

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**



Matheus Cavalcanti Mendonça

PARTICIPAÇÃO EM ESTUDOS GEOTÉCNICOS

Recife, 2024

Matheus Cavalcanti Mendonça

Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO DE CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DAS OBRAS DE
ARTE DA PASSAGEM INFERIOR DA RODOVIA DEPARTAMENTAL
RD135 – FRANÇA SEGUNDO OS EUROCÓDIGOS 7 (NF-P 94-270) E 8
(NF-P 06-014)**

O presente projeto faz objeto ao Trabalho de Conclusão de Curso, desenvolvido ao longo de 1 ano, no Polo Regional de Engenharia de Lyon da empresa SNCF Réseau, em Lyon, na França. Tal dissertação se enquadra no caráter de um contrato de aprendizagem/profissionalização, no âmbito do programa BRAFITEC/CAPES na modalidade de dupla-diplomação. Tal modalidade permitiu, após redação e apresentação do presente trabalho à uma banca examinadora, a obtenção do título de Engenheiro Civil e Geotécnico pela École Polytech Grenoble, localizada na cidade de Saint-Martin-d'Hères, França, e de Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco campus Recife. O trabalho foi desenvolvido sob a orientação do Prof. Dr. Florent Vieux-Champagne e do Prof. E coordenador do projeto Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Idioma do trabalho: francês



ÉCOLE D'INGÉNIEUR POLYTECH GRENOBLE – INP, UGA
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E ENGENHARIA CIVIL (GGC)

A comissão examinadora do trabalho de conclusão de curso

PARTICIPAÇÃO EM ESTUDOS GEOTÉCNICOS

defendido por

Matheus Cavalcanti Mendonça

Considerado o candidato

APROVADO

com notas:

14,33/20 na primeira sessão (**Retour d'expérience 1**)

Em Saint-Martin-d'Hères, 09 de janeiro de 2023

e 13,99/20 na segunda sessão (**Retour d'expérience 2**)

Em Saint-Martin-d'Hères, 28 de agosto de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Florent VIEUX-CHAMPAGNE - GRENOBLE INP,
UGA
(orientador)

Prof. Dr. BIÈVRE Gregory- GRENOBLE INP, UGA
(examinador interno)

Eng. LORIS A. – SNCF Réseau
(examinador externo)

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido no contexto do programa BRAFITEC/CAPES na modalidade de dupla-diplomação entre a Universidade Federal de Pernambuco campus Recife e a École d'Ingénieur Polytech Grenoble – INP, UGA localizada na cidade de Saint-Martin-d'Hères, França. Este trabalho foi apresentado como relatório de fim de estudos após a realização de um contrato de profissionalização/aprendizagem tendo como intuito de ser pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Civil e Geotécnico pela Polytech Grenoble. Vale salientar que tal contrato se apresenta como uma das duas alternativas possíveis para o último ano de dupla-diplomação, na qual o estudante alterna períodos entre a universidade e uma empresa contratante. Essa periodicidade é variável e permite ao aluno alternar teoria e prática, assim ajudando-o na consolidação de um aprendizado mais orgânico além de uma preparação do mesmo para sua inserção no mercado de trabalho.

O documento intitulado « **Participação em Estudos Geotécnicos** » foi elaborado em duas partes, sendo ambas apresentadas e julgadas por uma banca examinadora, uma no fim do primeiro semestre (09/01/23) e a segunda no fim do segundo semestre letivo (29/08/23). O contrato de profissionalização/aprendizagem foi realizado na empresa SNCF Réseau, sediada em Lyon, na França.

Todas as informações coletadas na pesquisa são estritamente confidenciais. Assim, com o intuito de preservar os direitos da empresa contratante, pseudônimos foram utilizados.

2 OBJETIVOS

Os objetivos durante o contrato de aprendizagem foram fornecer suporte aos estudos geotécnicos realizados no campo das obras de arte contribuindo para a elaboração de soluções em obras de contenção e fundações, bem como na análise de riscos naturais. Tudo isso, regido conforme a versão atualizada da norma Europeia vigente na França, o Eurocódigo 7 (NF-P 94-270), que trata as estruturas geotécnicas e o Eurocódigo 8 (NF-P 06-014), que trata os riscos sísmicos.

No entanto, o objetivo principal deste estudo gira em torno da eliminação definitiva da passagem cruzada PN65 e à substituição da passagem cruzada PN66. Tudo isso, pela criação de uma ponte ferroviária para restabelecimento da linha férrea e pela criação de uma Ponte Rodoviária para restabelecer o Caminho da Barlière (74), paralelo às linhas férreas e servindo a estação de Perrignier. Os dois dispositivos permitem a passagem inferior da RD135. Assim, para que tal fosse possível, um estudo prévio a fim de propor e dimensionar diferentes soluções de contenção e fundação para estabilizar as porções de terra à montante foi conduzido.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo foi fundamentada em revisões da literatura, com destaque para as normas europeias de aplicação vigentes na França : Eurocódigo 7 (NF-P 94-270) e Eurocódigo 8 (NF-P 06-014). Normas internas pertencentes ao acervo da SNCF também foram utilizadas. Ademais, para a análise dos esforços solicitantes, estados limites (ELU e ELS) e estabilidade das obras de contenção, foram utilizados os softwares K-RÉA e DPI-Vocal.

4 RESULTADOS

Com base nos objetivos citados, este trabalho resultou na concepção de uma obra de grande porte contendo diferentes soluções que variaram ao longo da passagem inferior. Assim, foi apresentado em os cálculos justificativos e uma perspectiva do projeto, em que pode-se dividir a solução global em duas partes : contenção provisória e contenção definitiva. A primeira se fez presente devido a qualidade do solo e certas exigências internet e quanto o método construtivo interno à companhia. Como solução provisória, cortinas de estaca-pranchas foram idealizadas. Tais, posteriormente concretadas, assumirão o cunho definitivo juntamente à instalação de muros de arrimo nos extremos da passagem e paredes de estacas secantes autoestáveis e mantidas por estruturas metálicas na região central.

5 CONCLUSÃO

A defesa do relatório de fim de estudos ocorreu nas datas 09 de janeiro de 2023 e 28 de agosto de 2023, onde cada uma das notas foi calculada a partir da média aritmética dos seguintes critérios: apresentação, relatório final e desenvolvimento do estudante durante o estágio. Com isso, a banca julgadora concedeu uma pontuação final de 14,33/20 para a primeira e de 13,99 para segunda, indicando a **aprovação** do estudante.

Société Nationale des Chemins de fer en France – Prily OA
133 Boulevard de la Bataille de Stalingrad
69625 Villeurbanne

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1
Département Géotechnique et Génie Civil



Elève : CAVALCANTI MENDONÇA Matheus

Tuteur enseignant : VIEUX-CHAMPAGNE Florent

Tuteur entreprise : CHAVE PARISSET Cécile

GGC5 - PRO

Table des matières

Présentation de l'entreprise d'accueil et domaine d'activité.....	7
Intégration dans l'entreprise.....	8
Missions confiées et travaux réalisés.....	9
1. <i>Passage à niveau 18.....</i>	9
2. <i>Remblai de Lissieu.....</i>	9
3. <i>Implantation d'une sous-station à Saint-Priest.....</i>	9
Fil rouge.....	10
<i>Choix du sujet.....</i>	10
<i>Contexte.....</i>	11
Contexte environnemental actuel dans le domaine de la géotechnique.....	11
Contexte environnemental chez ABCD.....	11
<i>Mise en place du fil rouge.....</i>	12
Phase de préparation du chantier.....	12
Phase de production.....	12
<i>Analyse des résultats.....</i>	17
Hypothèse de base.....	17
Détails des calculs.....	18
<i>Résultats obtenus.....</i>	19
<i>Comparaison CEM I/ CEM III.....</i>	21
<i>Bilan du fil rouge.....</i>	23
Perspectives pour la deuxième période.....	24
Références bibliographiques.....	25
Annexe 1 : Enchaînement des missions chez SNCF Réseau.....	26
Annexe 2 : Plan d'implantation de sondages.....	27
Annexe 3 : Profil 101+560 - Relevé piézométrique annuel et suivi des mesures d'écart altimétrique.....	28

Présentation de l'entreprise d'accueil et domaine d'activité

En tant qu'étudiant de la troisième et dernière année en Géotechnique et Génie Civil à Polytech Grenoble, j'ai eu la possibilité de poursuivre, la filière professionnelle. Cette formation en apprentissage concède aux étudiants l'opportunité de travailler en entreprise parallèlement à la formation et ainsi de consolider les compétences lors du parcours à l'école.

Depuis le 19 septembre de 2022 je fais partie d'une des filiales de la Société Nationale de Chemin de fer en France –, la SNCF Réseau. L'entreprise s'occupe de gérer, exploiter, maintenir et développer le réseau ferré français et donc réaliser les études et travaux nécessaires à son entretien. Au sein de la SNCF Réseau (Figure 1). Ces dernières se répartissent les différentes tâches que doit exécuter la SNCF Réseau. Il existe 12 Directions Générales. L'une des Directions, la Direction Générale Industrielle et Ingénierie (DGII), a pour objectif, réaliser les études et d'assurer le management de projets relatifs aux infrastructures fixes du réseau ferroviaire français.

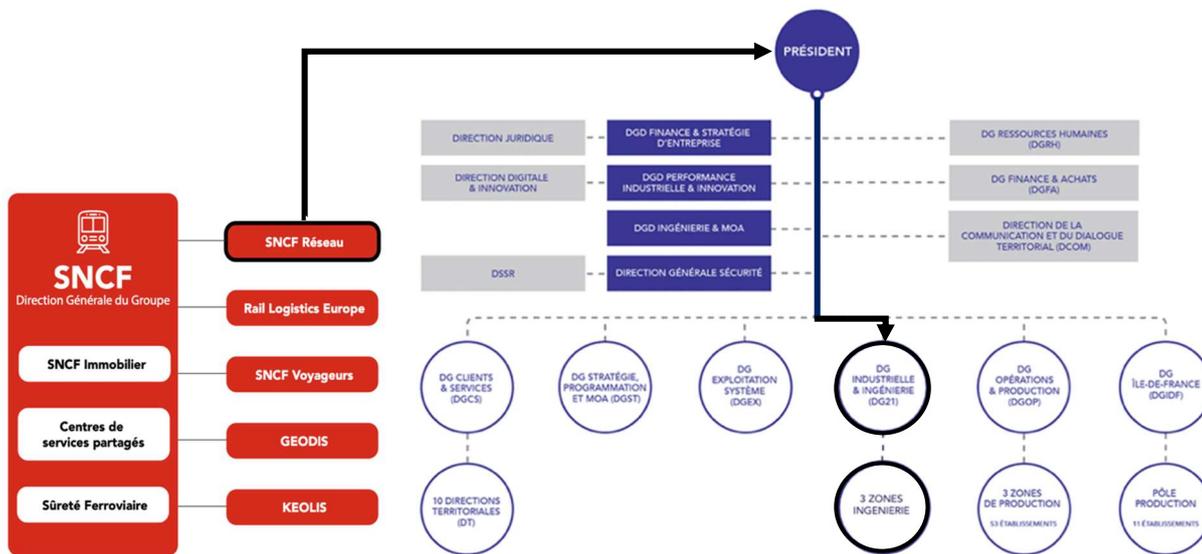


Figure 1 : ramification du groupe SNCF

Elle est composée par 3 sous-directions et 3 Directions Zone Ingénierie, les DZI's. Ces 3 dernières divisent la carte la France (hors Ile-de-France) selon la Figure 2. La ville de Lyon, où se situe le Pôle Régional Ingénierie (PRI) de Lyon, appartient à la DZI Sud-Est. Elle a pour rôle, assurer la conduite d'opérations de développement, de régénérations et de maintenance ainsi que les missions d'ingénierie de conception et de surveillance du patrimoine. Elle organise la cohérence des priorités entre Agence Projets et PRI et leur apporte les soutiens nécessaires à l'exécution de leurs missions.

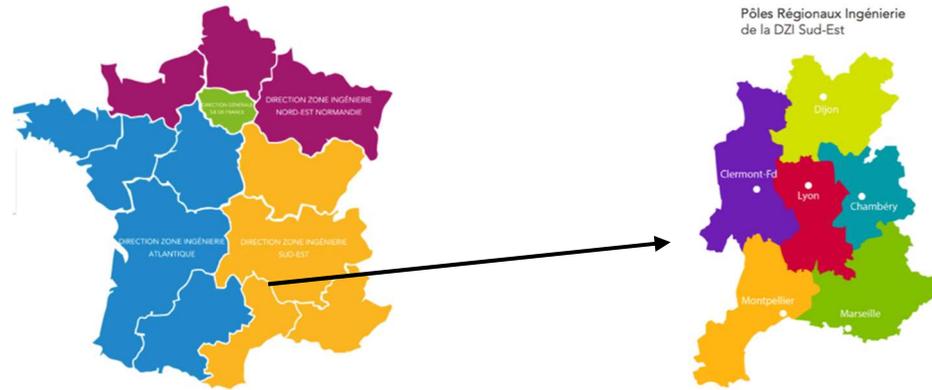


Figure 2 : DZI's et les PRI's de la DZI Sud-Est

Les pôles régionaux portent la pleine responsabilité des études de conception qui leur sont confiées par les Agences projets et d'autres clients (internes ou externes). Ils réalisent les essais complexes des nouvelles installations ferroviaires et assurent des prestations d'assistance et d'expertise pour la Direction Zone Production (DZP).

Au sein du PRI de Lyon je suis rattaché au groupe Ouvrages d'Art, en charge des études de conception géotechnique et terrassement des Ouvrages en Terre et Ouvrages d'Art du réseau ferré. Ce bureau a deux missions principales : l'assistance de la maîtrise d'ouvrage (MOA majoritairement chez SNCF) comprenant l'acquisition des données géotechniques qui répond aux besoins de tous les corps de métier au sein du Prily et aussi le rôle de MOE études sur toutes les étapes de construction d'un projet (EP, AVP, APO, REA..), selon la loi MOP (Maîtrise d'Ouvrage Publique) (Annexe 1 : Enchaînement des missions chez SNCF).

Quelques chiffres de l'entité SNCF Réseau :

- Responsable pour la gestion de 30 000 à 32 000 km de voies (déjà construites) ;
- Le réseau ferré français (2.600km) est le 4^{ème} plus grand réseau à grande vitesse au monde derrière la Chine, le Japon et l'Espagne ;
- Sont plus de 50 000 collaborateurs chez SNCF Réseau ;
- Et pour l'année de 2022 la société mère SNCF a eu un chiffre d'affaires de 30 milliards d'euros.

Intégration dans l'entreprise

Mes premières semaines chez le PrilyOA – SNCF Réseau se sont bien déroulées. J'ai été vraiment bien accueilli. La bonne adaptation est due surtout grâce à madame CHARPY L. qui m'a fait une présentation générale sur le groupe où je travaille (organigramme, explications sur le rythme de travail et des règles de sécurité propre au travail en domaine ferroviaire) et à ALBERT L., mon tuteur remplaçant pour cette période, qui dès le premier jour s'est rendu disponible et m'a aidé aussi bien sur le volet professionnel que pour des sujets personnels (comme mon installation dans une ville où je ne connaissais personne).

Je suis également reconnaissant envers BEAUFRERE C., chargée de la surveillance des Ouvrages en Terre, qui pendant les deux premières semaines, m'a introduit quelques notions de bases chez SNCF Réseau ainsi que le sujet du déblai de Pierrelatte (26). Il s'agit d'un ouvrage en terre sensible où le 14/09/2022 il s'est passé un glissement en raison de fortes pluies dans la région. L'occasion de me rendre sur terrain m'a fait mettre en pratique les mesures de sécurité relatives à SNCF et m'a permis d'appréhender la nécessité de la méthode observationnelle de terrain permettant de dresser une première analyse géotechnique des phénomènes ayant conduit à une instabilité, d'établir un diagnostic et d'échanger sur les possibles solutions de confortement et amélioration de sol à mettre en œuvre sur le site afin de protéger les installations ferroviaires.

Missions confiées et travaux réalisés

Tout d'abord, la plupart de mes activités sont au bureau et dès que nécessaire, des visites sur terrain ont été programmées afin de dresser une meilleure compréhension sur la complexité et les contraintes des missions.

1. Passage à niveau 18

Il s'agit d'un sujet en partie traité par l'alternant précédent. Pour cette mission mon rôle a été de valider le dimensionnement d'un mur poids (en Blocs Titans) choisi comme solution de soutènement du pied de talus d'un remblai ferroviaire ayant été soumis à un glissement soudain et de produire la note de calcul correspondante. Le dimensionnement devait permettre de justifier la stabilité externe (excentrement, glissement et portance), stabilité générale (justification de non-glissement du talus sur Talren) et stabilité interne (renversement bloc sur bloc) et doit se joindre au DOE (dossier d'ouvrage exécuté).

D'après les hypothèses de conception selon l'EUROCODE 7 et le modèle géotechnique préétabli, j'ai pu calculer et puis comparer pour enfin commencer la rédaction. Envisageant une meilleure compréhension j'ai utilisé les logiciels AutoCAD (pour les schémas plus visuels) et Excel (pour les calculs de stabilité externe). C'était une bonne occasion pour entraîner mes compétences rédactionnelles et surtout pour mettre en pratique les connaissances développées à Polytech.

2. Remblai de Lissieu

Pour le deuxième sujet, j'ai pu prendre connaissance d'un ouvrage en terre sensible suivi depuis les années 80 sur lequel SNCF Réseau envisage des travaux d'urgence à l'été 2023, grâce à une opportunité liée à la fermeture de la ligne ferroviaire empruntant cet ouvrage. Il s'agit du remblai de Lissieu, situé à 15km de Lyon (69) et qui comprend trois contraintes principales : il s'agit d'un remblai dissymétrique sur versant (remblai/déblai) (1) situé en sortie de tunnel (2) et avec une constitution de sol majoritairement argileux (3). Les tunnels ont pour nature de capter des eaux et compte tenu du positionnement du remblai, il pourrait être en partie alimenté par les eaux rejetées du tunnel ainsi que par les écoulements de versant, ce qui peut jouer sur la stabilité générale du remblai. La constitution argileuse (matériau très sensible à l'eau) entraîne des problèmes de nivèlement de la voie puisque la saison a une forte influence sur les réactions au gonflement pendant l'hiver et au tassement pendant l'été, avec cependant une tendance générale au tassement (Annexe 2 : Plan d'implantation de sondages et Annexe 3 : Profil 101+560 - Relevé piézométrique annuel et suivi des mesures d'écart altimétrique).

Pour m'imprégner du sujet j'ai pris connaissance de la fiche signalétique de cet ouvrage, et travaillé sur la lecture d'un rapport G2 PRO pour en faire son analyse et la rédaction d'une fiche d'observations. Compte tenu des problématiques du remblai de Lissieu, pour l'année de 2023 je serai chargé de la rédaction du DCE (dossier de consultation des entreprises – Janvier 2023) ainsi que l'assistance à Maitrise d'œuvre Travaux pour le suivi des études d'exécutions (VISAS) et pour la réalisation des travaux prévus pour l'été 2023.

Afin de comprendre le comportement du remblai j'ai eu l'occasion de commencer des calculs aux éléments finis pour étudier les phénomènes de déformations liées au tassement. Pour ce dernier, j'ai eu l'idée de le calculer selon de différents types de modèles de comportement de sol, c'est-à-dire Mohr-Coulomb et Hardening Soil. L'objectif était, faire un rapport entre les résultats obtenus lors de leurs modélisations sur Plaxis afin d'arriver à une conclusion sur les différences et applicabilités. Cependant, je n'ai pas pu finir les calculs avant le rendu de ce premier retour. Il sera complété et présenté donc dans mon deuxième retour en août de 2023.

3. Implantation d'une sous-station à Saint-Priest

Enfin, j'ai participé aux études d'Avant-Projet/Projet (APO) pour la réalisation des terrassements d'une plateforme liée à l'implantation d'une nouvelle sous-station (Poste d'injection électrique) sur la commune de Saint-Priest (69). Le projet a pour but, améliorer la capacité et la performance du Nœud ferroviaire Lyonnais (NFL).

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

Le site étudié est principalement plat et dans une zone industrielle goudronnée ce qui en fait un contexte favorable, avec des accès à la future installation déjà existants. Cependant, la zone d'implantation a une contrainte : le fait d'être enclavée entre un poste de mise en parallèle (qui permet la mise en parallèle des poteaux catenaires des 2 voies) et des bombonnes de gaz (qui permettent le réchauffage d'aiguilles pendant l'hiver lorsqu'il neige. Les aiguilles sont des branchements qui permettent le changement de convoi de voie). Cet enclavement rend une difficulté lors des travaux de déblaiement. Mes interprétations d'après une campagne de reconnaissance G2 AVP provisoire, ont retenu que pour un déblaiement à 1,55m de profondeur par rapport au terrain actuel, le sol atteindrait les objectifs attendus qui sont eux :

1. Une plateforme à la coté 193,30m (1m sous le TN) ;
2. Une plateforme réalisée en matériaux granulaires ;
3. Un objectif de portance à atteindre sur la couche de forme du bâtiment supérieur à 50MPa.

Pour cela, j'ai choisi de faire un déblaiement jusqu'à 1,55m en différentes pentes en raison des contraintes périphériques du projet. Pour les fournitures extérieures, le dimensionnement selon le GTR (guide de terrassement routier) a été fait et j'ai obtenu comme résultat :

- 0,40m d'un matériau avec une granulométrie 0/80 pour la couche de forme ;
- 0,15m d'un matériau avec une granulométrie 0/20 pour la couche de réglage.

La prise en main de ce dossier, ne présente pas de complexité géotechnique importante, mais m'a permis de comprendre et d'obtenir la vision du dossier type d'études maîtrise d'œuvre (planification, estimation d'un projet, notice descriptive et les plans de réalisation) et d'appréhender les attentes et des moyens à mettre en œuvre pour répondre à la commande du maître d'ouvrage. Ce dossier m'a aussi permis de me préparer pour l'année 2023 quand je serai chargé d'une étude géotechnique complexe pour la création et la mise en œuvre d'un ouvrage de type Pont Rail.

Fil rouge

Choix du sujet

Le changement climatique et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre représentent des défis majeurs pour l'humanité au XXIe siècle. Les experts scientifiques actuels ne cessent de mettre en garde contre l'urgence de la situation, soulignant que la transformation de nos modes de vie et de consommation est cruciale pour l'avenir. C'est la raison pour laquelle j'ai considéré primordial d'incorporer cette problématique en tant qu'élément central de mon travail rédigé après mon retour au Brésil. Le projet prendra en compte les données d'une entreprise située en France, mais pour des raisons de confidentialité, le nom de l'entreprise sera substitué par un pseudonyme.

Mon sujet de recherche était le suivant : *Comment peut-on diminuer l'empreinte carbone d'un projet de génie civil impliquant des travaux de consolidation par ancrages géotechniques ?*

La méthodologie prévue :

- Exploration bibliographique et documentaire à partir des ressources internes de l'entreprise et disponibles en ligne.
- Identification des points critiques du projet de construction de l'entreprise ABCD.
- Consultation des fournisseurs, des travailleurs et de la direction pour recueillir leurs opinions sur l'impact environnemental.
- Discussion avec les ingénieurs en santé, sécurité, environnement et qualité (QSHE), la

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

direction et les chefs de chantier concernant ces retours.

- En fonction des commentaires reçus, proposition de pistes de réflexion pour renforcer la sensibilisation à cette question (suggestion d'une approche RSE pour l'entreprise dans le but de réduire l'empreinte carbone).
- Sélection des outils à déployer sur le chantier en vue de la préservation de l'environnement.
- Proposition d'alternatives et de solutions envisageables compte tenu des conditions spécifiques du chantier.
- Évaluation de l'empreinte carbone du chantier.

Pour accomplir cette tâche, j'ai bénéficié de l'assistance et du soutien de l'équipe QSHE d'ABCD, qui a dirigé ce travail tout au long de ma période de formation lors des réunions.

En outre, j'ai eu accès à la documentation environnementale d'ABCD ainsi qu'à un outil interne de calcul de l'empreinte carbone.

Contexte

Contexte environnemental actuel dans le domaine de la géotechnique

En raison de notre formation en génie civil et en géotechnique, nous sommes chargés de concevoir ou de superviser la construction de divers ouvrages tels que des pieux, des tirants d'ancrages, des fondations superficielles ou profondes, entre autres.

L'un des principaux défis auxquels nous sommes confrontés réside dans l'utilisation intensive d'un composant essentiel à la fabrication du béton ou du coulis : le ciment.

En effet, le ciment est reconnu comme étant un matériau extrêmement nuisible pour l'environnement..

Pour vous donner une idée, en France, les 27 usines de production de ciment représentent à elles seules 2,5% des émissions de CO₂ du pays. À l'échelle mondiale, le ciment contribue à hauteur de 7% aux émissions de gaz à effet de serre.

De plus, le ciment est le matériau le plus largement utilisé sur Terre après l'eau, ce qui souligne l'importance majeure de cette problématique environnementale pour notre domaine. Une analyse plus détaillée est présentée dans la section consacrée à la phase de production.

Contexte environnemental chez ABCD

Comme d'autres leaders du secteur du génie civil en France, ABCD s'est également engagé en faveur de la lutte contre le changement climatique. Dans ce contexte où les enjeux climatiques sont majeurs, l'entreprise accorde une grande importance aux alternatives aux énergies fossiles, à l'utilisation de ciment à faible teneur en carbone, à l'éco-conduite et à la sensibilisation des équipes.

L'entreprise s'est fixé pour objectif de se conformer aux accords de Paris de la COP21 en 2015, qui visent à limiter le réchauffement climatique à 2 degrés Celsius d'ici la fin du siècle, par rapport à une augmentation de 5 degrés prévue si aucune mesure n'est prise. À cette fin, ABCD s'est engagé à réduire ses émissions de CO₂ de 30% d'ici 2030 et de 46% d'ici 2050, par rapport aux niveaux d'émissions de 2019.

Pour information, en 2019, le bilan des émissions de gaz à effet de serre s'élevait à 410 414 tonnes de CO2 pour l'ensemble du groupe.

ABCD est confronté au défi de trouver le bon équilibre entre la réduction de ses émissions de gaz à effet de serre tout en continuant à assurer sa croissance et à réaliser des bénéfices.

Mise en place du fil rouge

Phase de préparation du chantier

Durant ma troisième semaine chez ABCD, j'ai identifié le fil conducteur de mon projet, juste au moment où j'ai été informé du chantier sur lequel je devais travailler. Au cours de la semaine suivante, tout en m'occupant des tâches de préparation de ce chantier, je me suis efforcé de trouver des axes de réflexion en relation avec mon sujet. Cela a suscité des interrogations avec lesquelles j'ai pu discuter avec l'ingénieur en charge des travaux :

- *Est-il possible d'employer le ciment à faible teneur en carbone en tant qu'option de remplacement?*

Le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) donne les directives à respecter, et le choix du ciment est déterminé par les normes en vigueur. En outre, le ciment pour la première phase a déjà été commandé. Cependant, il sera envisageable d'examiner cette question pour la phase 2 du chantier. Il sera nécessaire de comparer les caractéristiques, l'impact sur les émissions de CO2 et les prix.

- *Est-il envisageable de connecter l'ensemble du matériel électrique au réseau électrique préexistant du port afin de se passer de l'utilisation d'un groupe électrogène ?*

Pour le petit équipement, c'est réalisable, mais malheureusement, ce ne sera pas faisable pour la centrale d'injection et la base vie, car ils consomment trop d'énergie, et le réseau électrique n'a pas une capacité suffisante.

- *Est-il envisageable d'utiliser des objets réutilisables comme des tasses et des gourdes pour diminuer la quantité de déchets générée ?*

Absolument, cela peut être facilement réalisé. Nous prévoyons d'installer une fontaine à eau et de fournir à chaque membre de l'équipe du chantier une gourde et une tasse personnalisée pour remplir, afin de réduire l'usage excessif de gobelets ou de bouteilles en plastique.

En outre, d'autres idées que nous avons envisagées comprennent la réduction de la location de véhicules au strict minimum (uniquement un fourgon pour les déplacements du personnel ou du matériel entre la base de vie et le chantier), et la priorisation de l'utilisation de nos propres véhicules déjà disponibles sur place.

Après cette première discussion concernant mon projet principal, j'étais plutôt satisfait, car l'entreprise semblait être réceptive à l'idée de tester de nouvelles approches sur les prochains chantiers.

Phase de production

Le chantier a débuté le 15 janvier en collaboration avec le sous-traitant EFGH.

Malheureusement, dès le début, j'ai remarqué des manquements aux engagements pris par l'entreprise EFGH.

Cela incluait notamment le gaspillage de bouteilles d'eau et le manque de tri des déchets.

De notre côté, nous avons mis en place une fontaine à eau avec des gourdes et des tasses individuelles. En supposant que chaque personne intervenant sur le site consomme environ 2 bouteilles d'eau de 50 cl par jour et utilise 2 gobelets pour le café, voici le calcul effectué :

$$2 \text{ Bouteilles} \times 8 \text{ Personnes} \times 60 \text{ jours} = 960 \text{ bouteilles /gobelets}$$

Ce qui équivaut à une réduction de 960 bouteilles d'eau et de 960 gobelets. Sachant qu'une bouteille d'eau en plastique a un impact de 129 grammes de CO₂, nos mesures ont permis une économie de 123 kg de CO₂. Bien que cela puisse sembler minime, chaque geste compte, même les plus petits.

Afin de mieux comprendre les opinions des acteurs du chantier sur les questions environnementales, j'ai mis en place un petit questionnaire anonyme que j'ai distribué. Neuf personnes ont été sondées, dont un conducteur de travaux, un chef de chantier, un stagiaire, deux foreurs, un centraliste, deux aides-foreurs et un intérimaire.

Voici les questions posées :

- 1) Êtes-vous préoccupé par le changement climatique ? Sur une échelle de 1 à 10.
- 2) Pratiquez-vous le tri des déchets chez vous ?
- 3) Cherchez-vous à réduire votre consommation ?
- 4) Accordez-vous de l'importance à l'origine des produits que vous achetez ?
- 5) Êtes-vous favorable à des changements dans nos habitudes pour préserver la planète ? Sur une échelle de 1 à 10.

Initialement, cela a été un peu difficile, car certains membres de l'équipe étaient méfiants à l'égard de mes questions. Ils ont pensé qu'il s'agissait d'une enquête de la part d'ABCD les concernant. J'ai dû leur expliquer à plusieurs reprises que cela était uniquement destiné à mon projet de fin d'études et que les réponses étaient bien anonymes.

En analysant les retours, j'ai obtenu :

La question 1 a obtenu une moyenne de 8,6/10. Cependant, étant donné ce que j'ai remarqué sur le chantier et le niveau de méfiance observé, personnellement, je remets en question la fiabilité de ce résultat.

Le Tableau 1 récapitule les aspects positifs et négatifs relevés lors du sondage.

Points positifs	Points négatifs
Pratiquement la totalité des individus effectuent un tri de leurs déchets (8 personnes sur 9 interrogées).	La plupart des personnes interrogées (6 sur 9) ne prêtent pas attention à l'origine des articles qu'ils achètent.
L'opinion générale est que perturber nos routines quotidiennes est bénéfique.	Sur 9 personnes, seulement 2 font attention à réduire leur consommation.

Tableau 1 : Bilan retour du sondage

À première vue, bien que tout le monde ne fournisse pas les efforts attendus, je remarque néanmoins un début

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

de prise de conscience. Le véritable défi consiste à instaurer un engagement environnemental au sein d'ABCD, allant du conseil d'administration aux travailleurs sur le chantier. Réduire l'empreinte carbone d'un chantier nécessitera davantage de campagnes de sensibilisation auprès du personnel et un changement des habitudes ancrées depuis des décennies dans l'entreprise.

Comme mentionné dans la section sur le contexte environnemental actuel en géotechnique, le ciment est un matériau de construction très polluant. Cependant, se passer complètement de ciment pour réduire les émissions de CO₂ n'est pas tout à fait juste. En effet, le clinker, principal composant polluant du ciment, est essentiel dans la composition du matériau car il agit comme un activateur hydraulique nécessaire au développement des propriétés mécaniques du béton, permettant ainsi la construction de structures durables.

Le CEM I, type de ciment le plus couramment utilisé dans la construction en raison de ses propriétés mécaniques, est composé à 95% de clinker. C'est pourquoi des recherches ont été menées ces dernières années pour réduire la proportion de ce composant dans les ciments traditionnels. Au cours de mes recherches, j'ai découvert le LC3 (Ciment de calcaire argileux calciné), qui contient près de deux fois moins de clinker que le CEM I. (Consultez la Figure 3 pour plus de détails sur sa composition).

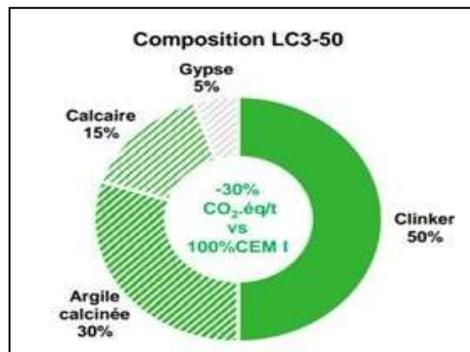


Figure 3 : Composition du ciment LC3

Au premier abord, on pourrait supposer que puisque le clinker est le composant prédominant du ciment, il a une influence significative sur ses propriétés mécaniques. Cependant, comme le montre le diagramme de la Figure 4, les propriétés mécaniques du LC3 sont comparables à celles du CEM I.

