

PROJET D'OUVRAGE D'ART : JUSTIFICATION DU PROGRAMME DES RECONNAISSANCES COMPLÉMENTAIRES

BRIDGE PROJECT : JUSTIFICATION FOR FURTHER GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS

Aurore BRACH¹, Lucile SAUSSAYE², Grégory GENEREUX¹, Philippe JANDIN¹

¹ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Sourdun, France

² Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Blois, France

RÉSUMÉ – La justification des programmes de reconnaissances géotechniques complémentaires est parfois complexe. Il s'agit de transmettre au maître d'ouvrage des arguments techniques, normatifs et réglementaires ainsi que financiers comme le montre l'exemple retenu d'un projet de doublement d'un ouvrage d'art pour lequel, au stade de projet, il subsiste de nombreuses incertitudes géotechniques.

ABSTRACT – To justify further geotechnical investigations is sometimes complicated. Technical, standard and regulatory, financial arguments should be given to the client. This is shown in a doubling bridge project, for the one there are still many geotechnical uncertainties at the project step.

1. Introduction

Justifier un programme de reconnaissances géotechniques complémentaires est parfois une mission ardue. En effet, ces actions exigent des dépenses importantes dès les phases amont d'un projet d'ouvrage d'art exceptionnel.

À partir d'un exemple concret, l'objectif de cet article est de présenter la progressivité des études menées jusqu'au stade actuel, la phase G2 AVP des missions géotechniques ainsi que les arguments apportés pour la justification détaillée d'une campagne de reconnaissances géotechniques complémentaires conséquente pour les phases G2 PRO et G2- DCE/ACT, telles que définies par la norme NF P94-500 de novembre 2013.

L'article est organisé en trois parties, présentant respectivement le projet d'ouvrage d'art, le contexte géotechnique issu des campagnes déjà réalisées, les propositions pour la campagne de reconnaissances géotechniques complémentaires ainsi que l'argumentaire développé pour justifier cette dernière.

2. Présentation du projet et de son avancement

2.1. Ouvrage d'art à réaliser

Le projet de pont concerne le doublement d'un ouvrage existant de 1300 m de longueur. Le nouvel ouvrage sera situé 40 m en aval de l'ouvrage existant. Ses travées seront de longueur identique égales à 70 m. Deux solutions sont envisagées à ce stade des études : une solution nommée « B70 var » à tablier en caissons en béton précontraint

de hauteur variable, portés par 22 appuis, ou une solution nommée « M70 » à tablier à ossature mixte acier-béton de type bipoutre à entretoises, porté par 21 appuis.

Les deux solutions envisagées pour le moment comptent donc respectivement 20 et 19 piles fondées sur 4 pieux de grande longueur ancrés dans le substratum rocheux et deux culées en rive fondées également sur pieux. Les deux remblais d'accès au pont sont à réaliser sur des sols compressibles, mais ne seront pas traités dans la suite de cette communication.

Les pieux seront a priori tubés en tête dans les sols mous puis ancrés dans le substratum rocheux sain. Les diamètres retenus pour les pieux sont actuellement de 1,4 m pour la solution « B70 var » et 1,3 m pour la solution « M70 » pour reprendre des efforts normaux en tête de pieu pouvant aller jusqu'à plus de 13 MN.

2.2. Phasage et avancement du projet

Le projet est actuellement en phase de préparation du POA (Projet d'Ouvrage d'Art). Trois campagnes de reconnaissances ont été réalisées antérieurement. La première campagne réalisée en 2010, pour les études préalables et la mission G11 selon la norme NF P94-500 : 2006, a consisté en la réalisation d'une campagne géophysique sur les berges. Une deuxième campagne de reconnaissances réalisée entre 2011 et 2013, dans le cadre d'une mission G12, selon la norme NF P94-500 de 2006, a permis de réaliser des sondages en rivière notamment. Enfin, une mission de type G2 AVP intégrée au dossier de mise à jour de l'EPOA (Étude Préliminaire d'Ouvrage d'Art), a été réalisée en 2015, permettant de définir une campagne de reconnaissances complémentaires à réaliser.

