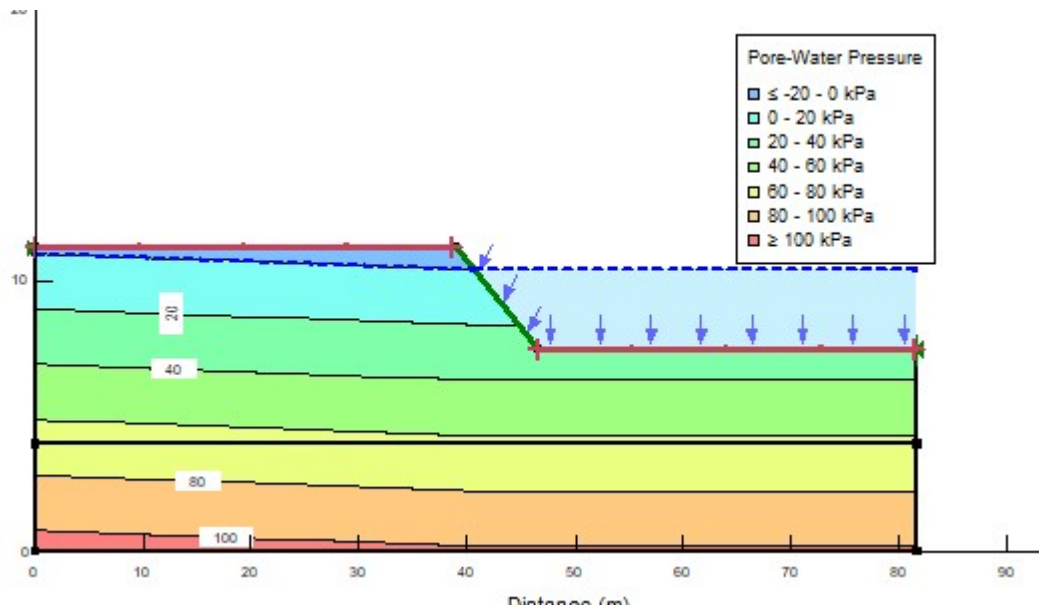


Figure 44. Draw contours.

Etape 02 : Solve

C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et à partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité F_s .

Etape 03 : Contour

C'est l'étape chargée de traduire les différents résultats sous une forme graphique, et afficher ces résultats.

- $F_s (\text{min}) = 2,804$

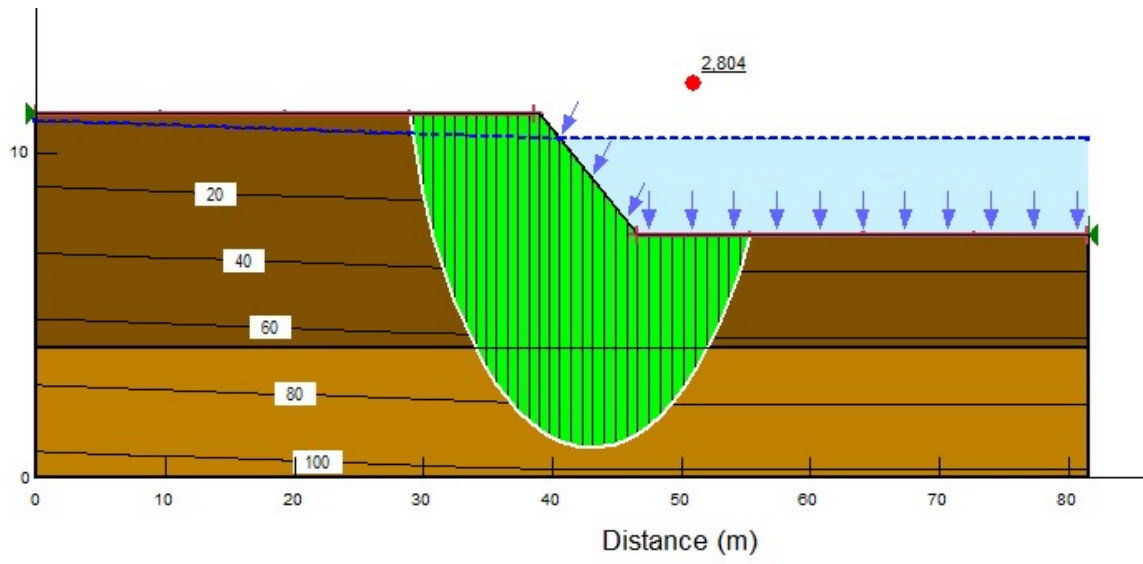


Figure 45. Affichage des résultats.

4.3.Cas de la digue (Calcul à court terme)

Les mêmes étapes que le premier modèle, avec l'ajout d'une digue de protection sur la rive.

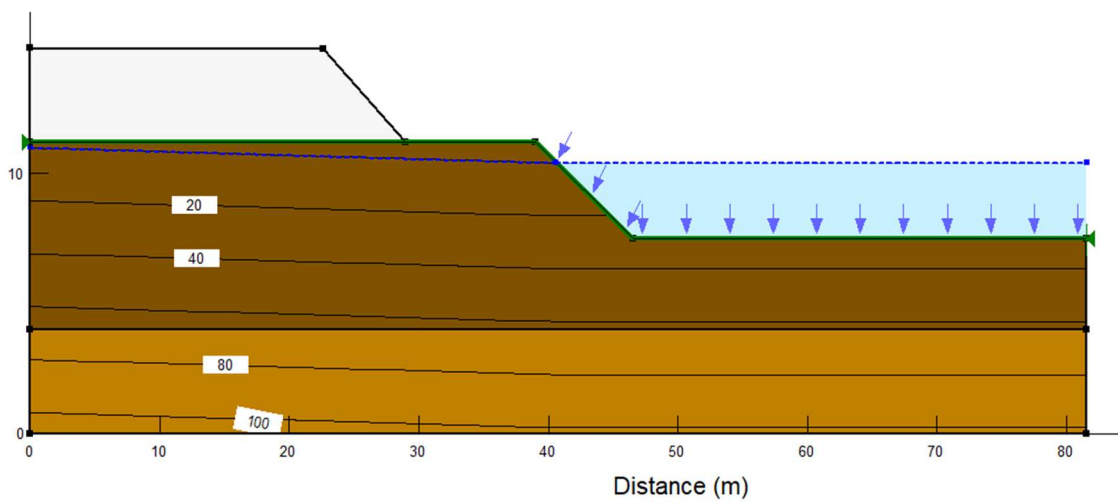


Figure 46. Draw Digue.

Name: Color:

Material Model:

Basic

Unit Weight: Cohesion:

Figure 47. Les propriétés de la digue.

On obtient le model suivant:

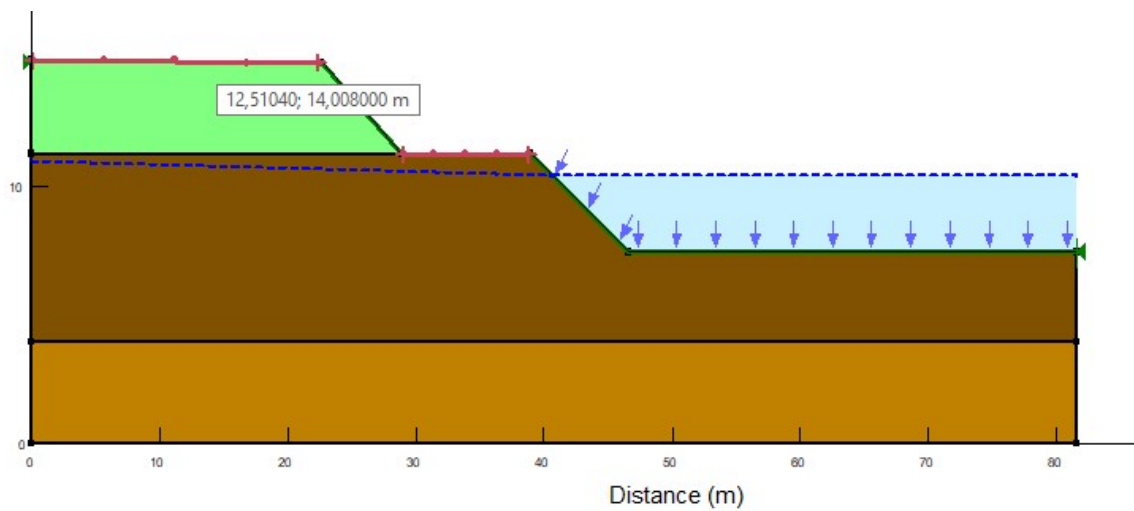


Figure 48. Le model final.

On passe donc à l'étape de **Solve**, et enfin à l'étape de **Contour**:

- **Fs (min) = 2,067**

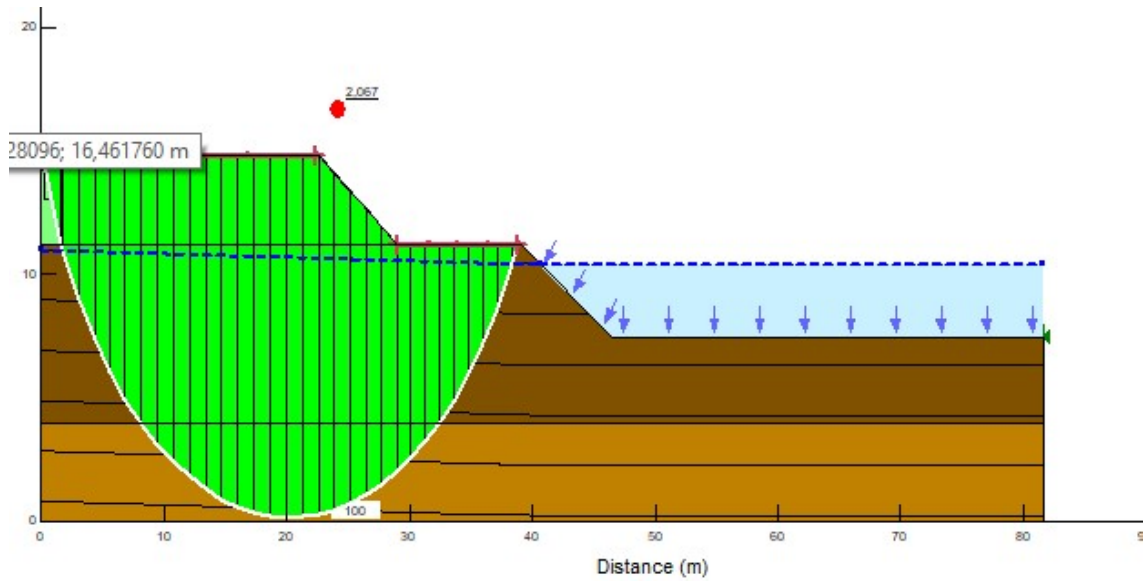


Figure 49. Affichage des résultats à court terme.

4.4.Cas de la digue (Calcul à long terme)

Le même principe que le modèle précédent, sauf un petit changement de propriétés de la digue:

Figure 50 shows the material properties configuration for the dam. The name is 'Digue'. The material model is 'Mohr-Coulomb'. The basic properties are: Unit Weight: 11,5 kN/m³, Cohesion: 32 kPa, and Phi: 11,29°. There are also tabs for 'Suction', 'R Envelope', 'Liquefaction', and 'Advanced'. A 'Color' field is set to green with a 'Set...' button.

Figure 50. Les propriétés de la digue.

Résultats de calcul à long terme:

- $F_s (\text{min}) = 3,64$

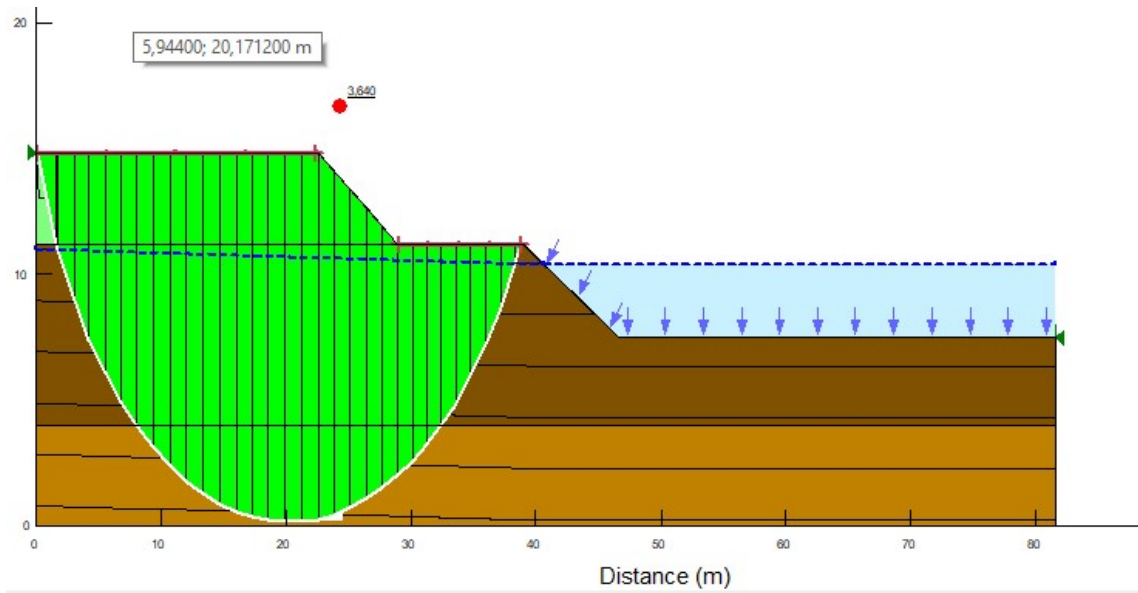


Figure 51. Affichage des résultats à long terme.

4.5. Cas de crue

Dans ce cas le niveau d'eau devient très élevé jusqu'au débordement de la rive:

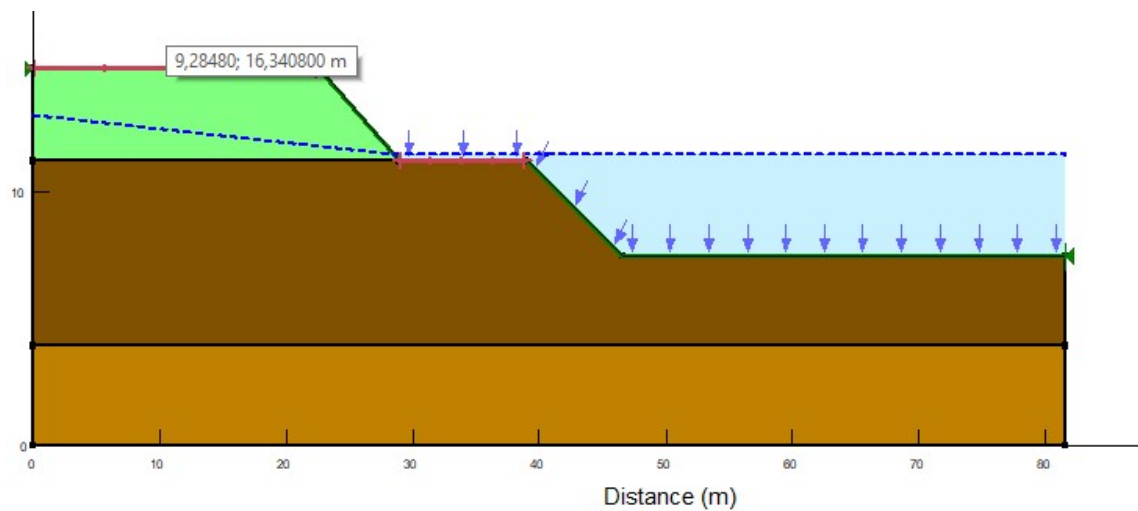


Figure 52. Le modèle final après l'élévation de niveau d'eau.