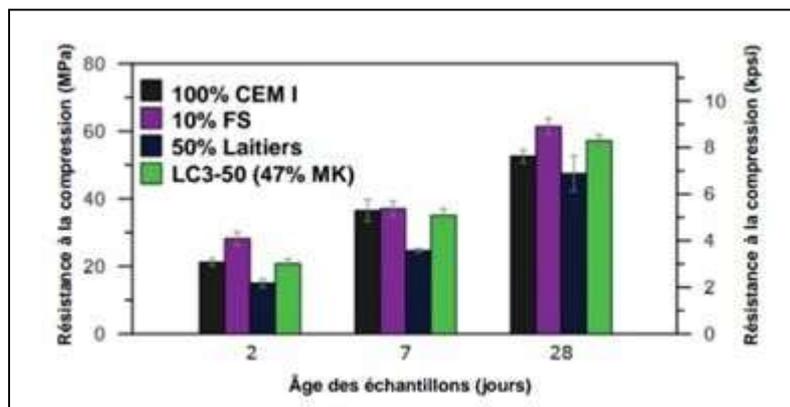


Figure 4 : Résistance mécanique des différents types de béton

Avec une empreinte carbone réduite de moitié, comme indiqué dans la Figure 5 ci-dessous :

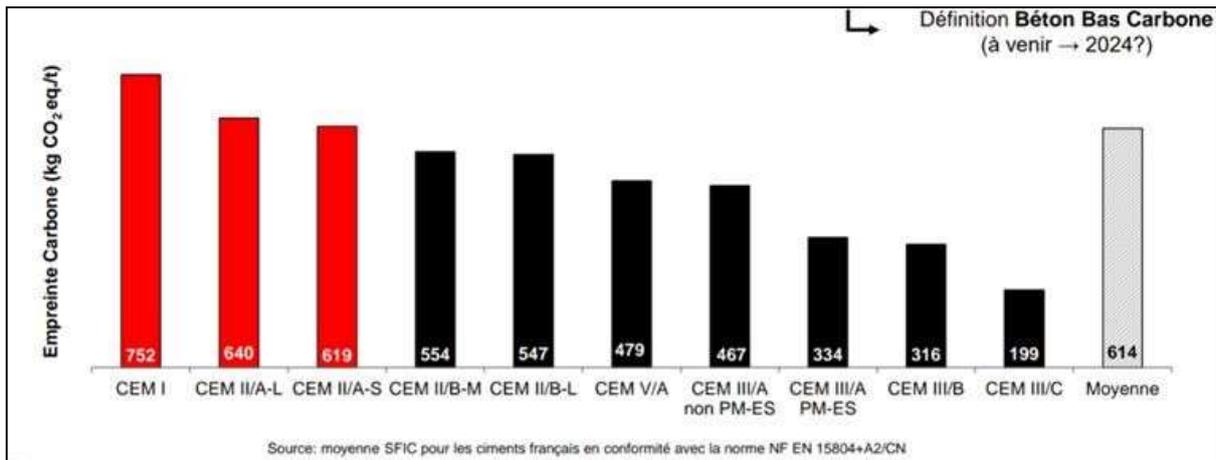


Figure 5 : Empreinte carbone des différents types de ciment

Cela semble aller à l'encontre de ce qui a été mentionné dans le paragraphe précédent. Comment peut-on expliquer cette apparente contradiction ?

Pour explorer cette question, j'ai consulté des thèses du professeur universitaire canadien, M. GAGNÉ R., spécialisé dans les bétons et les ciments pour les ouvrages de construction, et leur rôle dans la prévention de la détérioration des structures. M. Gagné est directeur de thèse à l'Université de Sherbrooke et a co-écrit des ouvrages tels que "Recommandations sur la limite du facteur d'espacement, la température critique lors de l'hydratation du ciment et la résistance à l'écaillage du béton des ouvrages d'art" (2016) et "Étude de l'influence de la qualité du granulat sur la résistance à l'écaillage du béton" (2021).

En résumé, l'empreinte carbone des ciments Portland est directement liée à leur contenu en clinker. Outre le clinker, d'autres matériaux contribuent également à la résistance mécanique des ciments, tels que les calcaires, les laitiers, les pouzzolanes naturelles calcinées, les cendres volantes, etc.

Concernant le LC3, l'interaction entre l'argile calcinée et le calcaire finement broyé favorise la formation de carboaluminates, permettant ainsi de compenser la réduction de la quantité de clinker et d'obtenir une résistance mécanique similaire à celle des CEM I, avec une teneur en clinker considérablement réduite.

Cependant, malgré ces avantages, l'utilisation de ciments bas carbone représente moins de 4,5% (ciments spéciaux et divers) de l'utilisation totale des ciments dans la construction en France, comparativement à 23,9% pour les CEM I (voir Figure 6).

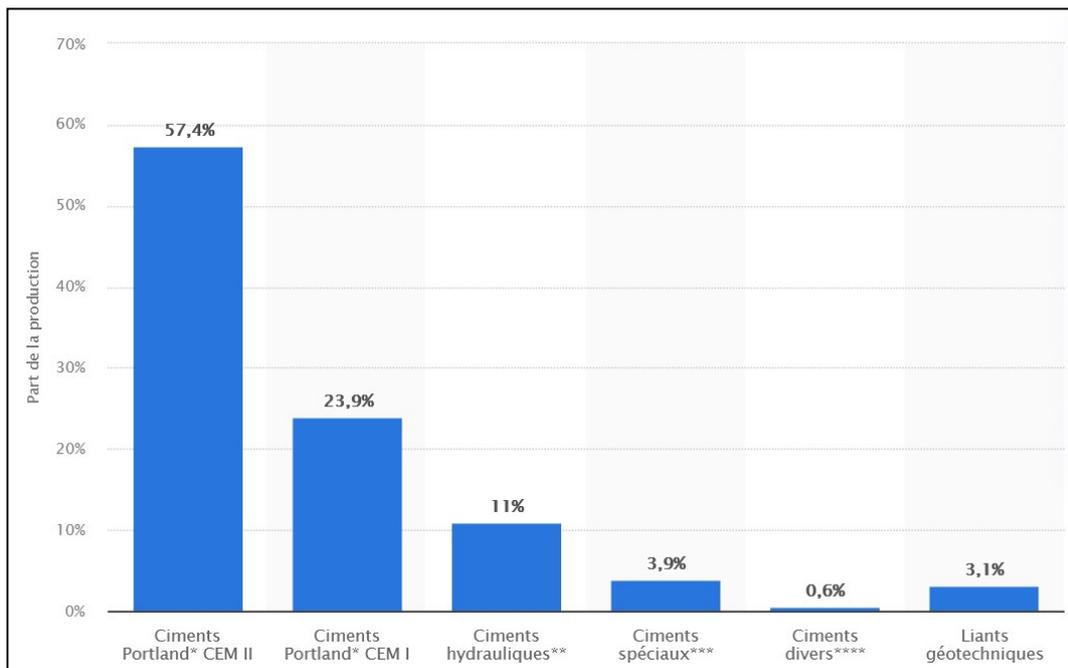


Figure 6 : Part de la production des différents types de ciment

J'ai identifié plusieurs facteurs potentiels pour expliquer cela :

- Les clients préfèrent se conformer strictement au Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) et ne souhaitent pas s'embarrasser de modifier une formule qui a fait ses preuves.
- Les considérations financières jouent un rôle important.
- Le changement de fournisseurs implique de rompre des contrats avantageux négociés depuis plusieurs années.
- Certains projets peuvent ne pas convenir au ciment bas carbone.

Lors d'une réunion en début novembre avec les ingénieurs en Qualité, Sécurité, Environnement (QSE) et le conducteur de travaux, j'ai suggéré une alternative à faible empreinte carbone pour la seconde phase du projet, en remplaçant le traditionnel CEM I par un ciment moins polluant. Les principaux défis étaient de trouver une option abordable, adaptée à l'environnement (pour les tirants d'ancrage) et offrant des propriétés mécaniques suffisamment élevées.

J'ai effectué des recherches approfondies sur les principaux fournisseurs de ciment en France afin de trouver une alternative répondant aux spécifications du CCTP. J'ai choisi le CEM III/B 42,5 -LH/SR PM NF fourni par IJKL. Ce ciment présente plusieurs avantages :

- Il est conçu pour les travaux de soutènement conformément à la norme française NF P 15-317 et résiste aux sulfates selon la norme NF EN 197-1. De plus, il convient aux classes d'environnement de la norme NF EN 206/CN : X0 (sans risque de corrosion).
- Son empreinte carbone est inférieure de 58 % à celle d'un CEM I.
- Il offre des résistances mécaniques à jeune âge et à 28 jours adaptées (42,5 MPa contre 25 MPa imposés par le CCTP).

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

En ce qui concerne les coûts, j'ai pris contact avec les fournisseurs locaux autour du chantier afin d'obtenir le meilleur prix possible. Après négociation, j'ai réussi à obtenir un prix de 0,25 euro par kilogramme, comparé à 0,21 euro pour le CEM I (soit environ 20% plus cher).

Pour évaluer l'impact total sur le coût supplémentaire que l'utilisation de ce ciment entraînerait pour un tel projet, j'ai effectué le calcul suivant :

- 40 tirants doivent être réalisés lors de la seconde phase.
- Chaque tirant nécessite un volume de coulis de scellement d'environ 600 litres. Ce coulis de scellement nécessite 32 sacs de ciment de 25 kg, soit 800 kg de ciment par tirant.

Donc, $800 \times 40 = 32\ 000\ kg = 32\ T$

Pour un CEM I : $32\ 000 \times 0,21 = 6720\ euros$

Pour un CEM III : $32\ 000 \times 0,25 = 8000\ euros$

Cela équivaut à un écart de 1280 euros. Étant donné que cette phase était estimée à environ 300 000 euros, cela représente 0,42% du coût total.

Malgré la faible incidence financière de cette décision, le client a choisi de décliner notre proposition de changer de ciment, justifiant leur choix par leur préférence pour le respect strict du CCTP.

Cette décision m'a déçu, soulignant le fait que malgré les efforts déployés, le secteur de la construction a encore beaucoup à faire en termes de sensibilisation environnementale.

Cependant, je n'ai pas laissé cette déception m'arrêter, et j'ai continué à explorer d'autres possibilités d'amélioration pour réduire l'empreinte carbone globale.

Analyse des résultats

Pour évaluer l'empreinte carbone du chantier de la phase 1, j'ai utilisé une calculatrice interne mise à disposition par ABCD. Cet outil prend en considération diverses données telles que les modes de transport utilisés (voitures, trains, etc.), la consommation de matériaux de forage (acier, béton, coulis, etc.) ainsi que les ressources consommées (eau, gaz, électricité, essence, GNR). De plus, il fournit des informations sur les émissions de CO₂ de référence des différents matériaux.

Hypothèse de base

Pour obtenir une estimation réaliste et conforme à la réalité, j'ai dû prendre en considération plusieurs hypothèses dans le processus de calcul :

- Pour la distance parcourue hebdomadairement par les ETAM/Cadres, j'ai pris en compte la distance entre leur domicile et le chantier, à savoir : Saint-Étienne/Marseille, Bourgoin-Jallieu/Marseille, et Nîmes/Marseille, soit un total de 1614 km aller-retour.
- La consommation hebdomadaire de GNR a été calculée à partir de la consommation totale sur la phase 1, soit 15985 L, divisée par 7 pour obtenir 2283 L.
- La consommation d'essence a été arrondie à 8 L/100 km, ce qui équivaut à une consommation hebdomadaire de 129 L.

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

- Le poids total des barres d'acier a été estimé à 7,2 tonnes, calculé en considérant les dimensions des barres et la durée du chantier.
- La consommation de gaz a été estimée à une grande bouteille de 13 kg.
- La consommation d'électricité de la base vie a été évaluée à 16,5 kWh/jour.
- Pour la consommation d'eau, j'ai pris en compte la quantité nécessaire pour le coulis de chaque forage ainsi que 5 m³/semaine pour les besoins quotidiens (nettoyage du site, de la centrale et des foreuses, etc.), soit un total de 55,8 m³.
- La consommation totale de coulis a été calculée à partir de 630 L par forage multiplié par 52, ce qui équivaut à 32,8 m³.
- Pour les personnes n'ayant pas de véhicules, la distance en train entre Marseille/Toulouse et Paris/Marseille a été considérée, soit un total de 2350 km aller-retour.
- La distance parcourue par les compagnons entre leur domicile et le chantier a été estimée à 1500 km.
- Enfin, la quantité totale de déchets dangereux et inertes a été évaluée à 1 tonne et 5 tonnes respectivement.

Détails des calculs

En utilisant les hypothèses énoncées précédemment, ainsi que la calculatrice interne et les documents internes concernant l'environnement de l'ABCD, j'ai pu calculer les résultats suivants :

1. La consommation moyenne d'essence est de 8 litres pour chaque 100 kilomètres, avec une durée de chantier de 7 semaines et une distance totale parcourue par les cadres de 1614 kilomètres.

Cela entraîne une consommation totale d'essence de :

$$1614 * \frac{7 * 8}{100} = 903,84L$$

Cependant, chaque litre d'essence consommé entraîne une émission de gaz à effet de serre équivalente à 2,93 kilogrammes de dioxyde de carbone.

D'où **903,84 × 2,93 = 2.648,2512 kg CO₂**.

1. La quantité de GNR consommée par semaine totalise 2283 litres, ce qui équivaut à 15981 litres au total. Sachant qu'un litre de GNR entraîne une empreinte carbone de 3,25 kg de CO₂, cela nous donne un total de 51938,25 kg de CO₂.

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

2. La consommation d'électricité de la base de vie sur le chantier s'élève à 16,4 kWh par jour, soit un total de 574 kWh pour toute la durée du chantier. En utilisant un coefficient d'émission de 0,08 kg de CO₂ par kWh, le total des émissions de CO₂ s'élève à 45,92 kg.

En ce qui concerne le gaz, une bouteille de 13 kg de butane a été consommée, équivalant à 0,013 m³. Sachant que le coefficient de conversion en kWh est de 13,75 et que le facteur d'émission de CO₂ est de 0,241 kg CO₂ par kWh, nous obtenons un total de 0,0442 kg de CO₂.

3. La consommation totale d'eau pendant la durée du chantier s'est élevée à environ 55,8 m³. En utilisant un facteur d'émission de 0,32 kg de CO₂ par litre, cela équivaut à 17 856 kg de CO₂.

Pour la réalisation des 52 forages, il a été nécessaire d'assembler 9 barres SAS 500 pesant chacune 50 kg. Cela totalise 23 400 kg, soit 23,4 tonnes. En appliquant un facteur d'émission de 3190 kg de CO₂ par tonne, cela donne un total de 74 664 kg de CO₂.

Quant aux émissions de CO₂ liées à la consommation de coulis, elles s'élèvent en moyenne à 787 kg de CO₂ par tonne, ce qui donne un total de 25 813 kg de CO₂.

4. Pour le transport en camion depuis le dépôt jusqu'au chantier, les chargements ont en moyenne un poids de 15 tonnes. Le coût du transport s'élève à 5000 euros, pour une distance parcourue de 70 km en une heure, avec un tarif horaire de 120 euros. En utilisant un facteur d'émission de 0,42 kg de CO₂ par kilomètre, le total des émissions est calculé comme suit :

$$\frac{5000}{120} * 70 * 15 * 0,42 = 18.375 \text{ kg } CO_2$$

Pour la phase de retour et le transport du matériel du chantier vers le dépôt, les calculs et le résultat restent identiques, aboutissant à une émission de 18 375 kg de CO₂.

5. Les trajets en train totalisent 2350 kilomètres chaque semaine, ce qui équivaut à 16 450 kilomètres au total. En utilisant un facteur d'émission de 0,004 kg de CO₂ par kilomètre parcouru, cela nous donne un total de 65,8 kg de CO₂.
6. Le déplacement des compagnons totalise environ 1500 kilomètres chaque semaine, ce qui équivaut à 10 500 kilomètres au total. En appliquant un facteur d'émission de 0,213 kg de CO₂, le total des émissions est calculé comme suit : 2236,5 kg de CO₂.
7. Les déchets dangereux totalisent 1 tonne, ce qui, avec un facteur d'émission de 128 kg de CO₂ par tonne, équivaut à 128 kg de CO₂.

En ce qui concerne les déchets inertes, ils s'élèvent à 5 tonnes. Avec un facteur d'émission de 33 kg de CO₂ par tonne, cela donne un total de 165 kg de CO₂.

Tous les facteurs d'émission utilisés sont basés sur les documents internes de l'ABCD, élaborés dans le cadre de leur politique environnementale.

Résultats obtenus

En se basant sur les différents calculs préalablement effectués, le total des émissions de dioxyde de carbone

Matheus Cavalcanti Mendonça

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

atteint 230 263 kilogrammes. La Figure 7 met en lumière une distribution inégale de ces émissions. Environ 25% des émissions de carbone proviennent de la consommation de carburant des véhicules et engins de chantier, tandis que juste en dessous de la moitié est imputable aux matériaux utilisés. Cette distribution n'est pas surprenante à la lumière des informations fournies dans la section sur la phase de production, qui souligne l'importance du choix des matériaux de construction et ses répercussions dans l'industrie du bâtiment.

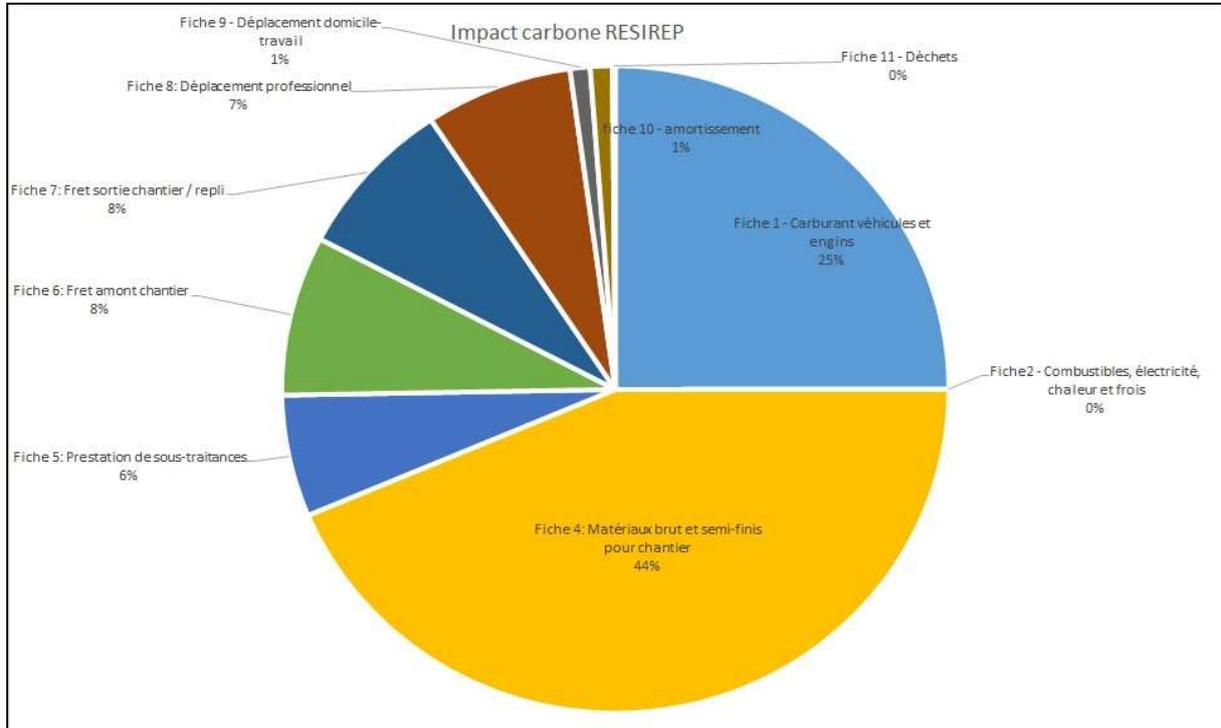


Figure 7 : Répartition de l'impact carbone des composants du chantier

La Figure 8 explore plus en détail la principale source de pollution sur notre site de construction, à savoir les matériaux, ainsi que leur répartition en fonction des émissions de CO2. Nous étudierons dans la section comparant CEMI et CEMIII l'effet du choix des matériaux sur l'empreinte carbone du chantier.

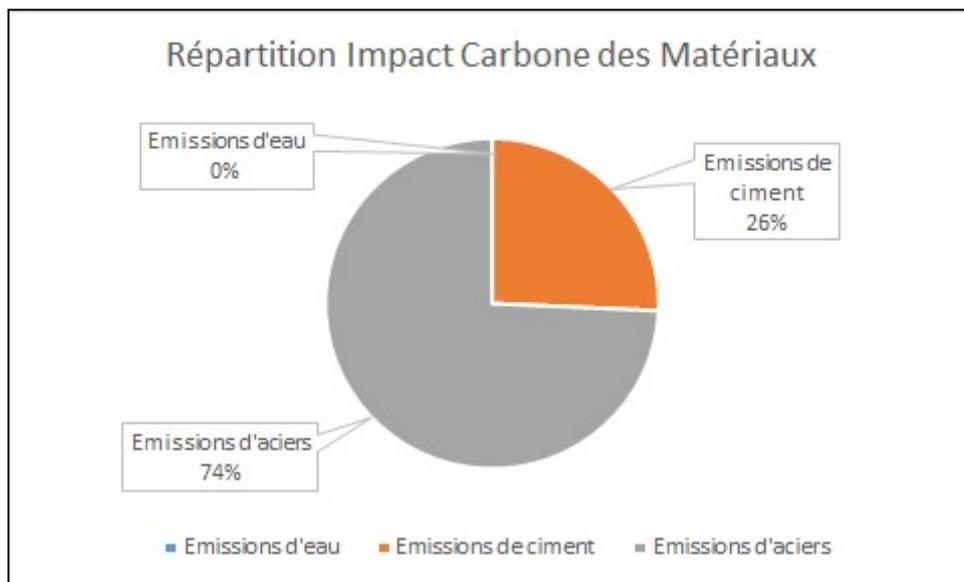


Figure 8 : Répartition de l'impact carbone selon les matériaux

Avec un chiffre d'affaires de près de 393 000 euros pour cette phase, cela équivaut à une dépense d'environ 58 centimes par kilogramme de CO2. Le Tableau 2 offre une meilleure visualisation des chiffres calculés avec des comparaisons.

Comparatif	Chiffres
Kg CO ₂ / €	0,585911571
Kg CO ₂ / km voiture	0,213
Nombre de Km pour une voiture par passager	1 081 048,11 (3 fois la distance Terre Lune environ)
Nombre de vols Aller/Retour Paris-New York possibles d'effectuer	230,26

Tableau 2 : Comparatif des émissions de CO₂ selon différents paramètres

Comparaison CEM I/ CEM III

Dans cette section, j'ai choisi de comparer les émissions de carbone en fonction du type de ciment utilisé pour le coulis (il est à noter que la demande de modification du ciment à utiliser a été rejetée par le client). Les calculs effectués sont les mêmes que ceux présentés dans la section des résultats obtenus, à l'exception des émissions attribuables au coulis. Dans la phase 1, ces émissions représentent en moyenne 787 kg de CO₂ par tonne, tandis que dans la phase 1 bis, ce chiffre passe à 334 kg de CO₂ par tonne :

$$334 \times 32,8 = 10955,2 \text{ kg de CO}_2$$

Le Tableau 3 récapitule les différentes valeurs d'impact des matériaux selon la Phase 1 (phase réelle) et la phase 1 bis (si le ciment avait été modifié).

Matériaux	Phase 1	Phase 1 Bis
Impact Consommation d'eau	17,856	17,856
Impact Consommation de ciment	25813,6	10955,2
Impact Consommation d'aciers	74646	74646

Tableau 3 : Comparatif de l'impact carbone selon les différentes phases

En somme, en changeant de ciment, les émissions de CO2 passent de 230 263 kg à 215 405 kg, permettant ainsi d'économiser 14 858,4 kg de CO2. Plus précisément, les émissions de CO2 provenant du ciment ont diminué de moitié (comme indiqué dans la Figure 9), réduisant la part des émissions dues aux matériaux de 44% à 40%. Dans l'ensemble, cela se traduit par une diminution globale des émissions de 7%.

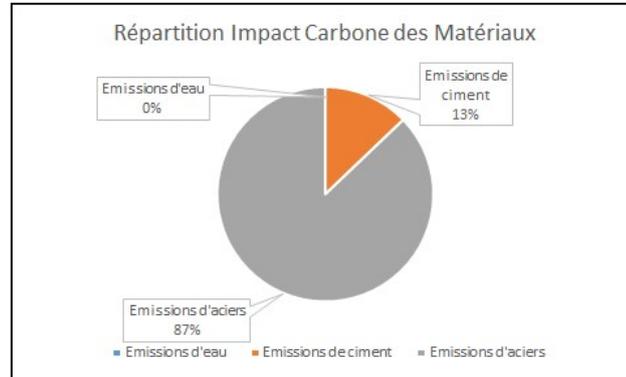


Figure 9 : Répartition de l'impact carbone des matériaux

La Figure 10 offre une représentation détaillée des émissions de carbone dans la phase 1 bis, mettant en évidence la diminution attribuable au changement de ciment.

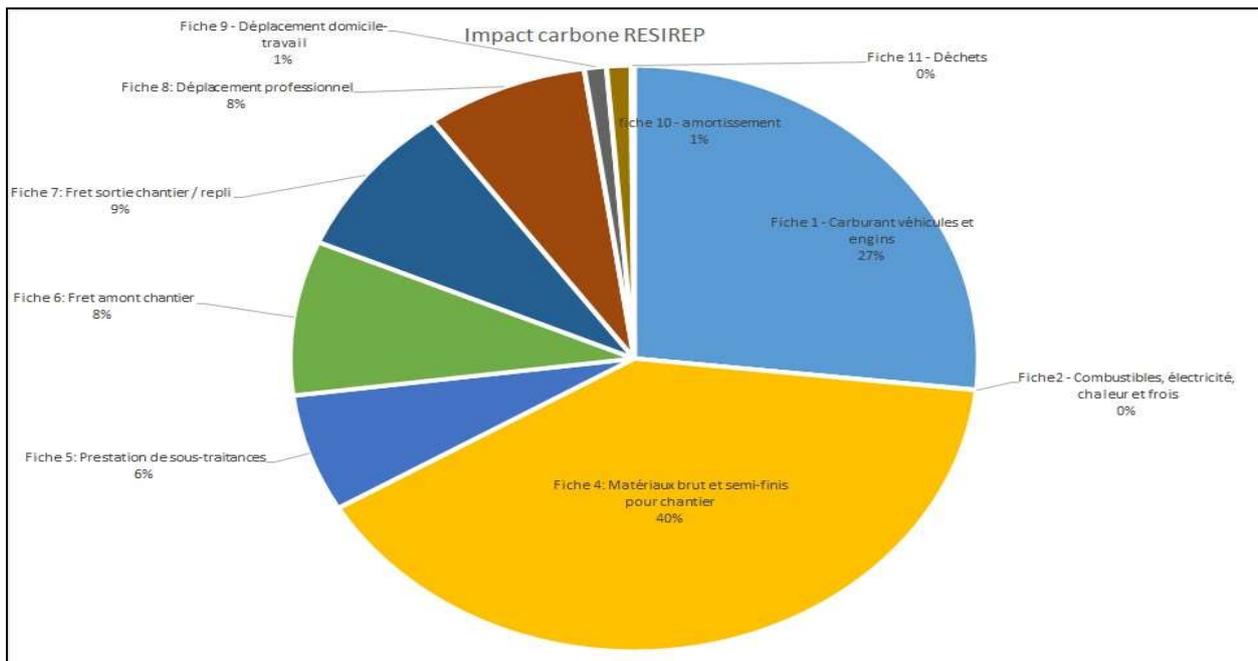


Figure 10 : Répartition de l'impact carbone durant la phase 1 bis

Comme on pouvait s'y attendre, avec une diminution des émissions de CO₂, les valeurs présentées dans le sont inférieures à celles du Tableau 4.

Comparatif	Chiffres
Kg CO ₂ / €	0,548103937
Kg CO ₂ / km voiture	0,213
Nombre de Km pour une voiture par passager	1 011 290,36
Nombre de vols Aller/Retour Paris-New York possibles de faire	215,4

Tableau 4 : Comparatif des émissions de CO₂ selon différents paramètres (Phase 1 bis)

Bilan du fil rouge

La réduction des émissions de gaz à effet de serre nécessite des efforts considérables, notamment dans le secteur du BTP, où des changements comme le remplacement des ciments conventionnels par des alternatives moins polluantes sont essentiels. Malgré la croissance de l'attention portée à l'environnement dans les médias, j'ai constaté au cours de l'élaboration de mon projet que tout n'était pas encore parfait. Il reste encore beaucoup à faire dans divers domaines, notamment la sensibilisation des travailleurs du chantier au tri des déchets, l'utilisation de matériaux plus écologiques et réutilisables (comme les gourdes fournies qui seront utiles sur les futurs chantiers), ce qui contribuera à réduire de manière significative les déchets produits.

ABCD s'est fixé pour objectif de réduire ses émissions de CO₂ de 50% d'ici à 2050. Cette partie de mon travail a mis en lumière le long chemin à parcourir pour atteindre cet objectif, mais il n'est pas irréalisable. Cependant, la réalisation de cet objectif dépend également de la coopération des autres acteurs du chantier. Comme illustré ici, la maîtrise d'œuvre n'a pas été disposée à consentir les efforts nécessaires pour changer de ciment.

La phase 1 a produit 230,263 tonnes de CO₂, tandis que la phase 1 bis en aurait produit 215,245. L'objectif est maintenant de réaliser une étude de bilan carbone pour les phases suivantes afin de déterminer si l'amélioration se poursuit ou non.

J'ai beaucoup apprécié travailler sur cette problématique pour ce projet et ABCD s'est réellement impliquée dans ce processus. J'ai ressenti une véritable volonté de trouver des solutions. Tout au long de mon alternance, j'ai pu échanger avec différents acteurs de l'entreprise et participer à des réunions avec mon tuteur d'entreprise et les responsables QSE. Cela m'a permis d'explorer différentes pistes et d'obtenir des retours réguliers sur mon travail.

Perspectives pour la deuxième période

Pour formuler un bref résumé, de ma première période, je suis très satisfait, car j'ai pu me développer personnellement et professionnellement en consolidant mes apprentissages (calculs de tassement et stabilité, dispositions constructives à retenir) et en apprenant de nouveaux concepts et nouvelles méthodologies de travail. Par ailleurs, lors de mes premières occasions de sortie sur terrain j'ai pu retenir l'importance de l'alternance bureau-terrain comme un facteur prépondérant pour bien comprendre les enjeux du site étudié afin de trouver la solution la plus adaptée pour répondre aux contraintes du projet.

De plus, l'expérience d'être dans un bureau avec des projets multidisciplinaires m'a fait côtoyer différentes interfaces de la géotechnique (ouvrage de soutènement, mécanique des sols, géotechnique routière, stabilité des pentes, etc) et ainsi consolider et développer mes apprentissages et compétences depuis mon parcours à Polytech Grenoble.

Pour la deuxième période, j'ai comme objectif principal devenir autonome. Au-delà, j'ai dans l'espoir de pouvoir continuer à apprendre encore plus avec mes collègues de bureau (comme mener une réunion avec des différents interlocuteurs, et jusqu'à prendre confiance en moi en tant que futur ingénieur) compte tenu de leurs expériences lors des différents contextes et contraintes sur des différents types de projets.

Références bibliographiques

[1] *Université Grenoble-Alpes - Chamilo - GGC3. (s. d.). | Cours de Technique des travaux*

Stassi, F. (2020, 22 avril).

À la poursuite du ciment vert. www.usinenouvelle.com.

