

L'importance de la fiabilité des entrants pour la géotechnique des projets

The crucial role of the input data reliability for the geotechnics of the projects

Jean-François FREZET^{1*}, Pierre-Louis REGAZZONI^{1*}, Fabien BORSELLINO¹

1 : Egis, 3 Rue du Dr Schweitzer, 38180 Seyssins - France

** jean-francois.frezet@egis-group.com*

RESUME : Un projet s'inscrit dans un cadre géotechnique précis, il répond à un besoin clairement défini. Le cadre réglementaire et normatif doit être adapté au type d'ouvrage et sa localisation. Si toutes les parties prenantes du projet doivent prendre en compte ce cadre, le géotechnicien est particulièrement concerné : la connaissance de ce cadre lui permettra de fiabiliser les données d'entrée nécessaires à condition que chaque élément soit bien choisi et adapté à l'ouvrage.

Quels sont les enjeux et les difficultés durant le projet, pour fiabiliser les entrants ?

Le premier enjeu est réglementaire et normatif. Existe-t-il un référentiel adapté à ce projet ? Est-ce que les référentiels retenus sont adaptés ?

Le deuxième enjeu est la connaissance de l'ouvrage lui-même, s'il s'agit d'une reprise ou d'une réparation, ou des ouvrages existants, s'il s'agit d'un ouvrage neuf à proximité d'avoisinants. Est-ce que toutes les connaissances disponibles ont été transmises ? Est-ce qu'elles peuvent être valorisées ?

Le troisième enjeu concerne l'acquisition des données de sol et d'eau. La difficulté est de prendre du recul face à la masse parfois incomplète et imparfaite des données disponibles : les plages de variation des mesures sont-elles bien connues et quantifiées ? Leur représentativité est-elle bien acquise ?

Enfin, le dernier enjeu se manifeste dans la définition de critères à respecter en phase de travaux puis d'exploitation. S'il paraît assez évident que ces critères soient définis précisément au début du projet par l'exploitant, il est parfois compliqué de les obtenir. Des critères inadaptés peuvent compromettre la faisabilité de l'ouvrage et induire des difficultés en phase travaux puis en exploitation.

L'article présente une démarche de fiabilisation des entrants à travers le retour d'expérience de projets essentiellement portuaires, sans éluder les difficultés liées à cet exercice. L'objectif est une prise de conscience par tous les acteurs de cette étape clé du projet.

ABSTRACT: A project is tied to specific geotechnical conditions and addresses a clearly defined need. The code and standards must be adapted to the type of structure and its location. While all project stakeholders must take these codes and standards in account, the geotechnical engineer is particularly concerned: knowledge of this framework will allow her or him to improve the reliability of the necessary input data, provided that each element is carefully chosen and adapted to the structure.

What are the stakes and the difficulties during the project regarding the reliability of input data?

The first challenge is regulatory and normative. Is there a set of standards adapted to this project? Are the selected technical specifications appropriate?

The second challenge is knowledge of the structure itself, whether it involves an upgrade or repair, or knowledge of existing structures if it is a new build near adjacent structures. Has all available knowledge been shared? Can it be effectively utilized?

The third challenge concerns the acquisition of soil and groundwater data. The difficulty lies in maintaining perspective when faced with a mass of data that is sometimes incomplete or imperfect: are the ranges of measurement variation well-known and quantified? Has their representativeness been clearly established?

Finally, the last challenge appears in the definition of criteria to be met during the construction and operational phases. While it seems obvious that these criteria should be precisely defined at the start of the project by the operator, they are sometimes difficult to obtain. Inappropriate criteria can compromise the feasibility of the structure and lead to difficulties during both construction and operation.

This article presents a methodology for improving the reliability of input data through feedback and case studies from primarily port-related projects, without overlooking the difficulties associated with this exercise. The objective is to raise awareness among all stakeholders regarding this key stage of the project.

Mots-clés: réglementation ; données d'entrée ; critères d'exploitation ; archives.

Keywords : regulations; input data; operating criteria; archives.

1 CONSTATS

L'ingénierie géotechnique est une des disciplines qui continue de bénéficier la loi de Moore en informatique. Nous disposons d'outils de calculs de plus en plus puissants. Les modélisations s'appuient sur des concepts de plus en plus fins et complexes telles que des modélisations en 3D intégrant le sol, la nappe, la structure et le phasage, avec des lois de comportement toujours plus complexes, etc. Leur mise en œuvre nécessite à la fois une expertise pointue, une expérience étendue et un certain recul sur les conceptions possibles selon les fonctions de l'ouvrage et les référentiels. La géotechnique est aussi une discipline dont la complexité est parfois sous-estimée par les non-spécialistes, qui conservent l'impression de pouvoir appréhender toute sa globalité et sa sensibilité par la modélisation et les calculs, et avoir une impression de certitude sur les résultats obtenus avec une précision au dixième de millimètre. C'est un premier écueil.