Le résultat:

- $F_s (\min) = 2,106$

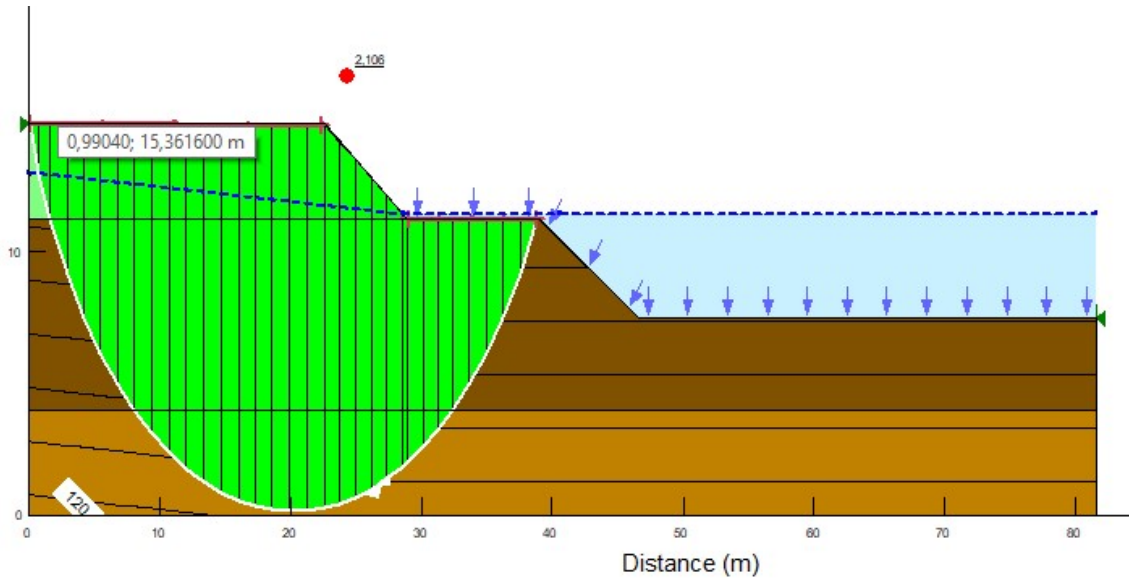


Figure 53. Affichage des résultats en cas de crue.

5. Comparaison des résultats

Le tableau 12, montre que les valeurs du F_s sont proches, et que les pentes du Oued sont stables.

Tableau 12. Tableau comparatif entre les valeurs de F_s obtenues.

| F_s | Rive | Digue à court terme | Digue à long terme | Digue en cas de crues |
|--------------|------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| Calcul | 2,72 | 2,99 | 4,33 | - |
| Modélisation | 2,80 | 2,07 | 3,64 | 2,11 |

6. Conclusion

La modélisation par Geostudio a montré que les pentes sont stables dans les différentes conditions y compris le cas des crues.

Les résultats de la modélisation sont comparables à ceux des calculs et on peut compter sur eux pour juger la stabilité.

A thick, dark blue vertical bar runs down the left side of the page. A horizontal blue arrow points from the bar towards the right, positioned above the text.

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandation

Dans ce modeste travail, on a fait une étude géotechnique du projet d'aménagement de l'Oued El Harrach. On donc met le point sur le rôle de la géotechnique dans ce type de projets.

Les conditions hydrologiques et climatiques (précipitations) de la région du projet étudié, nécessite l'élargissement du lit d'oued par reprofilage, ainsi que par la construction de digues de protection contre les inondations.

L'utilisation de la classification GTR permet de connaître les conditions de l'emploi des matériaux pour la construction des remblais, le choix du matériel à utiliser et le calcul du débit pratique (nécessaire pour la gestion et la détermination des délais des travaux).

Le calcul manuel de la stabilité des pentes est très utile, mais il reste lent et approximative. D'où l'outil informatique présente un gain de temps et plus de précision (éviter les erreurs lecteur des mesures).

Les résultats de calcul manuel et par modélisation par logiciel, montrent que la stabilité des pentes de la rive et de la digue est vérifiée à court et à long terme, et avec des valeurs de F_s très proches.

Cependant, il est important de protéger les berges (rives) et les digues contre l'érosion surtout en période des crues, par exemple par des enrochements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L'environnement en Poitou-Charentes : thème, l'eau (élaboré dans une démarche partenariale au sein du réseau partenarial des données sur l'Eau) »- édition : dépôt légal 2015-observatoire régional de l'environnement Poitou-Charentes.
- [2] W. ROUABAH, «Les critères environnementaux des aménagements hydraulique cas d'étude Oued Chebba ville d'Elmhir W.BBA»- mémoire pour l'obtention de diplôme de de master en hydraulique, option: assainissement- Ecole Nationale Supérieure d'hydraulique -ARBAOUI Abdellah-2015.
- [3] La gestion et l'aménagement des cours d'eau - DDTM 59 – SEE – www.nord.gouv.fr.
- [4] Commission Milieux aquatiques groupe de travail "cours d'eau " - Saint-Julien- mardi 16 avril 2013.
- [5] La rivière, site : <https://smavas.fr/comprendre/la-riviere>.
- [6]http://www.outils_cetu.fr/didactu/tunnel/dimensionnement/empiriques/terzaghi/definition/Massive.html.
- [7] www.glossaire.eaufrance.fr > concept > annexe-hydraulique.
- [8] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/marais-et-vasieres/>
- [9] <https://hydrologie.org> > glu > FRDIC > DICESPAC.
- [10] Nappe Alluviale, site : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nappe_alluviale.
- [11] Terrasse alluviale, site : https://fr.wikipedia.org/wiki/Terrasse_alluviale.
- [12] L'entretien et l'aménagement d'un cours d'eau: des droits et des devoirs brochure à destination des collectivités et des propriétaires riverains de cours d'eau- création AGEP Bastia - 04 95 32 35 11.
- [13] Travaux d'aménagement de l'oued el Harrach – Direction des ressources en eau (fiche technique + situation postérieure et antérieure).

[14] Renaturation des cours d'eau, site :

https://www.rurundkall.de/index.php?article_id=159&clang=1 -.

[15] Fiche de recommandations -mesures à prendre pour éviter le départ de matières en suspension (mes) ou polluantes lors des interventions dans le lit mineur d'un cours d'eau.

[16] La Direction des Aménagements Hydrauliques, site :

<https://bartaii.fr.gd/Barrage.htm> -.

[17] dragage analyses des sédiments marins sable-de sédiments extraits de cours d'eau, site : <https://www.flandres-analyses.com/>

[18] Concept de mesure de protection contre les crues – Laboratoire de constructions hydraulique (Ecole polytechnique FEDERAL DE LAUSANNE).

[19] <https://www.geosoc.fr/>

[20] Evaluation de la qualité de l'eau du réseau Hydrographique de l'Oued El Harrach (partie amont) mémoire pour l'obtention du diplôme De MASTER en GENIE DES PROCÉDES- Option : Traitement des eaux- par : Abed Dihia - juin 2017.

[21] Etude d'aménagement de l'oued EL HARRACH- Rapport d'étude géotechnique G11 – Client : DAEWOO - Etabli par : Laboratoire GEO MAG - Juillet 2013

[22] Etude d'Aménagement de l'Oued El Harrach - Rapport géotechnique phase I - Client : DAEWOO - Etabli par : Laboratoire GEO MAG - Septembre 2012

[23] « Le suivi hydrogéologique des travaux de forages d'eau pour l'alimentation en eau potable de la nouvelle ville de Blida (dans la plaine de la Mitidja, Bouinane,) »
Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie-Filière : Géologie appliquée- Spécialité: Hydrogéologie - Juin 2017

[25] SourceANRH.

- [26] Contribution à l'étude de la vulnérabilité urbaine au risque d'inondation dans un contexte de changement climatique- Cas de la vallée d'Oued El Harrach à Alger - Conference Paper - January 2009
- [27] Google Earth.
- [28] Etude géotechnique d'Aménagement de l'Oued El Harrach RAPPORT-01- Client : DAEWOO - Etabli par : Laboratoire GEO MAG- PHASE 04 - Février 2016
- [29] Norme Afnor – NF P94-110- Juillet 1991
- [30] « Remblai et compactage - Planète TP » - <http://www.planete-tp.com/remblai-et-compactage-a1019.html>
- [31] F.Visa, Chapitre 03 : Classification des Sols Norme NF P 11 300 et GTR, Cours d'étude géotechnique routière, IUT de Saint Pierre, 12 pages.
- [32] Chapitre 07 – Etude de compactage et des différents matériels
- [33] Chapitre V- Analyse de stabilité des pentes /GCI 730 -Résistance au cisaillement
- [34] « Analyse de la stabilité des terrains et mise en place d'un système de confortement (Cas Bekira - Constantine) » - Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention d'un diplôme de Master Académique -Option : Géotechnique--Université Larbi Tebessi – Tébessa- Promotion 2016/2017
- [35] « Eléments de géotechnique : écoulements, stabilité des pentes, parois de soutènement souples IUT Génie Civil et Construction Durable Module MXG6 Luc Sibille »- <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01784598>- Submitted on 3 May 2018
- [36] Analyse et modélisation d'un glissement de terrain. Cas de sidi Youcef (Béni Messous Alger)- par Mohamed Hamza Aissa- Centre khemis Miliana Algérie- Master Géotechnique 2011- <https://www.geoslope.com/>



Annexes

Annexe A- COUPES DES SONDAGES CAROTTÉS

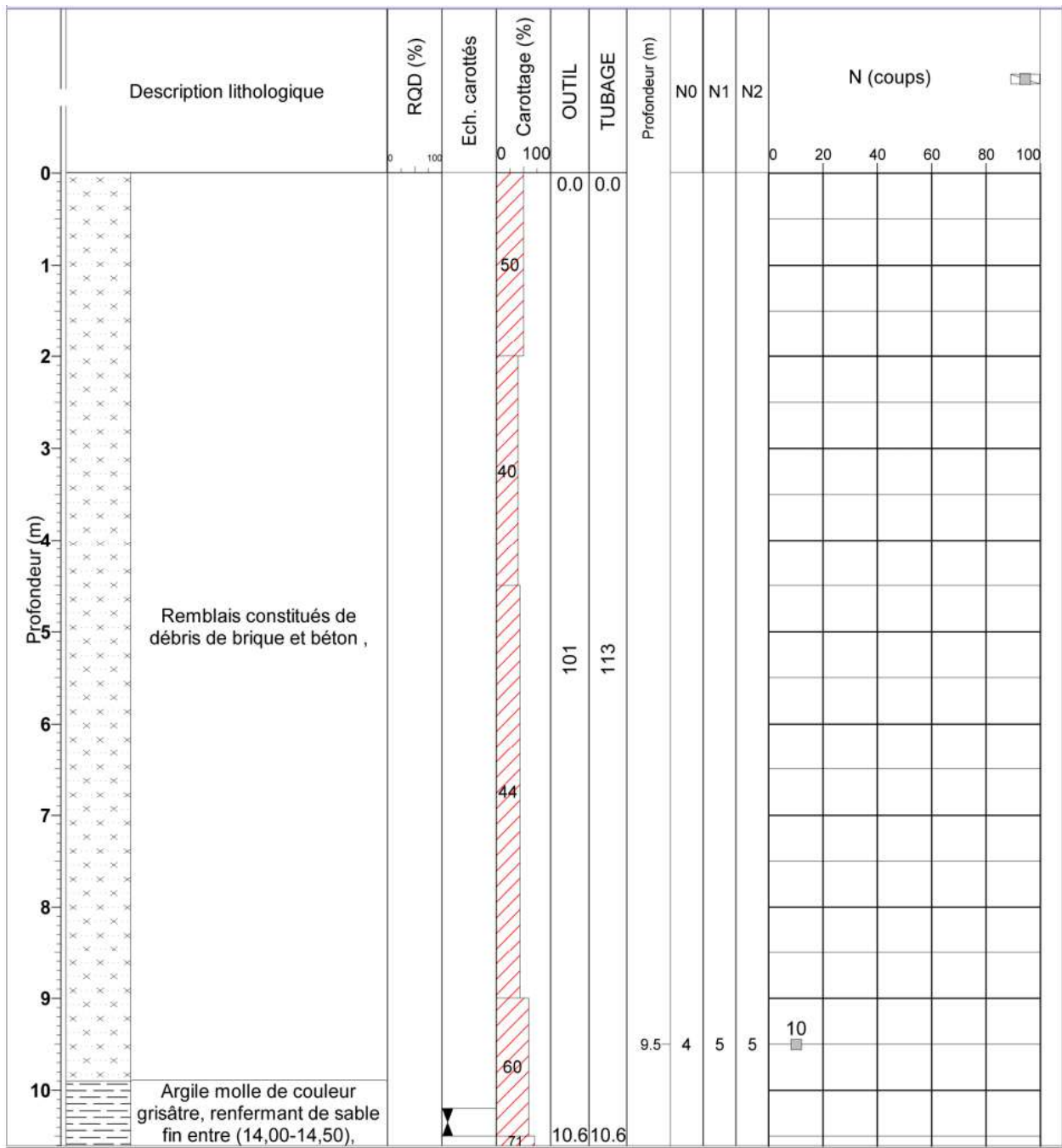


Figure A1. Forage: BBH-161 (P1/2).

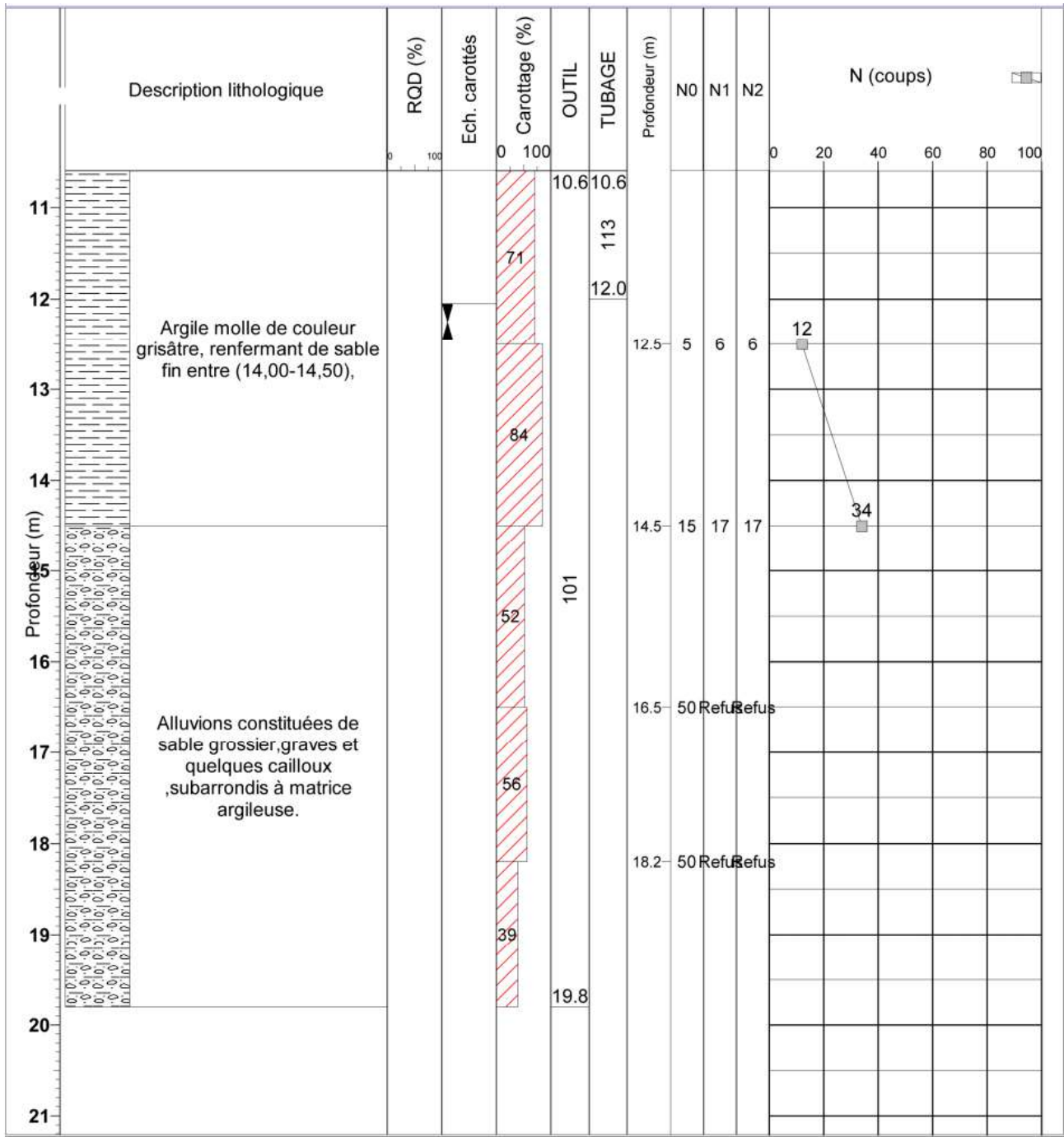


Figure A2. Forage: BBH-161 (P2/2).