<https://www.usinenouvelle.com/article/a-lapoursuite-du-ciment-vert.N953076>

[2] *Les ciments « bas carbone » : de nouveaux mélanges ternaires | Infociments. (s. d.). Infociments.*

<https://www.infociments.fr/ciments/les-ciments-bas-carbone>

[3] Statista. (2023, 19 mai). *Part de ciment produit en France, par type de ciment 2016.*

<https://fr.statista.com/statistiques/810434/production-cimentfrance-repartition-par-categorie/>

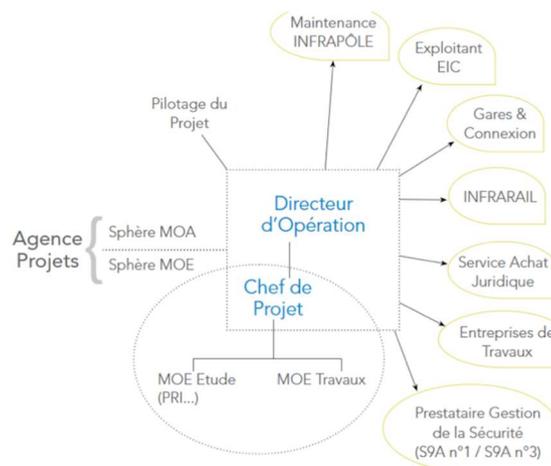
[4] *Notions de classes d'exposition | Infociments. (s. d.). Infociments.*

<https://www.infociments.fr/betons/notions-de-classes-dexposition>

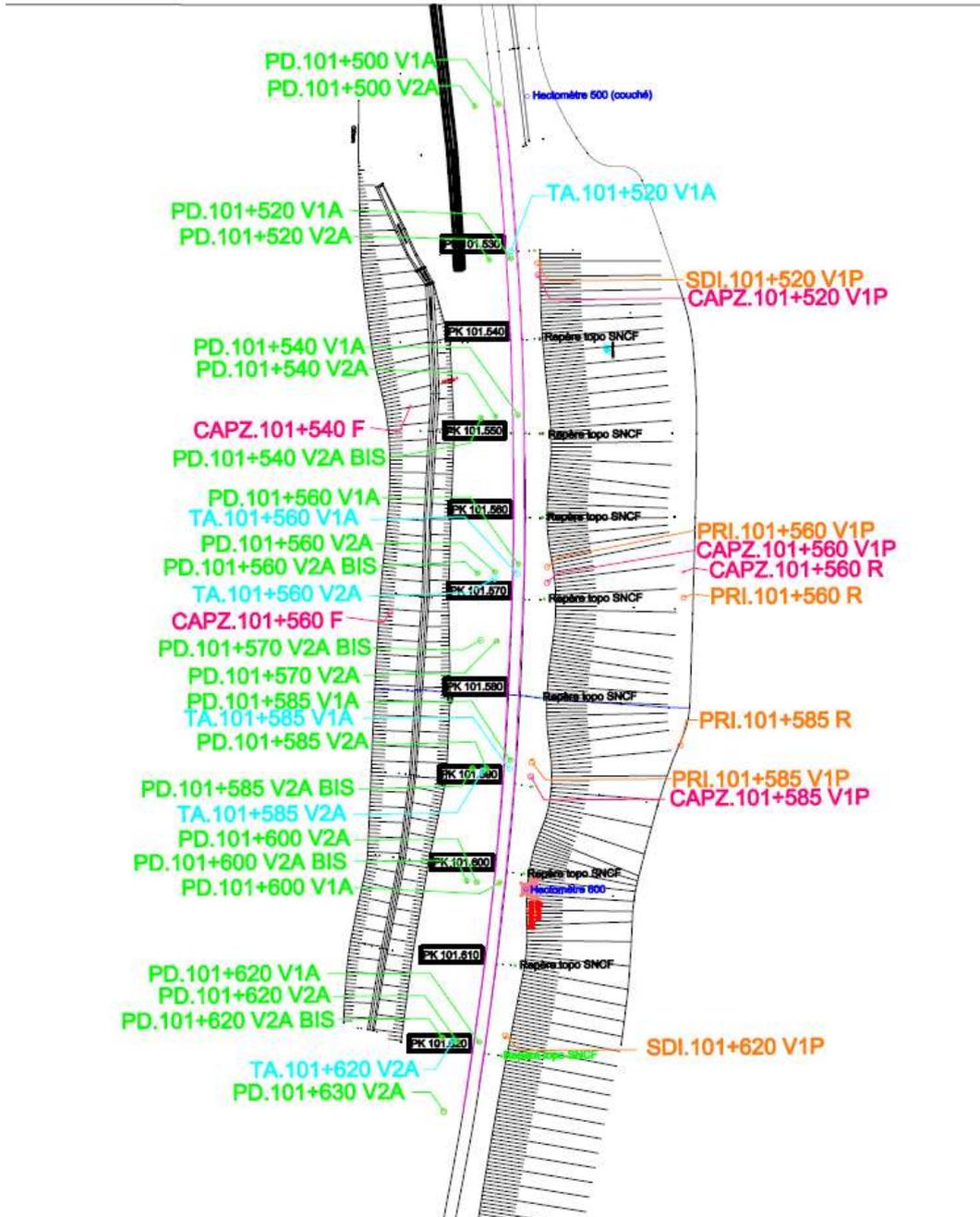
Annexe 1 : Enchaînement des missions chez SNCF Réseau

Les grandes phases du projet

- 1 Dossier d'Initialisation (DI)** : permet notamment de donner au projet des premiers éléments de coûts et de planning sur les différentes variantes à l'étude, qui pourront par la suite être écartées ou approfondies lors des études préliminaires.
 - 2 Étude Préliminaire (EP)** : Les études préliminaires permettent d'affiner et d'approfondir les éléments définis dans la première phase. Les études préliminaires visent quatre objectifs principaux : Analyser l'importance des enjeux (études de marché, études économiques...); Démontrer la faisabilité technique et environnementale des réponses techniques aux besoins exprimés; Évaluer les enveloppes financières et les calendriers prévisionnels de ces réponses; Proposer un programme optimisé pour la phase AVP pouvant laisser ouverte la porte à quelques variantes secondaires.
 - 3 Avant-Projet (AVP)** : Permet de finaliser la consistance de l'opération et de fixer le Coût Prévisionnel Provisoire de Réalisation (CPPR estimation à +0/-20 %), de proposer un plan de financement de l'opération, de préparer et engager les procédures administratives et de quantifier les impacts du projet sur la gestion et la régénération de l'infrastructure. Les principales options éventuellement laissées ouvertes à l'issue des études préliminaires sont comparées sous l'angle des critères techniques, économiques et environnementaux afin de choisir la solution la plus adaptée. Il s'agit d'une phase particulièrement importante puisqu'elle induit une décision et un financement de la part du maître d'ouvrage.
 - 4 Projet (PRO)** : Phase servant à finaliser le projet dans le but de déposer et achever les demandes d'autorisations administratives nécessaires, telle la demande de permis de construire, et de fixer un calendrier global de réalisation.
- Avant-Projet et Projet (APO)** : Cumul des 2 phases précédentes. Lorsque les phases AVP et PRO sont réalisées conjointement.
- 5 Réalisation (REA)** : Dans cette phase, il y a la mise en place des conditions de réalisation du projet puis sa réalisation (achats, travaux...)



Annexe 2 : Plan d'implantation de sondages



LEGENDE	
- TA	sondage à la tarière hélicoïdale
- CAPZ	sondage carotté avec piézomètre
- SDI	sondage destructif avec équipement inclinométrique
- PRI	sondage destructif avec essais pressiométriques et équipement inclinométrique
- PD	essai de pénétration dynamique

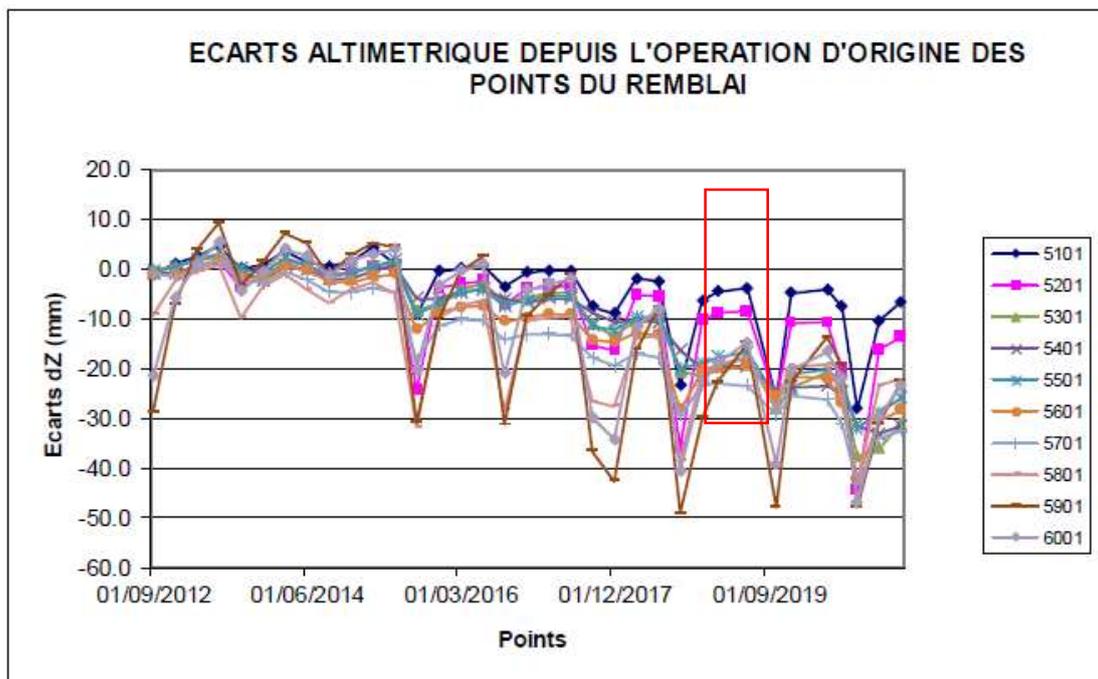
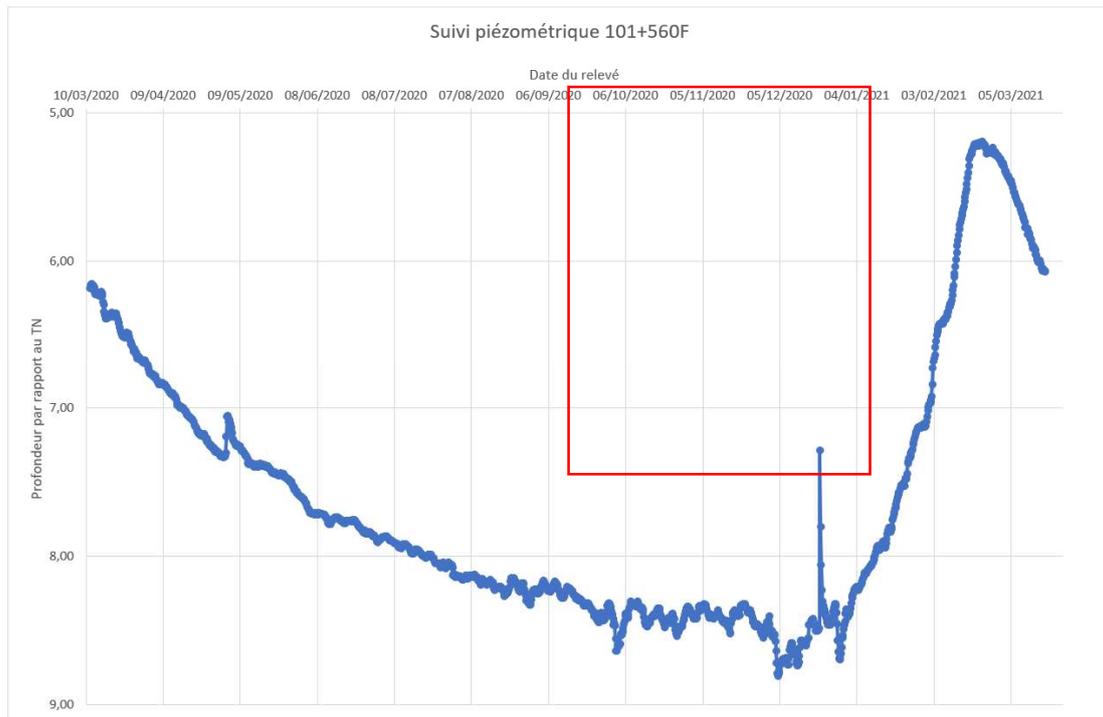
HYDROGÉOTECHNIQUE
 8 rue Georges Méliès
 22 rue grande Collè
 38000 Saint Martin d'Hères
 Téléphone : 04.74.85.87.87 - Fax : 04.74.85.85.48
 e-mail: hydro@hydrogeotechnique.com

Remblai
SNCF RESEAU
 LISSIEU (69)

Echelle : 1/500
 Dossier : C.20.61013
 Date : le 7 décembre 2020

RETOUR D'EXPERIENCE N° 1

Annexe 3 : Profil 101+560 - Relevé piézométrique annuel et suivi des mesures d'écart altimétrique



SNCF Réseau – Prily OA
133 Boulevard de la Bataille de Stalingrad
69625 Villeurbanne

RETOUR D'EXPERIENCE N° 2



Elève : CAVALCANTI MENDONÇA Matheus

Tuteur enseignant : VIEUX-CHAMPAGNE Florent

Tuteur entreprise : CHAVE PARISSET Cécile

GGC5 - PRO
Année universitaire 2022-2023

Table des matières

Résumé	6
Abstract	6
Introduction	7
Présentation de l'entreprise et le contexte de l'alternance	7
Le sujet et la démarche adoptée	9
Travaux réalisés et analyse des résultats	12
<i>SUPPRESSION DU PASSAGE A NIVEAU PN-13</i>	12
<i>REMBLAI DE MOULIN-GLATTARD</i>	16
<i>OA7BIS/OA7 – LORIOLE-SUR-DROME/LIVRON-SUR-DROME</i>	24
<i>VISITES SUR TERRAIN</i>	28
<i>REMPLACEMENT DU PASSAGE A NIVEAU PN65/66</i>	30
Présentation de l'ouvrage	30
Contexte géologique	31
Contexte hydrogéologique	31
Contexte géotechnique	31
Aléas	33
Dimensionnement.....	33
Le bilan des compétences acquises, relatives au référentiel des compétences de l'ingénieur Géotechnique et Génie Civil de Polytech Grenoble	46
La responsabilité sociétale et environnementale de l'entreprise	48
Bilan personnel et professionnel de l'activité en entreprise et de l'alternance	49
Annexes	50
<i>ANNEXE 1 : Modèle géotechnique établi dans le rapport de la G2-AVP</i>	50
<i>ANNEXE 2 : Plan d'implantation des sondages</i>	51
<i>ANNEXE 3 : Modèle géotechnique (configuration 1)</i>	52
<i>ANNEXE 4 : Modèle géotechnique (configuration 2)</i>	53
<i>ANNEXE 5 : Disposition constructive (configuration 1)</i>	54
<i>ANNEXE 6 : Disposition constructive (configuration 2)</i>	55
<i>ANNEXE 7 : Plan d'implantation des sondages complémentaires</i>	56
<i>ANNEXE 8 : Plan d'implantation des sondages envisagé</i>	57
<i>ANNEXE 9 : Plan d'implantation des sondages modifié</i>	58
<i>ANNEXE 10 : vue en plan générale</i>	59

<i>ANNEXE 11 : plan d'implantation des sondages</i>	<i>60</i>
<i>ANNEXE 12 : rideaux de palplanche – phase définitive.....</i>	<i>61</i>
<i>ANNEXE 13 : synthèse des résultats K-Réa (ELS) – écran 1 et 2</i>	<i>62</i>
<i>ANNEXE 14 : synthèse des résultats K-Réa (ELU) – écran 1 et 2.....</i>	<i>63</i>
<i>ANNEXE 15 : synthèse des résultats K-Réa (ELS) – Pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement</i>	<i>64</i>
<i>ANNEXE 16 : synthèse des résultats K-Réa (ELU) – Pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement</i>	<i>65</i>
<i>ANNEXE 17 : géométrie du mur de soutènement en L et les caractéristiques des couches de sol</i>	<i>66</i>

Table acronymes

BE – Bureau d'Etudes

CEP – Coordinateur Etudes Projet

CEREMA – Centre d'Etudes et d'expertises sur les Risques l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

DCE – Dossier de Consultation des Entreprises

DICT - Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux

DGII – Direction Générale Industrielle Ingénierie

DI – Dossier d'Initialisation

DZP – Direction Zone Production

EP – Etudes Préliminaires

HTA – Haute Tension type A

LGV – Ligne de Grande Vitesse

MOA – Maîtrise d'Ouvrage

MOEG – Maîtrise d'Œuvre Général

MOP – Maîtrise d'Œuvre Public

NU – Nations Unies

OCP – Opération Coup de Poing

ODD – Objectifs de Développement Durable

PMR – Personnes à Mobilités Réduites

PN – Passage à Niveau

PRa – Pont Rail

PRo – Pont Route

PRI – Pôle Régional Ingénierie

RD – Route Départementale

RN – Route Nationale

RSE - Responsabilité Sociale et sociétale d'Entreprise

SNCF – Société National des Chemins de fer Français

ZIG – Zone d'Influence Géotechnique

Résumé

Mon contrat de professionnalisation lors de la 5^{ème} année a été effectué chez SNCF Réseau, filiale du groupe SNCF, afin de valider mon année d'étude à Polytech Grenoble.

SNCF Réseau est responsable de la gestion, de l'exploitation, du maintien et du développement du réseau ferré français. Elle apporte son savoir-faire à chaque projet dans 120 pays au monde, en assurant aux maîtres d'œuvres, maîtres d'ouvrage et entreprises l'efficacité et fluidité du déroulement de l'opération dès la phase de conception jusqu'aux phases de mise en service et exploitation.

Les défis des méthodologies et démarches internes ainsi que d'un vocabulaire propre à SNCF Réseau m'ont encore plus fait sortir de ma zone de confort pour bien comprendre et appréhender les problématiques et enjeux. Pendant ce cycle d'un an j'ai eu l'occasion de suivre différents projets en région Auvergne Rhône-Alpes et ses alentours, ce qui a rendu possible l'application et la consolidation des apprentissages suivis lors du parcours à Polytech.

En résultat de mon alternance, j'ai pu améliorer les différentes compétences personnelles et professionnelles nécessaires à un poste d'Ingénieur et ce notamment grâce à la multidisciplinarité des missions qui m'ont été confiées m'ayant permis de développer le côté technique « *hard skills* » ainsi que les relations interpersonnelles « *soft skills* ».

Abstract

My professionalization contract during the 5th year was carried out at SNCF Réseau, a subsidiary of the SNCF group, to validate my year of study at Polytech Grenoble.

SNCF Réseau is responsible for the management, operation, maintenance, and development of the French rail network. It brings its know-how to each project in 120 countries around the world, ensuring the efficiency and fluidity of the operation from the design phase to the commissioning and operation phases.

The challenges of internal methodologies and approaches as well as a vocabulary specific to SNCF Réseau made me even more out of my comfort zone to understand and understand the issues and issues. During this one-year cycle I had the opportunity to follow different projects in the Auvergne Rhône-Alpes region and its surroundings, which made possible the application and consolidation of the learnings followed during the course at Polytech.

As a result of my work-study program, I was able to improve the various personal and professional skills required for an engineer position, particularly thanks to the multidisciplinary nature of the missions entrusted to me, which enabled me to develop the technical side “hard skills” and “soft skills” interpersonal relationships.

Introduction

Étudiant en 3^{ème} année du cycle d'ingénieur en Géotechnique et Génie Civil à Polytech Grenoble, j'ai effectué mon alternance en tant qu'assistant ingénieur chargé d'études géotechniques en ouvrages d'art. L'alternance a été réalisée sur la durée d'un an, du 19 Septembre 2022 au 19 Septembre 2023. J'ai été accueilli au sein du Pôle Régional d'Ingénierie de Lyon (PRILy).

Cette expérience m'a permis d'apprendre sur les missions géotechniques dans l'élaboration d'un projet passant principalement par les phases des études géotechniques préalables (G1), les études de conception (G2) et les études géotechniques d'exécution (G3 – études), en qualité de maître d'œuvre.

De cette manière, ce rapport a pour objectif présenter mes expériences et connaissances retenues lors de cette expérience en tant qu'alternant chez SNCF Réseau.

Dans un premier temps je présenterai l'entreprise, ses savoirs faire et le contexte de l'alternance. Dans une deuxième partie j'introduirai le sujet et la démarche adoptée ainsi qu'une analyse de chacune des missions qui m'ont été confiées en faisant une exploitation des résultats obtenus. Enfin, dans une troisième et dernière partie, sera fait un bilan des compétences personnelles et professionnelles acquises en mettant en évidence l'activité en entreprise et l'alternance.

Présentation de l'entreprise et le contexte de l'alternance

Depuis le 19 septembre de 2022 j'ai intégré la SA SNCF Réseau, société fille du groupe SNCF - Société Nationale des Chemins de fer en France. Avant d'évoquer cette dernière, il est important de présenter et de comprendre ce qui se cache derrière l'appellation Groupe SNCF. Fondée en 1938 à la suite de la fusion de 5 grandes entreprises, le groupe s'occupe de la production ferroviaire, des problématiques de mobilité et de l'expertise en ingénierie des infrastructures et du matériel roulant. A nos jours, la société compose la quatrième plus grande compagnie ferroviaire du monde intervenant dans 120 pays au monde.

Le 1^{er} janvier 2020, le groupe SNCF connaît une restructuration majeure : le nouveau pacte ferroviaire. Le groupe est passé de trois établissements publics à caractère industriel et commercial (Epic) et leurs filiales à une société mère SNCF à laquelle sont rattachées cinq sociétés filles (Figure 1).

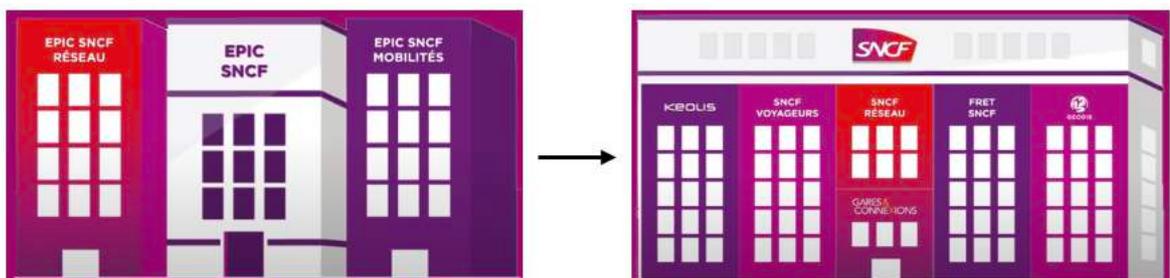


Figure 1 : restructuration du groupe SNCF

La branche SNCF Réseau, à laquelle je suis rattaché, a pour mission de commercialiser l'accès au réseau ferré national, ainsi que de développer, moderniser et sécuriser les infrastructures pour maximiser la circulation des trains sur l'ensemble du territoire national en réalisant notamment des études d'ingénieries et en pilotant des chantiers de Génie Civil Ferroviaire. L'une des Directions, la Direction Générale Industrielle et Ingénierie (DGII), a pour objectif de réaliser les études et d'assurer le management de projets relatifs aux infrastructures fixes du réseau ferroviaire français (Figure 2).

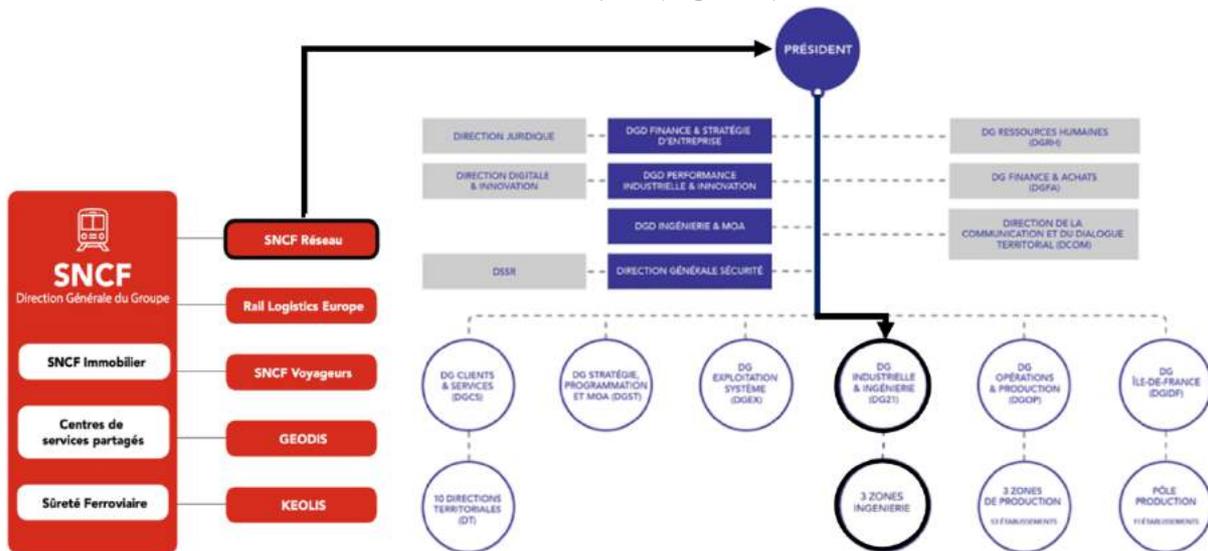


Figure 2 : organisation du groupe SNCF Réseau

Elle est composée, hors Île-de-France, par 3 sous-directions et 3 Directions Zone Ingénierie, les DZI's. Ces 3 dernières divisent la carte la France selon la Figure 3.

La ville de Lyon, où se situe mon agence, appartient à la DZI Sud-Est. Elle a pour rôle d'assurer la conduite d'opérations de développement, de régénérations et de maintenance ainsi que les missions d'ingénierie de conception et de la surveillance des infrastructures existantes. Elle organise la cohérence des priorités entre Agence Projets et Pôle Régional Ingénierie (PRI) et leur apporte les soutiens nécessaires.

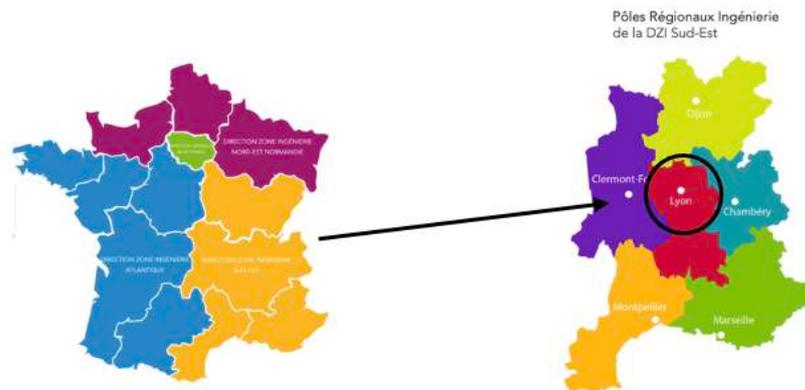


Figure 3 : répartition de la DZI Sud-Est

Les pôles régionaux d'ingénierie (PRI) portent la pleine responsabilité des études qui leurs sont confiées par les Agences projets et d'autres clients (internes ou externes). Ils réalisent les essais complexes des nouvelles installations ferroviaires et assurent des prestations d'assistance et d'expertise pour la Direction Zone Production (DZP).

Dans le cadre de mon alternance, je me situe au PRI de Lyon dans un groupe qui en charge des études et contrôle des Ouvrages d'Art et Ouvrages en Terre. En tant que maître d'œuvre, nous avons le rôle d'assister notre propre maîtrise d'ouvrage sur toutes les phases reprises dans l'article 7 de la loi MOP (Loi du 12 Juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique), donc des études préliminaires en passant par les études de conception AVP/PRO et jusqu'à la phase de réalisation des travaux. Les calculs géotechniques de stabilisation de talus, fondation, soutènement, glissement de terrain, stabilité de remblai et déblai et aussi du terrassement, s'intègrent dans les phases de conception AVP/PRO.

Les quelques chiffres présentant SNCF Réseau sont :

- 30 000 kms de voies sur le territoire national ;
- Plus de 50 000 collaborateurs chez SNCF Réseau ;
- Le réseau ferré français (2.600km) est le 4ème plus grand réseau à grande vitesse au monde derrière la Chine, le Japon et l'Espagne ;
- Pour l'année de 2022 le groupe SNCF a réalisé un chiffre d'affaires de 30 milliards d'euros.

Le sujet et la démarche adoptée

A la suite du contexte dans lequel s'insère mon alternance, dans cette section il sera expliqué le sujet choisi et la méthodologie adoptée dès la prise d'une nouvelle demande par le bureau d'études jusqu'à la remise du produit final au client. Comme déjà décrit précédemment, au sein du groupe Ouvrages d'Art, je fais partie du bureau d'études numéro 3 qui assure les missions de maîtrise d'œuvre études ou expertise dans le domaine des ouvrages géotechniques, ouvrages en terre, terrassement et plateforme ferroviaire.

Le bureau est actuellement composé par Cécile CHAVE – ingénieure études responsable du BE3 et ma tutrice entreprise désignée, Magali RAGAZZOLI – chargée d'études géotechnique et terrassement et responsable de collection, Cyril PARISSET – CEP tunnels et traversées sous voies et depuis le 17 juillet 2023 de Louis FIORINI, en remplacement de M. ALBERT en tant qu'ingénieur géotechnicien chargé d'études géotechniques et terrassement et par moi-même – alternant chargé d'études géotechniques. En effet, depuis le 1 mai de 2023, Loris ALBERT a changé de poste en interne en devenant coordinateur études projet (Figure 4).

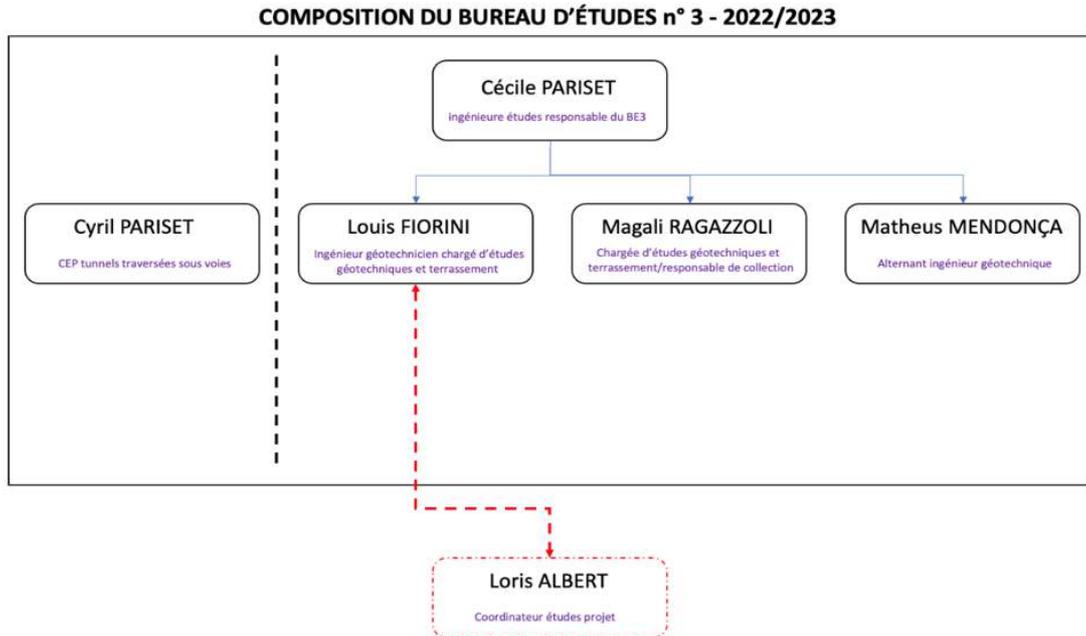


Figure 4 : composition du bureau d'études BE3

Le bureau est principalement responsable des missions suivantes :

- 1- **L'assistance de la maîtrise d'ouvrage** : C'est-à-dire définir, piloter et exploiter les acquisitions de données géotechniques pour répondre aux besoins de tous les corps de métier du PRI de Lyon, afin de mener à bien le projet ;
- 2- **Le rôle de maîtrise d'œuvre études**. C'est-à-dire de réaliser les études de conception des projets et de contrôler ou réaliser les études d'exécution selon les métiers sur toutes les étapes constructives d'un projet (DI, EP, AVP, PRO et EXE) régit par la loi MOP.

Au sein du BE3 je suis chargé des études de conception géotechnique et terrassement des Ouvrages en Terre et Ouvrages d'Art du réseau ferré. Lors de mon alternance j'ai occupé une position polyvalente grâce à la diversité des missions qui m'ont confiée et la multidisciplinarité des compétences que j'ai pu acquérir et développer. Parmi mes tâches principales, j'ai pu dans les cas généraux : effectuer le suivi des dossiers de reconnaissances géotechniques, élaborer les dessins techniques des projets, établir des notes de calculs en respectant les normes et règlements en vigueur et assurer des missions de producteur d'études. En tant que MOE j'ai pu : participer à l'élaboration des dossiers d'études, participer aux missions VISA et à certaines réunions de chantier.

L'arrivée des demandes au sein du PRI se caractérise principalement sous trois angles :

- 1- **Une demande externe** : c'est le cas d'un projet de développement, financé par un état ou une région, dans lequel il y a un impact direct sur le réseau ferroviaire. Dans ce cas, la MOA SNCF est convoquée à l'effet de déterminer l'objet de l'opération. Une fois l'objet défini, cette demande est confiée à la Direction Territoriale de la MOA. Cette

dernière se charge de désigner un pilote d'opération, représentant de la MOA et un chef de projet représentant la MOEG. Dans le cas d'un projet d'ingénierie et plus particulièrement qui fait appel à la géotechnique et/ou au terrassement, le BE3 du PRI de Lyon, en tant que MOE Etudes, prend en charge la conception du projet pour répondre aux objectifs de qualité, coûts et délais fixés par la demande initiale, le tout avec prise en considération des impacts et risques ferroviaires du projet.

- 2- Une demande interne :** c'est le cas des projets de rénovation votés à la suite des inspections détaillées réalisées par l'INFRAPOLE ou le bureau de surveillance et d'inspection du groupe Ouvrages d'Art, dans le cadre de la maintenance des installations. Dans le cadre d'une demande n'ayant pas un caractère complexe, l'INFRAPOLE peut prendre la charge le sujet (comme par exemple, le remplacement des rails). Cependant, lorsqu'un ouvrage plus complexe doit être entretenu (un mur à conforter, par exemple), des études d'opportunités sur les ouvrages connexes sont menées pour les intégrer au programme de rénovation. Dans cette situation, la MOA reste interne à SNCF Réseau mais la MOEG est représentée par l'INFRAPOLE. Le PRI de Lyon et donc le BE3 pour des sujets géotechniques pourront être sollicités pour la réalisation des études techniques liées à l'entretien de l'ouvrage.