Ces premières investigations ont permis d'aborder les calculs préliminaires vis-à-vis des solutions constructives envisagées mais ne permettent pas de dimensionner l'ouvrage en phase Projet (phase G2 PRO de la mission géotechnique de type G2).

La progressivité des études doit aussi tenir compte des évolutions normatives et notamment de la nouvelle version de la norme NF P94-500 de novembre 2013 sur les missions géotechniques.

3. Reconnaissances réalisées et contexte géotechnique

3.1. Reconnaissances réalisées

Les différentes études géotechniques se sont basées sur des reconnaissances géophysiques, des sondages in situ, des essais in situ de type pénétromètre, pressiomètre et phicomètre, des essais en laboratoire sur échantillons intacts ainsi que sur des données bibliographiques de la zone étudiée, comme les coupes géotechniques ayant servi à la construction de l'ancien ouvrage situé 40 m en amont.

Pour les piles en rivière, objet de cette communication, il a été réalisé 4 sondages destructifs, 4 sondages carottés qui ont permis de réaliser quelques essais en laboratoire et in situ (9 identifications GTR des sols, 3 essais d'abrasivité de la roche, 4 essais de résistance à la compression simple de la roche, 4 essais de résistance à la traction indirecte de la roche, 3 identifications pétrographiques de la roche par lames minces, 4 essais d'eau de perméabilité de type Lugeon de la roche), 4 profils scissométriques et 4 profils pressiométriques.

3.2. Contexte géotechnique

La zone d'étude du nouveau pont est située dans l'estuaire d'une rivière. En raison d'une forte influence des marées et de la présence de mangroves au niveau des berges, le trait de côte est assez irrégulier.

Les terrains que l'on trouve en surface sont des terrains sédimentaires d'épaisseur variable et très peu consolidés. Ce sont des dépôts fluvio-marins de séries différentes selon le côté de la rive étudiée. Ces formations quaternaires reposent sur un substratum rocheux granitique très résistant d'époque précambrienne.

Les dépôts sédimentaires sont de trois types. Le premier est un horizon vasard de teneur en eau très élevée et présentant une très faible compacité et des caractéristiques mécaniques médiocres. En dessous de ces vases, les reconnaissances ont mis en évidence des lentilles de sables, de teneur en eau élevée et de caractéristiques mécaniques faibles. Cet horizon n'est pas rencontré pour tous les sondages et n'est donc pas présent sur tout le linéaire de l'ouvrage. Enfin, au-dessus du substratum granitique sain se trouve un horizon caractérisé d'« argiles d'altération » qui correspond à une argile sableuse, de forte teneur en eau et de caractéristiques mécaniques faibles. Cette couche est hétérogène en termes de caractéristiques mécaniques et sa compacité n'augmente pas nécessairement linéairement avec la profondeur.

4. Nécessité et justifications des reconnaissances complémentaires

4.1. Définition du programme complémentaire des reconnaissances

Afin de réduire les incertitudes géotechniques qui subsistent actuellement sur le projet, il a donc été recommandé de réaliser 5 sondages carottés jusqu'à 5 m sous le niveau du substratum rocheux permettant de prélever des échantillons de roche pour réaliser de nouveaux essais de compression et de traction ainsi que d'abrasivité (pour chaque sondage) et un sondage pressiométrique jusqu'à 5 m sous le niveau du substratum rocheux sous chaque appui de l'ouvrage n'ayant pas fait l'objet de sondages auparavant (a minima il faut un sondage pressiométrique ou carotté sous chaque appui).

Il est aussi proposé de réaliser une campagne sismique pour avoir une connaissance plus précise du toit et de la qualité du substratum granitique.

4.2 Justifications techniques et incertitudes géotechniques

4.2.1. Faible rapport entre le nombre de données disponibles et la taille de l'ouvrage

Les reconnaissances établies pour les études de niveau projet doivent permettre d'établir un modèle géotechnique fiable pour le dimensionnement de 20 appuis sur fondations profondes, pour une longueur de pont de 1300 m.