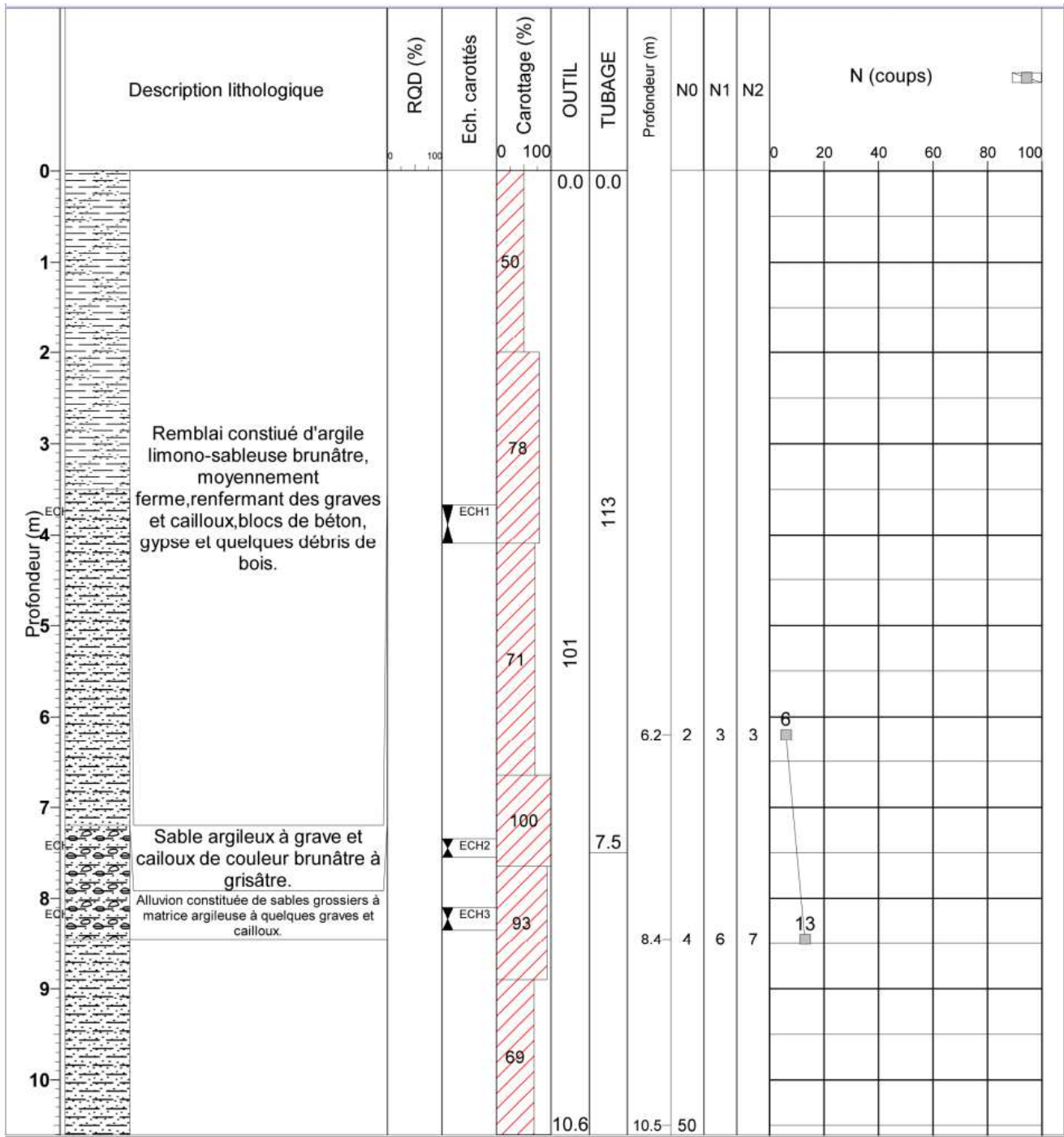


Figure A3. Forage: BBH-162 (P1/2).

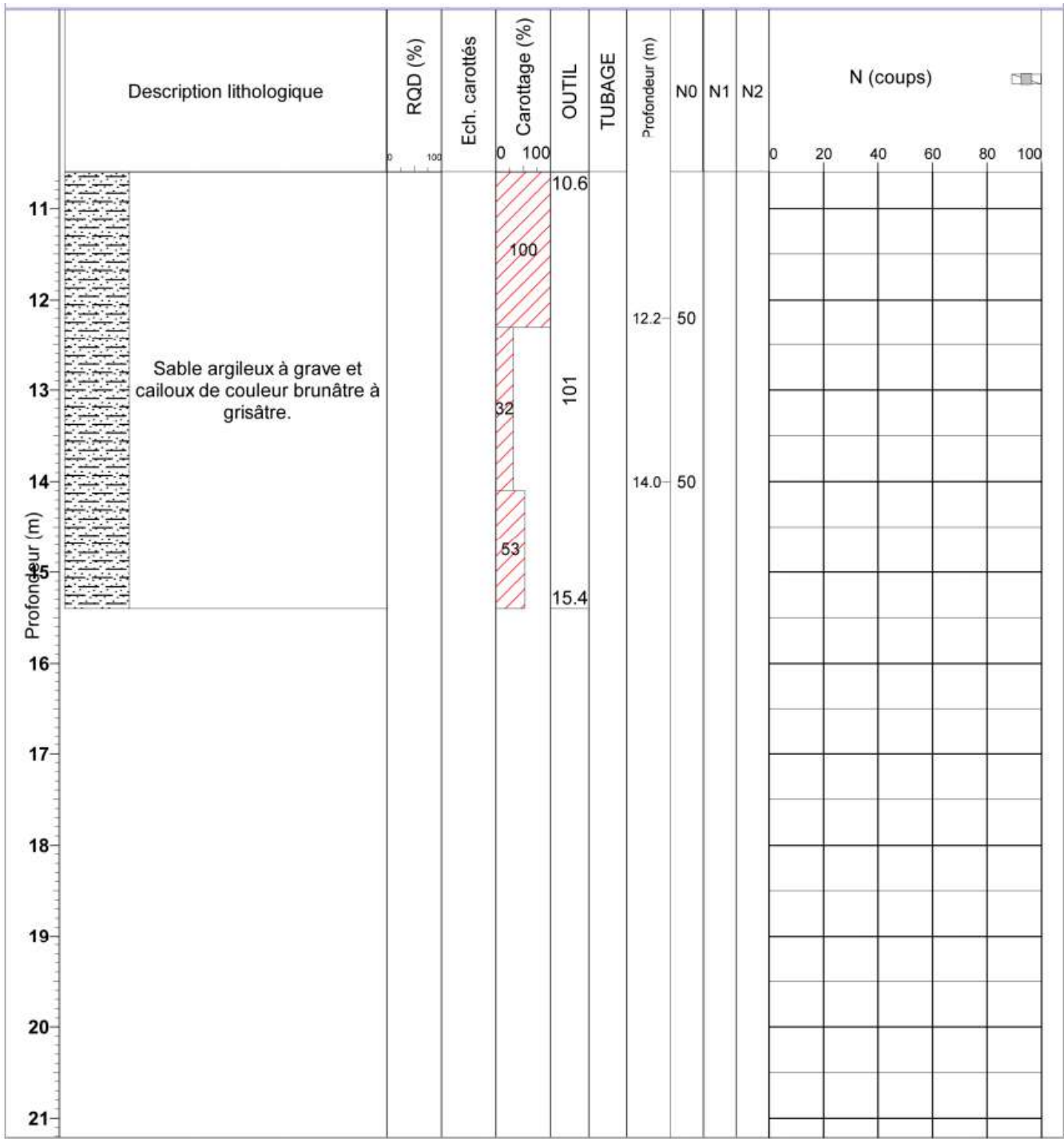


Figure A4. Forage: BBH-162 (P2/2).

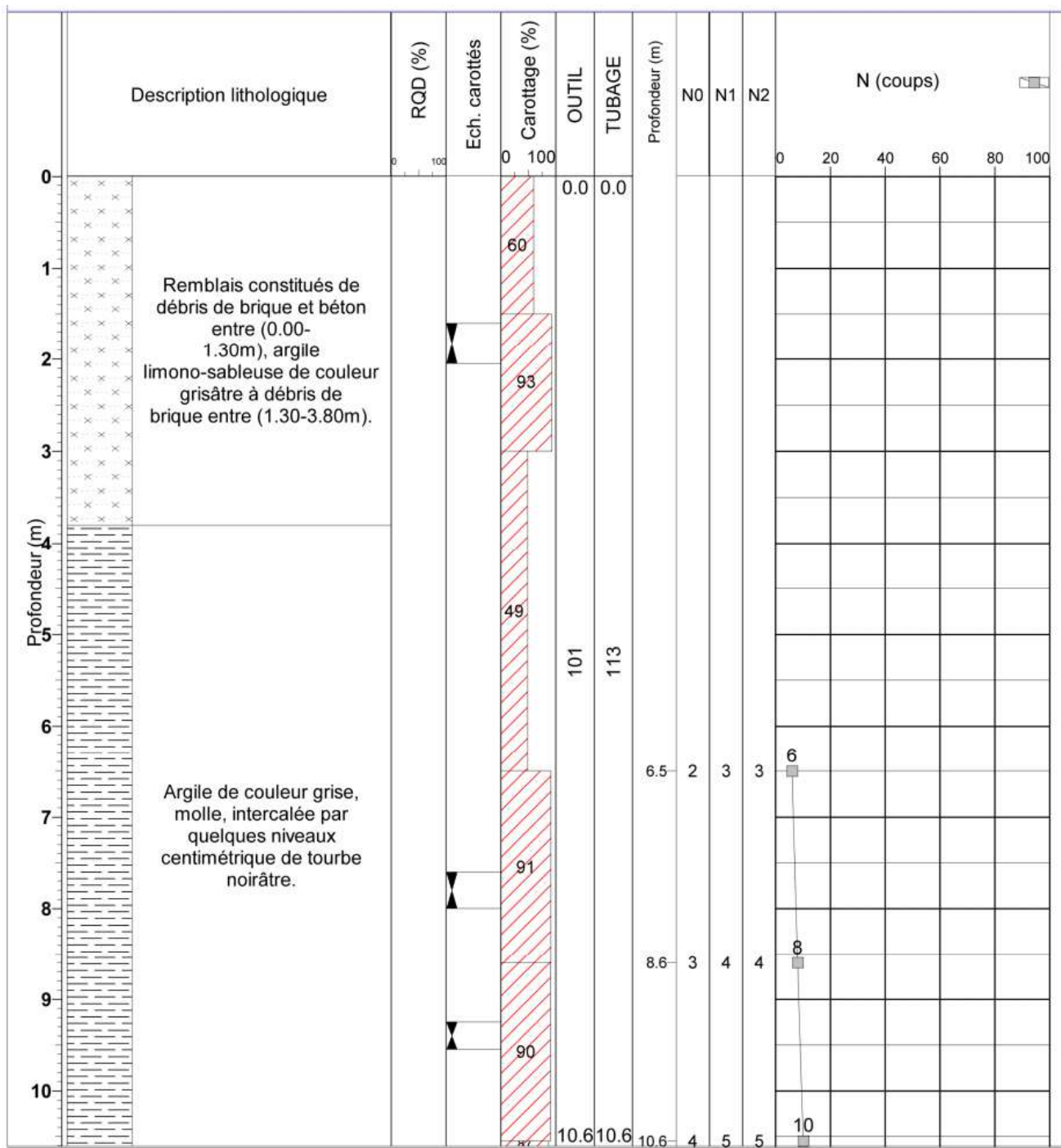


Figure A5. Forage: BBH-163 (P1/3).

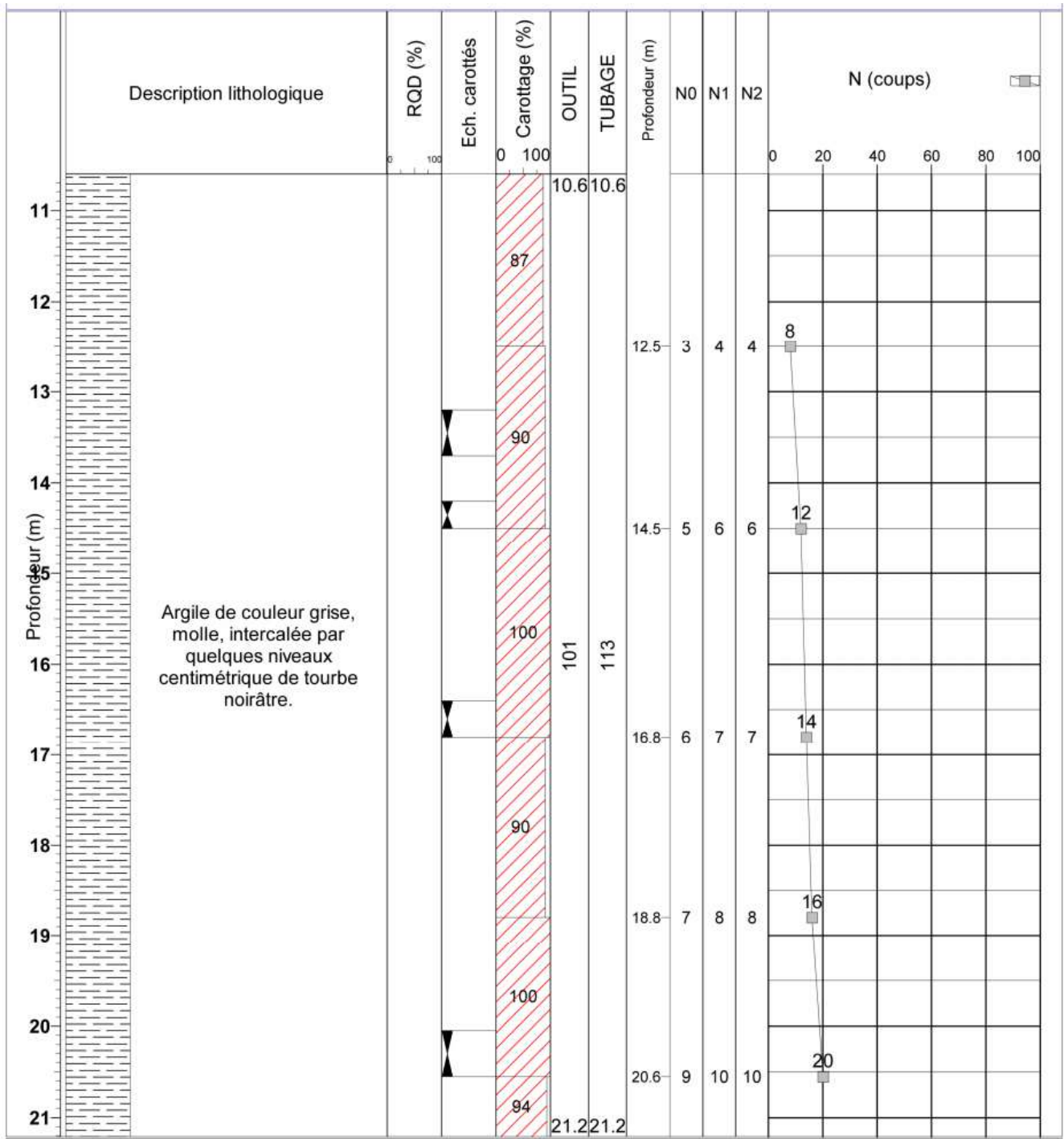


Figure A6. Forage: BBH-163 (P2/3).