Ces deux approches représentent la quasi-totalité des demandes qui font appel au BE3. En qualité de maître d'œuvre, il est important de souligner que la direction du PRI se réserve le droit d'accepter ou refuser les demandes entrantes, et de juger les opérations pouvant faire l'objet d'une externalisation à un maître d'œuvre extérieur. La prise en charge de la demande variera principalement en fonction des plans de charge et des capacités de production du PRI.

Néanmoins, il existe une troisième et dernière voie d'arrivée des demandes : « **les projets tiers** ». Cela représente toutes les constructions appartenant et conduites par un tiers (une personne, une entreprise...), situées dans la ZIG des emprises ferroviaires. Dès que les travaux envisagés sont en interface avec les emprises ferroviaire et susceptible d'influer sur la sécurité des installations, un avis technique doit être donné par l'ingénierie SNCF. Au sein du BE3, c'est notamment le cas pour des projets de traversées sous voies (réseaux divers).

A noter également que le PRI de Lyon regroupe l'ensemble des métiers techniques du Génie Civil Ferroviaire, à savoir les groupes d'Etudes Générales (Tracé de voie ferrée et gabarit ferroviaire), Caténaires, Signalisation, Telecom, Environnement, Hydraulique, travaillant conjointement pour répondre aux objectifs d'un projet, tout en garantissant une gestion réussie des interfaces métiers. A titre d'exemple, le BE3 est toujours en contact avec les ingénieurs structure des BE1 et/ou BE2 pour définir les dispositions constructives régissant de l'interaction sol/structure (Descente de charge, hydraulique, préconisation techniques, mesures des déplacements...).

Travaux réalisés et analyse des résultats

Dans cette section il sera abordé, dans un premier temps et d'une manière plus globale, les travaux que j'ai pu réaliser lors des missions qui m'ont été confié durant ma deuxième période d'alternance au sein du PRI de Lyon. Dans un deuxième temps, je me concentrerai sur le projet auquel j'ai accordé le plus de temps à mon travail : la suppression des passages à niveau PN65-66, sur la commune de Perrignier (74).

Tout d'abord, la plupart de mes activités se déroulent au bureau, mais dès que nécessaire, des visites sur terrain ont été programmées afin de dresser une meilleure compréhension sur la complexité et les contraintes des missions.

SUPPRESSION DU PASSAGE A NIVEAU PN-13

Ce projet concerne la suppression du passage à niveau numéro 13 de la ligne Lyon-Grenoble (n° 905 000) sur la commune de SAINT-PIERRE-DE-CHANDIEU (69). Ce dernier sera remplacé par un pont route (PRO) qui enjambera la voie ferrée. Un plan de principe (Figure 5) et une perspective (Figure 6) de l'ensemble de l'ouvrage sont fournis ci-dessous.

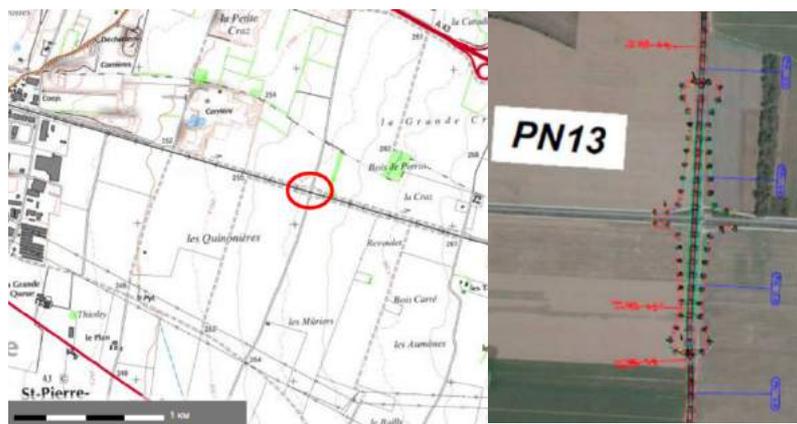


Figure 5 : carte IGN et vue en plan

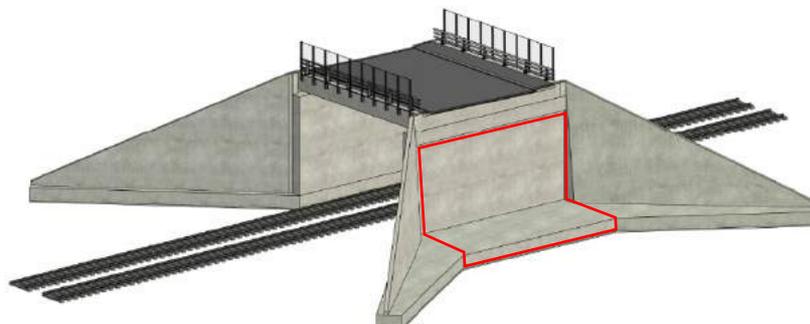


Figure 6 : perspective

Pour cette mission, mon rôle a été de dimensionner le mur en « L », marqué en rouge sur la figure précédente, choisi comme solution de soutènement pour la pose du tablier du pont

route. Le dimensionnement devait permettre de justifier la stabilité externe (portance et renversement), stabilité interne (vérification de la résistance des éléments qui constituent le mur aux efforts qui les sollicitent) et stabilité générale (justification de non-glissement) de l'ouvrage. Pour ces justifications, j'ai utilisé DPI Vocal, un logiciel interne de la SNCF.

D'après les hypothèses de conception selon l'EUROCODE 7, DPI Vocal procède aux calculs en découpant le mur en « n » tranches de sections égales, puis calcule des sollicitations sur chacune de ces sections. Ensuite, une réduction des efforts des différentes sections sous la semelle au point O (Figure 7) est faite et la vérification de la stabilité de l'ensemble peut être calculée.

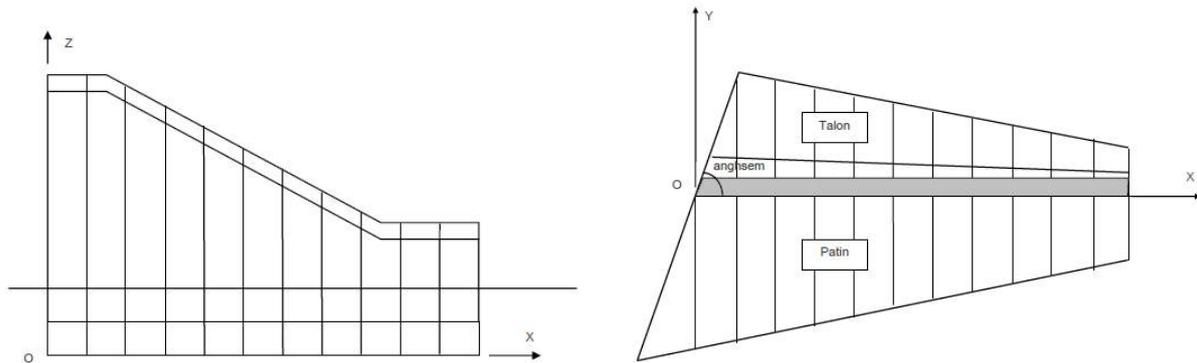


Figure 7 : principe de calculs sur DPI Vocal

Pour la saisie de données sur DPI Vocal, une réinterprétation du modèle géotechnique établi dans le rapport de la G2-AVP (ANNEXE 1 : Modèle géotechnique établi dans le rapport de la G2-AVP) a été faite. Tout ça, afin d'évaluer l'influence de la variation du profil en long, vu que les sondages faits sur place ont indiqué différentes profondeurs et valeurs des paramètres mécaniques des couches, malgré l'éloignement des sondages (ANNEXE 2 : Plan d'implantation des sondages). Pour cela, j'ai défini deux différentes configurations autour de la couche C3 : la première en considérant les paramètres mécaniques trouvés sur le sondage PR-13-1 (ANNEXE 3 : Modèle géotechnique (configuration 1)) et la deuxième sur le sondage PR-13-2 (ANNEXE 4 : Modèle géotechnique (configuration 2)). Aussi, afin de satisfaire l'exigence d'une portance EV_2 supérieure ou égale à 60 MPa pour le projet, j'ai considéré que toutes les couches 0-TV, R, C1 et C2 ont été purgées et substituées par des matériaux de qualité « assise de fondation » de type D2/D3, méthodiquement compactés. Avec le remblai de substitution, deux nouveaux modèles géotechniques ont été obtenus (Tableau 1) :

MA REINTERPRETATION				
-	Configuration 1		Configuration 2	
Lithologie	Remblai d'apport	Alluvions fluvio-glaciaires	Remblai d'apport	Alluvions fluvio-glaciaires
N° de la couche	0-R	C3	0-R	C3
Limites (m)	0.0 – 10.0	10.0 – < 15.0	0.0 – 10.5	10.5 - < 15.0
Pression limite nette P_1^* (MPa)	1.0	3.95	1.0	3.55

Module pressiométrique (MPa)	10.0	95.14	10.0	44.88
Module rhéologique α	0.33	0.25	0.33	0.25
Angle de frottement φ' (°)	30	37	30	37
Cohésion c' (kPa)	0	1	0	1
Densité γ_d (kN/m ³)	20	20	20	20

Tableau 1 : modèle géotechnique pris en compte

J'ai retenu une pression limite P_1^* équivalente égale à 1.0 MPa pour le remblai d'apport (valeur très sécuritaire qui ne tient pas compte de l'amélioration rapide de compacité du sol avec la profondeur). Aussi, j'ai choisi de figer les dimensions du mur et jouer sur sa profondeur d'ancrage afin de trouver le cas le plus défavorable pour le dimensionnement définitif. Pour la première configuration, le mur est ancré de 0.5 m dans le remblai et les autres 0.5m dans la couche C3, tandis que pour la deuxième configuration il est ancré totalement dans la couche de remblai d'apport. Les caractéristiques des matériaux utilisés pour le mur ont été :

- Béton :
 - $E = 20GPa$;
 - $f_{ck} = 35MPa$;
 - $\gamma = 25KN/m^3$.
- Acier :
 - Classe de ductilité : B ;
 - $f_{yk} = 500MPa$.

Dans le contexte hydrogéologique, selon les études faites, aucun niveau de nappe superficielle a été identifié dans la zone. Selon la NF EN 1991-2, ce type de projet fait appel au modèle de charge 1, donc une charge routière égale à 10kN/m². Depuis le 22 octobre 2010, la France dispose d'un nouveau zonage sismique divisant le territoire national en cinq zones de sismicité croissante en fonction de la probabilité d'occurrence des séismes. Pour le PN-13, le décret n°2010-1255 classe la zone étudiée en zone 3, aléa modéré.

Ces règles doivent être appliquées au moyen d'un coefficient d'importance attribué à chacune des catégories d'importance de la structure. Les valeurs de ces coefficients sont données par le tableau suivant (Tableau 2) :

CATÉGORIE D'IMPORTANCE	COEFFICIENT D'IMPORTANCE γ_1
I	0,8
II	1
III	1.2
IV	1.4

Tableau 2 : γ_1 en fonction de la catégorie d'importance

Pour ce projet, j'ai retenu $\gamma_1 = 1$ pour une catégorie d'importance II. Le mouvement dû au séisme est représenté par un spectre de réponse élastique en accélération. Il est caractérisé au niveau d'un sol rocheux (sol de classe A) par la valeur d'accélération a_{gr} . Les valeurs des accélérations a_{gr} sont données dans le tableau suivant (Tableau 3) :

ZONES DE SISMICITÉ	a_{gr} (en m/s^2)
1 (très faible)	0,4
2 (faible)	0,7
3 (modérée)	1,1
4 (moyenne)	1,6
5 (forte)	3,0

Tableau 3 : a_{gr} en fonction de la zone de sismicité

Dans le cadre de cette étude $a_{gr} = 1,1 \text{ m/s}^2$. L'accélération horizontale de calcul est déterminée à partir d'un sol référence de classe A rocheux. Elle est égale au produit de l'accélération a_{gr} par le coefficient d'importance γ_1 . J'ai retenu donc :

$$a_g = a_{gr} \times \gamma_1 = 1,1 \times 1 = 1,1 \text{ m/s}^2$$

Ainsi, j'ai pu calculer les coefficients k_h et k_v qui vont représenter l'action sismique par des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales, respectivement :

$$k_h = \frac{a_g}{g} \cdot \frac{S}{r} \quad \text{et} \quad k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

Dont :

- a_g est l'accélération horizontale ;
- g est l'accélération de la pesanteur ;
- S est le paramètre de sol ;
- r est un coefficient avec une valeur comprise entre 1 et 2 dépendant du déplacement résiduel considéré après séisme.

Selon le Tableau 3.1 de la norme NF EN 1998-1 il est possible de retenir que le sol est à priori de classe B, les terrains ont donc un paramètre de sol $S = 1,35$. « r » est retenu égal à 1, ce que c'est un choix très sécuritaire qui suppose donc qu'il n'y aura pas de déplacement résiduel après séisme. Considérant les calculs pour un séisme pesant et allégeant, les valeurs retenues pour les calculs sont :

$$k_h = \frac{1,1}{9,81} \cdot \frac{1,35}{1} = 0,151 \quad \text{et} \quad k_v = 0,5 \cdot 0,15 = \pm 0,075$$

Envisageant une meilleure compréhension de la note de calcul j'ai utilisé le logiciel AutoCAD pour des schémas plus visuels sur la disposition du mur dans chacune des

configurations (ANNEXE 5 : Disposition constructive (configuration 1) et ANNEXE 6 : Disposition constructive (configuration 2)).

Après la saisie des données d'entrée, j'ai pu poursuivre avec le lancement des calculs, le logiciel fourni une note de calcul simplifiée avec la vérification des états limites pour la combinaison la plus défavorable (Figure 8 et Figure 9).

ETATS LIMITES	COMB. N°	PARAMETRE	VALEUR CALCULEE	VALEUR LIMITE	OK **
ELS limitation charge	28	Vd<Rv,d+RO (KN)	-1381.1	-3557.1	OK
ELS OP/Freq excentrement V	9	ie > 2/3	0.759	0.667	OK
ELS Caract. excentrement V	27	ie > 1/2	0.748	0.500	OK
ELU de mobilisation du sol	84	Vd<Rv,d+RO (KN)	-1383.0	-3425.4	OK
ELU excentrement V	49	ie > 1/15	0.632	0.067	OK
ELU de glissement (H seul)	84	Rh:d/Hd > 1	1.519	1.000	OK
ELU de glissement (H + MZ)	46	Rmz:d/Mzd > 1	infini	1.000	OK
ELU sismique mobilisation sol	147	Vd<Rv,d+RO (KN)	-1430.5	-1504.7	OK
ELU sismique excentrement V	147	ie > 1/15	0.350	0.067	OK
ELU sism. glissement (H seul)	147	Rh:d/Hd > 1	1.191	1.000	OK
ELU sism. glissement (H + MZ)	147	Rmz:d/Mzd > 1	infini	1.000	OK

N° Comb. ELS	Rotation Maxi de la Semelle (mRad)	Déplac. Maxi de la Semelle (mm)	Déplac. Maxi en tête du mur (mm)	Déplac. limite en tête du mur (mm)	OK
10	1.45	0.0000	15.2586	105.0000	OK

Figure 8 : vérification des états limites et des déplacements (configuration 1)

ETATS LIMITES	COMB. N°	PARAMETRE	VALEUR CALCULEE	VALEUR LIMITE	OK **
ELS limitation charge	28	Vd<Rv,d+RO (KN)	-1682.7	-4461.1	OK
ELS OP/Freq excentrement V	9	ie > 2/3	0.849	0.667	OK
ELS Caract. excentrement V	27	ie > 1/2	0.842	0.500	OK
ELU de mobilisation du sol	86	Vd<Rv,d+RO (KN)	-1686.2	-4516.2	OK
ELU excentrement V	85	ie > 1/15	0.764	0.067	OK
ELU de glissement (H seul)	84	Rh:d/Hd > 1	1.431	1.000	OK
ELU de glissement (H + MZ)	84	Rmz:d/Mzd > 1	infini	1.000	OK
ELU sismique mobilisation sol	147	Vd<Rv,d+RO (KN)	-1609.1	-2540.5	OK
ELU sismique excentrement V	147	ie > 1/15	0.561	0.067	OK
ELU sism. glissement (H seul)	147	Rh:d/Hd > 1	1.007	1.000	OK
ELU sism. glissement (H + MZ)	155	Rmz:d/Mzd > 1	infini	1.000	OK

N° Comb. ELS	Rotation Maxi de la Semelle (mRad)	Déplac. Maxi de la Semelle (mm)	Déplac. Maxi en tête du mur (mm)	Déplac. limite en tête du mur (mm)	OK
10	0.79	0.0000	7.7683	104.3000	OK

Figure 9 : vérification des états limites et des déplacements (configuration 2)

D'après les résultats obtenus sur les figures ci-dessus, il est possible de conclure que sur la configuration 1 les valeurs calculées pour les états limites sont plus faibles que ceux de la configuration 2, ce qui est assez cohérent avec la réalité étant donné le fait d'ancrer la semelle de 0.5m dans une couche de sol où les caractéristiques mécaniques sont de meilleure qualité. Au niveau des déplacements maximaux la configuration 1 a aussi présenté des déplacements plus importants vis-à-vis de la différence entre les ancrages des dispositions. Ainsi, j'ai pu poursuivre avec la rédaction de la note de calcul pour validation et/ou optimisation de la part des ingénieurs structure.

Cette mission a développé mon sens critiques, mes compétences rédactionnelles et surtout la mise en pratique des connaissances apprises à Polytech.

REMBLAI DE MOULIN-GLATTARD

Pour le deuxième sujet, j'ai pu travailler sur un ouvrage en terre sensible suivi depuis les années 90, sur lequel en 2022 SNCF Réseau a mandaté le CEREMA pour mener une étude au grand glissement du site. Il s'agit du remblai de Moulin-Glattard, situé entre les communes de Tartaras (42) et Trèves (69) (Figure 10).

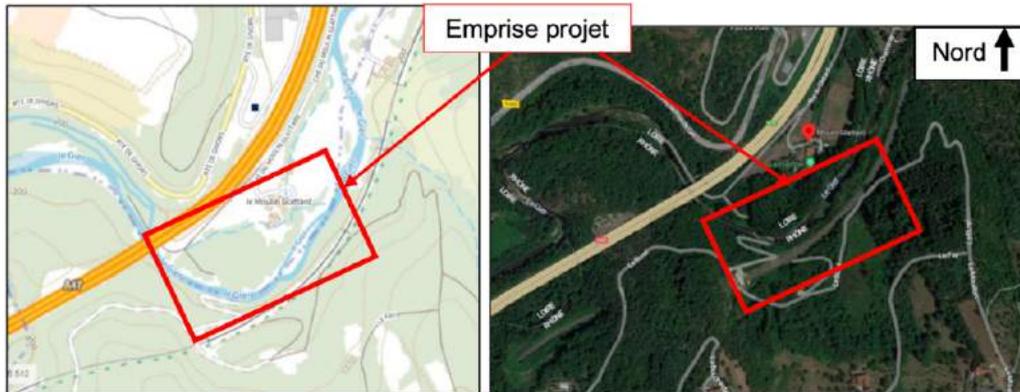


Figure 10 : carte IGN et photo aérienne du site

Au droit du lieu-dit du Moulin-Clattard, le lit mineur du Gier est l'objet de processus d'érosion latérale en rive droite mettant en danger l'avenir du remblai ferroviaire. Compte tenu des forts enjeux et de la dynamique d'évolution des processus, une opération de confortement de la berge droite (siège des circulations ferroviaires) doit être réalisée à plus ou moins court terme (Figure 11).

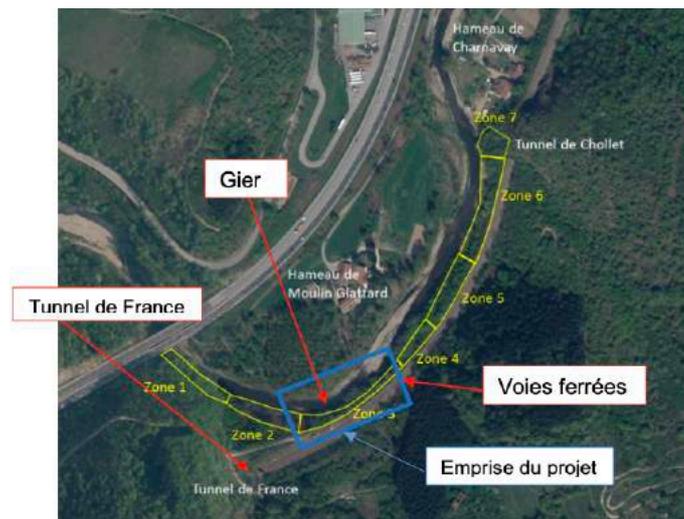


Figure 11 : vue en plan du site

Lors des visites de contrôles de l'ouvrage, des désordres importants ont été constatés sur la zone 3 dû à plusieurs crues importantes (crues du 02/12/2023, 02/11/2008 et 04/11/2014) et par la mobilité latérale du cours d'eau. La nature des terrains (talus et berges) tout au long de la zone d'étude est très hétérogène et conduit à des désordres d'incisions des terrains, et à la nécessité de mise en œuvre de massifs d'enrochements et de perrés en berge. De plus, la géométrie du remblai met en évidence que les plans de sécurité de la voie sont impactés. L'élément le plus sensible reste les circulations ferroviaires puisqu'un glissement par incision de remblai en rive droite pourrait provoquer le déraillement sur la voie en crête.

Deux études sont en cours : la G2 PRO – étude pour le confortement de berge afin de définir une solution technique viable et réalisable techniquement. Mission au cours de laquelle

nous avons défini une campagne de reconnaissances permettant de mener les deux études en simultanée. L'étude au Grand Glissement - étude du mouvement de reptation des sols fins sur le substratum rocheux sur l'ensemble du versant en forme d'amphithéâtre, au-dessus des voies ferrées. En fonction des conclusions de l'étude d'opportunité d'un grand glissement, les dispositions constructives à retenir en G2 PRO pourraient être impactées. Pour cela, une campagne de reconnaissance géotechnique (ANNEXE 7 : Plan d'implantation des sondages complémentaires) a été lancée afin d'étudier l'hétérogénéité de la nature et de la compacité des sols. Le linéaire du remblai à conforter est situé entre les profils P5 et P7 et mesure 120 mètres de longueur (Figure 12).

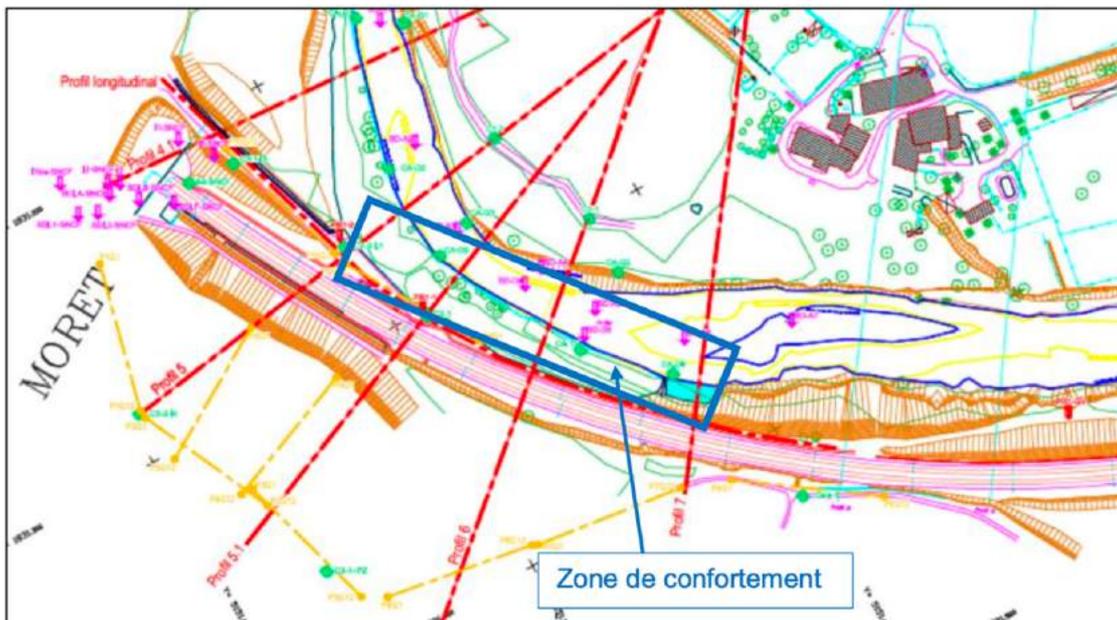


Figure 12 : localisation du projet

Mon rôle pour cette mission a été donc d'anticiper le VISA du rapport définit de la G2 PRO complémentaire afin de contrôler les études et discuter des solutions proposées. En effet, d'après les résultats des sondages j'ai dû établir le modèle géotechnique pour le profil le plus défavorable (profil 6 : Un remblai sur $H_{\max} = 15$ à 16 mètres, sur versant de pente modérée (45° à 50° maximum)) pour enfin proposer une solution faisable de confortement de la berge droite du Gier, vis-à-vis des contraintes liées à la présence du cours d'eau et surtout pour maintenir en circulation la ligne ferroviaire exploitée.

A partir de mon interprétation et d'une corrélation des résultats obtenus sur les sondages destructifs SD-D4, SD-D5, SD-A4 et SD-A5 et les carottés C1-1, CA-T1 et CA-T5 j'ai pu établir le modèle géotechnique suivant pour le profil 6 (

Figure 13) :

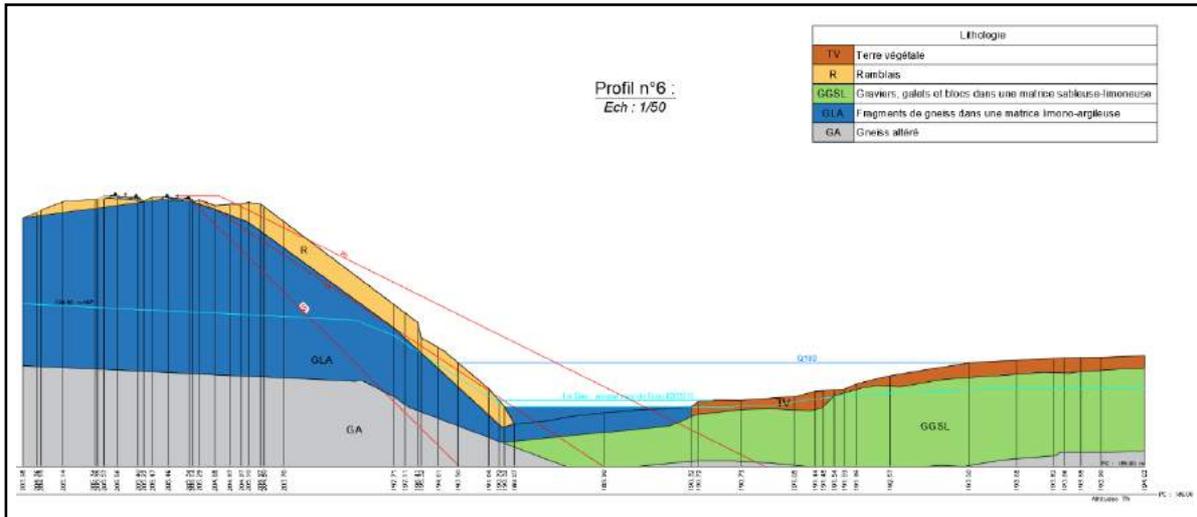


Figure 13 : mon modèle géotechnique pour le profil n°6

En comparant avec celui défini par l'entreprise responsable du rapport définitif de la G2 PRO Complémentaire (Figure 14) il est raisonnable de conclure que malgré les différences, les résultats des profils 6 ont été assez cohérents.

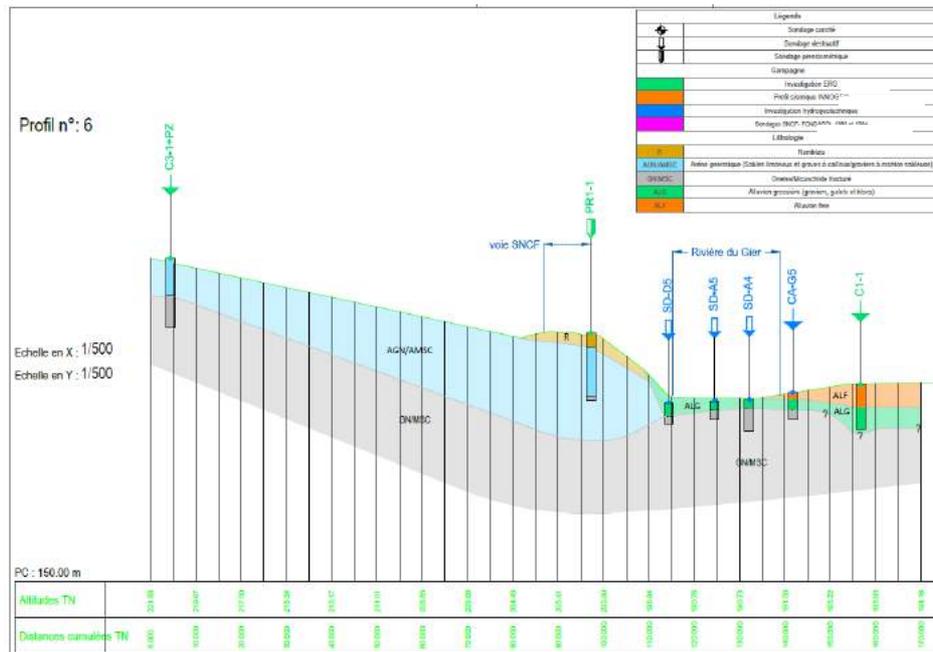


Figure 14 : modèle géotechnique définit dans la G2 PRO pour le profil n°6

Le fait d'avoir réalisé moi-même le modèle géotechnique m'a permis d'anticiper la validation de la G2 PRO et d'avoir du recul afin d'argumenter lors des discussions techniques vis-à-vis de la solution de confortement du remblai ferroviaire. Compte tenu de la problématique de glissement, je suis parti du principe de la mise en œuvre d'un confortement en enrochements liaisonnés sur les 120 mètres avec une pente 3H/2V ancrés dans le talus avec une bêche d'ancrage de 3 mètres de largeur et de 2 mètres profondeur. Cette solution prévoit

de conserver sensiblement la section d'écoulement actuelle du cours d'eau, sans relever le fil d'eau. De fait, elle nécessite de prévoir des excavations dans le talus, pour permettre la mise en place de l'enrochement (Figure 15).

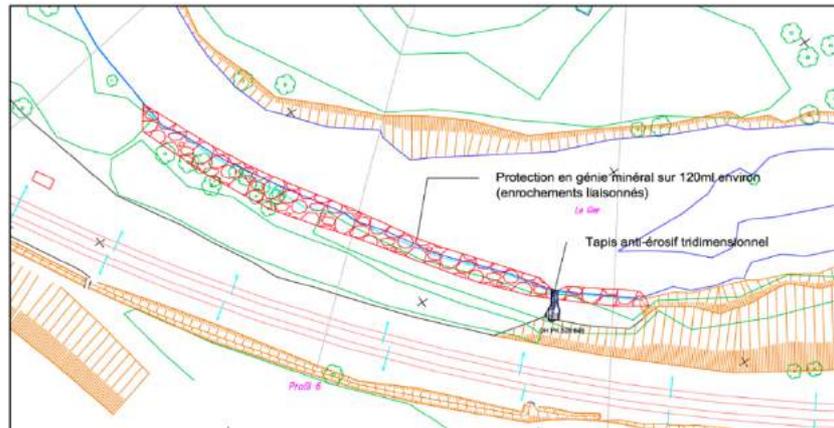


Figure 15 : solution de confortement proposé

Pour cela, j'ai dû définir :

1 – Les dimensions du profil (Figure 16) :

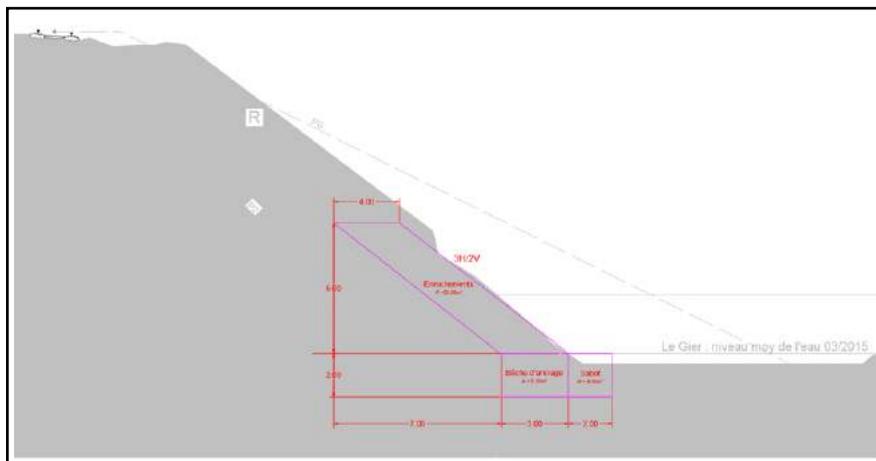


Figure 16 : dimensions du profil d'enrochement

Comme expliqué précédemment, je suis parti du principe de conserver significativement la portion courant du cours d'eau. Ainsi, j'ai établi sur une longueur linéaire de 120 mètres une section transversale constituée d'une bêche d'ancrage de 3 mètres de largeur et de 2 mètres profondeur, un sabot de 2 mètres de largeur et de 2 mètres profondeur et des enrochements sur une pente de 3H/2V commençant du niveau moyen de l'eau du Gier et montant 6 mètres avec une largeur de 4 mètres.