Le nombre d'essais et la quantité des reconnaissances géotechniques ne sont à ce stade pas suffisants en regard de l'ampleur du projet, des risques financiers qui en découlent, notamment géotechniques. Les reconnaissances géotechniques réalisées en 2011 et 2013 ne permettent d'établir qu'un modèle géologique et géotechnique sommaire. Les incertitudes encore importantes à ce stade pourront entraîner des conséquences techniques et financières lourdes sur certains appuis.

Un sondage par appui est donc nécessaire pour situer de manière précise les niveaux de l'horizon vasard et du substratum rocheux dans lequel les pieux devront être ancrés.

4.2.2. Présence potentielle d'une zone fracturée ou faillée

La nature pétrographique du substratum rocheux différente entre la rive droite et la rive gauche amène à penser qu'il peut exister entre les deux rives une zone d'accident géologique (information tirée de la carte géologique et des essais pétrographiques sur lame mince). Cet accident géologique pourrait être caractérisé par une roche fracturée, fragmentée ou de plus faibles caractéristiques mécaniques que le reste du substratum rocheux.

À ce stade des études et avec les reconnaissances actuelles, l'existence de cette zone ne peut être ni confirmée ni située géographiquement.

Un dimensionnement complémentaire a été réalisé montrant que les diamètres des pieux devraient être augmentés de 40 cm.

4.2.3. Variation incertaine du toit du substratum rocheux

Les reconnaissances effectuées mettent en avant des épaisseurs de sols peu consolidés très variables le long de l'axe de l'ouvrage (épaisseurs variant de 5 à plus de 20 m de vases). Le toit du substratum rocheux est lui aussi d'altitude très variable pouvant aller de - 21,3 NGF à - 43,5 NGF pour les sondages réalisés. De plus, il existe une forte variation (plus de 3 m) du niveau du toit du substratum rocheux entre les deux sondages espacés de moins de 5 m. Les incertitudes sur les niveaux des couches de terrain sont donc fortes.

De plus, il est très délicat de se baser sur le profil géotechnique de l'ouvrage actuel situé à 40 m de l'axe du projet car les sondages ont permis d'identifier des cotes altimétriques très différentes de l'ordre de plusieurs mètres.

La morphologie du substratum rocheux est donc chahutée et doit conduire à un maillage élevé de reconnaissances pour réduire les incertitudes sur les longueurs des fondations.

4.2.4. Spécificités locales et risques résiduels

Les reconnaissances réalisées permettent d'attirer l'attention sur ces points particuliers et localisés.

Au niveau d'un sondage carotté, en rivière, le rocher présente des passes fracturées (confirmées par les essais Lugeon) et des filons de dolérite (roche de nature pétrographique différente du granite) : il faut donc confirmer les paramètres mécaniques et la fracturation du rocher pour chaque pieu pour s'assurer de la capacité portance du substratum.

Au niveau d'un deuxième sondage carotté, des blocs rocheux non liés au substratum ont été rencontrés : il faut donc être vigilant quant à leur présence éventuelle et en tenir compte lors de l'interprétation des reconnaissances complémentaires.

Enfin, les sables limoneux présentent une grande hétérogénéité au niveau de leurs caractéristiques mécaniques et de leur présence ou non dans le sol. Il convient donc d'avoir des données complémentaires et d'être vigilant lors du choix des valeurs caractéristiques pour le dimensionnement des appuis.

4.3 Justifications réglementaires et normatives

Les premières investigations ont permis d'aborder les calculs préliminaires vis-à-vis des solutions constructives envisagées mais ne permettent pas de dimensionner les ouvrages en phase Projet (phase G2 PRO de la mission géotechnique de type G2). Des reconnaissances complémentaires sont donc essentielles pour essayer de lever un maximum d'incertitudes géologiques et pour le dimensionnement en phase projet.