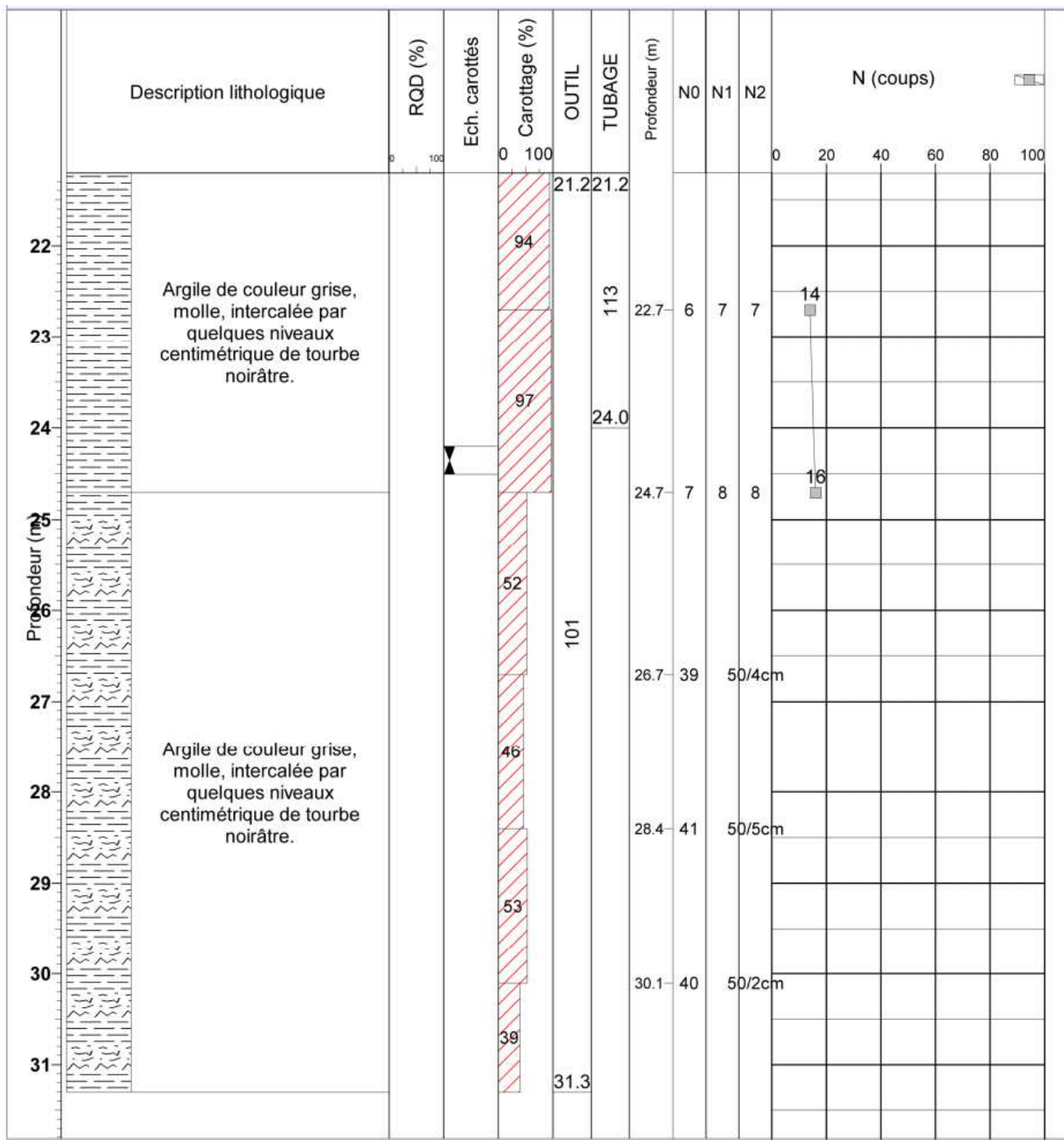


Figure A7. Forage: BBH-163 (P3/3).

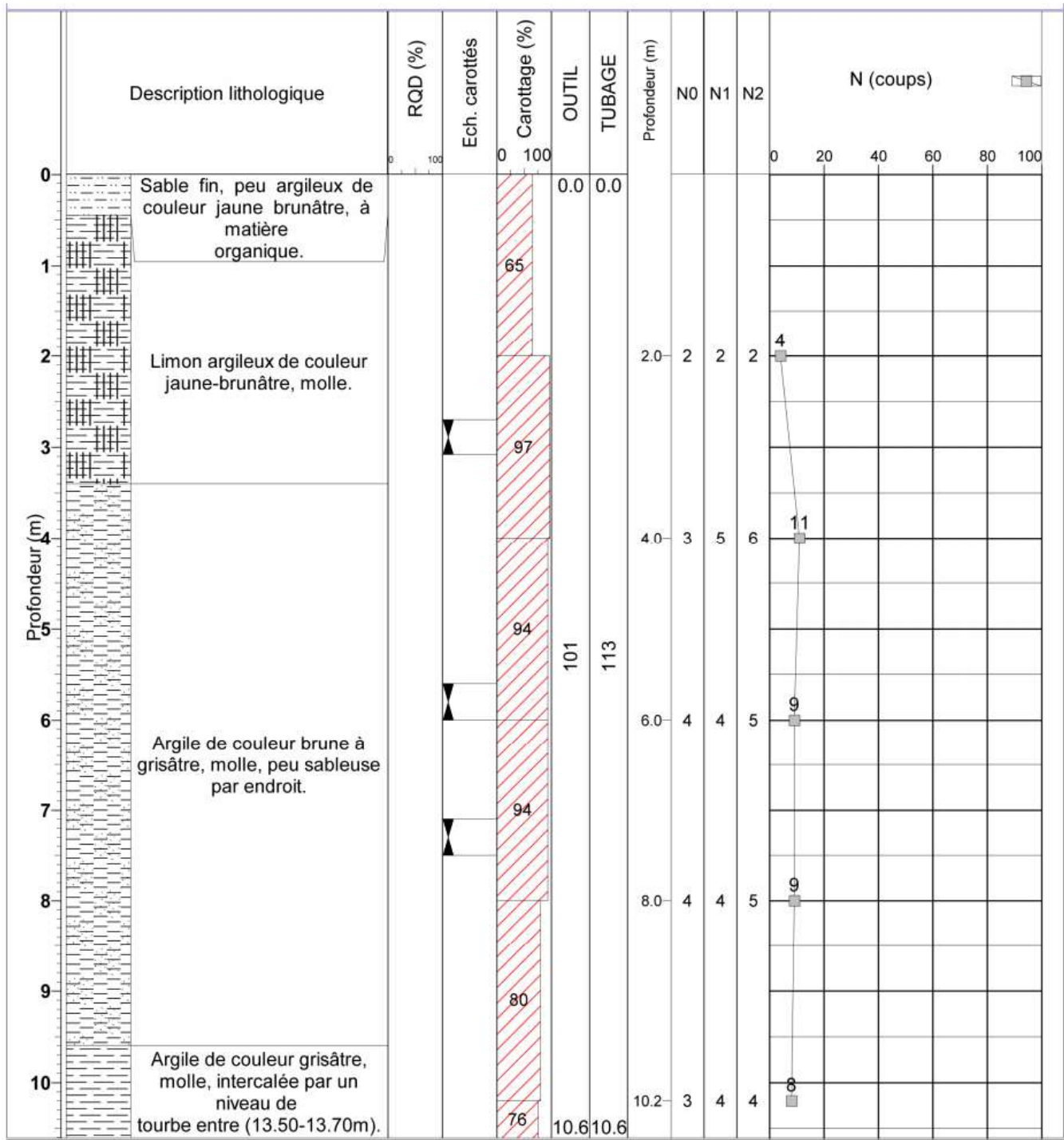


Figure A8. Forage: BBH-164 (P1/3).

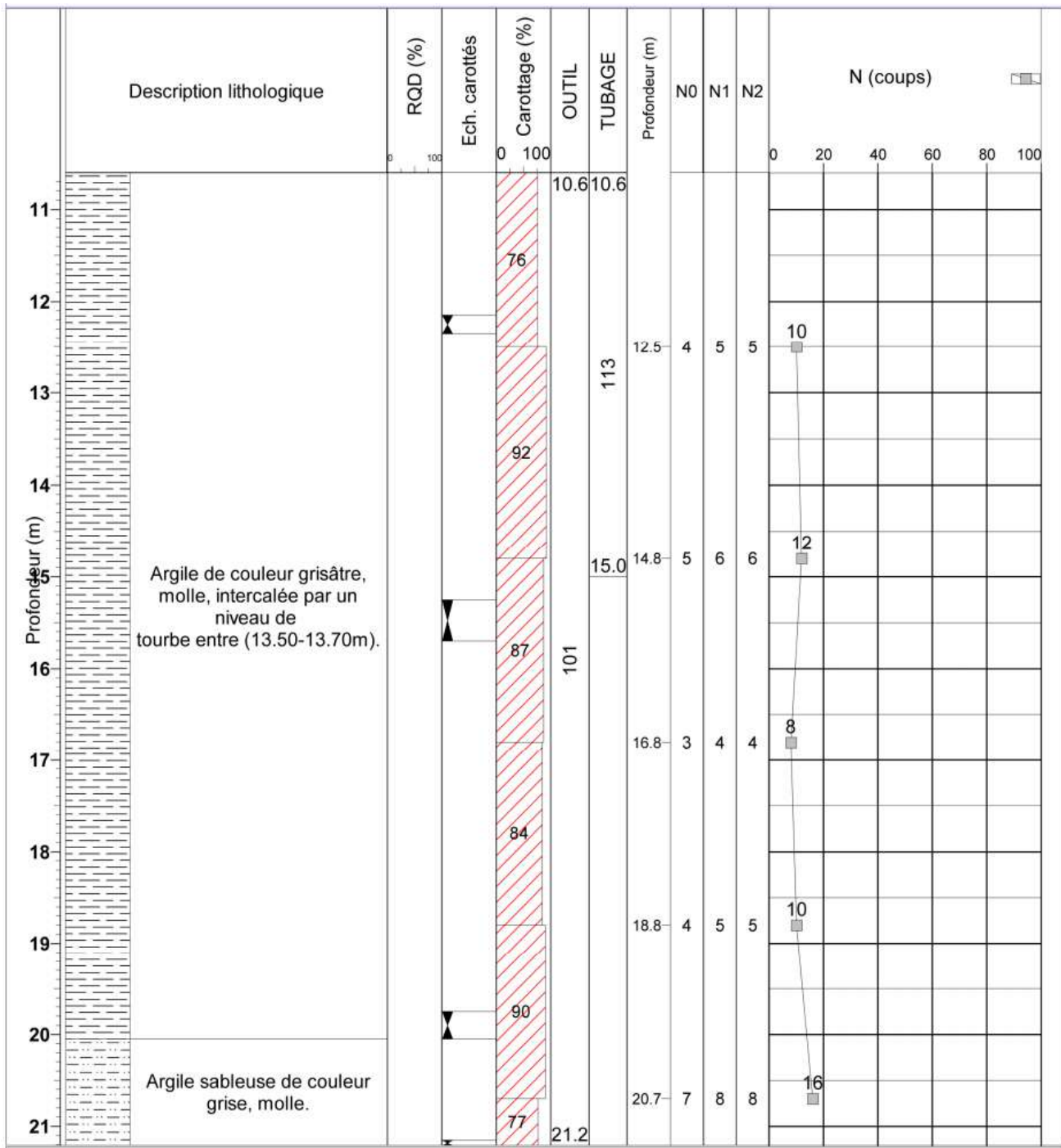


Figure A9. Forage: BBH-164 (P2/3).

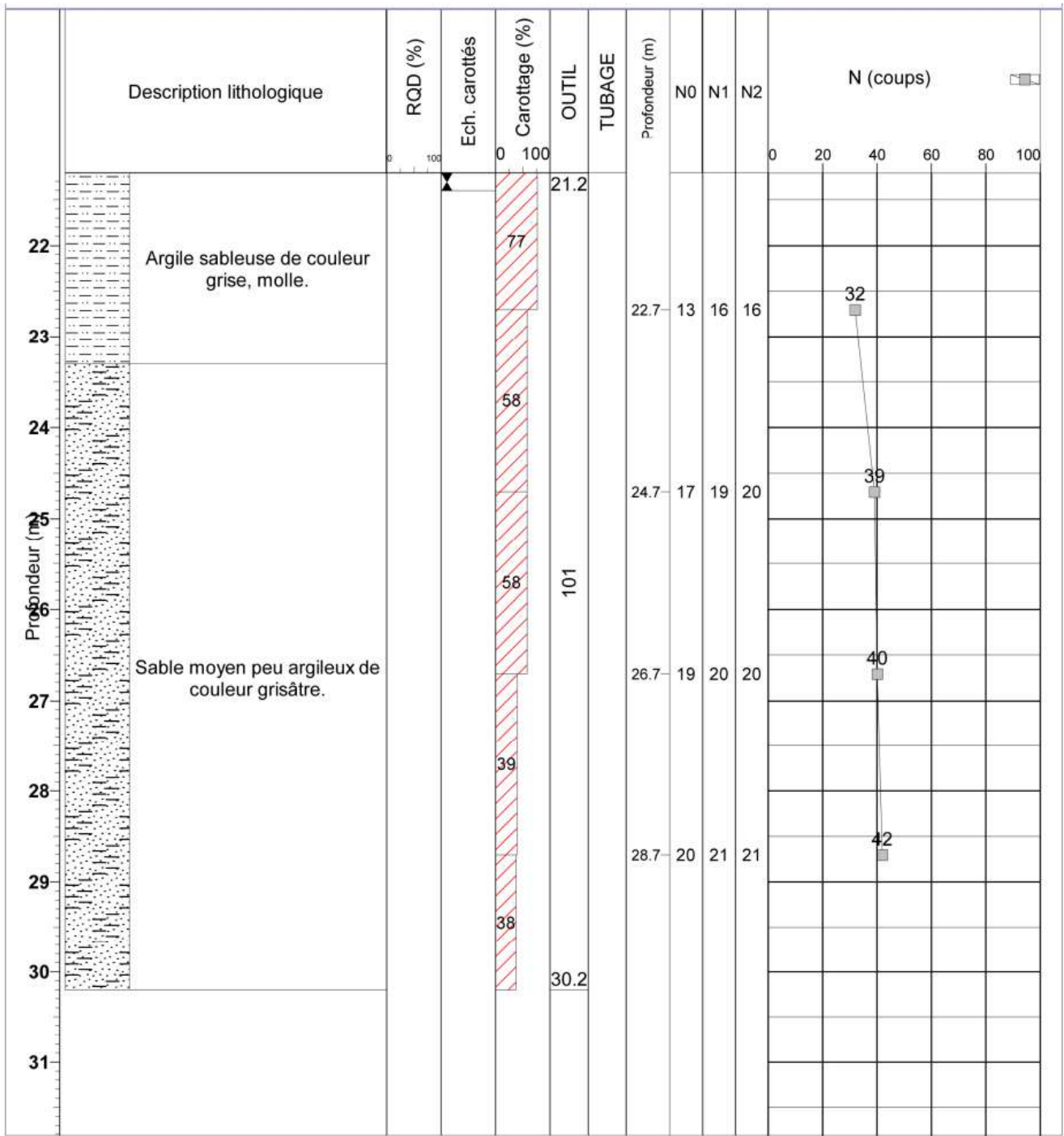


Figure A10. Forage: BBH-164 (P3/3).