2 – Le tonnage :

Avec les dimensions du profil définies, j'ai pu poursuivre avec le calcul du tonnage :

$$V(m^3) = S \cdot l = 45,5 \cdot 120 = 5\,460\, m^3$$

Dont :

- S : est surface du profil ;
- l : est la longueur linéaire du profil.

Les caractéristiques mécaniques minimales que j'ai choisi pour l'encrochement liaisonné à mettre en œuvre sont données ci-dessous (Tableau 4) :

Matériau	γ kN/m ³	c' kPa	ϕ' °
Encrochements bétonnés	25	50	45

Tableau 4 : caractéristiques intrinsèques minimales des encrochements liaisonnés

$$T(t) = V(m^3) \cdot \gamma \left(\frac{t}{m^3} \right) = 5\,460 \cdot 0,0025 = 13,65\, t$$

En arrondissant, j'ai décidé caler le tonnage à 14 t.

3 – La blocométrie :

Pour déterminer la dimension des blocs à mettre en place, j'ai appliqué la formule d'Isbash, qui donne le diamètre médian (d) des blocs pour une protection en encrochement sur fond plat en fonction de la vitesse (U) du courant au voisinage du revêtement (écoulement faiblement turbulent). Lors des études hydrogéologiques, U du Gier a été défini égal à 5,6m/s².

$$d = 0,7 \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \cdot \frac{U^2}{2g}$$

Dont :

- $\gamma_s = 25\, \text{kN/m}^3$;
- $\gamma_w = 10\, \text{kN/m}^3$;
- $g = 9,81\, \text{m/s}^2$.

$$d = 0,7 \cdot \frac{10}{25 - 10} \cdot \frac{5,6^2}{2 \cdot 9,8} = 0,7\, m$$

Pour la taille des encrochements posés sur un talus (ce qui est notre cas en protection des berges), un facteur correctif (*E.W.Lanne*) est calculé pour diviser le diamètre calculé pour un fond plat :

$$f = \sqrt{1 - \frac{\sin(\beta)^2}{\sin(\phi)^2}}$$

Dont :

- β est l'angle du talus avec l'horizontale ;

- φ est l'angle d'équilibre limite des enrochement libre sans écoulement (une valeur moyenne de 40° est retenue).

Plus l'angle β du talus est couché, plus la taille des blocs sera augmentée par le facteur de *Lanne* qui tiendra compte de la composante tangentielle liée à la pente inclinée sur laquelle le bloc est posé. Pour l'opération de Moulin-Glattard en prenant compte des vitesses de l'ordre de $5,6\text{m/s}^2$, d'après les études faites dans la G2-AVP, qui s'exercent localement en extrados des méandres et une pente de talus à conforter de $3\text{H}/2\text{V}$ (34°), le nouveau diamètre « d' » vaut :

$$d' = \frac{0,7}{\sqrt{1 - \frac{\sin(\beta)^2}{\sin(\varphi)^2}}} = \frac{0,7}{\sqrt{1 - \frac{\sin(34^\circ)^2}{\sin(40^\circ)^2}}} = 1,42\text{m}$$

Donc, avec un talus à $3\text{H}/2\text{V}$, le diamètre moyen des blocs de la protection est :

$$D = d \cdot d' = 0,7 \cdot 1,42 = 1,00 \text{ m}$$

Tenant compte du contexte (pente, ouvrage SNCF à l'amont), toute excavation provisoire, sous les plans de sécurité de la voie ferrée, doit faire l'objet d'un soutènement systématique mis en place à l'avancement des terrassements. De plus, un plot terrassé sur un poste doit être refermé en fin de poste. Ainsi, je suis parti du principe de la mise en place d'une paroi berlinoise en tant qu'ouvrage de soutènement provisoire pour permettre la mise en œuvre des enrochements. Pour rendre ma solution possible et justifiable, j'ai dû établir le phasage (Figure 17) afin d'estimer un planning travaux à la grosse maille. En effet, mon planning travaux devait répondre aux questions des impacts sur la circulation ferroviaire, c'est-à-dire : s'il est nécessaire, une limitation de vitesse temporaire et pour combien de temps, s'il y aura des travaux de nuit et de jour et pour combien de temps, etc. Tout ça pour que la MOA avec la MOEG puisse établir un planning dit « RP0 », à établir à A-2, permettant de demander des capacités travaux sur la ligne. Les capacités, travaux, peuvent se traduire par des limitations temporaires de vitesses (LTV) ou des Interruptions Temporaires de Circulation (ITC), afin de réaliser les travaux avec mise en sécurité des circulations ferroviaires. A partir des 35 mètres sur le linéaire vers l'Est la foreuse engagera le gabarit ferroviaire. De ce fait, j'ai donc dû préconiser des forages de nuit afin de poursuivre les travaux, mais sans faire appel à une possible fermeture de la ligne.

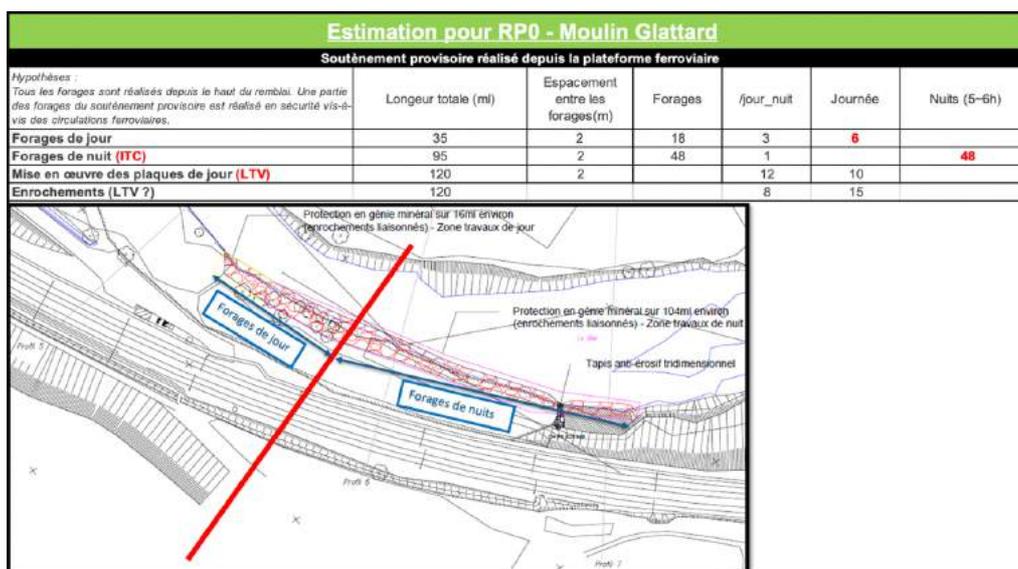


Figure 17 : phasage des travaux de confortement

Dans le rapport définitif de la G2 PRO, la solution choisie pour conforter le remblai part du même principe sur des travaux d'enrochements + une paroi berlinoise jouant le rôle du soutènement provisoire, ce qui est compatible avec ce que j'ai pu préconiser. Cependant, lors de la lecture j'ai pu remettre en question quelques propositions sur :

- 1- Des contraintes environnementales liées au Gier : dans la G2 PRO il est proposé de réaliser un batardeau et/ou un canal de déviation et de pompages pour assurer la mise au sec d'une aire de travaux. Ensuite, un aménagement de remblai en pied de talus permettra la réalisation de l'ouvrage provisoire. Cependant, cette intervention aurait une grande interférence environnementale dans le cours du lit mineur du Gier et aussi une durée qui aurait des impacts directs sur le budget. Ces deux contraintes iraient contre les intérêts environnementaux et économiques de la SNCF ;
- 2- La solution de soutènement provisoire a également un intérêt restreint étant donné que :
 - La modélisation a été faite en considérant un rôle définitif pour l'ouvrage, donc les calculs ont pris en compte un déplacement nul, ce qui n'est pas représentatif vis-à-vis de ce que se passe dans la réalité sur les ouvrages provisoires. De ce fait, une remise en question sur la nécessité des enrochements (l'ouvrage définitif) pour maintenir la pente a été fait.
 - Une deuxième remise en question sur la nécessité des enrochements comme ouvrage définitif repose sur le fait que la paroi berlinoise puisse être modélisée avec 4 lits de tirants comme ancrage, ce qui rend la paroi capable de maintenir le talus toute seule (Figure 18).

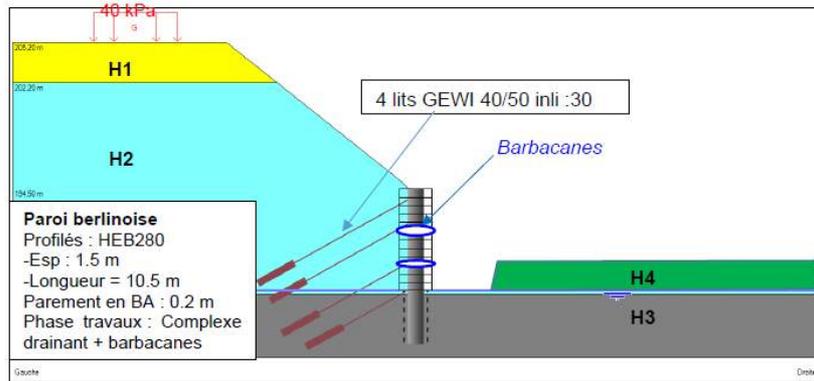


Figure 18 : coupe type de la paroi proposée par l'entreprise

- 3- La méthodologie de mise en œuvre : faire les forages de la paroi berlinoise en touche de piano (c'est-à-dire creuser en X, puis en X+2 et ensuite X+1). Ainsi, la réalisation des tirants sur la paroi berlinoise pourrait être non nécessaire car le talus resterait stable.

Ces remarques ont constitué ma fiche d'observation sur la G2 PRO, ce qui a été aussi ma dernière activité dans le projet du remblai de Moulin-Grattard. Une réunion technique doit avoir lieu en septembre pour accorder les solutions et tendre vers un soutènement provisoire simplifier (sans tirant). Cette mission a éveillé mon sens critique, qui était jusque-là l'un des points que je devais améliorer au sein du BE3.

OA7BIS/OA7 – LORIOL-SUR-DRÔME/LIVRON-SUR-DRÔME

Pour le troisième projet, j'ai eu la responsabilité de piloter les entreprises en phase DCE de reconnaissances géotechniques pour le projet de déviation de la route nationale n° 7 sur les communes de Livron-sur-Drôme et Loriol-sur-Drôme. Le projet fait l'objet de la création d'un pont-rail (OA7) et d'un pont-route (OA7 bis) qui permettront le rétablissement des voies ferrées de la ligne Paris – Lyon – Marseille (ligne 830 000) et de la voie communale accès à la Zone d'Activité Commerciale est envisagé au pk 638+735 (Figure 19).



Figure 19 : vue en plan du site

L'objectif du projet repose sur l'allègement de la traversée de Loriol et de Livron ainsi que sur l'amélioration de la fluidité du trafic local. Pour que cela soit possible, il est envisagé donc de construire en un seul complexe, deux ouvrages d'art dans l'axe de la déviation routière, qui seront ensuite ripés au cours d'une Opération Coup de Poing (OCP), en fermeture totale de la ligne ferroviaire. Lors d'un premier phasage, le pont rail ainsi que le pont route seront préfabriqués au droit d'une fouille dont le niveau bas est actuellement prévu à environ 96,0 m NGF. La surface de la fouille atteindra environ 2 100 m². Dans un deuxième temps, il est prévu que l'ouvrage soit ripé au droit de la rue Hector Berlioz et de la voie SNCF. La fouille complémentaire s'étendrait sur une surface de 1 800 m² environ et atteindra une profondeur de 96,0 m NGF (niveau haut de la couche de substitution) (

Figure 20).



Figure 20 : plan des phasages du ripage

Pour cela, des investigations géotechniques destinées aux reconnaissances des sols pour les études du projet ont été réalisées afin de fiabiliser la solution préconisée lors des phases des précédentes études. Ma responsabilité pour cette mission a été donc de faire le pilotage entre les entreprises. En effet, j'ai dû préparer des réunions pour la validation des procédures administratives, techniques et logistiques et ainsi adapter et démarrer les reconnaissances géotechniques.

Du point de vue hydrogéologique du site, des études faites en 2018 ont mené à la rencontre d'un aquifère constitué majoritairement par des Alluvions de la Drôme, une formation sablo-graveleuse. Au vu des formations recoupées, la productivité de cet aquifère

serait importante et l'écoulement de la nappe serait en grande majorité libre, ce qui demanderait un rabattement de la nappe pour la réalisation des travaux dans la zone (Figure 21).

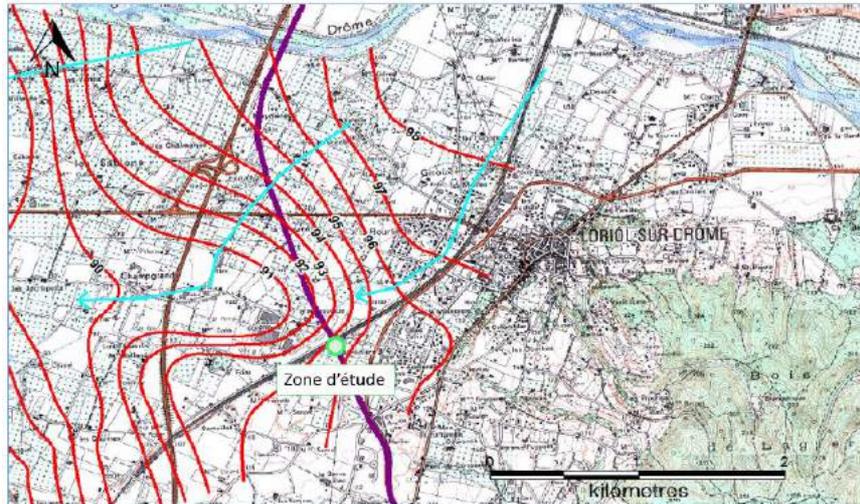


Figure 21 : extrait de la carte piézométrique provisoire de la Négociale réalisé en juin 2010

D'après la carte piézométrique réalisée par IDEES EAUX en juin 2010 dans le cadre du captage de la Négociale, il est raisonnable de conclure que la nappe sera orientée en direction de l'ouest avec une cote comprise entre 94,0 et 95,0 m.NGF.

Avant la préparation de la première réunion, des changements sur le programme de reconnaissance G2-AVP envisagés (ANNEXE 8 : Plan d'implantation des sondages envisagé) étaient déjà prévus afin de répondre aux exigences financières du projet. Pour ce faire, j'ai dimensionné une campagne moins importante, mais qui permet surtout d'un point de vue hydrogéologique puisqu'une campagne G2 PRO avait déjà été faite sur ce projet.

De plus, lors de la réunion des constats d'après la déclaration d'intention de commencement de travaux (DICT), des réseaux de haute tension (HTA) et une canalisation SUEZ (d'eau potable, d'assainissement ou de gaz) enterrés en pied de talus ont été repérés, ce qui a rendu des modifications sur le programme et le plan d'implantation envisagé précédemment (ANNEXE 9 : Plan d'implantation des sondages modifié). Le programme modifié proposait ainsi :

- 6 sondages pénétrométriques pour l'étude du remblai de raccordement ;
- 6 sondages destructif avec la pose de 5 piézomètres + 1 puit de pompage afin de réaliser l'étude hydrogéologique ;
- 2 sondages pressiométriques pour faire l'étude du dimensionnement de la zone de préfabrication et ripage de l'ouvrage ;
- 1 Fouille en talus avec le but de reconnaître la nature des terrains constituant le remblai ferroviaire actuel ;
- 2 Pelles mécaniques afin de reconnaître la nature et la granulométrie des terrains présents sur le site des investigations.

Une fois le nouveau programme validé, j'ai pu mener une visite sur site afin de suivre et garantir l'implantation des sondages aux bons endroits. Ce fut aussi l'occasion d'effectuer la détection géophysique des réseaux afin de valider les constats de la DICT (Figure 22).



Figure 22 : implantation des sondages

Les résultats provisoires des sondages ont constaté que l'ouvrage serait situé dans un environnement de sols constitués majoritairement de graves crues très perméables (de l'ordre de $K = 3.10^{-2}$ m/s), ce qui est donc une perméabilité très importante pour un aquifère. Ce constat a été confirmé lors de l'essai de pompage étant donné qu'après une première demi-journée de pompage au droit du futur site envisagé pour l'OCP sur Loriol et Livron, un rabattement de seulement 5 cm a été constaté au droit du puits DE1, après une heure de pompage à environ 36 m³/h (débit max).

Les conclusions finales du rapport hydrogéologique ont remis en question la faisabilité d'un ripage de l'ouvrage (solution presque impossible à mettre en place). Pour poursuivre avec cette dernière, il serait nécessaire d'effectuer des pompages importants lors de la phase de préfabrication de l'ouvrage, ce qu'impliquerait un exutoire adapté aux débits de pointes très élevés (compris entre 800 et 4 000 m³, ce qui ne paraît pas compatible avec la capacité de rejets des réseaux hydrographiques proches). Pour cela, j'ai dû caler une réunion d'urgence avec les ouvragistes de la SNCF afin de réfléchir à des dispositions constructives alternatives au regard des conclusions du rapport hydrogéologique.

Tout cela engendrera un délai supplémentaire pour le rendu des études AVP vu qu'une mise en pause de l'étude hydrogéologique, vis-à-vis de la solution étudiée a été actée, afin de repenser des dispositions constructives adaptées au contexte local.

Malgré le fait d'avoir de tâches très ponctuelles, cette mission m'a permis de jouer un rôle centralisé tout au long de l'avancement des phases. La prise en charge de l'organisation globale du projet m'a permis de développer le sens de l'urgence nécessaire autour des ajustements demandés face aux problématiques imprévues, toujours dans le respect des consignes données pour une circulation en toute sécurité.

VISITES SUR TERRAIN

Au cours de mon séjour au sein du BE3, j'ai eu plusieurs occasions d'aller sur le terrain. Les visites m'ont permis de surtout mieux comprendre la complexité et les contraintes des différents projets toujours en partant d'une démarche globale qui passe par :

1. La définition des objectifs de la visite ;
2. La préparation de la visite terrain ;
3. L'observation de l'activité de travail ;
4. La restitution des constats en fin de visite ;
5. Le traitement des constats.

Dans le présent rapport je me concentrerai sur l'accompagnement de deux visites annuelles d'inspection des cavités instrumentées sous la ligne de grande vitesse (LGV) - Méditerranée. Au droit de cette ligne se trouvent aujourd'hui trois zones karstiques suivies depuis 2006 : la zone karstique de Malataverne (autour de Montélimar), la zone karstique de Font Paule (autour d'Avignon) et la zone karstique du plateau d'arbois (autour d'Aix-en-Provence). De ce fait, j'ai eu l'occasion de participer aux visites annuelles des deux premières des trois citées ci-dessus (Figure 23).

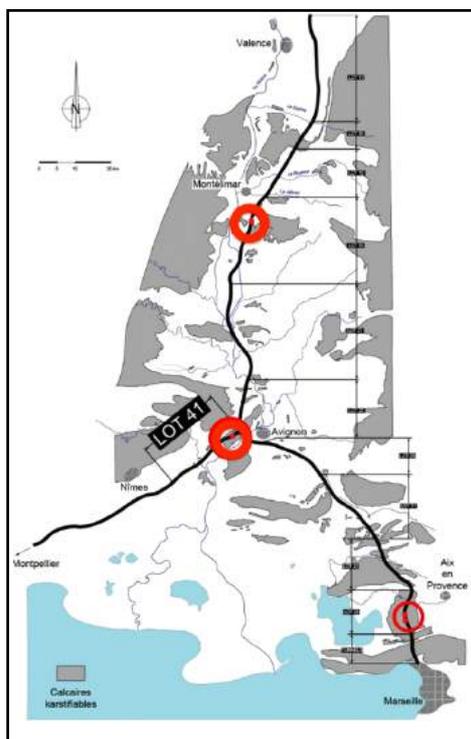


Figure 23 : vue en plan des zones d'étude

Par définition, les karsts sont un type particulier de morphologie. Le paysage karstique est le résultat d'écoulements souterrains particuliers qui se forment progressivement dans les roches carbonatées (les calcaires, par exemple) et dans les roches salines. Compte tenu de sa

formation et son fonctionnement, qui sont totalement influencés par l'eau souterraine, les karsts sont considérés aussi comme un aquifère. Ils sont ainsi constitués d'un ensemble de formes souterraines et de surface ainsi que par les conditions d'écoulement souterrain, qui interagissent entre elles.

Dans le cadre des visites karstologues annuelles, j'en ai eu l'occasion d'accompagner deux dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : la première au sud de Montélimar et la deuxième à Ovest d'Avignon. La formation géologique des sites visités est indiquée par la présence du calcaire barrémien, une formation marno-calcaire du crétacé inférieur. Depuis 2011, les réseaux de Malataverne et Font Paule sont équipés de pluviomètres et de sondes de mesure piézométriques et de température afin d'accompagner l'avancement des phénomènes. Au cours des 10 années de suivi, un certain nombre de corrélations de phénomènes communs aux deux sites ont été identifiés, tels que :

- Les fluctuations des niveaux d'eau dans les siphons (galeries naturelles ennoyées) ont une forte corrélation aux saisons. Les variations des niveaux d'eau montrent que le niveau des eaux souterraines augmente de la fin de l'automne au début du printemps et que le niveau des eaux souterraines diminue de la fin du printemps au début de l'été.
- Les variations de température sont largement influencées par des circulations d'air dans les forages. Ce phénomène peut être corrélé donc au fait de l'aspiration d'air frais dans les forages indiquant une connexion avec un réseau de conduits permettant le transfert d'air. Aussi, d'une manière générale, les variations de température sont fortement corrélées aux variations de niveau d'eau, avec des variations positives ou négatives suivant la saison.

Les inspections annuelles permettent ainsi de contrôler un nombre de stations d'observation matérialisant les points remarquables devant faire l'objet d'observations systématiques sur : l'hydrologie, la géotechnique, la karstologie et l'aérologie. Tout cela afin d'établir une corrélation entre les données enregistrées et les possibles désordres souterrains ou en surface et ainsi évaluer et analyser toute évolution du site vis-à-vis des consignes données pour la circulation de la ligne en sécurité.

Accompagné par la collecte de données sur site, j'ai pu comprendre comment cela favorise l'analyse sur le comportement des ouvrages et permet la réalisation d'un diagnostic plus efficace. L'auscultation apporte une importante plus-value puisqu'elle vise à réduire les endommagements afin de pérenniser les ouvrages. De plus, la lecture postérieure des constats et préconisations des comptes-rendus m'a permis de comprendre l'importance d'une interprétation cohérente vis-à-vis de la variété d'informations fournies.

REEMPLACEMENT DU PASSAGE A NIVEAU PN65/66

Présentation de l'ouvrage

Comme sujet principal du présent rapport, j'ai opté pour la mission dont j'ai passé le plus de temps à développer : le projet de suppression du PN65 et remplacement du PN66. Ce projet vise à la suppression définitive du PN65 et au remplacement du PN 66 avec la création d'un Pont Rail de rétablissement de la voie ferrée et la création d'un Pont Route pour rétablir le Chemin de la Barlière (74), parallèle aux voies ferrées et desservant la gare de Perrignier. Les 2 ouvrages permettent le franchissement inférieur de la RD135. Le projet se situe en zone urbanisée rasante. Il est encadré (Figure 24) :

- Au Nord et à l'Ouest par la zone industrielle de Perrignier ;
- Au Sud-ouest par la gare de Perrignier, un lotissement et un site Natura 2000 et ;
- A l'Est par un immeuble d'habitation et une parcelle agricole.

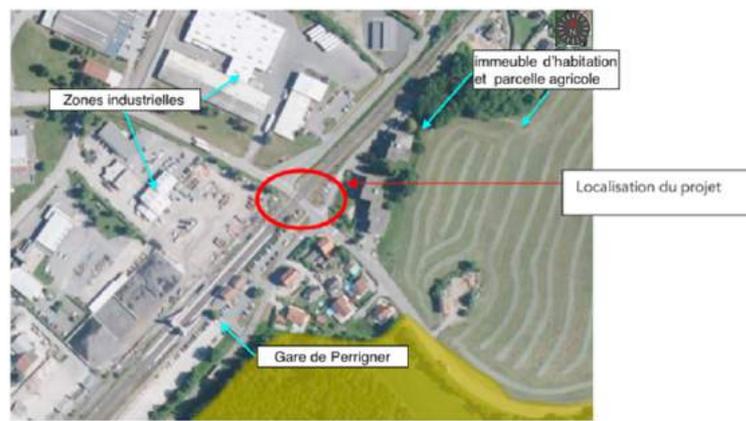


Figure 24 : vue en plan de localisation du projet

La solution retenue pour la suppression du PN-65/66 consiste à faire passer la RD135 sous les voies ferrées. Une trémie de 360 m de long est créée avec deux ouvrages de franchissement :

- Un Pont rails permettant le franchissement des deux voies de la ligne ferroviaire de Longera-Leaz au Bouveret (892 000) ;
- Un Pont route permettant le franchissement du chemin de la Barlière.

La largeur de la RD135 recherchée est de 12,40 mètres au droit des ouvrages de franchissement et de 11,40 mètres au-delà. Une vue en plan de l'ensemble de l'ouvrage est fournie en annexe afin d'une mieux compréhension (ANNEXE 10 : vue en plan générale). Pour cette mission, mon rôle a été donc de faire les études de conception des ouvrages de soutènement provisoires et définitifs :

- Rideau de palplanche (ouvrage provisoire) ;

- Paroi de pieux sécants butonnés (ouvrage définitif) ;
- Paroi de pieux sécants auto-stables (ouvrage définitif) ;
- Mur de soutènement L (ouvrage définitif).

Pour ce faire, je me suis occupé d'abord de synthétiser l'ensemble d'informations fournies d'après les sondages et les essais laboratoires afin d'établir le modèle géotechnique du profil longitudinal à utiliser pour le dimensionnement de chacun des ouvrages. Tout ça, en visant à une validation future des calculs et de la rédaction des notes de calculs.

Contexte géologique

Le projet se situe dans les contreforts du Chablais, en limite de bassin lémanique. Ce domaine est celui de formations glaciaires, et fluvio-glaciaires. La carte géologique de Douvaine (629) au 1/50 000 renseigne sur le contexte géologique. Les formations identifiées sont des remblais et formations de surfaces et des formations glaciaires Gy-argiles à blocs. On note aussi la présence des formations fluvio-glaciaires (FGyT) au Sud de la gare de Perrignier (Figure 25).



Figure 25 : extrait de la carte géologique de Douvaine (N°629)

Contexte hydrogéologique

Le niveau de nappe retenu à ce stade de l'étude est de 527.50 m NGF selon les reconnaissances réalisées dans le cadre du projet de création de la passerelle de la gare de Perrignier, située à 100 mètres à l'Ouest.

Contexte géotechnique

Les diverses campagnes de reconnaissances menées en 2017 dans le cadre de la mise en accessibilité PMR de la gare de Perrignier, peuvent laisser croire à un contexte similaire, à savoir :

- Couche 0 : remblai de surface limono graveleux ocre marron ;

- Couche 1 : horizon sablo limoneux marron beige à cailloutis, cailloux et quelques blocs, de compacité faible à modeste ;
- Couche 2a : horizon limono sableux marron gris à quelques graviers roulés de compacité moyenne à élevée et ;
- Couche 2b : Horizon limono argileux marron gris à rares cailloux de compacité faible à modeste.

Ainsi, sur la base des sondages carottés, des sondages pressiométriques et des résultats d'essais en laboratoire obtenus dans le cadre de la campagne de reconnaissance géotechnique G2 AVP du site (ANNEXE 11 : plan d'implantation des sondages), j'ai pu moi-même déterminer le modèle géotechnique. Pour cela, j'ai compilé un tableau synthèse avec toutes les informations obtenues à partir des sondages et des essais laboratoires, ce qui m'a permis d'établir la variation des horizons du profil longitudinal du site (Figure 26) et retenir la lithologie et ses caractéristiques mécaniques de la manière suivante (Tableau 5) :

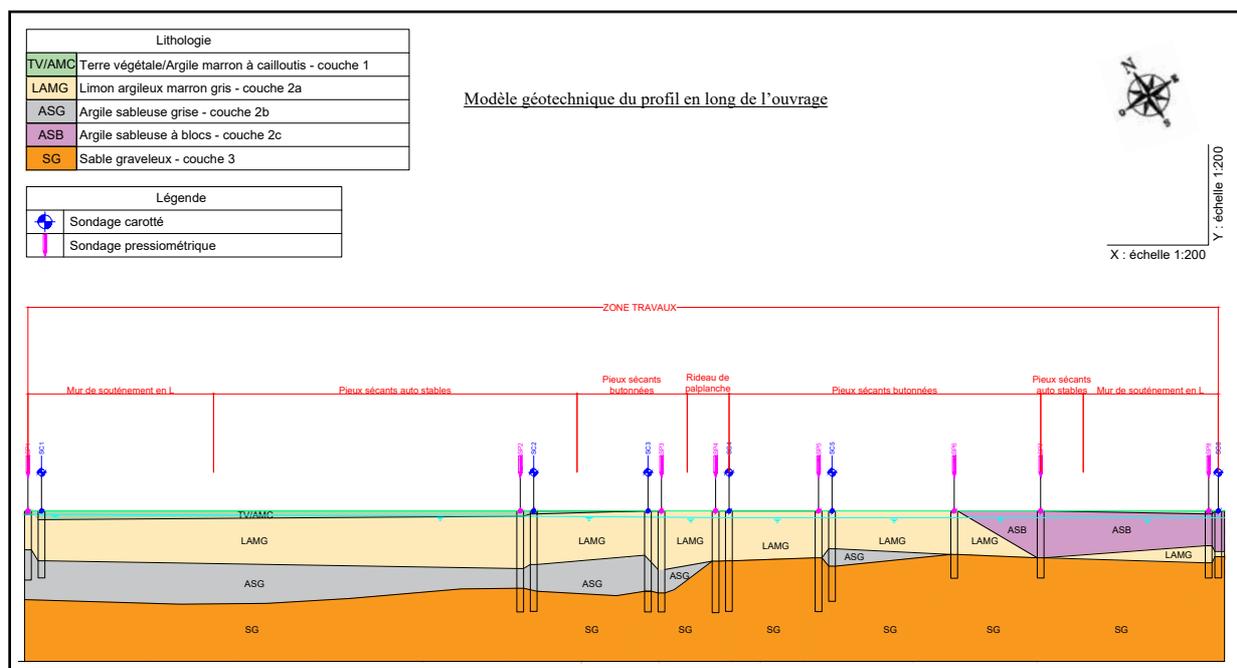


Figure 26 : profil longitudinal retenu

Modèle géotechnique retenu								
Couche	Lithologie	Profondeur (m)	GTR	c'(kPa)	ϕ' (°)	PI* (MPa)	Em (MPa)	α
2a	Limon Argileux marron gris	0,00 – 17,50	A1/A2	16	25	0,73	3,02	0,5
2b	Argileuse sableuse grise	11,60 – 27,85	A1	15	27	1,00	3,31	0,5

2c	Argileuse sableuse à blocs	0,00 – 14,00	B5	16	27	1,85	1,97	0,5
3	Sable graveleux	13,00 – 30,00	D3	5	31	3,72	20,42	0,33

Tableau 5 : caractéristiques mécaniques du modèle géotechnique établi

Une fine couche « C1 » constituée de terre végétale mêlée avec de l'argile marron à cailloutis a été également retenue. Cependant, dans le contexte d'une présence très ponctuelle et peu représentative dans les calculs, cette couche peut être négligée.

Aléas

D'après le site www.georisques.gouv.fr le site étudié se situe en zone d'aléa faible vis-à-vis du retrait gonflement des argiles et le site ne répertorie aucune cavité souterraine ou mouvement de terrain dans un rayon de 200 mètres.