De plus, dans le projet de « Recommandations pour la bonne application de la norme NF P94-500 (novembre 2013) sur les missions géotechniques » de Syntec-Ingénierie et

l'Union Syndicale Géotechnique, il est précisé que, d'une manière générale, une mission ne doit pas être partielle. Il faut donc réaliser toutes les phases d'une mission, y compris les phases G2 AVP et G2 PRO.

La norme NF P94-500 régissant les missions géotechniques ajoute de plus que « chacune des phases de la mission G2 doit s'appuyer sur des données géotechniques pertinentes, ce qui peut nécessiter la réalisation d'un programme spécifique d'investigations géotechniques. [...] il est indispensable de ne les définir qu'à l'issue de la réalisation de chacune des phases d'études précédentes ». (Article 8.1 de la norme NF P94-500 : 2013)

Il ne faut pas non plus oublier que suite aux évolutions normatives, la phase AVP de la mission G2 (NF P94-500 : 2013) ne correspond pas à l'ancienne mission G12 (NF P94-500 : 2006) car elle est plus complète. Les différentes étapes du projet doivent donc évoluer avec la normalisation en vigueur lors de la réalisation de chacune des études géotechniques.

D'autre part, il est recommandé aux bureaux d'études qui seraient dans le cas de réalisation d'une mission G3 en l'absence des phases G2 PRO et G2 DCE/ACT de réclamer au maître d'ouvrage la réalisation de la phase G2 PRO. Ainsi, sans investigations complémentaires suffisantes, la phase G2 PRO ne sera pas réalisable et compromet l'enchaînement des missions géotechniques suivantes pour l'ensemble du projet de construction du nouveau pont.

Enfin, selon la norme NF EN 1997-2 : 2007, portant sur les reconnaissances des terrains et essais pour le calcul géotechnique, et le guide du projeteur Ouvrage d'Art du Sétra de 1999, il convient d'effectuer, pour des ouvrages longs et non courants, des sondages dans l'axe de l'ouvrage centrés sur les appuis avec un sondage pressiométrique par appui. Le programme proposé répond également à l'exigence de maîtrise de la qualité et des risques techniques financiers tels que définis dans l'instruction technique du 29 avril 2014 relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national.

4.4 Justifications financières

Compte tenu des enjeux financiers que représente le poste fondations dans l'estimation de l'ouvrage (plus de 15 % du montant hors taxe des travaux), il est important de sécuriser la conception et le dimensionnement des fondations ainsi que des remblais d'accès.

Des incertitudes subsistent sur la présence ou non d'une zone de contact géologique ainsi que sur le niveau de l'horizon vasard et du toit du substratum rocheux. Pour ces deux types d'incertitudes, afin de donner des arguments financiers pour la suite du projet à mener (réalisation des études et avancement du projet), il a été décidé d'estimer les variations des coûts en tenant compte d'une variabilité spatiale ou d'une variabilité des paramètres mécaniques.

4.4.1 Impact financier de l'éventuelle présence d'une zone de contact géologique

Comme évoqué précédemment, en cas de présence d'une zone de contact géologique avec des propriétés mécaniques moindres du substratum, il est nécessaire de redimensionner les pieux pour vérifier les états limites de portance, ce qui conduit à une augmentation de 20 à 40 cm du diamètre des pieux.

Cette augmentation de diamètre conduit à un surcoût pouvant aller de 23 à 48 % pour la construction d'un appui (comportant quatre pieux), selon les deux solutions « B70 var » ou « M70 ».

4.4.2 Impact financier de l'incertitude sur les niveaux des terrains

Les variations du toit du substratum rocheux pouvant aller jusqu'à 25 m ainsi que les épaisseurs conséquentes de vases (de 5 à 20 m d'épaisseur) sont deux éléments majeurs de risques pour la réalisation des fondations. À ce stade des études et vu la forte variabilité mise en avant, les longueurs de tubages métalliques et les longueurs de pieux ne sont pas fiabilisées notamment à cause d'un maillage trop large des reconnaissances.

Pour l'estimation des longueurs des pieux, de la hauteur de forage et de la longueur des chemises métalliques, les données géotechniques obtenues par la coupe géotechnique du pont existant situé 40 m en amont et par les reconnaissances géotechniques réalisées ont été utilisées.