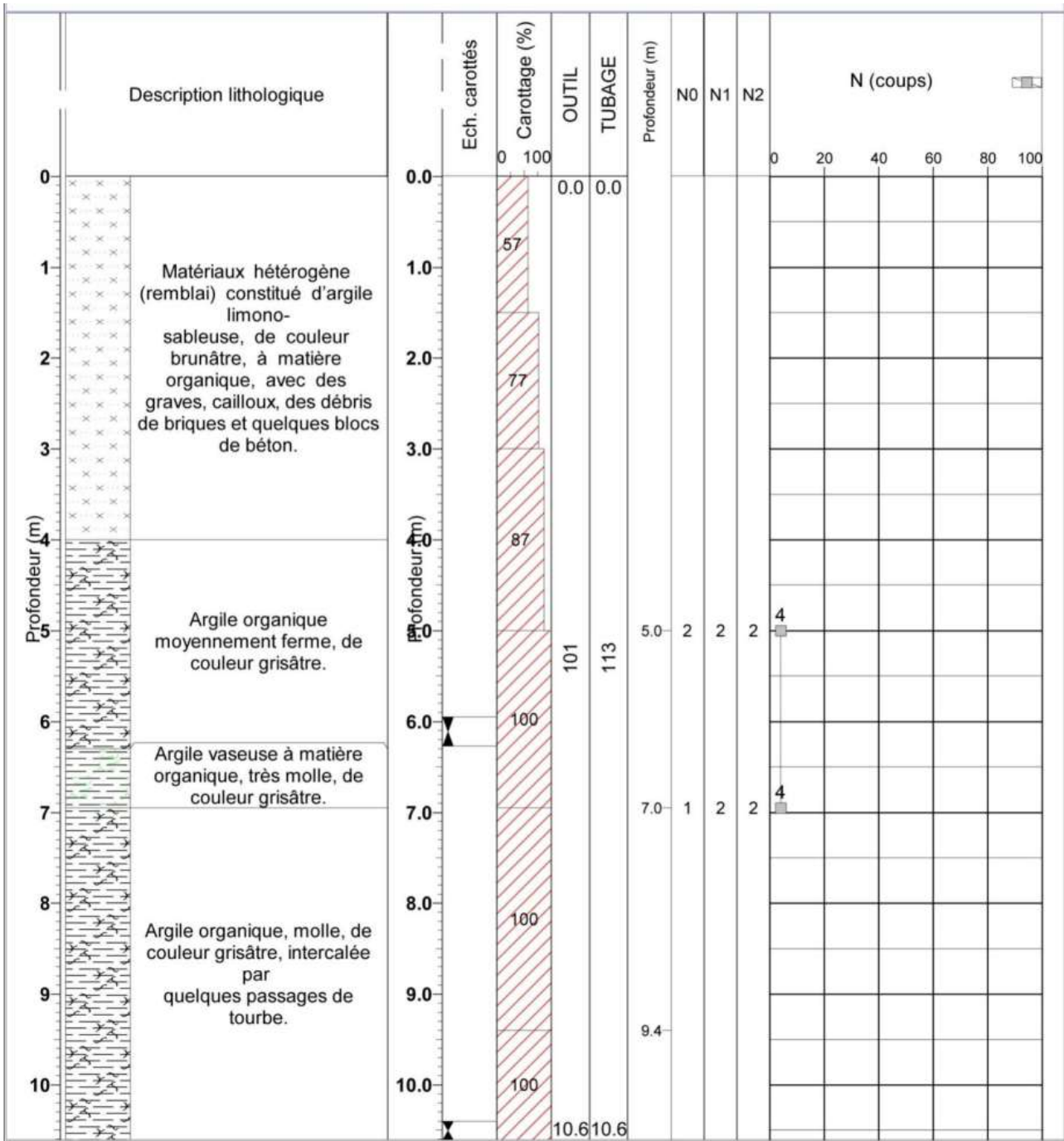


Figure A11. Forage: BBH-165 (P1/3).

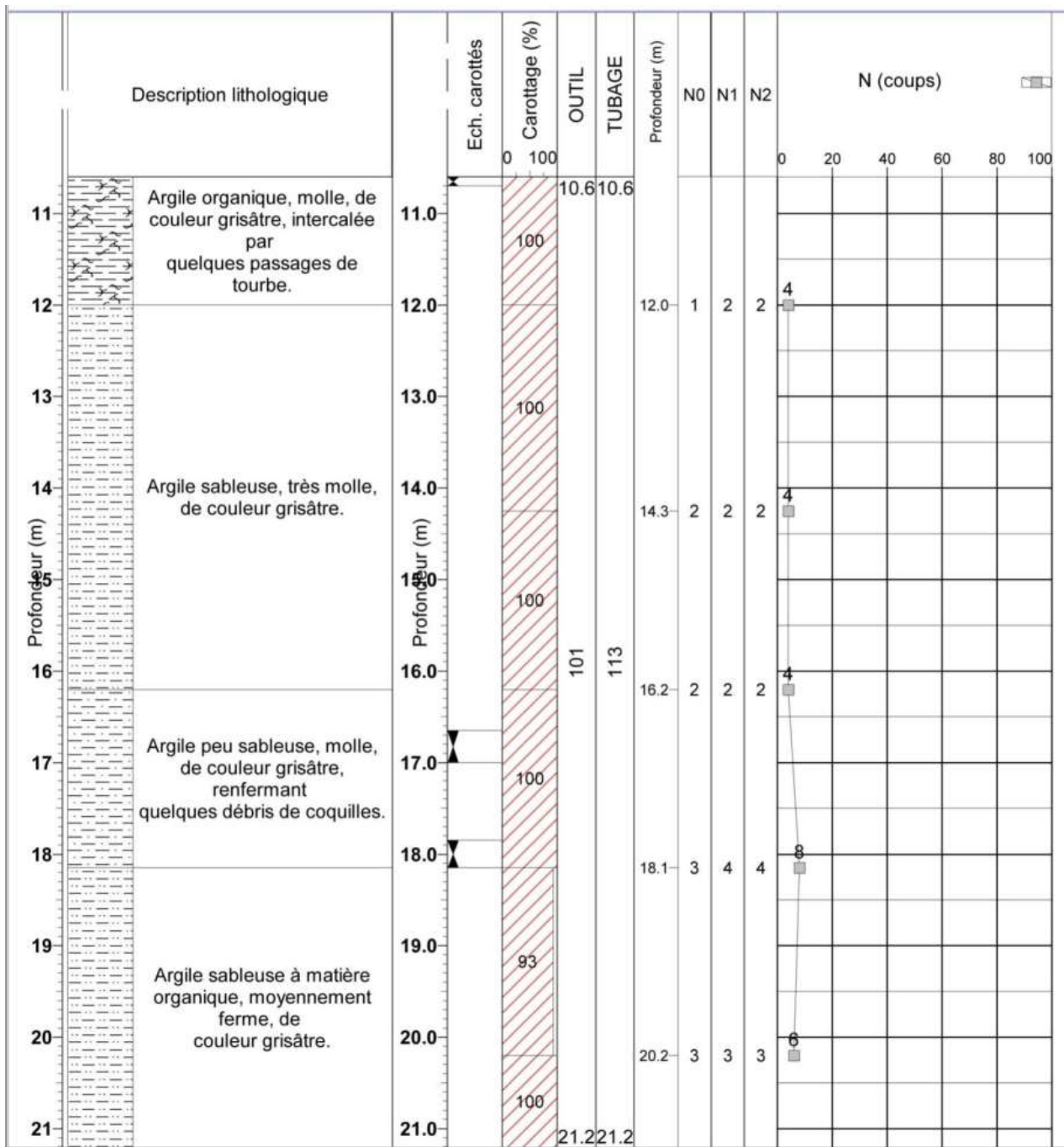


Figure A12. Forage: BBH-165 (P2/3).

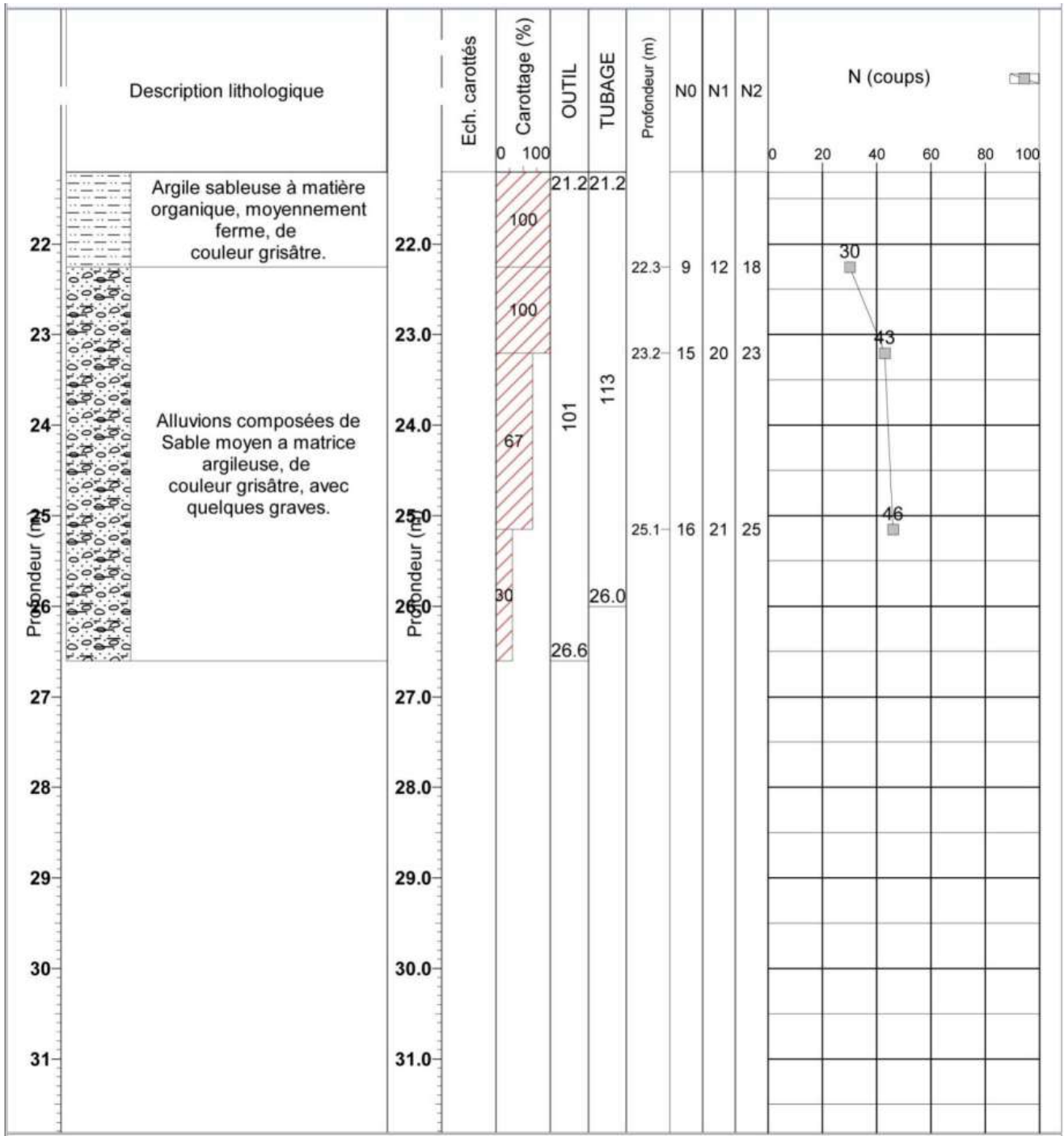


Figure A13. Forage: BBH-165 (P3/3).

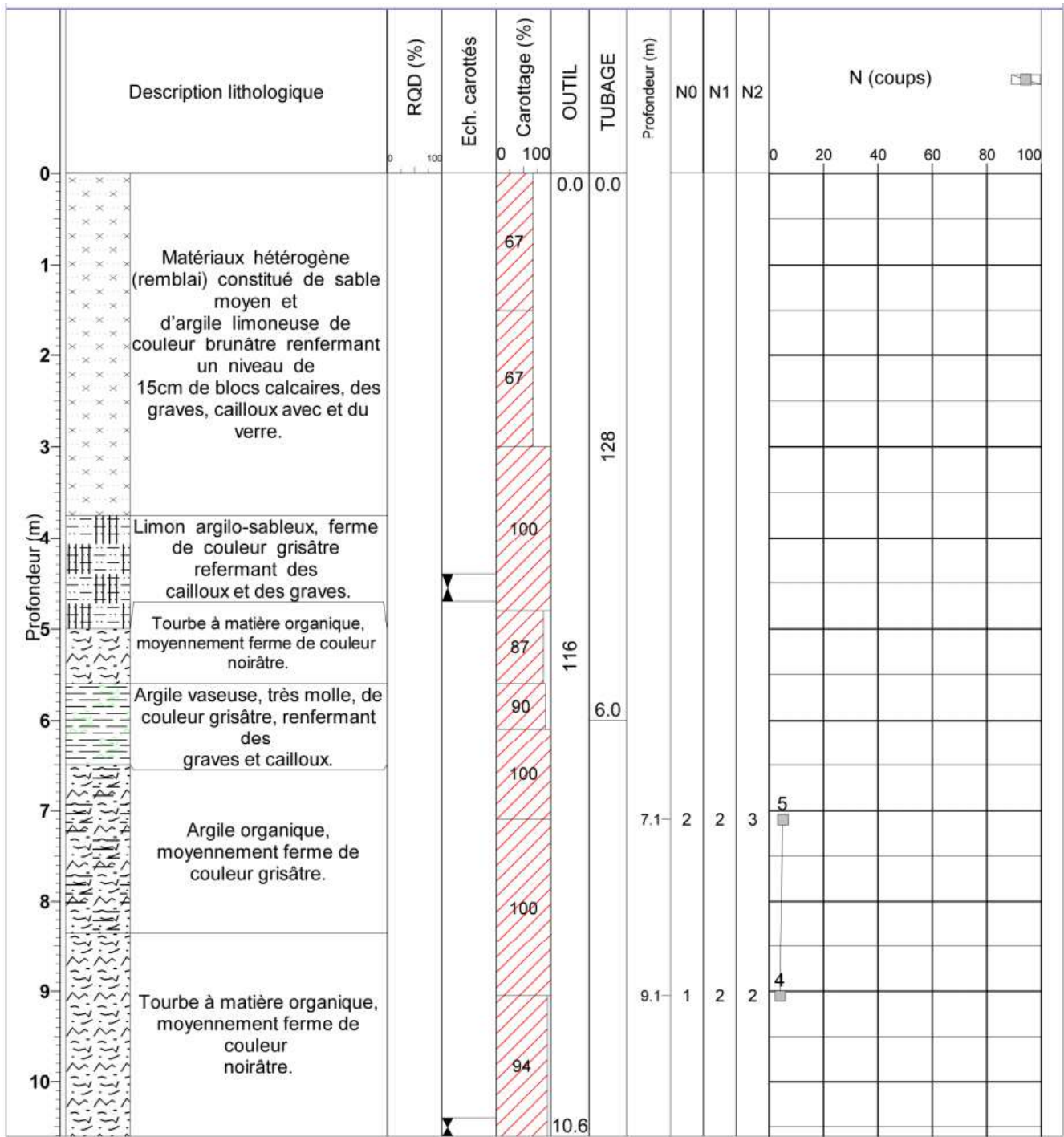


Figure A14. Forage: BBH-166 (P1/2).

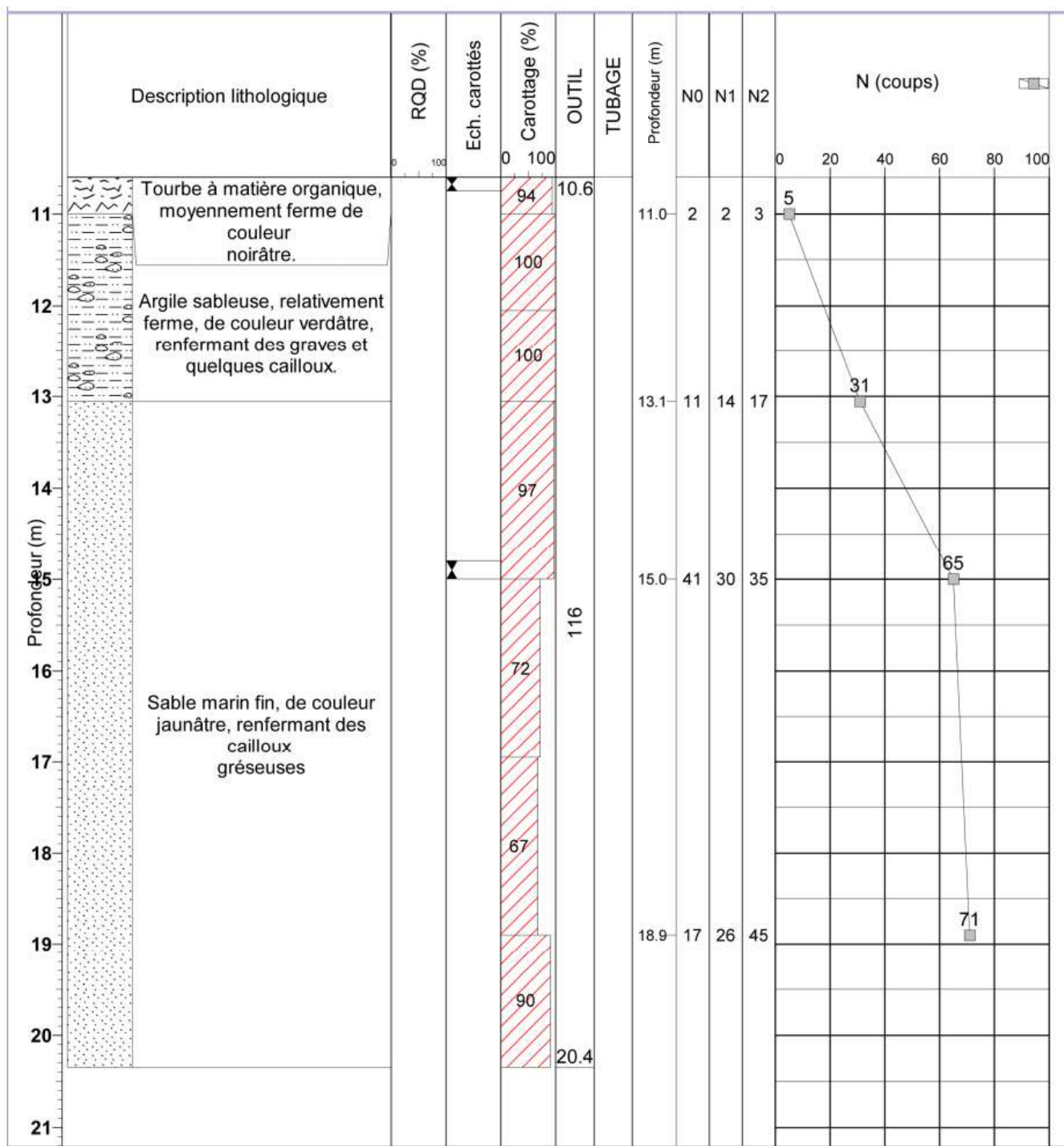


Figure A15. Forage: BBH-166 (P2/2).