Selon la carte de l'aléa sismique en France tirée de l'annexe nationale de l'Eurocode 8 « calcul des structures pour leur résistance aux séismes », le projet se situe dans une zone sismique à aléa moyen (Zone 4) impliquant la prise en considération d'efforts sismiques horizontaux et verticaux pour la conception des différents ouvrages. Ces règles doivent être appliquées au moyen d'un coefficient d'importance attribué à chacune des catégories d'importance de la structure. Suivant la même démarche que celle utilisée lors des calculs pour le remplacement du passage à niveau PN-13, dans le cadre de cette étude $a_{gr} = 1,6 \text{ m/s}^2$ et $\gamma_1 = 1$. Donc :

$$a_g = a_{gr} \times \gamma_1 = 1,6 \times 1 = 1,6 \text{ m/s}^2$$

Adoptant g égal à $9,81 \text{ m/s}^2$, r égal à 1 (un choix très sécuritaire qui suppose donc qu'il n'y aura pas de déplacement résiduel après séisme), le paramètre de sol S égal à 1,5 (sol de classe C) et considérant les calculs pour les cas des séisme pesant (+) et allégeant (-) pour k_h , il est retenu :

$$k_h = \frac{1,6}{9,81} \cdot \frac{1,5}{1} = 0,244 \quad \text{et} \quad k_v = 0,5 \cdot 0,244 = \pm 0,122$$

Dimensionnement

Contrairement au logiciel interne DPI Vocal, qui a servi à concevoir le mur de soutènement L dans le cadre de cette étude, pour dimensionner les autres ouvrages j'ai utilisé le logiciel K-Réa. Ce dernier utilise la méthode de calcul MISS, méthode de calcul aux coefficients qui associe le modèle d'une poutre en flexion symbolisant notre écran, avec celui d'une distribution de ressorts accolés élasto-plastiques modélisant le comportement lié à l'interaction sol-écran. Les tirants et butons sont modélisés par des ressorts élasto-plastiques équivalents. K-Réa nous permet d'obtenir des résultats afin de dimensionner des ouvrages de

soutènement, en utilisant par exemple : le déplacement, l'effort tranchant et le moment fléchissant. Cela permet de placer le projet :

- Dans le cas limite de stabilité de l'ouvrage (cas ELU) recommandé par le cahier des charges donnant la possibilité d'optimiser l'ouvrage, mais toujours dans l'optique de permettre de faire circuler du trafic ferroviaire en sécurité ;
- Dans le cas limite de déformation (cas ELS), qui consiste à vérifier que leur déformation élastique reste compatible avec le fonctionnement. A ce titre, des référentiels SNCF fixent les déplacements maximaux, à ne pas dépasser, pour des ouvrages de soutènements à proximité de voies circulées.

Afin d'éviter de présenter un trop grand nombre de modélisations j'ai fait quelques hypothèses. Tout d'abord, le terrain naturel se situe à une cote NGF de +529,5 et le fond de fouille le plus profond (celui des rideaux de palplanche) se situe à la cote +521,1 m, ce qui donne une excavation maximale à effectuer de +8,4 m. Afin de se placer dans le cas le plus défavorable pour le dimensionnement des ouvrages, j'ai opté donc de figer cette cote pour le fond de fouille des pieux sécants (butonnés et auto stables) et du rideau de palplanches.

Une seconde hypothèse repose sur le choix de modéliser les ouvrages en double écran, ce qui va me permettre de faire jouer les dissymétries du problème. De plus, j'ai opté effectuer lancer les calculs pour toutes les configurations de chaque ouvrage en choisissant présenter celle la plus défavorable vis-à-vis des déplacements. En effet, compte tenu de la symétrie des types d'ouvrage sur le linéaire, la configuration ancrée dans l'horizon le moins favorable a été retenue.

Lors des excavations, j'ai choisi aussi rabattre la nappe au même niveau que l'excavation en cours afin d'être dans le cas le plus défavorable. En pratique, nous devons rabattre la nappe un peu plus afin d'éviter qu'elle ne remonte pas (pluie non prévue ou passage d'engins de chantier). Ainsi, passons désormais aux dimensionnements.

Dimensionnement de l'ouvrage de soutènement provisoire – rideau de palplanche

Afin de limiter au maximum les coupures ferroviaires, il a été envisagé de retenir la mise en œuvre d'un rideau de palplanche, comme appui provisoire au pont rail, au droit de la voie ferrée. Cette solution repose sur un phasage des travaux très délicat à cause du contexte du projet. Tout d'abord, il se situe au droit d'une installation ferroviaire, le tout dans une zone résidentielle, ce qui demande des réflexions plus poussées et sensibles pour le dimensionnement vis-à-vis des habitations. Aussi, tenant compte de la politique et des intérêts de SNCF Réseau, la mise en œuvre de pieux au droit de la voie ferrée n'était pas chose envisageable, d'autant plus que cela prend plus de temps de réalisation. Ainsi, le choix d'un ouvrage provisoire avec un rideau de palplanche permet la mise en place du tablier du pont rail lors d'une opération coup de poing (OCP). Tout ça pour un rapide rétablissement de la voie permettant ainsi de faire circuler du trafic ferroviaire. Ces raisons renforcent le choix des rideaux de palplanche tirantés en soutènement et appui provisoire de la trémie routière au droit

de la voie ferrée. Les palplanches seront mises en œuvre à la faveur de deux OCP, avant une OCP principale pour mise en place du Pont Rail préalablement préfabriqué.

- Géométrie

En phase provisoire, le tablier du pont rail sera appuyé sur des palplanches tirantées avec une portée entraxe d'environ 14,45 m ; alors qu'en phase définitive, le tablier sera appuyé sur des voiles en béton armé avec une portée d'entraxe de 13,20 m. L'ouvrage définitif formera une enceinte fermée comportant une traverse articulée aux appuis par des bossages et des piédroits encastrés dans le radier. En phase définitive, les rideaux de palplanches seront donc rendus inactifs (ANNEXE 12 : rideaux de palplanche – phase définitive).

Trois lits de tirants, respectivement aux côtes +527 +525 et +523 m.NGF. Ces tirants sont espacés de 1,20 m horizontalement et ancrés avec un $\alpha = 15^\circ$ par rapport à l'horizontale et vers le bas. Il s'agit de tirants GEWI 63,5T. L'espacement de 1,20 m est choisi de manière à implanter les tirants sur la partie plane des palplanches.

- Caractéristiques des couches

Les épaisseurs des couches de sols définies pour le cas de pieux sécants butonnés sont identiques à celles fixées par le sondage SP4. En tête de palplanche, à la place du sol en place, j'ai considéré la mise d'un bloc technique sur une bande de 2 m. Les caractéristiques pour ce matériau sont les suivantes :

$$\varphi = 35^\circ \quad c' = 5kPa \quad E_m = 20MPa \quad \alpha = 0,5$$

La valeur choisie pour E_m équivaut à un béton médiocre, et les paramètres de sol choisis sont inférieurs à ceux usuellement considérés pour ce type de matériau. Les paramètres des sols initiaux introduits sous K-Réa sont les suivants (Figure 27) :

Couche	z [m]	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	φ [°]	c [kN/m ²]	dc [kN/m ² /m]	k0	kay	kpy	kd	kr	kac	kpc	kh [kN/m ² /m]
Limon argileux marron grs	529,50	17,00	7,00	25,00	16,00	0,000	0,577	0,406	3,319	0,577	0,577	1,274	4,764	4066
Argile sableuse grise	513,25	18,00	8,00	27,00	15,00	0,000	0,546	0,377	3,773	0,546	0,546	1,226	5,104	4595
Sable graveleux	509,15	18,00	8,00	31,00	5,00	0,000	0,485	0,271	5,464	0,485	0,485	1,210	6,565	90477

Figure 27 : paramètres des sols

- Interaction sol-structure :

On détermine le coefficient de réaction horizontale des terres conformément à l'annexe F de la NF P 02-282 :

$$K_h = 2 \cdot \frac{\left(\frac{E_m}{\alpha}\right)^{\frac{4}{3}}}{\left(\frac{E_{str} \cdot I_{str}}{B_0}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

Avec :

k_h : le coefficient de réaction horizontale du sol vis-à-vis de l'écran ;
 E_m : le module pressiométrique Menard ;
 α : le coefficient empirique fonction de la nature du terrain ;
 $E_{str} \cdot I_{str}$: le produit d'inertie d'un élément d'écran de longueur B_0 ;
 B_0 : la longueur de référence prise égale à 1 m.

Les résultats pour chacune des couches sont présentés sur la figure précédente.

- Schéma de calcul

Comme cité précédemment, j'ai choisi de réaliser le double écran afin de représenter le cas défavorable du chargement dissymétrique. Le cas dimensionnant est celui où le train est situé sur un des deux remblais et sur le tablier. La totalité des efforts horizontaux est appliquée en tête d'une des deux palplanches sous K-Réa. La répartition des efforts entre les deux parois se fait automatiquement par l'intermédiaire du tablier qui peut s'apparenter à un élément infiniment rigide) et des différentes raideurs de palplanches et du sol (Figure 28).

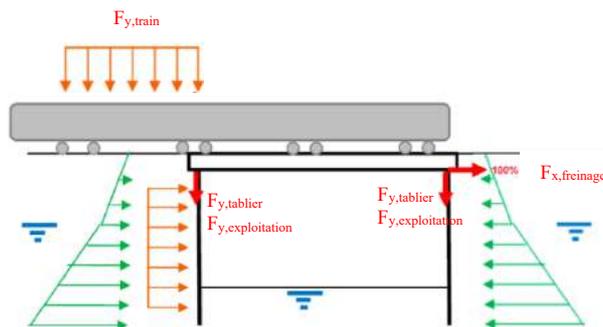


Figure 28 : schéma de calcul

- Chargement vertical

Une charge ponctuelle ($F_{y,tablier}$) de 288 kN/ml permanente est appliquée sur les palplanches à +529,5 m NGF au niveau de l'axe du tablier. Cette charge correspond au poids du tablier, au poids du ballast, à l'étanchéité et à l'armement des voies et garde-corps. Une charge ponctuelle ($F_{y,exploitation}$) de 300 kN/ml est appliquée au même niveau correspondant aux charges d'exploitation des voies côté fouille. De plus, j'ai considéré pour chacune des phases un chargement infini ($F_{y,train}$) dans l'espace, de 50 kN/m² situé 70 cm sous la tête de talus (passage du train).

- Chargement horizontal

Une charge ponctuelle ($F_{x,freinage}$) de 155 kN/ml variable est appliquée sur les palplanches à +529,5 m NGF au niveau de l'axe du tablier correspondant aux efforts de freinage. Les poussées et butées des terres sont déterminées à partir des tables de C.KERISEL

et E.ABSI en fonction de l'inclinaison et de l'angle de frottement interne des matériaux. Pour la poussée, les coefficients de C.KERISEL et E.ABSI changent relativement peu avec l'inclinaison δ , ainsi j'ai choisi de prendre $\delta_a = 0$, pour une valeur plus élevée de la poussée limite. Cependant, pour la butée, j'ai opté de prendre $\delta_p = -2/3 \varphi'$, ce qui correspond à une mobilisation partielle du frottement massif-paroi.

- Raideur des tirants

La raideur des ancrages scellés au terrain est déterminée ainsi :

$$K_t = \frac{E \cdot A}{l_u} \cdot \frac{1}{e_h}$$

Avec :

E : Module de Young de l'acier = 210 000 MPa ;

e_h : Espacement des tirants = 1,20 m ;

A_s : Aire de la section utile du tirant = $3,167 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

L_s : Longueur de scellement = 7 m ;

L_u : Longueur utile = 10,7 m.

La raideur K_t vaut donc $K_t = \frac{210000 \cdot 3,167 \cdot 10^{-3}}{10,7} \cdot \frac{1}{1,2} = 51\,796 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

- Raideur des butons

Les dalles supérieures et inférieures ont la fonction de butons pour le rideau de palplanches. Le tablier du pont rail et le radier routier (dalle de fond) mesurent $e = 0,90\text{m}$ et $e = 0,8\text{m}$ d'épaisseur respectivement. Les deux structures font $L = 15 \text{ m}$ de long. Considérant un module à court terme du béton $E = 34\,077 \text{ MPa}$ et représentant ces structures comme des liaisons surfaciques (car double-écran), elles ont une raideur qui vaut :

$$K = \frac{E}{L_u} = \frac{34\,077}{15} = 2\,227\,180 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} / \text{ml}$$

- Raideur de l'écran

La palplanche à mettre en œuvre est du type PU 32+1 partant du niveau +529,5 m.NGF jusqu'à +514 m.NGF, ce qui fait une profondeur égale à 15,5 mètres de longueur dont 8,40 m en hauteur libre et 7,10 m de fiche.

$E = 210\,000 \text{ MPa}$;

$I = 754\,100 \text{ cm}^4$.

Ce qui résulte un produit d'inertie $E.I$ égal à $158\,100 \text{ kN.m}^2/\text{ml}$.

- **Phasage de calcul**

Voici le phasage considéré pour la conception des travaux (Figure 29) :

Phase 0 : Phase initiale.

Phase 1 : Battage des palplanches.

Phase 2 : Terrassement et rabattement de la nappe à 526 m.NGF côté fouille.

Terrassement et rabattement de la nappe à 527 m.NGF côté terre pour la mise en place des blocs techniques.

Pose du premier lit de tirant à 527 m.NGF avec une précontrainte de blocage de 5t par tirant.

Phase 3 : Pose du tablier (butonnant) avec un $Z_{inf} = 528$ m.NGF.

Charges verticales permanentes en tête de palplanches (288 kN/ml).

Mise en place du bloc technique à l'arrière des palplanches.

Phase 4 : Charges verticales variables en tête de palplanches (300 kN/ml).

Surcharge ferroviaire 50 kPa côté gauche.

Phase 5 : Effort horizontal de freinage (155 kN/ml) côté droit.

Phase 6 : Terrassement et rabattement de la nappe à 525 m.NGF côté fouille.

Rabattement de la nappe à 526 m.NGF côté terres.

Phase 7 : Terrassement et rabattement de la nappe à 524 m.NGF côté fouille.

Rabattement de la nappe à 525 m.NGF côté terres.

Pose du deuxième lit de tirant à 525 m.NGF avec une précontrainte de blocage de 5t par tirant.

Phase 8 : Terrassement et rabattement de la nappe à 523 m.NGF côté fouille.

Rabattement de la nappe à 524 m.NGF côté terres.

Phase 9 : Terrassement et rabattement de la nappe à 522 m.NGF côté fouille.

Rabattement de la nappe à 523 m.NGF côté terres.

Pose du troisième lit de tirant à 523 m.NGF avec une précontrainte de blocage de 5t par tirant.

Phase 10 : Terrassement et rabattement de la nappe à 521,1 m.NGF côté fouille.

Rabattement de la nappe à 522,1 m.NGF côté terres.

Phase 11 : Mise en place du radier sur une couche drainante.

Augmentation de la raideur de l'écran représentant la mise en place des voiles de béton qui joueront le rôle d'ouvrage définitif.

De part et d'autre du Pont Rail, les soutènements de la trémie sont constitués de pieux sécants jusqu'à ce que le niveau supérieur de la nappe soit atteint. Au fur et à mesure que le profil routier s'élève, les pieux sécants passent de butonnés à autos stables.

Compte tenu de la symétrie de l'ouvrage par rapport au pont rail, j'ai pu réaliser des modèles tests en variant les limites d'interfaces des couches trouvées sur les sondages des différents côtés. En effet, j'ai modélisé l'ouvrage en pieux sécants butonnés en tenant compte des sondage SP3 et SP5, ce qui m'a fait obtenir le cas limitant. De la même façon pour le dimensionnement des pieux sécants autos stables, je me suis servi des sondages SP2 et SP7. Ceci afin de faciliter les dispositions constructives du chantier. Ce choix permet à la fois de simplifier les calculs et de permettre une logistique moins complexe sur chantier, étant donné qu'ils n'auront pas à se référer au plan pour savoir quel type de buton mettre en œuvre.

Après avoir démarré les calculs, j'ai pu constater que dans le cas des pieux sécants butonnés, pour un écran ancré dans les sables graveleux avec une longueur de 19,5 m dont 8,5 m de hauteur libre et 11 m de fiche, le sondage SP3 a été le cas limitant. Ce constat était déjà attendu puisque le modèle géotechnique établi sur la Figure 26 : profil longitudinal retenu met en évidence une couche argileuse d'épaisseur importante avant l'arrivée dans la couche sableuse dans ce sondage. De plus, dans les résultats du sondage SP5, l'arrivée de la couche sableuse a lieu à une profondeur moins importante que pour le sondage SP3, ce que suggérait déjà que le sondage SP3 était le cas limitant.

Dans le cas des pieux sécants autos stables pour un écran ancré dans les argiles sableuses grises avec une longueur de 17,5 m dont 6,0 m de hauteur libre et 11,5 m de fiche, des déplacements plus importants ont été obtenus sur le sondage SP2. La justification repose sur le même principe que celle du cas limitant des pieux sécants butonnés puisque sur le sondage SP2 un modèle tri couche où les deux premières sont argileuses est repéré. De plus, sur le sondage SP2 l'arrivée à la couche sableuse est localisée à une profondeur plus importante que dans le sondage SP7.

- Géométrie

Les pieux sécants font 1m de diamètre et sont disposés en alternance de pieux primaires non armés puis de pieux secondaires armés avec un recouvrement de 15 cm. Ils peuvent être boutonnés en tête ou considérés comme auto stables suivant le prédimensionnement.

Le fond de fouille est figé à 521,1 m.NGF pour les pieux sécants butonnés et trois lits de butons aux cotes de +528,5, +526 et +523,5 m.NGF sont ajoutés lors du phasage. Pour les pieux sécants autos stables le fond de fouille est figé à 523,5 m.NGF compte tenu de la remontée de la route et deux lits de butons aux cotes de 528,5 m.NGF et 526,0 m.NGF sont ajoutés lors du phasage. Les butons $\varnothing 457$ ont été espacés horizontalement de 4,00 m lors des phases provisoires pour les deux cas.

- Caractéristiques des couches

Les épaisseurs des couches de sol définies pour le cas de pieux sécants butonnés ont eu comme référence les limites des interfaces définies sur le sondage SP3. Les paramètres des sols initiaux introduits sous K-Réa sont les suivants (Figure 30) :

Couche	z [m]	γ [kN/m³]	γ' [kN/m³]	φ [°]	c [kN/m²]	dc [kN/m²/m]	k0	kay	kpy	kd	kr	kac	kpc	kh [kN/m²/m]
Limon argileux marron grs	529,50	17,00	7,00	25,00	16,00	0,000	0,577	0,349	3,544	0,577	0,577	1,388	5,175	1557
Argile sableuse grise	516,00	18,00	8,00	27,00	15,00	0,000	0,546	0,322	4,127	0,546	0,546	1,326	5,580	1759
Sable graveleux	513,00	18,00	8,00	31,00	5,00	0,000	0,485	0,271	5,464	0,485	0,485	1,210	6,565	34640

Figure 30 : paramètres des sols pour la modélisation des pieux sécants butonnés

Les épaisseurs des couches de sol définies pour le cas de pieux sécants autos stables ont eu comme référence les limites des interfaces définies sur le sondage SP2. Les paramètres des sols initiaux introduits sous K-Réa sont les suivants (Figure 31) :

Couche	z [m]	γ [kN/m³]	γ' [kN/m³]	φ [°]	c [kN/m²]	dc [kN/m²/m]	k0	kay	kpy	kd	kr	kac	kpc	kh [kN/m²/m]
Limon argileux marron grs	529,50	17,00	7,00	25,00	16,00	0,000	0,577	0,349	3,544	0,577	0,577	1,388	5,175	1557
Argile sableuse grise	513,00	18,00	8,00	27,00	15,00	0,000	0,546	0,322	4,127	0,546	0,546	1,326	5,580	1759
Sable graveleux	506,40	18,00	8,00	31,00	5,00	0,000	0,485	0,271	5,464	0,485	0,485	1,210	6,565	34640

Figure 31 : paramètres des sols pour la modélisation des pieux sécants auto stables

- Schéma de calcul

Différemment du cas des rideaux de palplanches, les pieux sécants joueront le rôle d'ouvrage définitif. Ainsi, il faut les dimensionner au séisme. Les effets sismiques sous K-Réa sont simulés selon une approche pseudo-statique où l'on prend en compte les forces d'inertie se calculant comme suit : les valeurs $F_H = k_H \times P_{\text{écran}}$ et $F_V = k_V \times P_{\text{écran}}$ associées au poids propre de l'écran $P_{\text{écran}}$ (Figure 32).

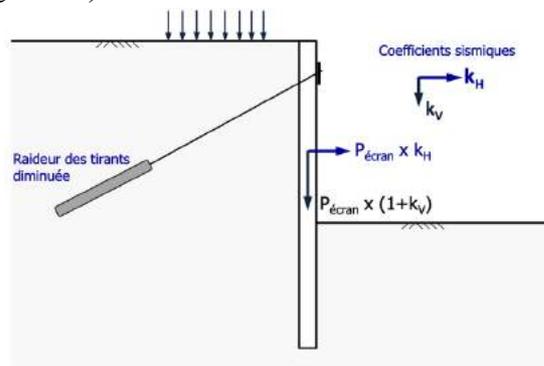


Figure 32 : schéma de calcul prenant compte le séisme sous K-Réa

- Chargement vertical

En tant qu'ouvrage définitif, les pieux doivent être dimensionnés au séisme. Pourtant, pour représenter ces forces sur K-Réa, il faut prendre en compte les forces d'inertie permanentes associées au poids propre de l'écran. Dans ce cas :

$$F_h = k_h \cdot P_{\text{écran}} = 0,244 \cdot (\pi \cdot R^2) \cdot h \cdot \rho_{\text{béton}} = 0,244 \cdot (\pi \cdot (0,5)^2) \cdot 19,5 \cdot 24 = 89,64 \text{ kN/ml}$$

$$F_v = k_v \cdot P_{\text{écran}} = 0,122 \cdot (\pi \cdot R^2) \cdot h \cdot \rho_{\text{béton}} = 0,244 \cdot (\pi \cdot (0,5)^2) \cdot 19,5 \cdot 24 = 44,82 \text{ kN/ml}$$

- Chargement horizontal

Les poussées et butées des terres sont déterminées à partir des tables de C.KERISEL et E.ABSI en fonction de l'inclinaison et de l'angle de frottement interne. Pour la poussée, les coefficients de C.KERISEL et E.ABSI changent relativement peu avec l'inclinaison δ , ainsi j'ai choisi de prendre $\delta_a = 0$, pour une valeur plus élevée de la poussée limite. Cependant, pour la butée, j'ai opté de prendre $\delta_p = -2/3 \varphi'$, ce qui correspond à une mobilisation partielle du frottement massif-paroi.

- Raideur des butons

Un lit de butons est assimilé à un ressort équivalent caractérisé par :

$$K_b = \frac{E \cdot S}{L_u \cdot E_h}$$

Avec :

E : Module de Young de l'acier = 210 000 MPa ;

S : Section du buton = 0,142 m² ;

eh : Espacement horizontal des butons = 4 m ;

Lu : Longueur utile = $\frac{11,4}{2} = 5,7 \text{ m}$.

$$\text{La raideur } K_b \text{ vaut donc } K_b = \frac{210\,000 \cdot 0,142}{5,7 \cdot 4} = 1\,314\,526 \frac{\text{kN}}{\text{m}}/\text{ml}$$

- Raideur de l'écran

Selon le logiciel K-Réa, le produit d'inertie E.I de l'écran est égal à 2 821 664 kN.m²/ml pour les deux cas.

- Phasage de calcul

Voici les phasages considéré pour les conceptions des travaux. Il faut remarquer que jusqu'à la phase 3 le phasage des deux configurations reste la même. A partir de la phase 4 le phasage des pieux sécants autos stables sera indiquée en *italique* (Figure 33) :

Phase 0 : Phase initiale.

Phase 1 : Mise en place des pieux sécants.

Phase 2 : Terrassement et rabattement de la nappe à 527,5 m.NGF côté fouille.

Pose du premier lit de buton à 528,5 m.NGF.

Application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (528,20 m.NGF).

Phase 3 : Terrassement et rabattement de la nappe à 525 m.NGF côté fouille.

Pose du deuxième lit de buton à 526 m.NGF.

Suppression des forces considérées dans la phase antérieure à l'application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (526,5 m.NGF).

Phase 4 : Terrassement et rabattement de la nappe à 522,5 m.NGF côté fouille.

Pose du troisième lit de buton à 523,5 m.NGF.

Suppression des forces considérées dans la phase antérieure à l'application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (524,8 m.NGF).

Terrassement et rabattement de la nappe à 523,5 m.NGF côté fouille.

Suppression des forces considérées dans la phase antérieure à l'application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (525,5 m.NGF).

Phase 5 : Terrassement et rabattement de la nappe à 521,1 m.NGF côté fouille.

Suppression des forces considérées dans la phase antérieure à l'application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (523,9 m.NGF).

Mise en place du radier sur une couche drainante.

Suppression des forces considérées dans la phase antérieure à l'application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (526,4 m.NGF).

Phase 6 : Mise en place du radier sur une couche drainante.

Suppression des forces considérées dans la phase antérieure à l'application des forces inertielles équivalentes horizontales et verticales (96 kN/ml et 48 kN/ml, respectivement) à 2/3 du terrain naturel (524,8 m.NGF).

Désinstallation du deuxième lit de buton.

Phase 7 : Désinstallation du troisième lit de buton.

Désinstallation du premier lit de buton.

Application de la surcharge routière de 10 kN/m².

Phase 8 : Désinstallation du deuxième lit de buton.

Application de la surcharge routière de 10 kN/m².

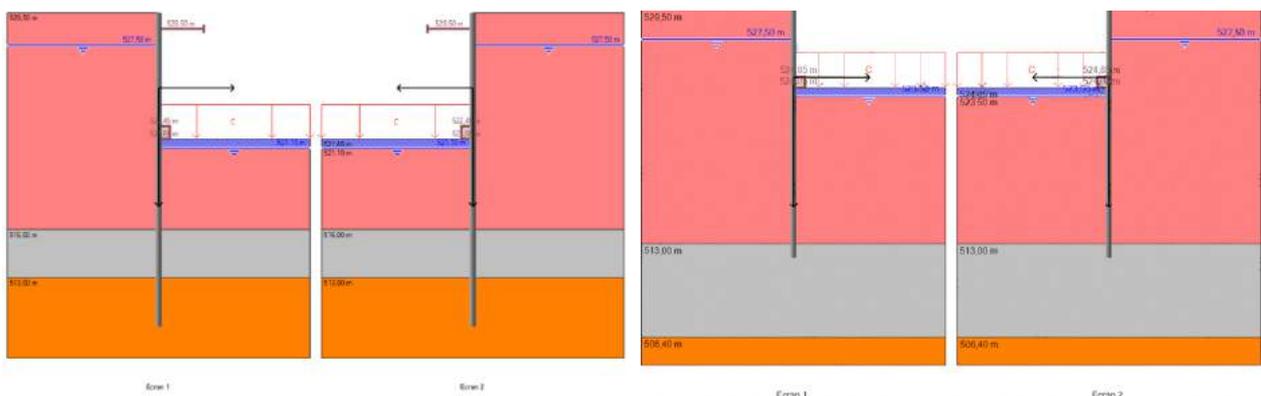


Figure 33 : configurations finales des pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement

- Vérifications (ELS)

Compte tenu que les deux ouvrages se situent hors zone voie ferrée, les référentiels SNCF sont moins restrictifs avec la valeur maximale de la déformée admissible avec une valeur $\delta_{tot,admissible} < 14mm$. D'après les sorties K-Réa (ANNEXE 15 : synthèse des résultats K-Réa (ELS) – Pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement), le déplacement maximal total en ventre est de 11,34 mm en phase 5 pour le cas des pieux sécants butonnés et de 9,67 mm en phase 4 pour le cas des pieux sécants autos stables. De ce fait, l'apparition de la déformée maximale à la phase 5 pour le cas butonné et à la phase 4 pour le cas auto stable est cohérente car ces sont les phases où la dernière excavation est exécutée, ce qui représente la phase de poussée des terres maximales. En comparant les résultats des déplacements maximaux pour les deux cas, notons la différence de 1,67 mm entre eux. Trois hypothèses peuvent expliquer ce fait. La première repose sur les différences des épaisseurs de couches de sols sur les différents sondages pris comme référence pour les ouvrages, la deuxième serait justement que les ouvrages sont intrinsèquement différents, avec la présence de butons en tête d'écran et la troisième joue sur le fait que les ouvrages ont différentes hauteurs libres, ce qui entraîne différentes valeurs de la poussée des terres.

Vous trouverez dans l'annexe les rapports de butée obtenus, qui ne descendent dans aucune phase en dessous de la valeur limite de 1,50. Ainsi, la stabilité en butée des deux ouvrages définitifs est vérifiée.

- Vérifications (ELU)

A l'ELU (ANNEXE 16 : synthèse des résultats K-Réa (ELU) – Pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement), la stabilité du massif d'ancrage est bien justifiée pour chacune des phases des deux ouvrages. D'après les résultats des bilans des forces, il est raisonnable de conclure que les deux écrans ne travaillent pas à l'arrachement (bilan des forces verticales positif). En comparant les résultats des efforts tranchants et moments fléchissant maximaux des deux modélisations, nous obtenons le Tableau 6 : comparaison des efforts maximaux entre les pieux sécants butonnés et autos stables :

Comparaison des efforts maximaux		
Valeurs	Pieux sécants butonnés	Pieux sécants autos stables
Effort tranchant (kN)	1 572,95	1 036,06
Moment fléchissant (kN.m)	2 708,40	1 161,33

Tableau 6 : comparaison des efforts maximaux entre les pieux sécants butonnés et autos stables

La configuration pour le cas des pieux sécants butonnés a des valeurs plus importantes de moment fléchissant, représentant un écart relatif de 133,2%. L'explication repose surtout sur la différence d'hauteur libre entre les configurations, augmentant la poussée des terres dans le cas des pieux sécants butonnés. Les efforts, malgré trop importants, ont été validés lors des échanges avec le bureau de génie civil au sein du PRI vu que l'ordre de grandeur des efforts correspond aux valeurs trouvées dans le dimensionnement d'autres ouvrages aux alentours, comme le projet de la gare de Perrignier, par exemple. Dans ce cas, il ne manque plus que vérifier les butons, qui est du ressort de l'Eurocode 3 et du bureau structure.

Dimensionnement des ouvrages de soutènement défini – Mur de soutènement en L

Des murs en L sont prévus aux abouts de la trémie où les hauteurs de terres à retenir sont faibles et hors nappe. Comme il n'est pas possible de modéliser un mur sur K-Réa, j'ai eu recours au logiciel interne SNCF DPI Vocal.

Le choix du sondage à prendre comme référence pour la base du dimensionnement part du même principe que pour les choix dans les cas des ouvrages modélisés précédemment. Dans le cas du mur en L, les prédimensionnements ont été faits considérant les épaisseurs des couches de sols des sondages SP8 et SP1. D'après une analyse comparative des résultats du dimensionnement du mur dans les deux situations, j'ai pu conclure que pour la modélisation SP1 comme référence les valeurs calculées pour les états limites sont plus importantes que ceux dans la modélisation avec SP8. Puisque sur la Figure 26 à l'Ouest de l'ouvrage se trouvent des épaisseurs des couches argileuses plus importantes, il est normal de conclure que parmi les deux sondages pris en compte, celui plus à gauche est le cas limitant. Cette épaisseur plus importante des couches argileuses impacte le dimensionnement du mur, en augmentant ses dimensions pour vérifier sa stabilité aux états limites.

- Géométrie et caractéristiques des couches

La géométrie définie pour le mur et sa profondeur d'ancrage sont présentées dans l'annexe ANNEXE 17 : géométrie du mur de soutènement en L et les caractéristiques des couches de sol.

- Chargement vertical

J'ai considéré sécuritairement une surcharge égale à 10 kN/m² afin de tenir compte des futurs véhicules d'entretien. De plus, il est possible de saisir le risque au séisme et le logiciel calcule automatiquement les forces inertielles équivalentes horizontales et verticales à prendre en compte lors du dimensionnement.

- Matériaux

Les murs de soutènement définitifs seront réalisés avec un béton de type C35/45. Les aciers considérés sont des barres à haute adhérence HA fe E 500 dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Limite d'élasticité : $f_{yk} = 500$ MPa
- Allongement à la rupture : $\epsilon_{uk} = 5,0$ % (acier classe B)
- Module d'élasticité : $E_s = 200\,000$ MPa

- Vérifications

Après la saisie des données d'entrée, j'ai pu poursuivre avec le démarrage des calculs. DPI Vocal fourni une note de calcul simplifiée avec la vérification des états limites pour la combinaison la plus défavorable (Figure 34).

ETATS LIMITES	COMB. N°	PARAMETRE	VALEUR CALCULEE	VALEUR LIMITE	OK **
ELS limitation charge	27	Vd<Rv, d+R0 (KN)	-113.8	-328.2	OK
ELS QP/Freq excentrement V	9	ie > 2/3	0.769	0.667	OK
ELS Caract. excentrement V	27	ie > 1/2	0.743	0.500	OK
ELU de mobilisation du sol	82	Vd<Rv, d+R0 (KN)	-113.8	-378.9	OK
ELU excentrement V	82	ie > 1/15	0.668	0.067	OK
ELU de glissement (H seul)	84	Rh:d/Hd > 1	1.563	1.000	OK
ELU de glissement (H + MZ)	82	Rmz:d/Mzd > 1	infini	1.000	OK
ELU sismique mobilisation sol	147	Vd<Rv, d+R0 (KN)	-121.3	-243.3	OK
ELU sismique excentrement V	147	ie > 1/15	0.506	0.067	OK
ELU sism. glissement (H seul)	147	Rh:d/Hd > 1	1.112	1.000	OK
ELU sism. glissement (H + MZ)	151	Rmz:d/Mzd > 1	infini	1.000	OK

N° Comb. ELS	Rotation Maxi de la Semelle (mRad)	Déplac. Maxi de la Semelle (mm)	Déplac. Maxi en tête du mur (mm)	Déplac. limite en tête du mur (mm)	OK
9	5.24	0.0000	13.6151	26.0000	OK

Figure 34 : vérification aux états limites pour le dimensionnement du mur de soutènement en L

D'après les résultats obtenus sur les figures ci-dessus, il est possible de conclure que les vérifications aux états limites ont été validés, ce qui m'a permis de poursuivre la rédaction de la note de calcul pour postérieure validation et/ou optimisation de la part des ingénieurs structure.