Un second écueil réside dans la temporalité propre au géotechnicien : celui-ci dépend de données d'entrées dont l'acquisition et l'interprétation sont intrinsèquement chronophages. Ces données d'entrées sont aussi coûteuses. Cette combinaison de facteur rend paradoxalement complexe l'intégration de campagnes exhaustives dans les plannings des projets, pourtant essentiels pour alimenter de manière fiable les modèles numériques actuels.

Le géotechnicien doit analyser l'environnement géologique / géotechnique / hydrogéologique de l'objet qu'il étudie, avoir conscience de ses propres limites, évaluer les aléas liés à l'environnement pesant sur le projet, identifier les enjeux du projet sur l'environnement. La finalité de l'analyse est de réduire les risques à un niveau acceptable en préconisant les mesures « juste nécessaires » (e.g. sans basculer dans des conceptions sur-sécuritaires).

Dernier point, le géotechnicien est tributaire d'objectifs à différentes étapes de la vie du projet, dont il ne maîtrise pas nécessairement les tenants et les aboutissants (e.g. politique sur le projet, optimisation demandée, évolution de projet).

Ainsi, pour pouvoir mener à bien son projet le géotechnicien doit cadrer une très grande variété/complexité d'éléments ou « entrants » au sens large, qui conditionnent la bonne exécution de celui-ci.

2 CADRAGE REGLEMENTAIRE ET NORMATIF

2.1 La nécessité d'auditer le cadre réglementaire et normatif imposé

Les Eurocodes s'appliquent pour les ouvrages à risques normaux. Les ouvrages à risques spéciaux peuvent quant à eux bénéficier d'un corpus réglementaire et normatif adapté.

Pour les centrales nucléaires (risque spécial), on se réfère au code RCC-CW (AFCEN, 2018).

Concernant les digues et barrages, l'Arrêté du 6 août 2018 fixe des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages (ATB). Un ensemble de recommandations du CFBR, de bulletin de l'ICOLD, encadrent la conception. Par exemple, pour les remblais de retenues, des pondérations spécifiques sont définies pour les études de stabilité, avec des cas de charges eux aussi spécifiques. Pour certaines parties d'ouvrage (e.g. barrages), ce corpus complète mais n'exclut pas le recours aux Eurocodes (par exemple les bajoyers d'un évacuateur de crue).

La conception des ouvrages portuaires nécessite parfois d'adapter le cadre des Eurocodes (déclinaison française) au profit de recommandations telles que ROSA2000 (préparé en vue de l'application aux Eurocodes), des BS6349, de l'AIPCN, voir de l'API, de l'ASCE.

Donc, même dans un contexte bien connu, il existe suffisamment de catégories d'ouvrages où le cadrage nécessite une analyse approfondie de l'adéquation des textes à l'ouvrage étudié.

Cette attention devra être toute particulière dans des contextes réglementaires et normatifs étrangers moins familiers. L'absence de référentiel adapté au type d'ouvrage étudié pouvant conduire à l'usage d'un jeu de normes inappropriées pouvant compliquer la conception de l'ouvrage.

Une étape de questionnement sur l'applicabilité et la représentativité des textes de référence, dont le poids contractuel est majeur, et leur éventuelle adaptation est donc nécessaire. Celle-ci requiert une appropriation et compréhension fine des textes de base importantes et une compréhension fine des enjeux sur les ouvrages.

2.2 Exemple d'adaptation sur un projet

Dans le cadre d'un projet portuaire sur un autre continent, l'équipe d'étude reprend un projet au stade faisabilité pour le porter vers les travaux. La solution technique est figée : un quai type combiwall classique. Le cahier des charges pour la conception liste les normes à respecter. Dans le pays où l'on

intervient, le corpus réglementaire et normatif est assez exhaustif et très contraignant. Seulement il ne couvre pas le type d'ouvrages à construire. Le dimensionnement général est donc basé sur un code pour le calcul des ponts routiers, avec des impacts importants sur les combinaisons de charges.

En complément, l'ASCE61-14 « Seismic Design of Piers and Wharves » a été utilisées pour les niveaux de séismes, bien que ce document ne s'applique qu'aux quais sur pieux. Cela introduit un séisme de design « DE » de période de retour bien plus importante que celle considérée usuellement, qui conduirait à devoir considérer un comportement localement plastique dans la structure. Or le type de structure retenue, un combiwall, n'admet pas le fonctionnement plastique, un point qui devrait être clarifié dans l'ASCE61-25 à venir.