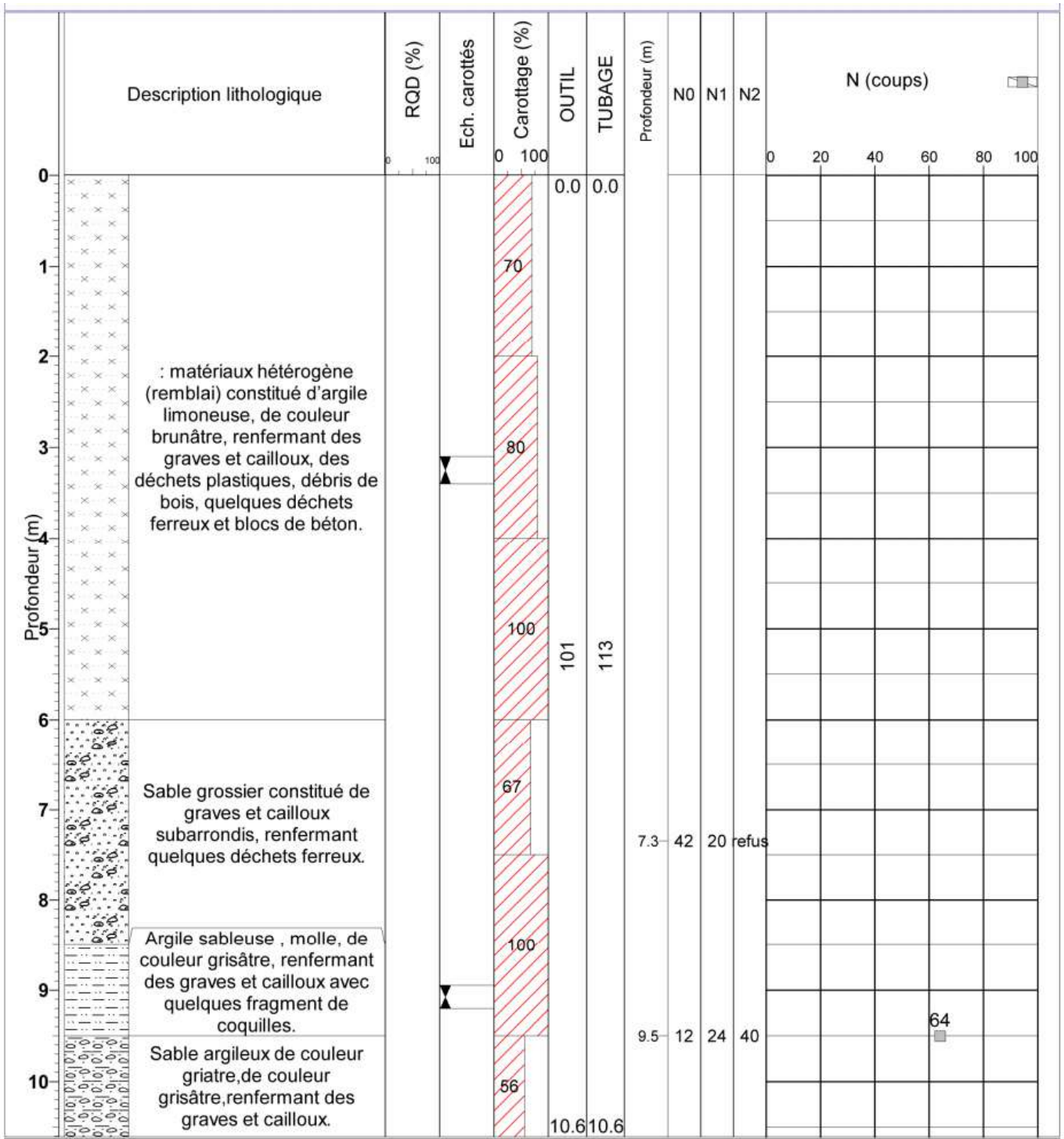


Figure A16. Forage: BBH-168 (P1/2).

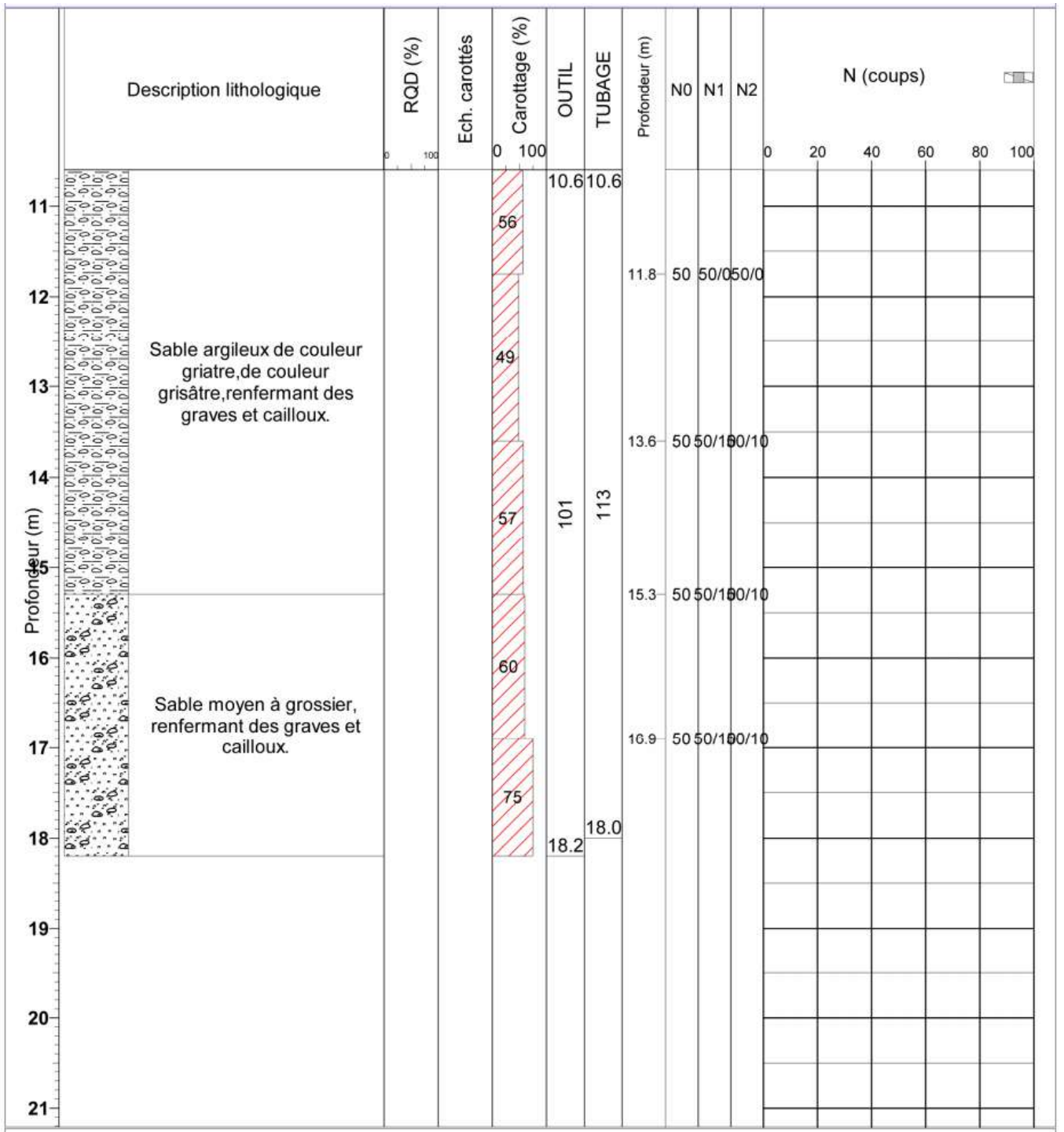


Figure A17. Forage: BBH-168 (P2/2).

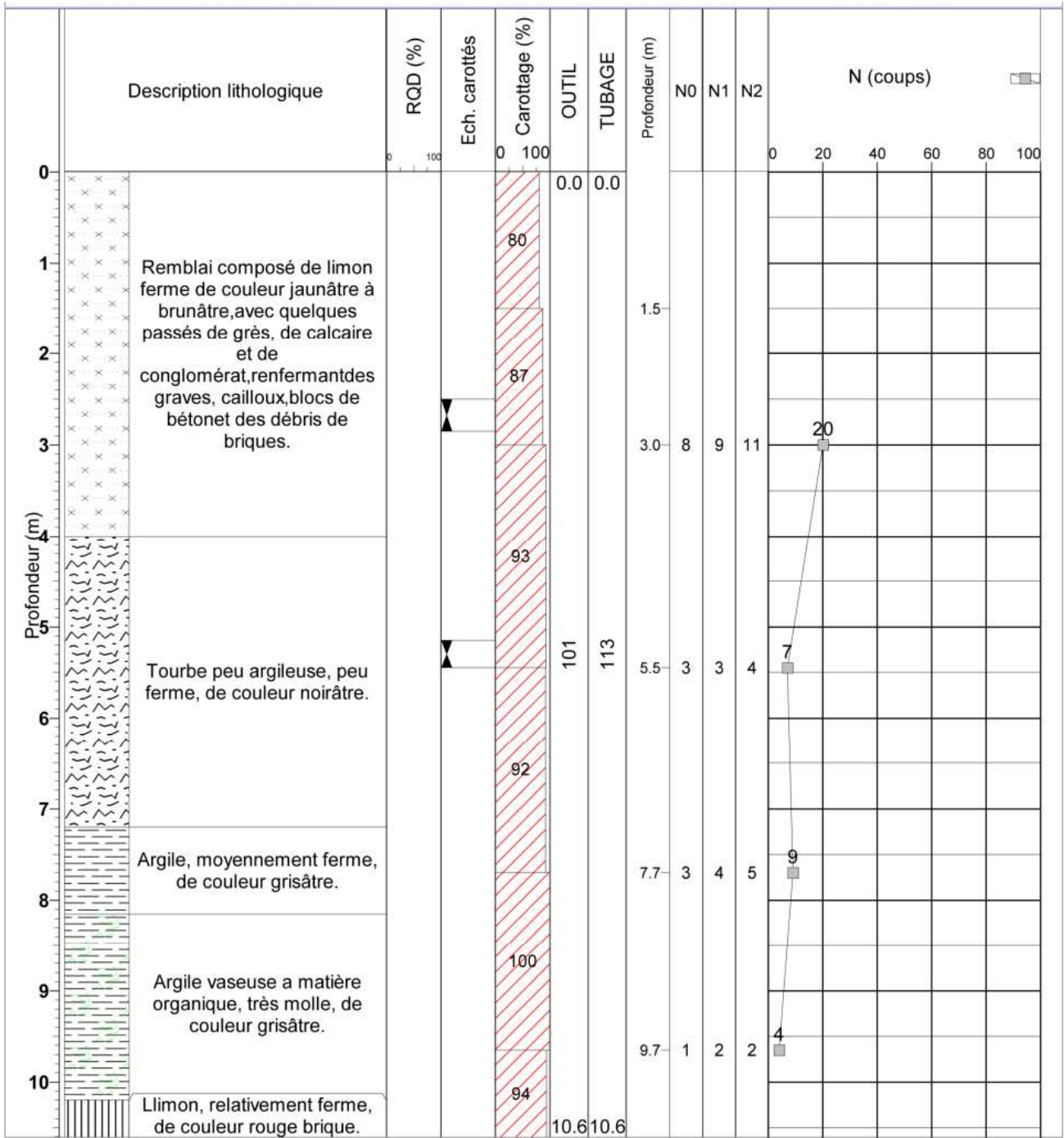


Figure A18. Forage: BB-45 (p1/2).

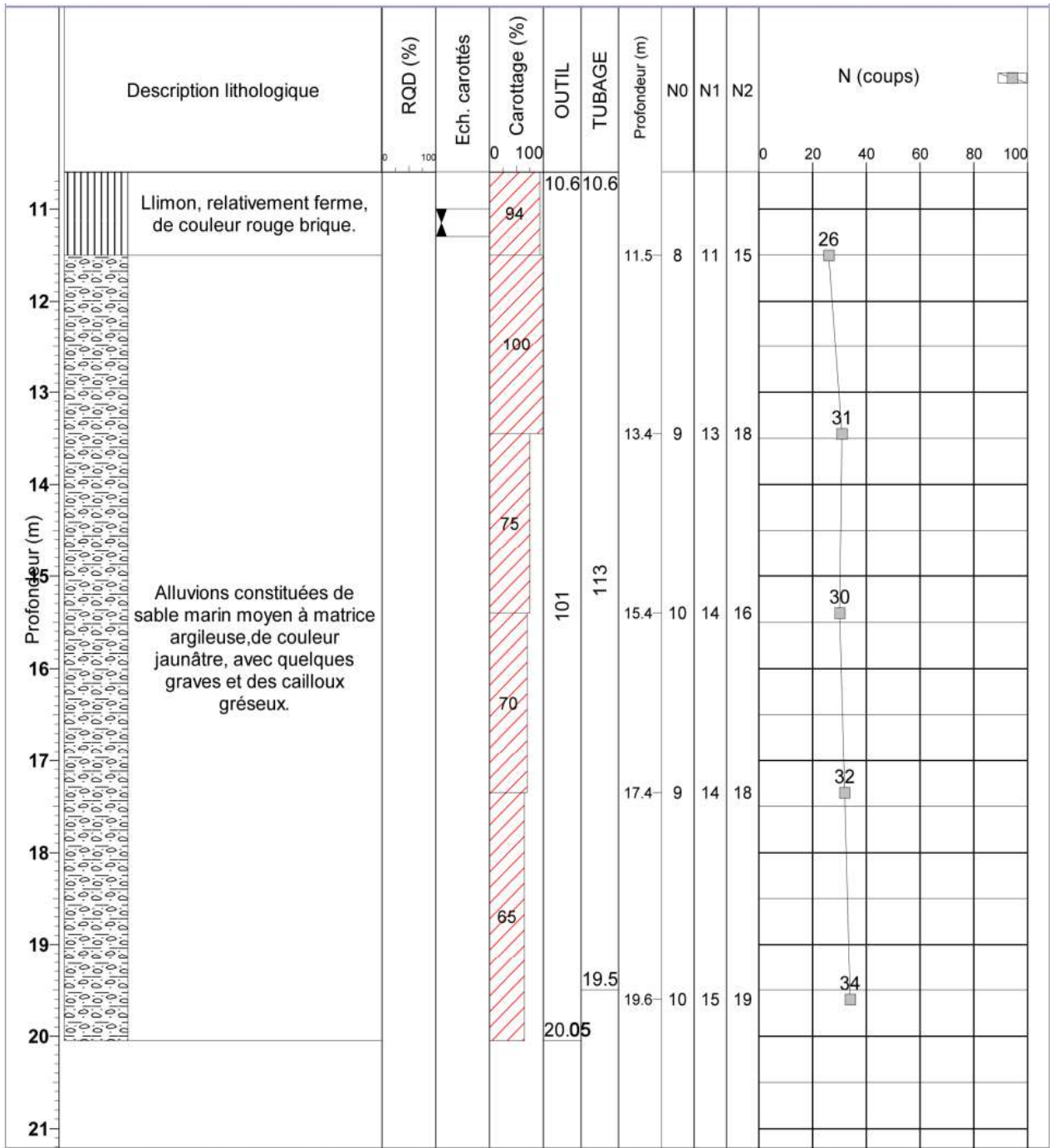


Figure A19. Forage: BB-45 (p2/2).