Cette mission m'a permis de participer à un projet au complet, dès l'interprétation des sondages afin d'établir un modèle géotechnique jusqu'à la procédure d'une solution travaux dont les études techniques et calculatoires demandent une réflexion plus critique compte tenu des contraintes des avoisinants et les obligations liées à la mise en sécurité des circulations ferroviaires.

Le bilan des compétences acquises, relatives au référentiel des compétences de l'ingénieur Géotechnique et Génie Civil de Polytech Grenoble

Pour formuler une auto-analyse des compétences acquises lors de mon alternance, je ferai un bilan des missions qui m'ont confié et les compétences qui sont dans grille d'évaluation. D'après les missions que j'ai pu remplir, j'ai atteint les compétences 1, 2, 3, 5 et 6 (Tableau 7 : référentiel de compétences).

BILAN	
Mission	Compétence atteinte
Remplacement du passage à niveau PN13	<p>COMPÉTENCE 3 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Concevoir des ouvrages</p>
Remblai de Moulin-Glattard	<p>COMPÉTENCE 2 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Evaluer les risques géologiques et géotechniques d'un site</p>
Livron-sur-Drôme et Loriol-sur-Drôme (OA7/OA7bis)	<p>COMPÉTENCE 1 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Définir un programme de reconnaissance</p>
	<p>COMPÉTENCE 5 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Suivre l'exécution des travaux géotechniques</p>
Visites sur terrain	<p>COMPÉTENCE 6 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Pérenniser les ouvrages et les sites : suivi, surveillance et remédiation</p>
Remplacement du passage à niveau PN65/66	<p>COMPÉTENCE 2 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Evaluer les risques géologiques et géotechniques d'un site</p>
	<p>COMPÉTENCE 3 DE L'INGÉNIEUR GEOTECHNIQUE</p> <p>Concevoir des ouvrages</p>

Tableau 7 : référentiel de compétences

Dans le cadre du projet de remplacement du passage à niveau PN13, j'ai eu l'occasion de vérifier l'adaptation de l'ouvrage au terrain ainsi que sa stabilité et déformabilité pour ensuite valider les hypothèses géotechniques et optimiser l'ouvrage, ce qui m'a permis d'atteindre la compétence numéro 3.

Pour le remblai de Moulin-Glattard, j'ai eu l'occasion de faire des VISAS de la G2 PRO afin d'évaluer les enjeux et proposer des solutions pour réduire les risques, remplissant ainsi la compétence numéro 2.

A Livron-Loriol, j'ai eu pour rôle de piloter les entreprises en phase DCE des reconnaissances géotechniques. Convoquer et préparer des réunions pour remédier aux contraintes techniques et logistiques afin de démarrer le programme de la campagne de reconnaissances, d'assurer l'efficacité des actions opérationnelles sur site et d'évaluer le rapport de la G2 AVP afin d'étudier des solutions alternatives. Grâce à elles, les compétences 1 et 5 sont assimilées.

Aller sur le terrain pour accompagner le suivi, la surveillance et la remédiation des entreprises désignées pour la maintenance des karsts existantes sous les voies SNCF m'a fait comprendre l'importance de la gestion des pathologies et les sinistralités des ouvrages afin de les pérenniser. Avec cette activité, j'ai pu développer la compétence 6.

Lors de la réalisation du projet de remplacement du passage à niveau PN65/66, j'ai eu l'occasion de dimensionner un ouvrage complexe dans sa totalité, partant de l'analyse des sondages pour l'établissement du modèle géotechnique utilisé lors du dimensionnement des différentes structures qui constituent l'ensemble de l'ouvrage. Une vérification postérieure de la stabilité et de la capacité de déformation des structures a été faite afin de confirmer les hypothèses géotechniques et pour optimiser l'ouvrage. Cette mission complexe correspond aux compétences numéro 2 et 3.

La responsabilité sociétale et environnementale de l'entreprise

De nos jours, la stratégie RSE 2020-2030 du groupe SNCF est usitée. S'appuyant sur les travaux stratégiques du projet Tous SNCF avec l'ensemble des entreprises et activités du groupe, la stratégie RSE fixe le cap et offre un cadre cohérent et commun pour faire de la RSE un levier de compétitivité et de performance globale. Cette stratégie est composée par 6 axes principaux, qui sont :

1. **Développer la part du ferroviaire et des mobilités durables** : Le premier axe d'impact environnemental est basé sur le gain de parts de marché sur les modes les plus polluants.
2. **Réduire l'empreinte environnementale de nos activités** : Le deuxième concerne l'économie de consommation, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le développement des énergies renouvelables, l'économie circulaire
3. **Améliorer l'adaptation et la résilience de nos activités au changement climatique** ;
4. **Agir pour la cohésion sociale et l'économie écologique et solidaire dans les territoires** ;
5. **Faire de nos salariés les principaux acteurs et bénéficiaires de la transition écologique et sociale** ;
6. **Développer une éthique irréprochable et une gouvernance ouverte.**

L'ensemble de ces six axes prévoit d'atteindre, d'ici 2023, 14 des 17 Objectifs de Développement Durable (ODD) identifiés par les Nations Unies (NU) (Figure 35). Les Objectifs de développement durable sont un appel mondial à l'action pour mettre fin à la pauvreté, protéger l'environnement et le climat et garantir que les populations du monde entier puissent jouir de la paix et de la prospérité. Ce sont les objectifs auxquels contribuent les Nations Unies pour que nous puissions réaliser l'Agenda 2030 en France.

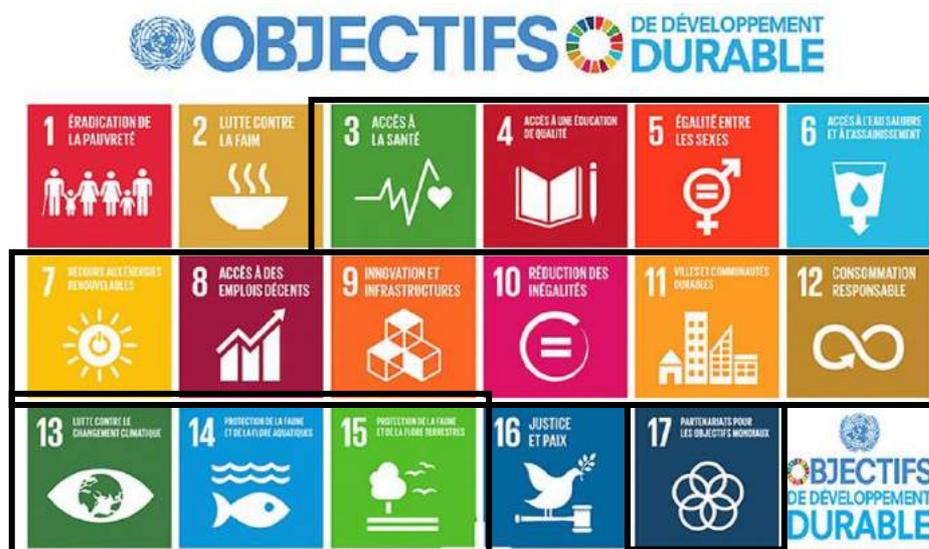


Figure 35 : objectifs de développement durable atteint d'après la stratégie RSE 2020-2030

Bilan personnel et professionnel de l'activité en entreprise et de l'alternance

Pour résumer brièvement mon expérience en alternance, je suis extrêmement content du résultat car je ressens une montée en compétences, tant sur le plan personnel que professionnel ; en renforçant mes connaissances et en acquérant de nouvelles idées et méthodes de travail. Par ailleurs, lors de mes sorties sur terrain, j'ai pu retenir l'importance de l'alternance bureau-terrain comme un facteur prépondérant pour bien comprendre les enjeux du site étudié afin de trouver la solution la plus adaptée pour répondre aux contraintes du projet.

Le fait d'être en poste dans un bureau avec des projets pluridisciplinaires m'a permis de collaborer avec diverses problématiques géotechniques (ouvrage de soutènement, mécanique des sols, géotechnique routière, stabilité des pentes, etc), consolider et améliorer mes connaissances et compétences depuis mon cursus à Polytech Grenoble. Mon stage m'a permis donc de toucher d'un peu plus près le quotidien d'ingénieur études géotechnique et terrassements, partageant ses bons et ses mauvais moments. Je pense avoir rempli la mission qui m'a été confiée, tout en apprenant constamment sur le côté technique et humain.

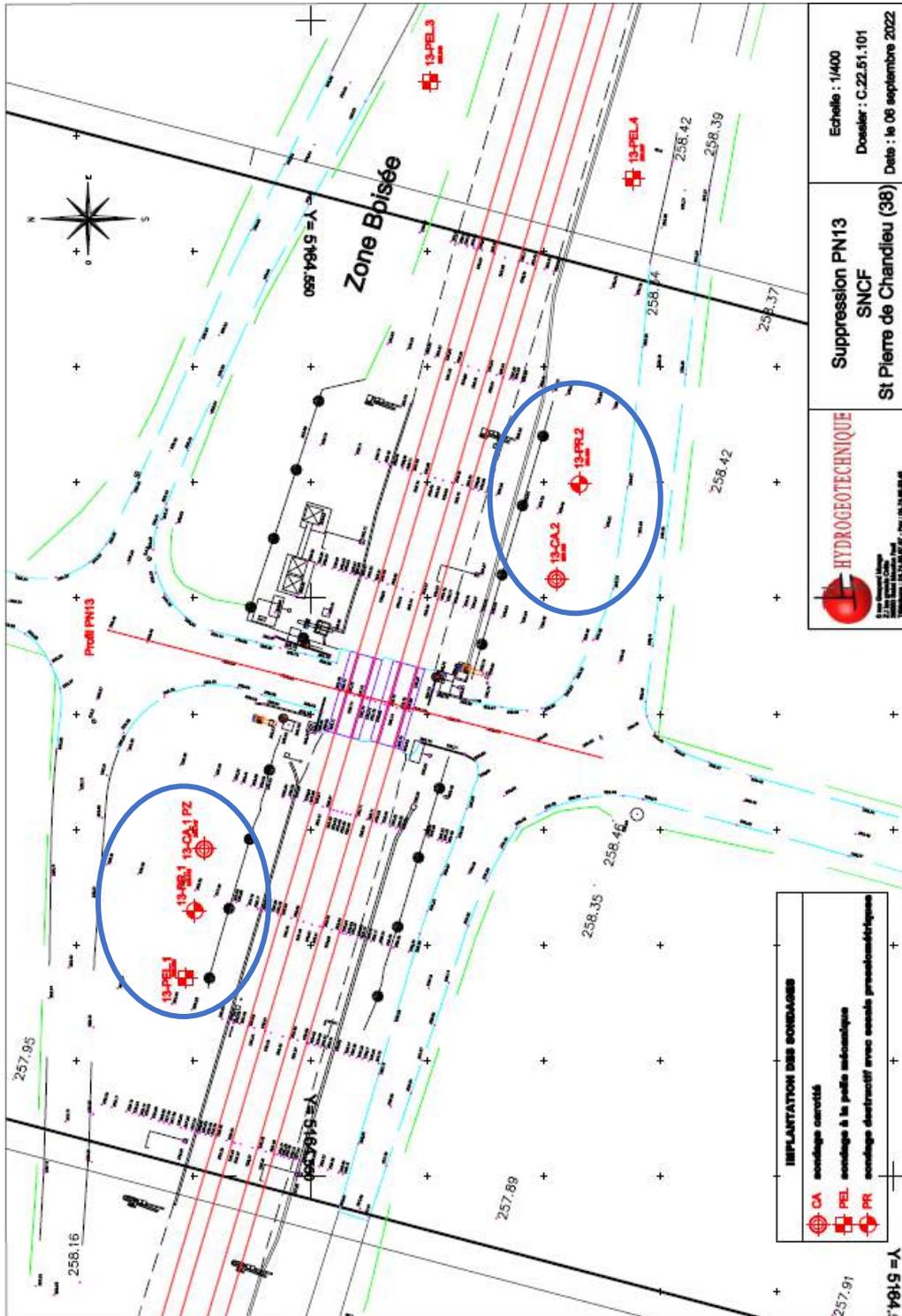
Malgré une bonne année au sein du PRI de Lyon, je souhaite migrer, dès janvier 2024, dans le domaine des travaux, que ce soit à l'étranger ou en France. Ce sera l'occasion de tenter de nouvelles expériences puisque tous mes expériences professionnelles lors de mes études se sont déroulées dans des bureaux d'études. C'est alors la garantie d'épanouissement professionnel et d'apprentissage tout au long de ma carrière qui me guidera dans mes choix. Je ne souhaite ni exclure ni affirmer quoi que ce soit pour le moment.

Annexes

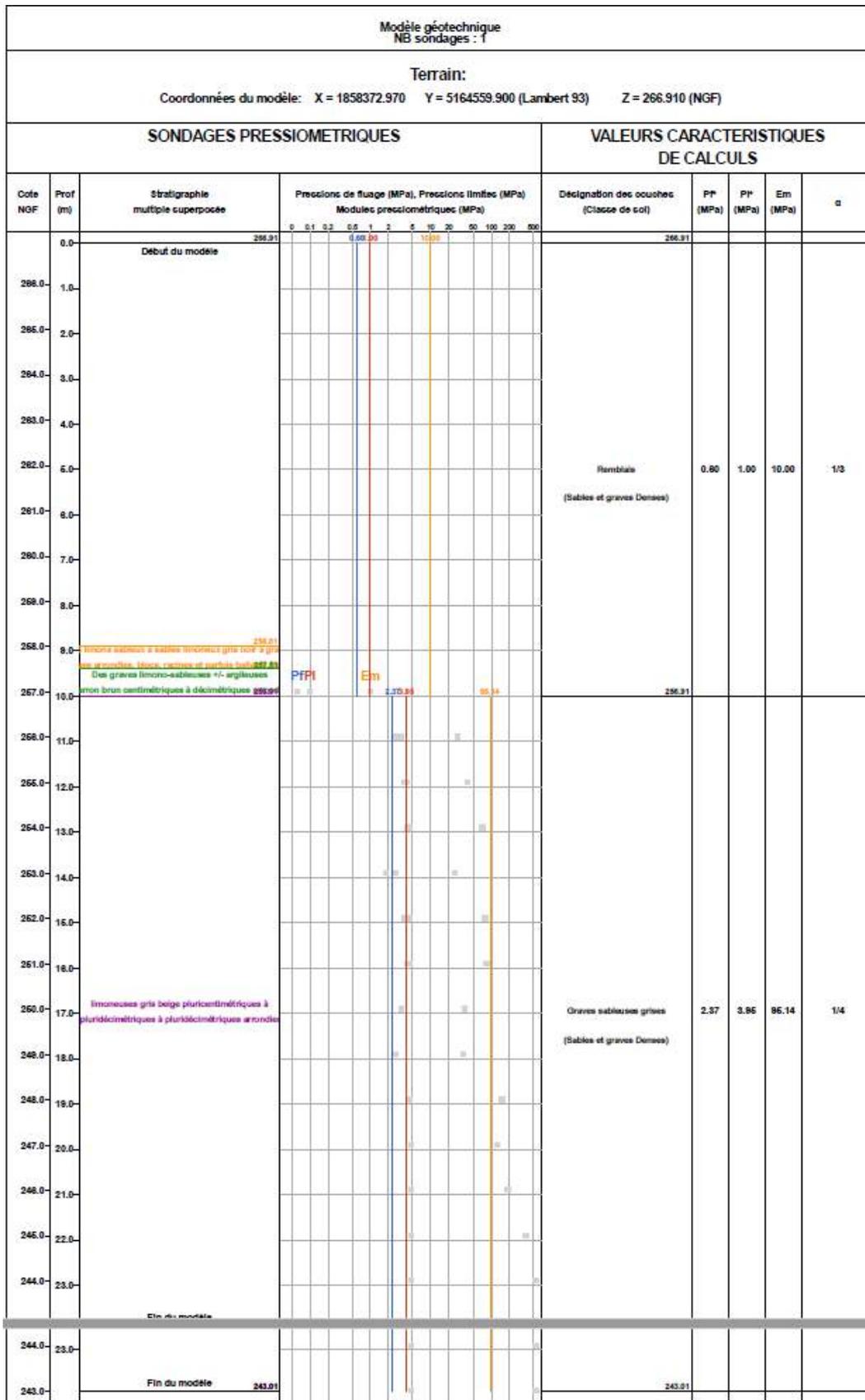
ANNEXE 1 : Modèle géotechnique établi dans le rapport de la G2-AVP

MODELE GEOTECHNIQUE DE LA G2-AVP					
Lithologie	Terre végétale	Remblais	Alluvions fluvio-glaciaires		
Description	Limons sableux à sables limoneux gris noir à graves centimétriques	Ballasts à racines, limons marron brun à graves ou graves sablo-limoneuses marron a blocs de béton	Limons sableux bruns a +/- de graves centimétriques à pluri-centimétriques	Graves limono-sableuses +/- argileuses marron brun centimétriques à décimétriques	Graves sableuses +/- limoneuses gris beige pluri centimétriques à pluridécamétriques
N° de la couche	0-TV	0-R	C1	C2	C3
Limites (m)	0.0 – 0.3/0.5	0.0 – 0.2/3.0	0.2 – 0.4	0.3/0.5 – 1.0/2.5	1.0/3.0 - <15.0
Pression limite nette P_1^* (MPa)	-	-	-	0.20	3.95
Module pressiométrique (MPa)	-	-	-	2.00	95.14
Module rhéologique α	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25
Angle de frottement φ' (°)	-	-	-	~30°	37°
Cohésion c' (kPa)	-	-	-	~0	1
Densité γ_d (kN/m³)	-	-	-	1.75 – 1.90	2.00 – 2.05

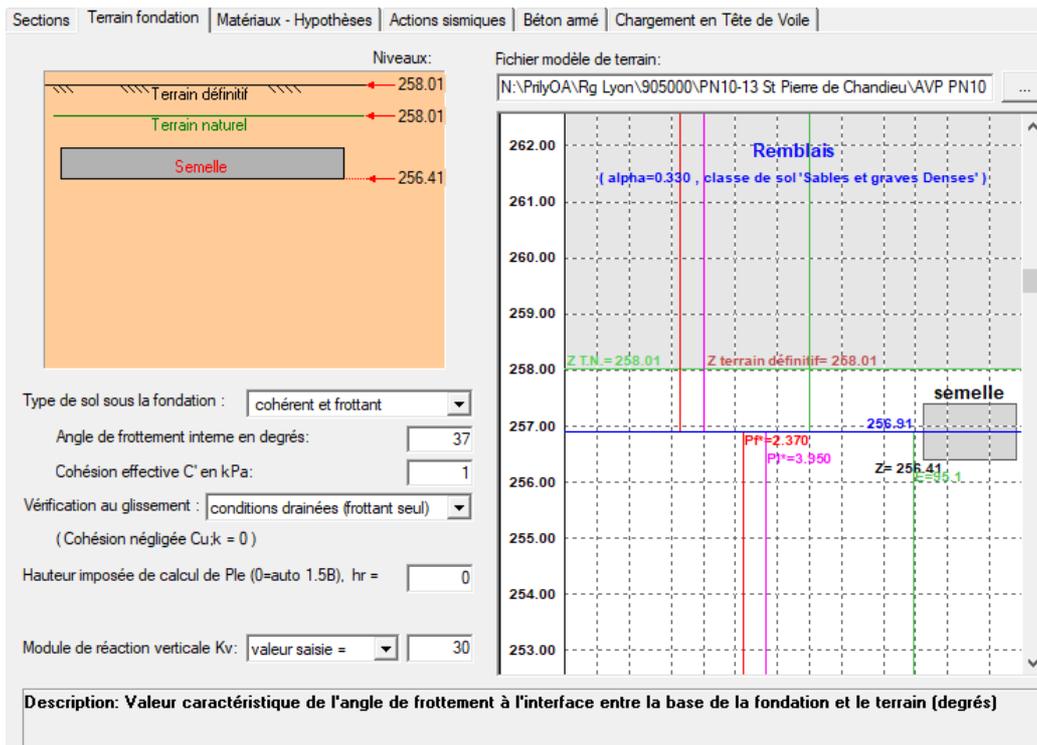
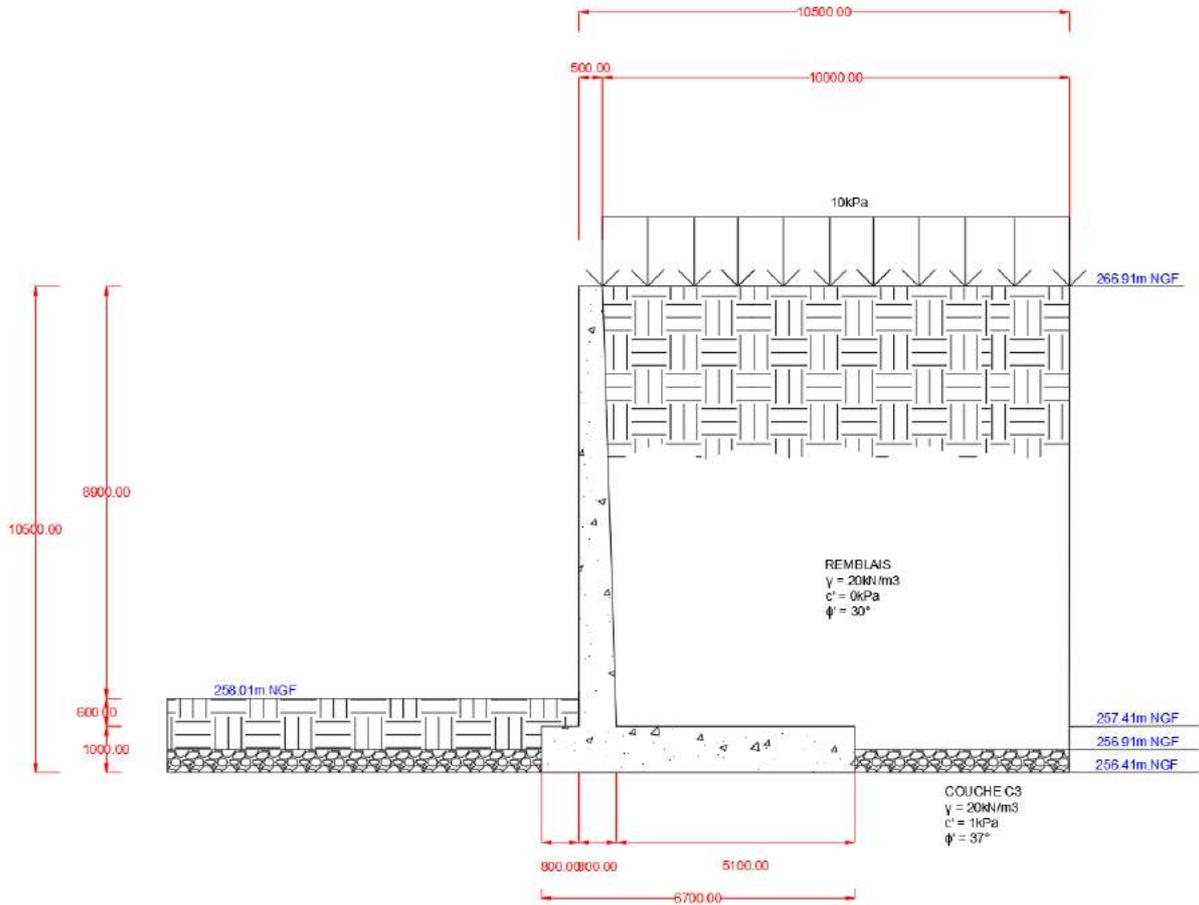
ANNEXE 2 : Plan d'implantation des sondages



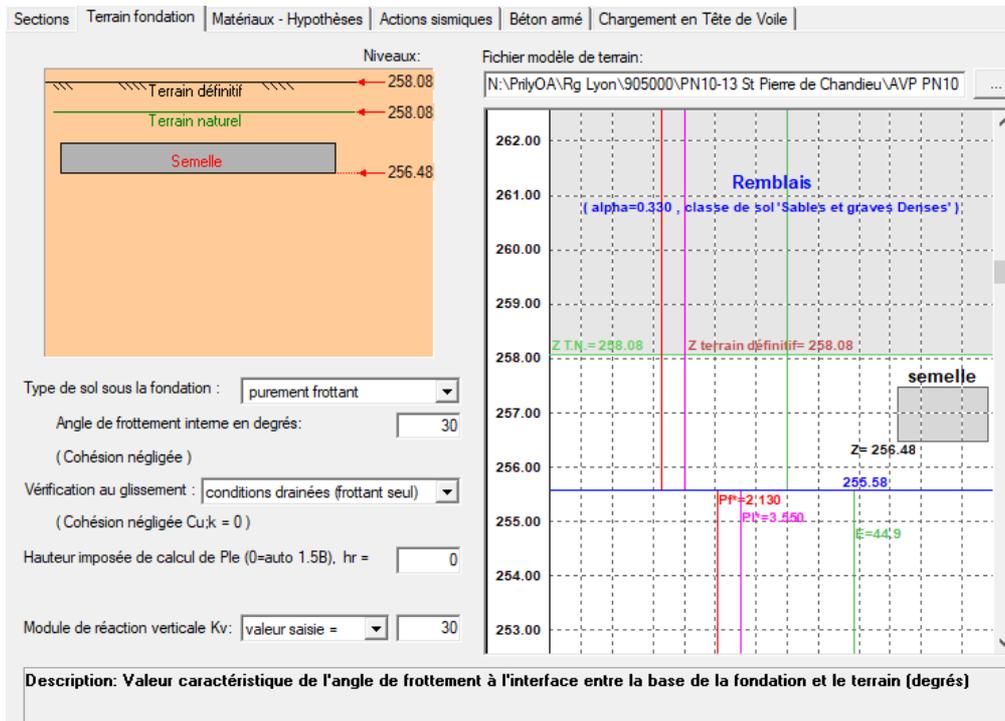
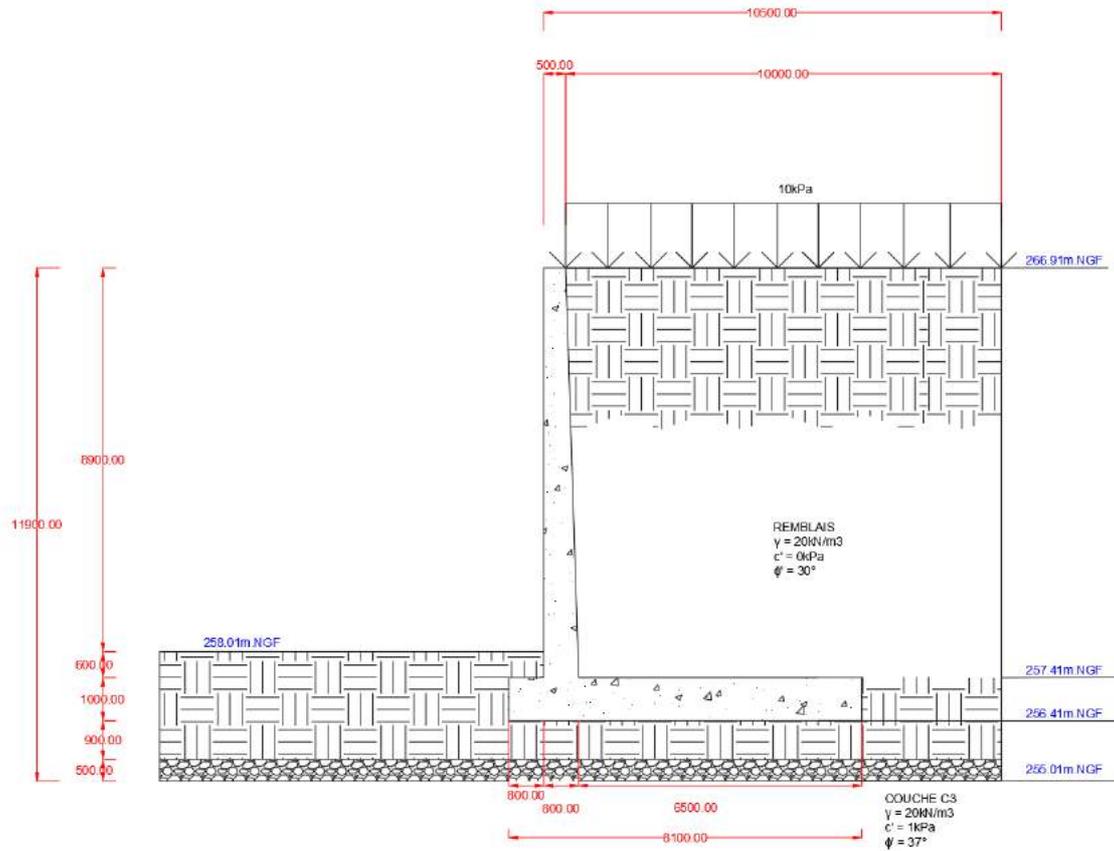
ANNEXE 3 : Modèle géotechnique (configuration 1)



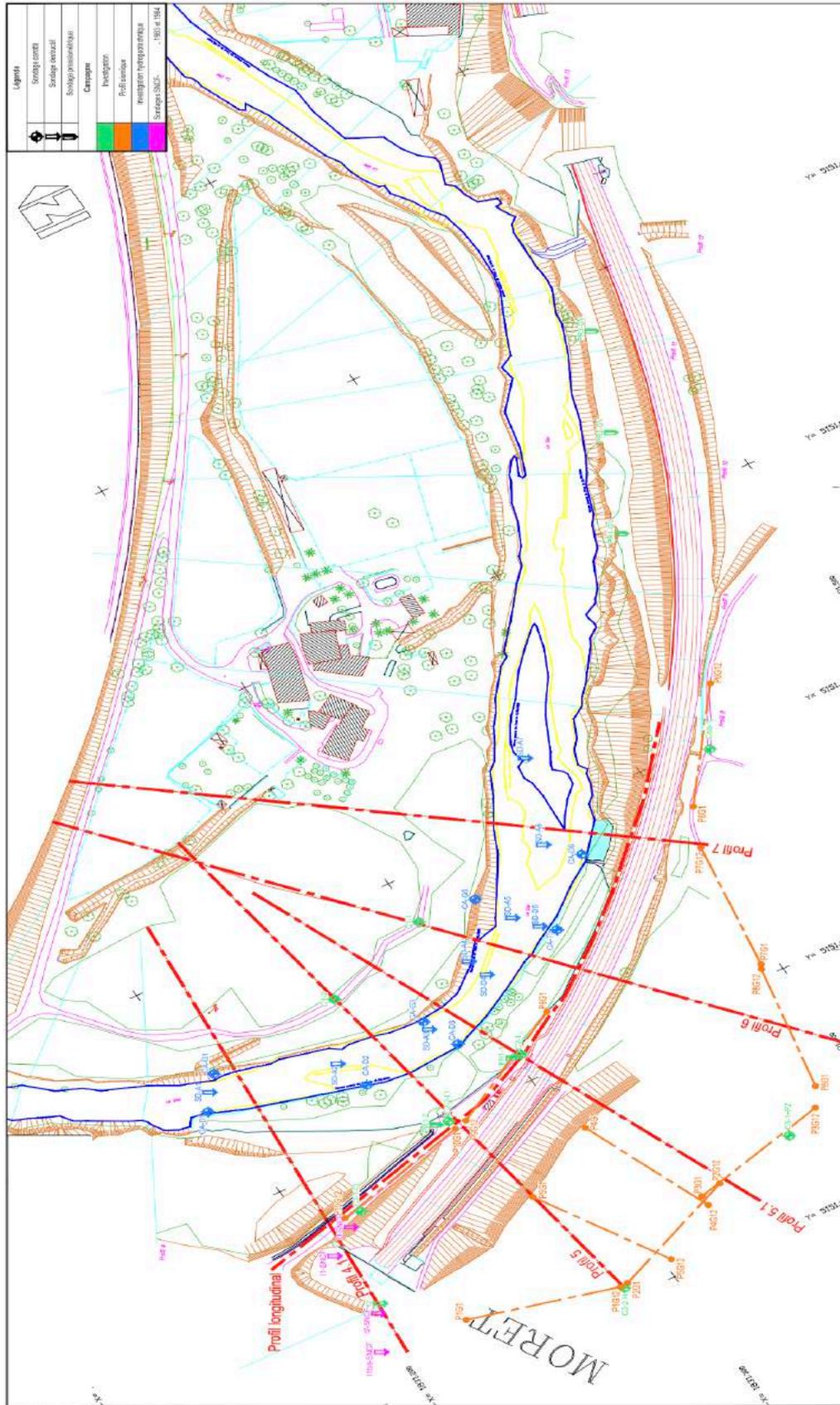
ANNEXE 5 : Disposition constructive (configuration 1)