Étant donné le peu de sondages à disposition par rapport au nombre de piles (4 sondages en rivière alors que les piles sont au nombre de 18 ou 19 selon les solutions étudiées), des règles ont été établies pour prendre en compte les incertitudes géotechniques.

Dans le cas où la pile est située à environ 40 m ou moins d'un sondage récent, ce dernier est utilisé pour fixer les caractéristiques géométriques de la pile. Dans le cas contraire, c'est la coupe géotechnique du pont existant qui a servi de référence. Une exception est néanmoins faite pour les piles situées à proximité de certains sondages. Il a été constaté dans une zone une variation très importante de la topographie du substratum au droit du pont existant par rapport à celui au droit du nouveau pont. Dans cette zone, le choix a donc été fait de retenir les données des sondages plus éloignés sans tenir compte du profil géotechnique du pont existant pourtant situé à une distance plus faible.

Il a été décidé d'introduire une variabilité de la géométrie des pieux, fonction de l'éloignement de la pile par rapport au sondage. Le tableau 1 présente les choix retenus pour la valeur de la variabilité par rapport à la distance entre le futur appui et le sondage permettant son dimensionnement.

Tableau 1. Critères de détermination de la valeur de la variabilité selon l'éloignement des sondages

Distance appui - sondage	Pourcentage de variabilité
Entre 0 et 10 m	0 %
Entre 10 et 20 m	10 %
Entre 20 et 40 m	20 %
Plus de 40 m	30 %

Pour les piles pour lesquelles les données géotechniques du pont existant ont été utilisées, 30 % de variabilité a été retenu.

Pour l'estimation du coût des fondations, trois calculs ont donc été menés : un sans prise en compte de l'incertitude des données géotechniques, un en retenant les paramètres géométriques minimaux (plus faible longueur de pieu possible compte tenu de la variabilité) et le troisième en retenant les paramètres géométriques maximaux (plus grande longueur de pieu possible compte tenu de la variabilité).

Avec cette méthode, on obtient une variation de coût sur les fondations de +/- 7 % du coût des piles et culées (fondations, chevêtres et piles). Ce résultat non négligeable montre qu'il est important de fiabiliser au maximum le modèle géotechnique.

Enfin cette variation de l'enveloppe financière nécessaire pour la réalisation des appuis est à rapprocher du coût des reconnaissances complémentaires à mener qui est nettement inférieur.

5. Conclusions

Dans le cadre de l'enchaînement des missions géotechniques pour un projet d'ouvrage d'art exceptionnel, il est généralement nécessaire à chaque étape de définir un programme de reconnaissances complémentaires permettant de réduire les incertitudes géotechniques résiduelles. Ces reconnaissances peuvent avoir un coût conséquent au stade des études et il est parfois utile d'établir un ensemble de justifications complètes pour donner au maître d'ouvrage les éléments nécessaires à sa prise de décision.

L'exemple présenté a permis de mettre en avant plusieurs types de justifications : techniques, règlementaires et normatives et enfin financières.

Les estimations de risques financiers, en introduisant une variabilité spatiale des données géométriques des appuis selon leur proximité avec les sondages disponibles, ont permis de montrer que le risque financier était plus important que le coût des reconnaissances complémentaires.

Le travail réalisé en complément des arguments techniques appuyés sur des textes normatifs et règlementaires a permis de quantifier les incertitudes géotechniques à ce stade du projet.

Dans le contexte actuel de diminution des coûts des études, il devient important de donner au maître d'ouvrage plusieurs d'arguments, techniques et financiers lui permettant de prendre sa décision. Ainsi il semble intéressant à l'heure actuelle de développer une méthode généralisée permettant de gérer les risques géotechniques et les impacts en découlant durant toutes les phases des projets.

5. Références bibliographiques

- Afnor (2006). NF P94-500 Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications.
- Afnor (2007). NF EN 1997-2 Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais.
- Afnor (2013). NF P94-500 Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie (2015). Instruction technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national. 221 pages.