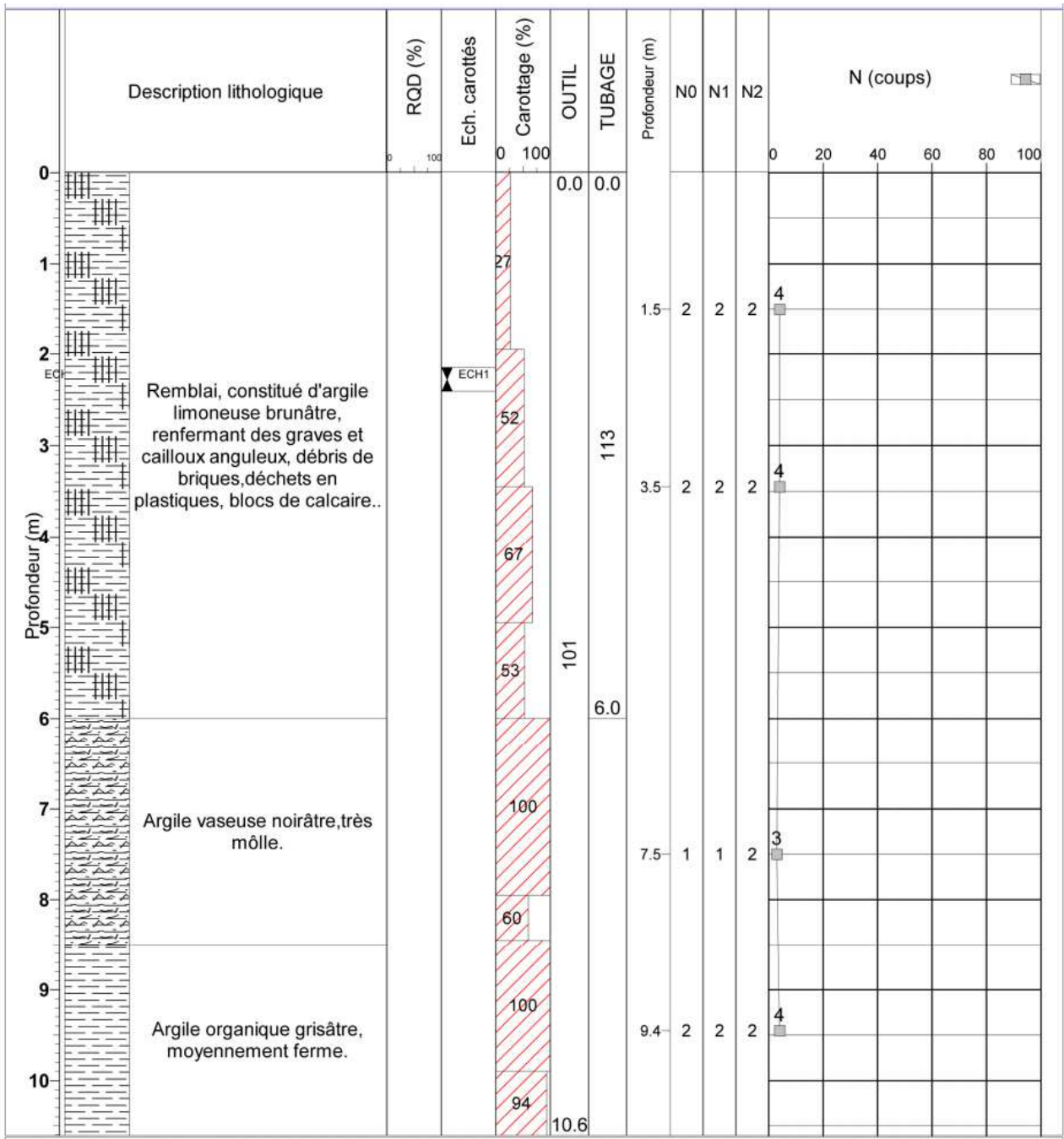


Figure A20. Forage: BBH-171 (P1/2).

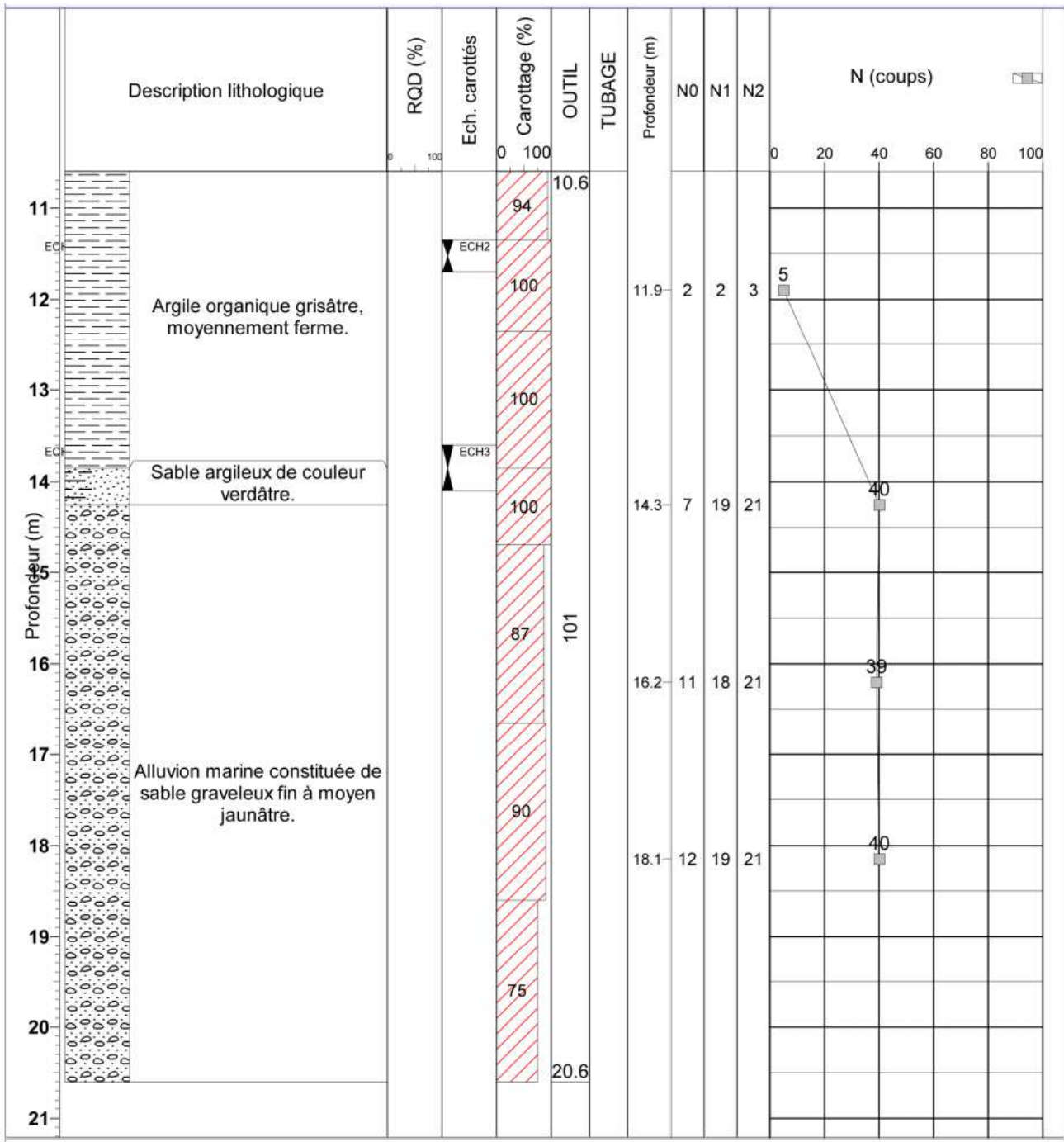


Figure A21. Forage: BBH-171 (P2/2).

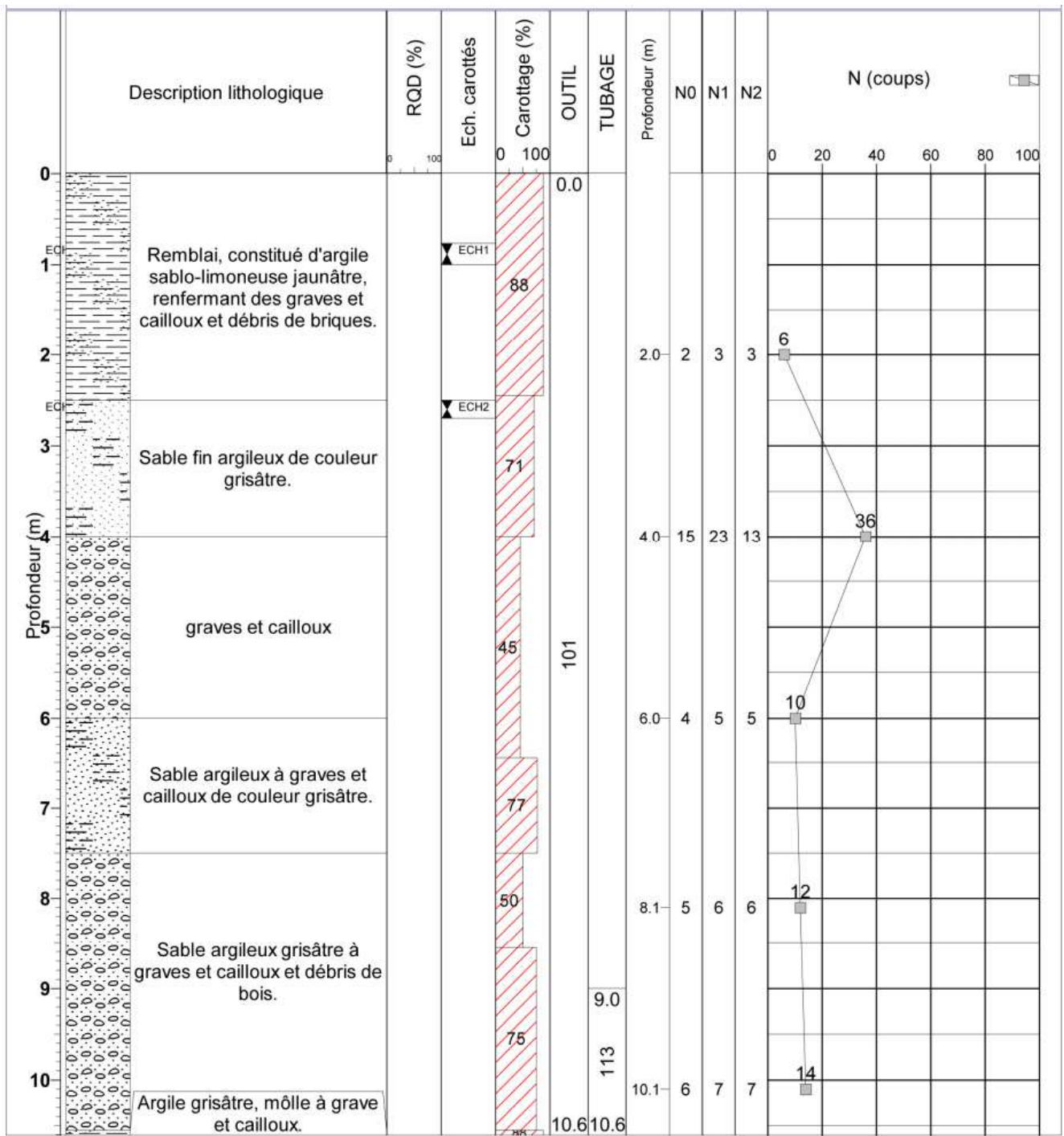


Figure A22. Forage: BBH-172 (P1/4).

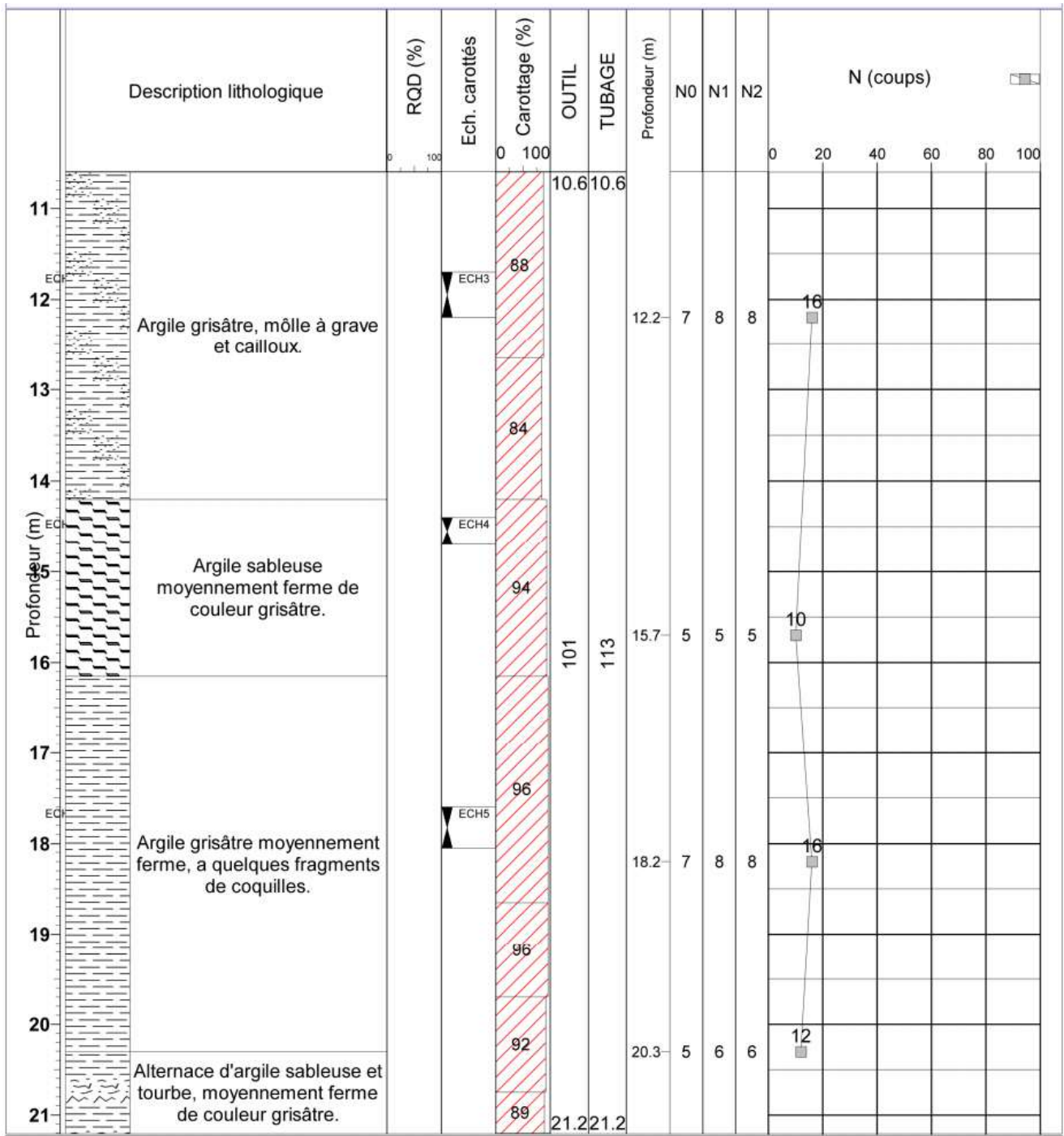


Figure A23. Forage: BBH-172 (P2/4).