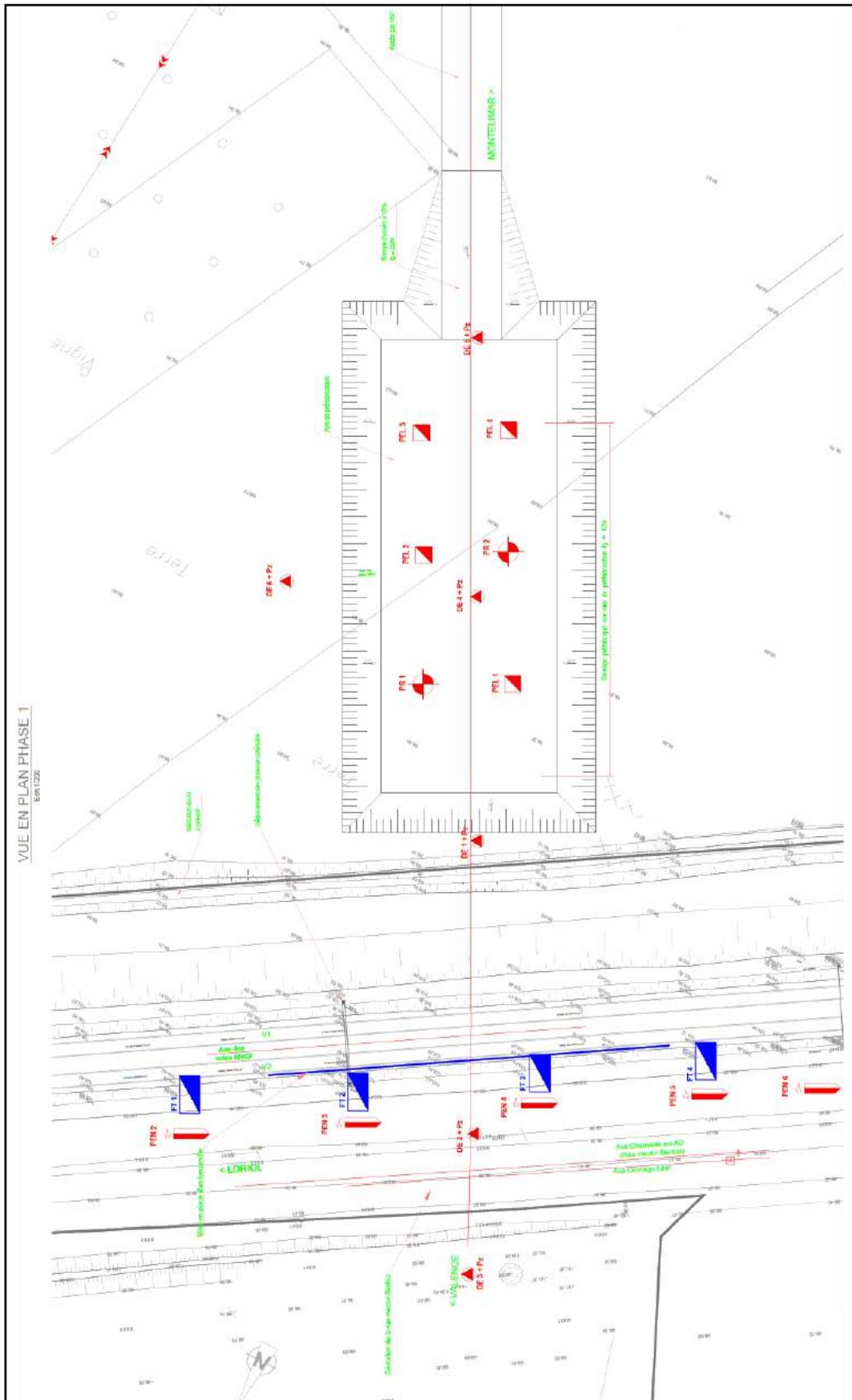
ANNEXE 6 : Disposition constructive (configuration 2)



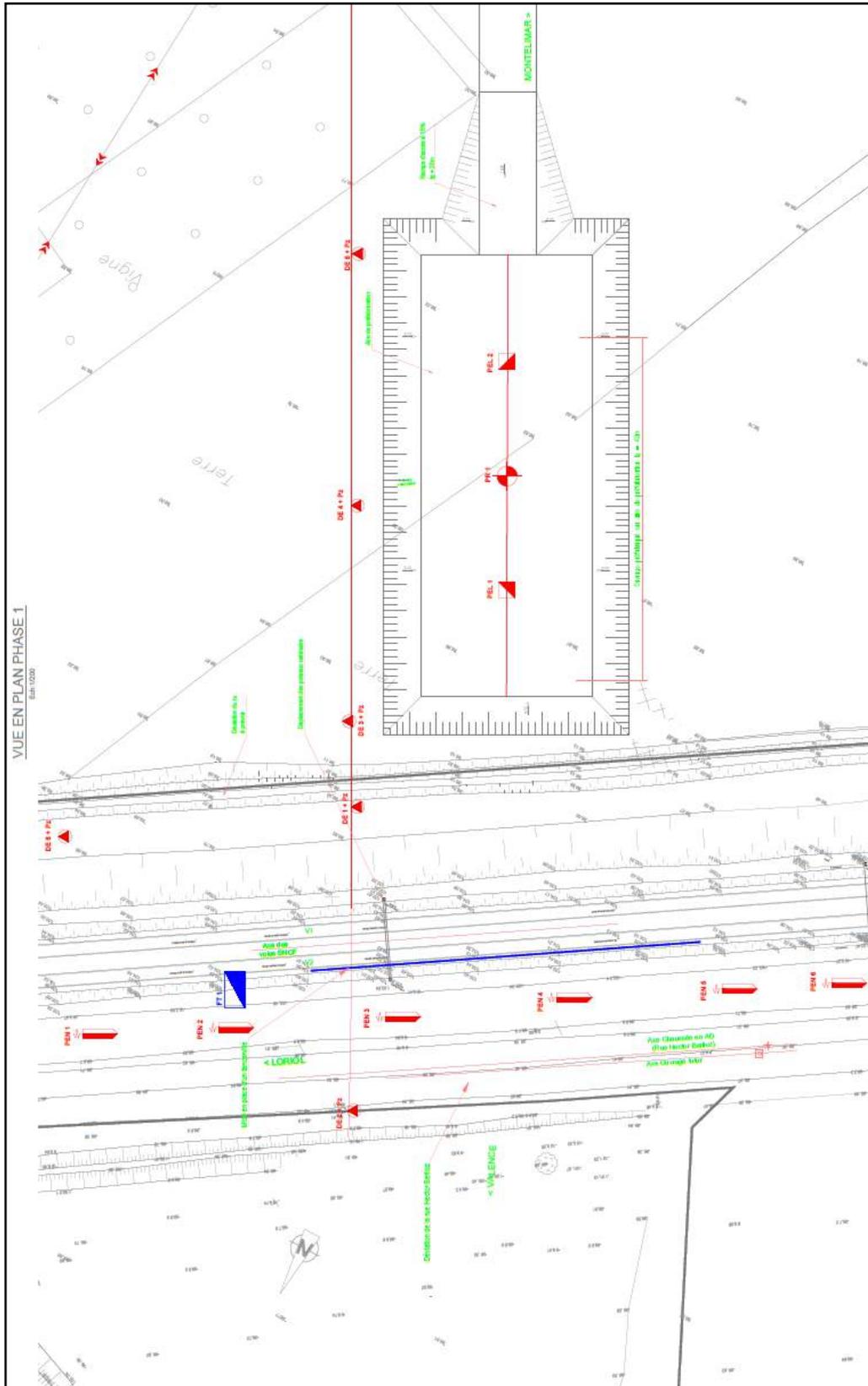
ANNEXE 7 : Plan d'implantation des sondages complémentaires



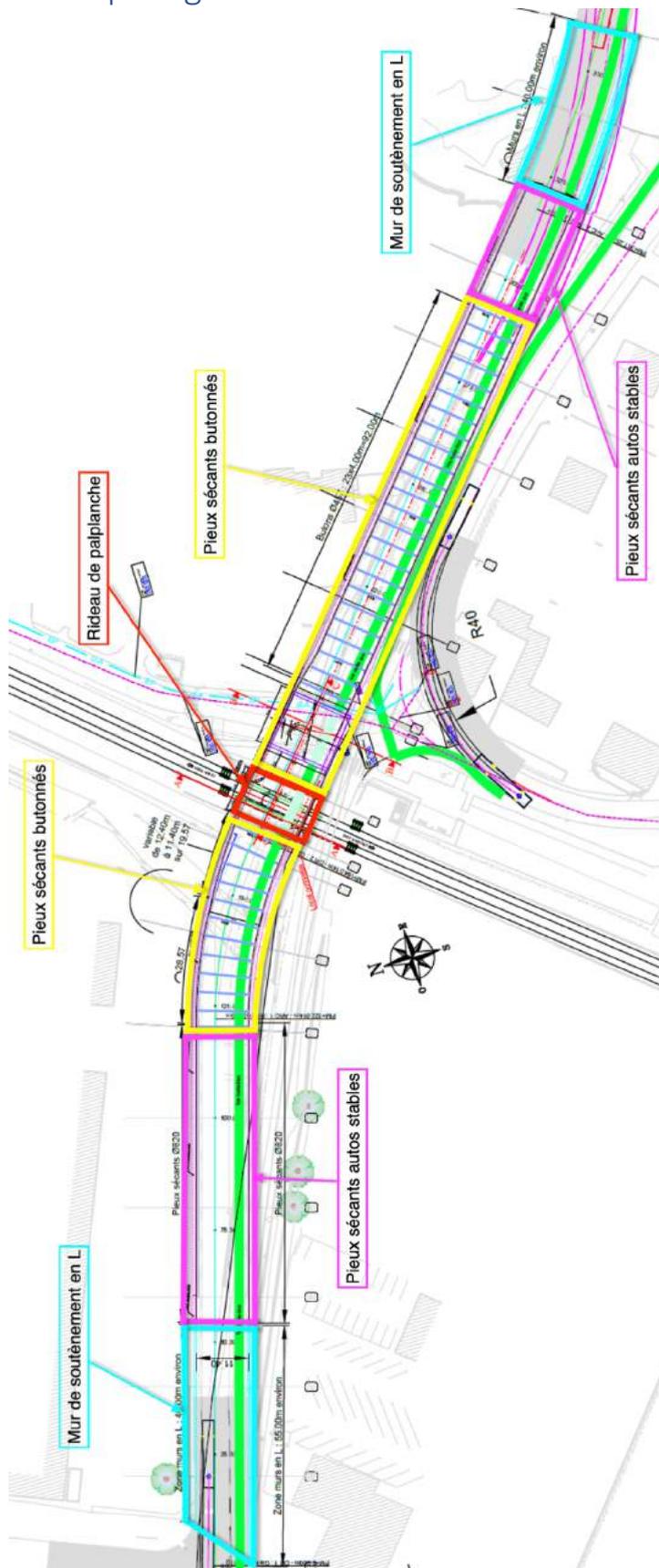
ANNEXE 8 : Plan d'implantation des sondages envisagé



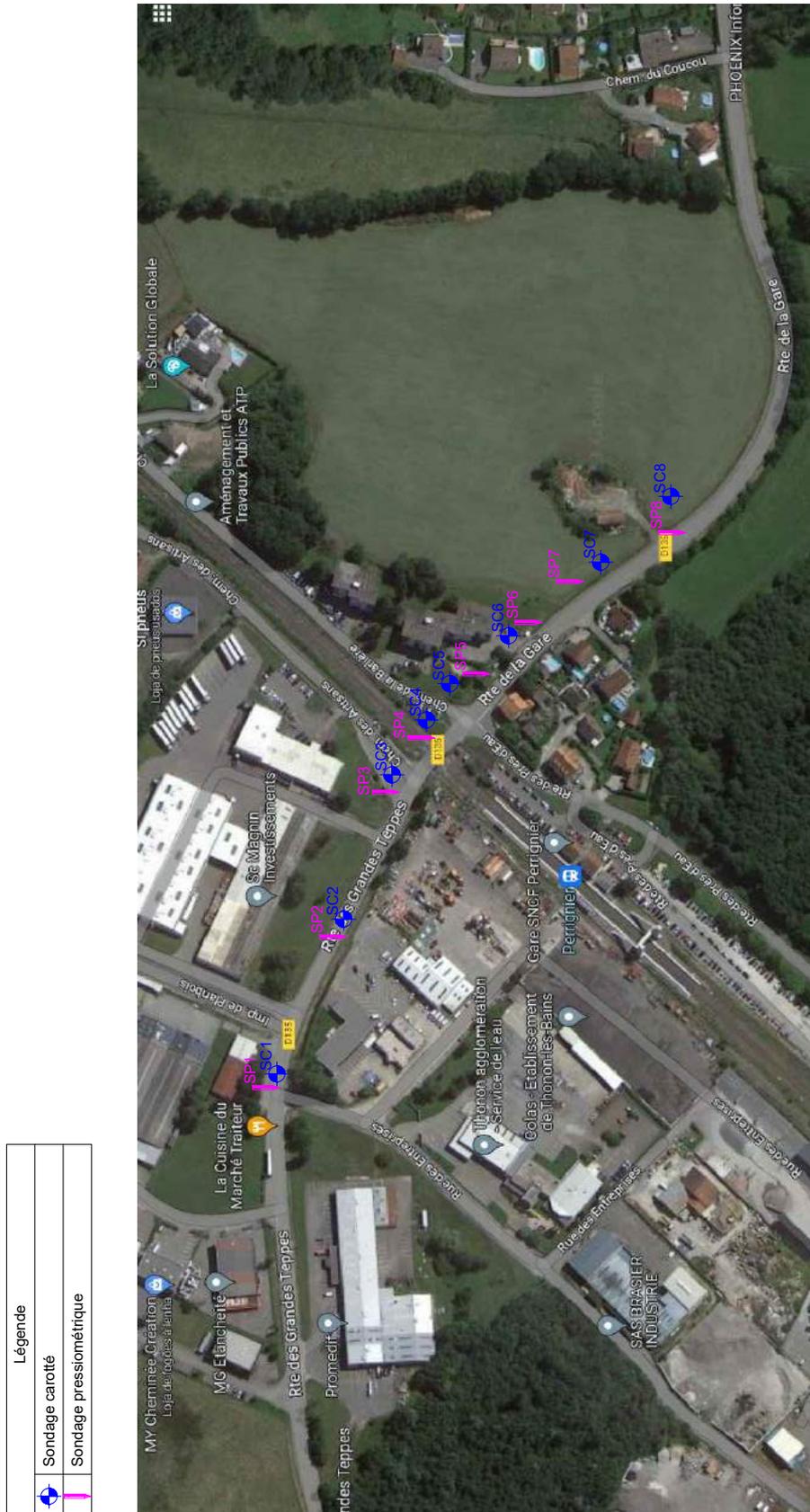
ANNEXE 9 : Plan d'implantation des sondages modifié



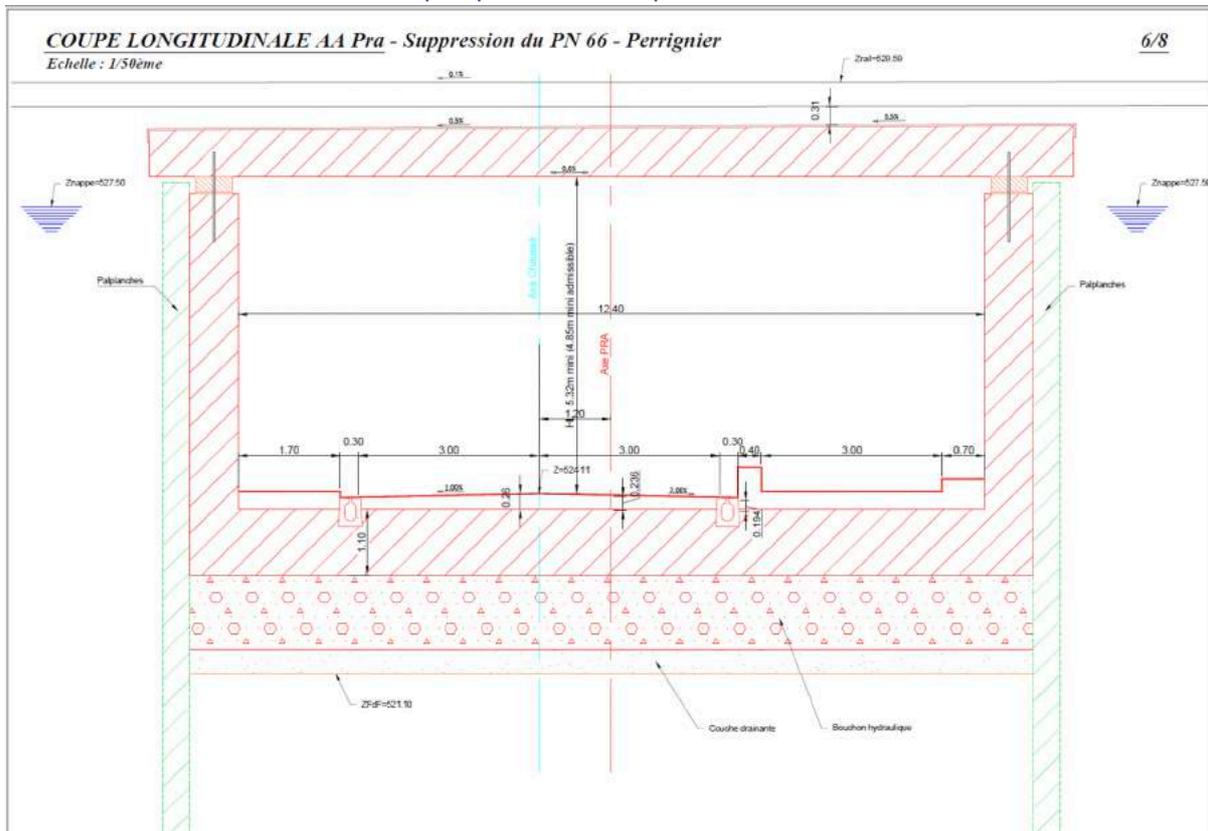
ANNEXE 10 : vue en plan générale



ANNEXE 11 : plan d'implantation des sondages



ANNEXE 12 : rideaux de palplanche – phase définitive



ANNEXE 13 : synthèse des résultats K-Réa (ELS) – écran 1 et 2

PHASE	Déplac. en tête mm	Déplac. max mm	Moment max kNm/m	Tranch. max kN/m	Rapport butées	Tirant 1 kN/m	Tirant 2 kN/m	Tirant 3 kN/m	Liai. Sur. 1 kN/m	Liai. Sur. 2 kN/m
1	0,00	0,00	0,00	0,00	7,450	-	-	-	-	-
2	-2,95	1,00	-41,66	-40,84	5,457	50,00	-	-	-	-
3	-2,98	2,48	-51,13	-61,68	4,797	61,55	-	-	32,15	-
4	-3,19	6,17	78,74	129,94	3,672	101,90	-	-	71,52	-
5	-2,52	6,15	78,36	135,92	3,676	112,89	-	-	42,95	-
6	-2,55	7,42	102,00	174,55	3,236	123,56	-	-	49,57	-
7	-2,44	8,63	108,14	185,04	2,886	119,43	50,00	-	46,94	-
8	-2,46	10,29	118,13	198,81	2,516	123,16	77,14	-	40,78	-
9	-2,42	12,00	119,10	199,78	2,196	122,35	82,67	50,00	34,44	-
10	-2,42	14,16	-120,40	195,65	1,886	121,47	89,27	90,61	27,66	-
11	-2,42	13,75	-136,27	195,64	2,222	121,54	89,43	90,85	29,81	-15,68
Extrema	-3,19	14,16	-136,27	199,78	1,886	123,56	89,43	90,85	71,52	-15,68

PHASE	Déplac. en tête mm	Déplac. max mm	Moment max kNm/m	Tranch. max kN/m	Rapport butées	Tirant 1 kN/m	Tirant 2 kN/m	Tirant 3 kN/m	Liai. Sur. 1 kN/m	Liai. Sur. 2 kN/m
1	0,00	0,00	0,00	0,00	7,450	-	-	-	-	-
2	2,95	-1,00	41,66	40,84	5,457	50,00	-	-	-	-
3	2,98	-3,48	51,13	61,68	4,797	61,55	-	-	32,15	-
4	2,83	-3,48	-62,21	-113,49	4,818	49,50	-	-	71,52	-
5	3,48	-2,51	-66,24	-171,08	4,805	39,99	-	-	42,95	-
6	3,49	-3,77	-87,80	-202,35	4,195	46,14	-	-	49,57	-
7	3,60	-5,06	-97,76	-215,41	3,658	56,49	0,00	-	46,94	-
8	3,60	-6,37	-105,72	-224,20	3,208	59,10	19,86	-	40,78	-
9	3,63	-7,93	-109,69	-226,82	2,791	61,60	40,15	0,00	34,44	-
10	3,63	-9,57	-107,62	-222,34	2,442	61,13	45,27	31,74	27,66	-
11	3,63	-9,28	119,86	-222,72	2,837	61,21	45,44	32,00	29,81	-15,68
Extrema	3,63	-9,57	119,86	-226,82	2,442	61,60	45,44	32,00	71,52	-15,68

ANNEXE 14 : synthèse des résultats K-Réa (ELU) – écran 1 et 2

PHASE	Type Vérif.	M,d max kNm/m	V,d max kN/m	Tirant 1 kN/m	Tirant 2 kN/m	Tirant 3 kN/m	Liai. Sur. 1 kN/m	Liai. Sur. 2 kN/m	Vérif. Def. Butée	Vérif. Equ. Vert. kN/m	Vérif. Kranz
1	MEL	0,00	0,00	-	-	-	-	-	OK	16,36	-
2	MISS	-55,22	-54,93	67,50	-	-	-	-	OK	1212,38	OK
3	MISS	-66,43	-80,42	80,76	-	-	42,22	-	OK	1585,64	OK
4	MISS	104,01	171,43	135,23	-	-	95,37	-	OK	1998,19	OK
5	MISS	105,04	181,81	151,84	-	-	55,56	-	OK	2009,63	OK
6	MISS	137,25	234,55	166,45	-	-	64,55	-	OK	2001,82	OK
7	MISS	146,01	249,41	160,95	67,50	-	60,91	-	OK	2012,66	OK
8	MISS	159,53	268,05	166,00	104,16	-	52,61	-	OK	2018,60	OK
9	MISS	160,85	269,38	164,92	111,64	67,50	44,04	-	OK	2038,97	OK
10	MISS	-160,87	264,28	163,73	120,55	122,31	34,88	-	OK	2051,64	OK
11	MISS	-182,14	263,88	163,82	120,76	122,64	37,78	-21,16	OK	2535,90	OK
Extrema	-	-182,14	269,38	166,45	120,76	122,64	95,37	-21,16	-	-	-

PHASE	Type Vérif.	M,d max kNm/m	V,d max kN/m	Tirant 1 kN/m	Tirant 2 kN/m	Tirant 3 kN/m	Liai. Sur. 1 kN/m	Liai. Sur. 2 kN/m	Vérif. Def. Butée	Vérif. Equ. Vert. kN/m	Vérif. Kranz
1	MEL	0,00	0,00	-	-	-	-	-	OK	16,36	-
2	MISS	56,24	55,14	67,50	-	-	-	-	OK	1214,88	OK
3	MISS	69,18	82,78	83,78	-	-	42,22	-	OK	1586,51	OK
4	MISS	-81,71	-149,22	67,51	-	-	95,37	-	OK	2018,56	OK
5	MISS	-86,56	-238,67	53,18	-	-	55,56	-	OK	1935,23	OK
6	MISS	-115,77	-281,25	61,44	-	-	64,55	-	OK	1923,08	OK
7	MISS	-129,01	-298,82	75,45	0,00	-	60,91	-	OK	1917,06	OK
8	MISS	-138,94	-310,74	78,98	26,87	-	52,61	-	OK	1920,04	OK
9	MISS	-144,34	-314,31	82,37	54,43	0,00	44,04	-	OK	1925,02	OK
10	MISS	-141,56	-308,28	81,73	61,38	43,00	34,88	-	OK	1936,21	OK
11	MISS	162,19	-308,79	81,84	61,60	43,35	37,78	-21,16	OK	2421,45	OK
Extrema	-	162,19	-314,31	83,78	61,60	43,35	95,37	-21,16	-	-	-

ANNEXE 15 : synthèse des résultats K-Réa (ELS) – Pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement

PHASE	Déplac. en tête mm	Déplac. max mm	Moment max kNm/m	Tranch. max kN/m	Rapport butées	Buton 1 kN/m	Buton 2 kN/m	Buton 3 kN/m	Appui S. 1 kN/m
1	0,00	0,00	0,00	0,00	9,214	-	-	-	-
2	-0,57	3,75	-319,60	-184,04	8,342	189,28	-	-	-
3	-1,92	7,77	-735,31	-260,71	5,921	0,00	420,94	-	-
4	-2,67	10,03	-1005,58	-363,83	4,044	0,00	191,75	418,06	-
5	-2,94	11,34	-1165,14	-464,43	3,170	0,00	90,93	620,38	-
6	-2,93	11,24	-1147,55	-477,93	3,453	0,00	103,17	621,55	-39,58
7	-3,01	11,23	-1144,80	-1116,85	3,510	0,00	200,59	-	484,79
8	-1,13	11,22	-1142,85	-2006,22	3,511	30,77	-	-	645,43
Extrema	-3,01	11,34	-1165,14	-2006,22	3,170	189,28	420,94	621,55	645,43

PHASE	Déplac. en tête mm	Déplac. max mm	Moment max kNm/m	Tranch. max kN/m	Rapport butées	Buton 1 kN/m	Buton 2 kN/m	Appui S. 1 kN/m
1	0,00	0,00	0,00	0,00	8,847	-	-	-
2	-0,66	3,44	-219,90	-120,55	7,830	125,99	-	-
3	-1,88	6,87	-499,37	-214,07	5,158	0,00	326,21	-
4	-2,32	9,67	-765,06	-286,75	3,289	0,00	196,00	-
5	-2,46	9,62	-760,07	-368,87	2,444	0,00	119,91	-
6	-2,45	9,60	-755,56	-381,41	2,773	0,00	-	-35,57
7	-2,64	9,59	-755,47	-847,39	2,851	-	-	378,94
Extrema	-2,64	9,67	-765,06	-847,39	2,444	125,99	326,21	378,94

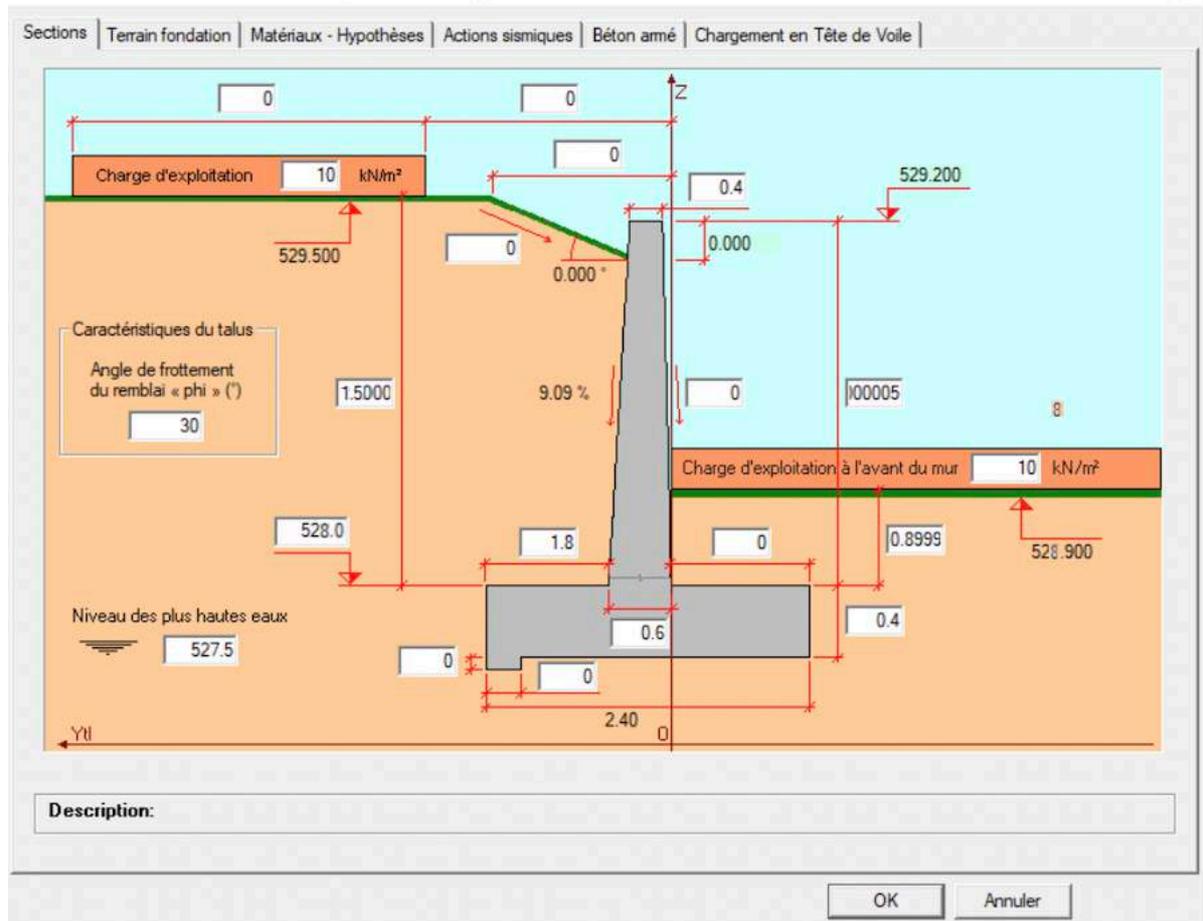
ANNEXE 16 : synthèse des résultats K-Réa (ELU) – Pieux sécants butonnés et autos stables, respectivement

PHASE	Type Vérif.	M,d max kNm/m	V,d max kN/m	Buton 1 kN/m	Buton 2 kN/m	Buton 3 kN/m	Appui S. 1 kN/m	Vérif. Def. Butée	Vérif. Equ. Vert. kN/m	Vérif. Kranz
1	MEL	0,00	0,00	-	-	-	-	OK	124,75	-
2	MISS	-431,46	-248,45	255,52	-	-	-	OK	10556,76	OK
3	MISS	-992,66	-351,96	0,00	568,27	-	-	OK	10467,34	OK
4	MISS	-1357,54	-491,17	0,00	258,87	564,39	-	OK	10428,54	OK
5	MISS	-1572,95	-626,98	0,00	122,75	837,51	-	OK	10370,24	OK
6	MISS	-1549,19	-645,20	0,00	139,27	839,09	-53,43	OK	10370,67	OK
7	MISS	-1545,48	-1507,75	0,00	270,80	-	654,46	OK	10370,75	OK
8	MISS	-1542,85	-2708,40	41,53	-	-	871,33	OK	10372,91	OK
Extrema	-	-1572,95	-2708,40	255,52	568,27	839,09	871,33	-	-	-

PHASE	Type Vérif.	M,d max kNm/m	V,d max kN/m	Buton 1 kN/m	Buton 2 kN/m	Appui S. 1 kN/m	Vérif. Def. Butée	Vérif. Equ. Vert. kN/m	Vérif. Kranz
1	MEL	0,00	0,00	-	-	-	OK	108,84	-
2	MISS	296,87	162,74	170,09	-	-	OK	7908,98	OK
3	MISS	674,05	289,00	0,00	440,39	-	OK	7824,50	OK
4	MISS	1036,06	387,11	0,00	264,60	-	OK	7745,66	OK
5	MISS	1026,01	501,44	0,00	159,12	-	OK	7706,09	OK
6	MISS	1023,05	518,38	0,00	-	-50,18	OK	7705,62	OK
7	MISS	1022,93	1161,33	-	-	514,68	OK	7705,52	OK
Extrema	-	1036,06	1161,33	170,09	440,39	514,68	-	-	-

ANNEXE 17 : géométrie du mur de soutènement en L et les caractéristiques des couches de sol

MUR3D - Section du mur suivant l'axe Y (voir Vue en Plan).



DOS DU RAPPORT

Etudiant : CAVALCANTI MENDONCA Matheus

Année d'étude dans la spécialité : 3

Entreprise : SNCF Réseau

Adresse complète : 133 Boulevard De Stalingrad, 69100
Villeurbanne

Téléphone : 04 37 51 90 50

Responsable administratif (nom et fonction) :

Téléphone :

Courriel :

Tuteur de stage : ALBERT Loris (remplacent Cécile CHAVE)

Téléphone : 06 14.46 95 00

Courriel : loris.albert@reseau.sncf.fr

Enseignant-référent : VIEUX-CHAMPAGNE Florent

Téléphone : 06 25 47 15 78

Courriel : florent.vieux-champagne@univ-grenoble-alpes.fr

Titre : (maximum 2 à 3 lignes).

Résumé :

J'ai effectué mon contrat de professionnalisation de 5^{ème} année d'étude de Polytech Grenoble au sein de la Société Nationale de Chemin de fer (SNCF) réseau, filiale du groupe SNCF.

Le branche SNCF Réseau est responsable de gérer, exploiter, maintenir et développer le réseau ferré français. Elle apporte son savoir-faire à chaque projet dans 120 pays au monde, en assurant aux maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage et entreprises l'efficacité et la fluidité du déroulement des opérations de la phase de conception jusqu'à la postérieure livraison et exploitation, en réalisant les études et chantiers projets.

La méthodologie, les démarches internes ainsi que le vocabulaire propre à la société m'ont forcé à sortir de ma zone de confort et à m'adapter afin de comprendre leur manière de travailler. Pendant ce cycle d'un an j'ai eu l'occasion de suivre différents projets dans la région Auvergne Rhône-Alpes et ses alentours, durant lesquels j'ai pu appliquer et consolider mes apprentissages de mon parcours à Polytech.

En conclusion de cette alternance, je suis monté en compétences, qu'elles soient personnelles ou professionnelles, en tant que futur ingénieur, grâce à la multidisciplinarité des missions qui m'ont été confiées. En effet, ces dernières m'ont permis de développer le côté technique « *hard skills* » ainsi que les relations interpersonnelles « *soft skills* ».