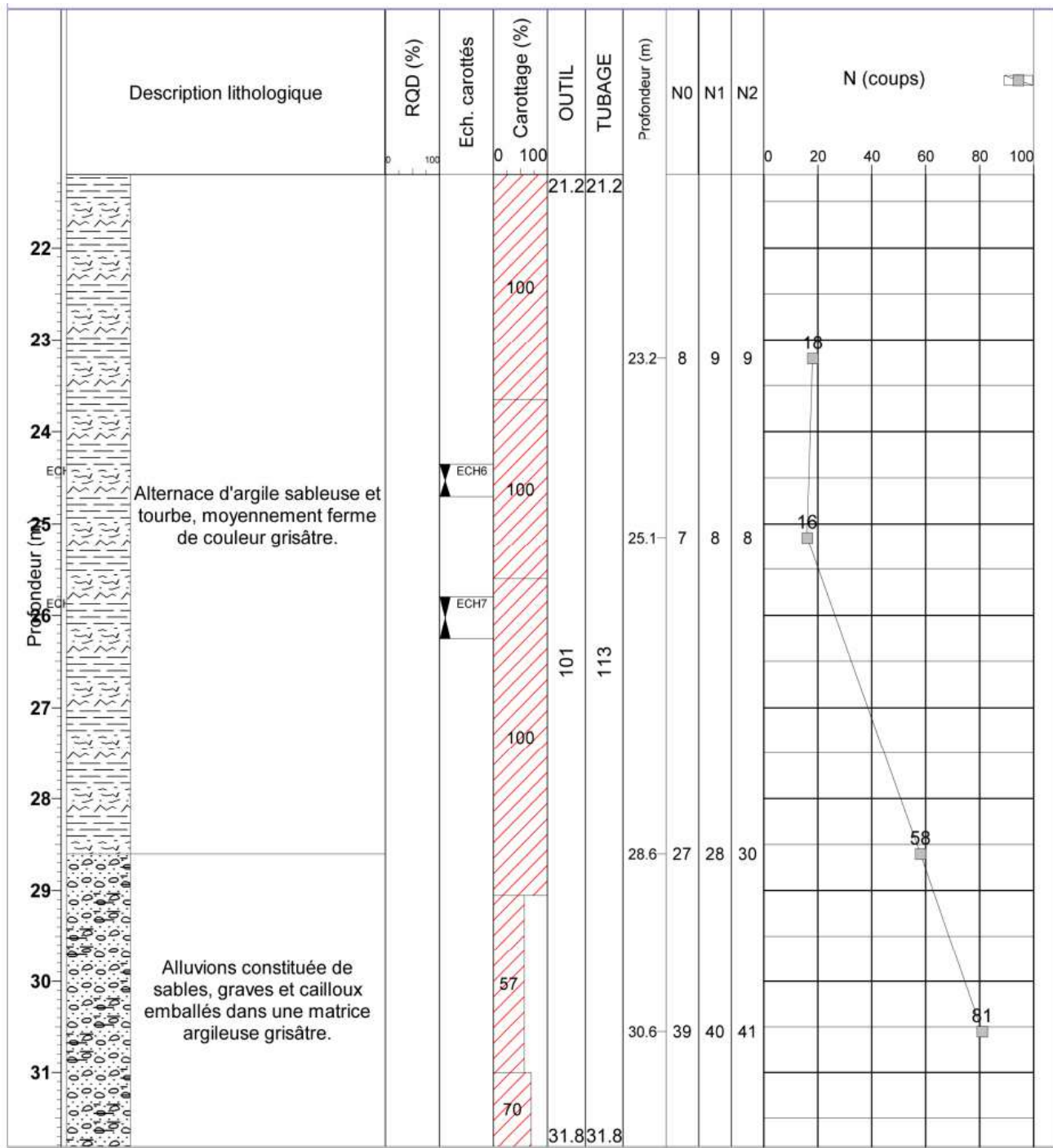


Figure A24. Forage: BBH-172 (P3/4).

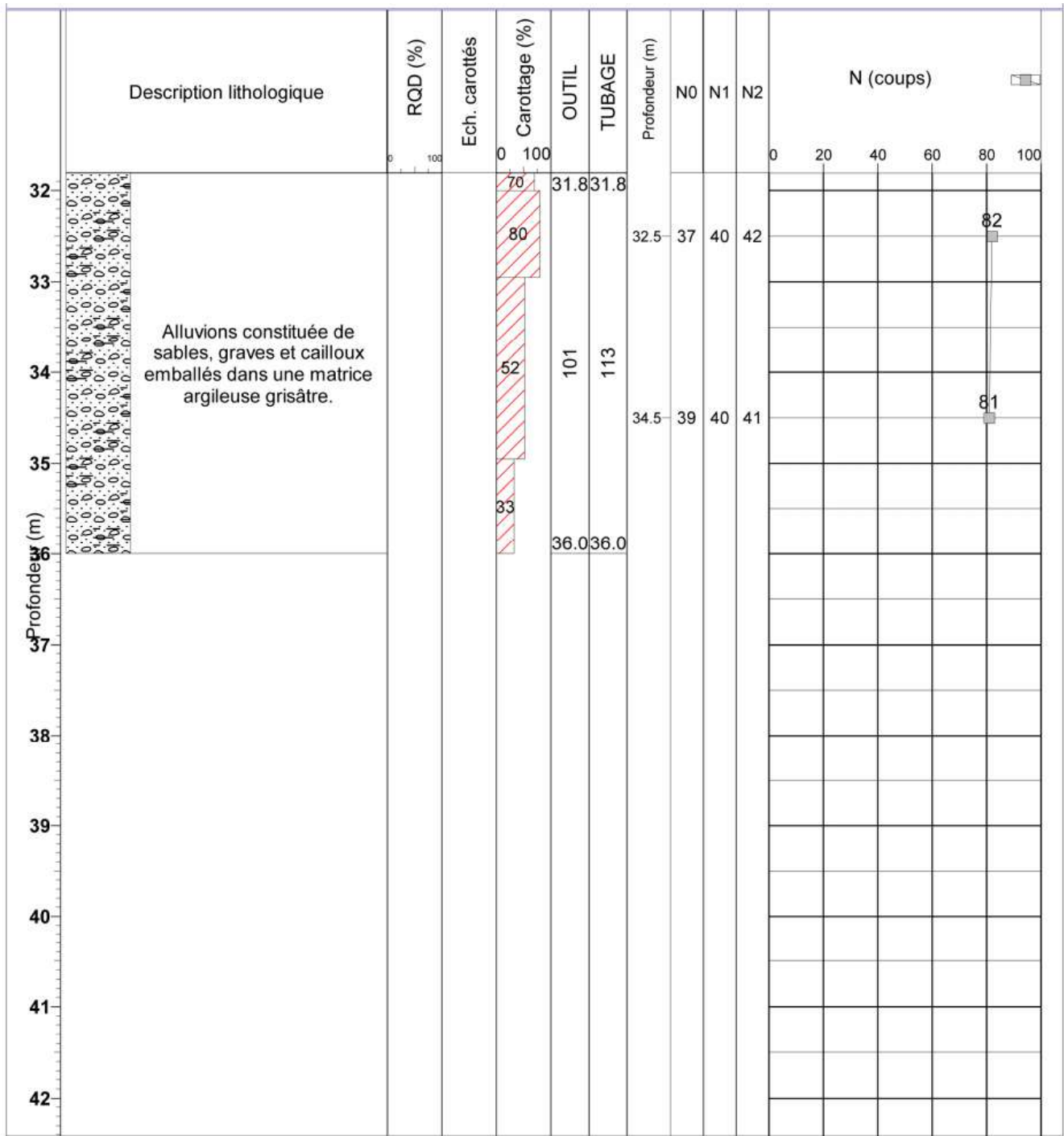


Figure A25. Forage: BBH-172 (P4/4).

**Annexe B - PHOTOGRAPHIE DES CAISSES À
CAROTTES ET SITES DE SONDAGES
CAROTTÉS**

BBH-161



Figure B1. Localisation du Sondage BBH-161.



Figure B2. Caisse du Sondage BBH-161 de 0,0 0m à 10,95 m.



Figure B3. Caisse du Sondage BBH-161 de 10,95 m à 19,80 m.

BBH-162



Figure B4. Localisation du Sondage BBH-162.



Figure B5. Caisse du Sondage BBH-162 de 0,00m à 7.65 m.



Figure B6. Caisse du Sondage BBH-162 de 7,65 m à 15,40 m.

BBH-163



Figure B7. Localisation du Sondage BBH-163.



Figure B8. Caisse du Sondage BBH-163 de 0,00m à 8,00 m.



Figure B9. Caisse du Sondage BBH-163 de 8,00 m à 14,20 m.

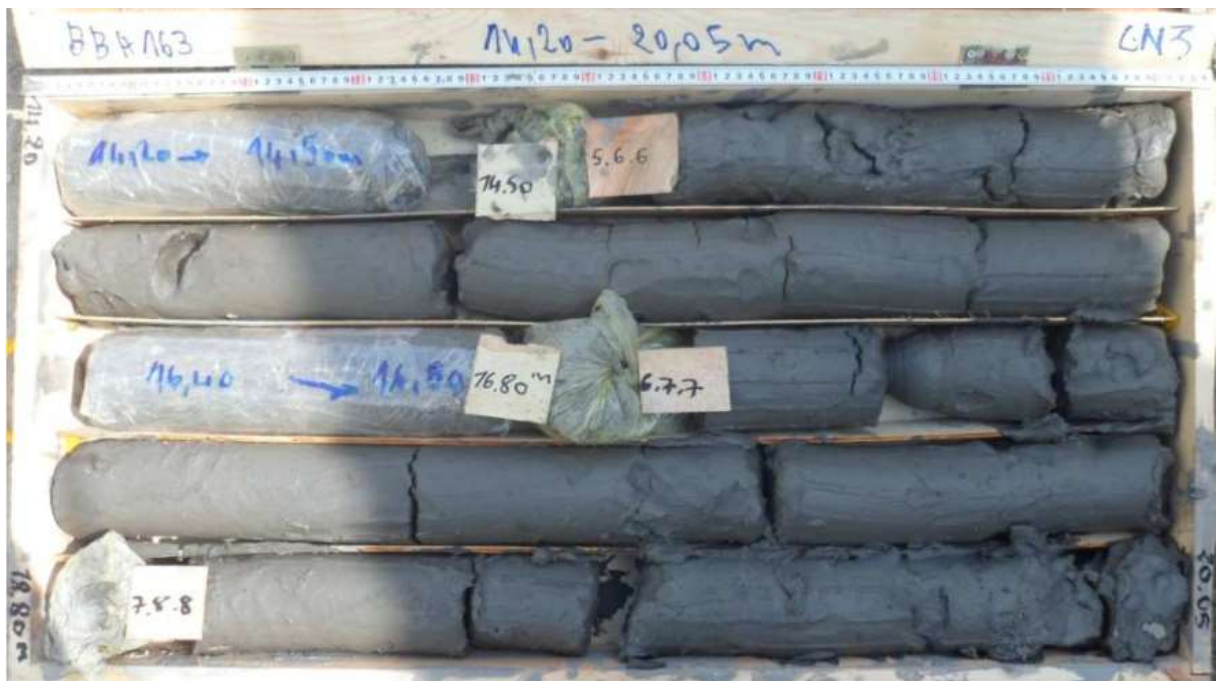


Figure B10. Caisse du Sondage BBH-163 de 14,20 m à 20,05 m.



Figure B11. Caisse du Sondage BBH-163 de De 20,05 m à 27,10 m.



Figure B12. Caisse du Sondage BBH-163 de 27,10 m à 31,30 m.

BBH-164



Figure B13. Localisation du Sondage BBH-164.



Figure B14. Caisse du Sondage BBH-164 de 0,00m à 7,00 m.



Figure B15. Caisse du Sondage BBH-164 de 7,00 m à 13,70 m.



Figure B16. Caisse du Sondage BBH-164 de 13,70 m à 20,05 m.



Figure B17. Caisse du Sondage BBH-164 de 20,05 m à 30,20 m.

BBH-165



Figure B18. Localisation du Sondage BBH-165.



Figure B19. Caisse du Sondage BBH-165 de 0,00m à 6,35 m.



Figure B20. Caisse du Sondage BBH-165 de 6,35 m à 11,75 m.



Figure B21. Caisse du Sondage BBH-165 de 11,75 m à 17,25 m.



Figure B22. Caisse du Sondage BBH-165 de 17,25 m à 22,70 m.

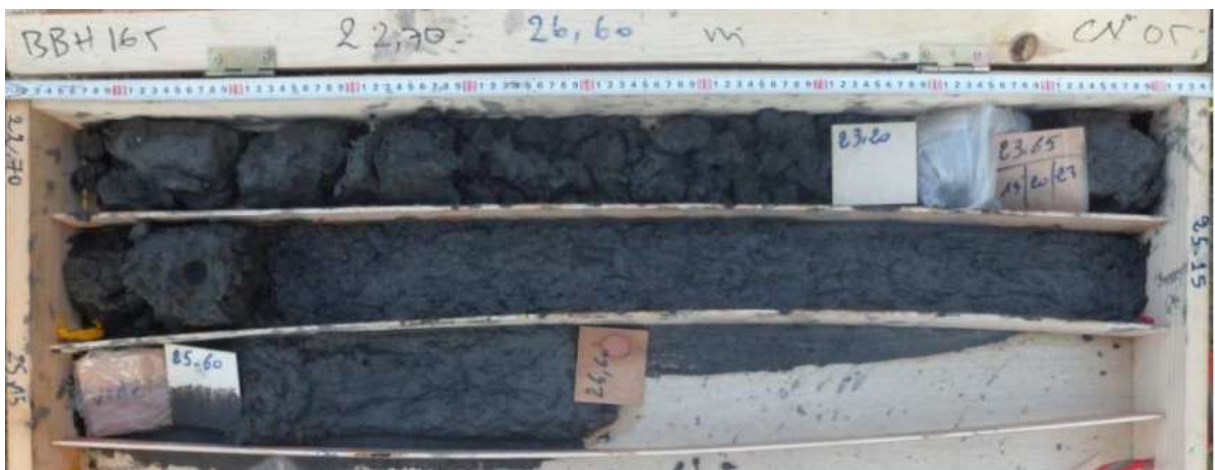


Figure B23. Caisse du Sondage BBH-165 de 22,70 m à 26,60 m.

BBH-166



Figure B24. Localisation du Sondage BBH-166.



Figure B25. Caisse du Sondage BBH-166 de 0,00m à 6,10 m.



Figure B26. Caisse du Sondage BBH-166 de 6,10 m à 12,05 m.



Figure B27. Caisse du Sondage BBH-166 de 12,05 m à 18,90 m.

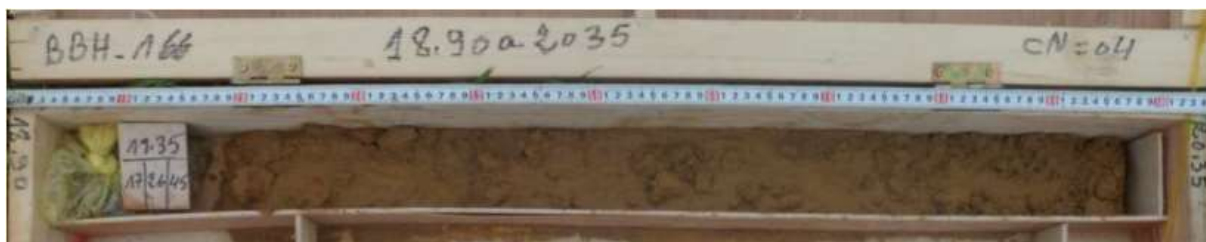


Figure B28. Caisse du Sondage BBH-166 de 18,90 m à 20,35 m.

BBH-168



Figure 29. Localisation du Sondage BBH-168.



Figure B30. Caisse du Sondage BBH-168 de 0,00m à 6,00 m.



Figure B31. Caisse du Sondage BBH-168 de 6,00 m à 13,60 m.



Figure B32. Caisse du Sondage BBH-168 de 13,60 m à 18,20 m.

BB-45



Figure B33. Localisation du Sondage BB-45.



Figure B34. Caisse du Sondage BB-45 de 0,00m à 6,20 m.



Figure B35. Caisse du Sondage BB-45 de 6,20 m à 12,30 m.



Figure B36. Caisse du Sondage BB-45 de 12,30 m à 20,05 m.

BBH-171



Figure B37. Localisation du Sondage BBH-171.



Figure B38. Caisse du Sondage BBH-171 de 0,00m à 8,45 m.



Figure B39. Caisse du Sondage BBH-171 de 8,45m à 13,85 m.



Figure B40. Caisse du Sondage BBH-171 de 13,85 m à 20,60 m.

BBH-172



Figure B41. Localisation du Sondage BBH-172.



Figure B42. Caisse du Sondage BBH-172 de 0,00m à 7,50 m.



Figure B43. Caisse du Sondage BBH-172 de 7,50 m à 14,20 m.



Figure B44. Caisse du Sondage BBH-172 de 14,20 m à 19,70 m.



Figure B45. Caisse du Sondage BBH-172 de 19,70 m à 25,60 m.



Figure B46. Caisse du Sondage BBH-172 de 32,00 m à 25,60 m.



Figure B47. Caisse du Sondage BBH-172 de 25,60 m à 36,00 m.