De part le niveau de séisme retenu, cette approche est donc très pénalisante pour un quai de type « combiwall ». Dans l'optique de garantir la viabilité économique du projet, il a été nécessaire de revenir à une approche similaire aux Eurocodes et à l'AIPCN WG34.

Le cas échéant, une approche de calcul couplée temporelle aurait pu être réalisée, mais elle nécessite adaptation du planning d'étude, avec une acquisition de données complémentaires, et un temps d'élaboration et d'exploitation du modèle difficilement compatible avec le déroulé du projet.

3 CONNAISSANCE DE L'OUVRAGE ET DE SON ENVIRONNEMENT

3.1 Une influence réciproque

Dans l'exercice de ses attributions le géotechnicien doit caractériser la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) définie comme le « volume de terrain au sein

duquel il y a interaction entre, d'une part, l'ouvrage ou l'aménagement de terrain (du fait de sa réalisation et de son exploitation) et, d'autre part, l'environnement (sols, ouvrages, aménagements de terrains ou biens environnants). ». Il est précisé que la forme et l'extension de cette zone sont spécifiques à chaque site et à chaque ouvrage ou aménagement de terrain.

Lors de travaux d'extension, d'amélioration, il peut être nécessaire, soit de devoir recalculer un ouvrage, ce qui est cadré par la mission G5 de la NF P94-500, soit d'implanter un nouvel ouvrage dans une zone déjà anthropisée. L'ouvrage projeté a un impact sur l'existant, et réciproquement, d'où la nécessité d'une bonne définition de la ZIG qui ne possède pas de définition précise (e.g. critère à utiliser).

Si nous avons tous pris l'habitude de consulter le site « remonter le temps » sur le site de l'IGN, il est nécessaire de coupler cette approche par une analyse approfondie des archives du maître d'ouvrage. Cette phase doit être réalisée précocement, c'est-à-dire idéalement dès la GIES. Par défaut, le géotechnicien effectue cette tâche pour mieux comprendre le site et les avoisinants sans pour autant que celle-ci soit clairement identifiée et affectée. Il est nécessaire de rappeler qu'en réalité elle déborde largement le cas de la géotechnique, et que la prise en main de cet aspect « historique » du site devrait être l'affaire de toutes les parties prenantes du projet.

Comme l'illustre la Figure 1, si les photos aériennes de cet ancienne aciérie identifient des difficultés potentielles dues aux usages passés, seule l'étude des archives permet de mesurer l'ampleur potentielles des structures enterrées (radiers épais, fortement ferrillés) qui ont été simplement arasées par l'aménageur, et d'éventuellement confirmer les difficultés à attendre.



Figure 1 : Exemple de transformation de site dans la vallée de l'Orne (57) nécessitant un passage aux archives en cas de nécessité d'intervention sur celui-ci – source <https://remonterletemps.ign.fr>

3.2 Exemple de valorisation d'archives

Dans le cadre d'un projet portuaire, un ouvrage est à créer en extension d'une zone de quai et d'amarrage réalisée une cinquantaine d'année auparavant, et dont l'exploitation par voie maritime a cessé il y a fort longtemps. Le nouveau quai est implanté dans la zone de dragage du projet précédent.

Une importante campagne de reconnaissance a été réalisée. La combinaison de forts courants et d'une couverture de sédiment très meuble a empêché de réaliser intégralement le programme souhaité, laissant des zones moins bien couvertes soit par défaut de sondages, soit par profondeur insuffisante des sondages. Les zones les moins bien couvertes sont malheureusement au droit du linéaire d'ouvrage le plus fortement sollicité.

Une première approche de diagnostic en phase de programmation a été réalisée. Les documents partiels disponibles et l'absence d'alerte à la première analyse des reconnaissances compte tenu des difficultés de celles-ci, n'ont pas permis d'exploiter efficacement les informations disponibles. En préparation des phases de conception, le maître d'ouvrage a été

sollicité pour accéder aux archives complètes, en particulier pour exploiter les plans d'exécution et les rapports de chantier sur la zone. Il a été découvert à cette occasion que lors du chantier précédent une substitution complète jusqu'au toit du rocher avait été réalisée sur une zone couvrant l'essentiel du projet actuel. Cette substitution, en rouge sur la Figure 2, était invisible dans les sondages récents (Sondage 1 et 2 par exemple), soit parce qu'ils étaient situés en périphérie de la souille, et ne voyant le sable que « encagé » entre deux couches de sédiments plus fins, soit parce qu'ils n'étaient pas assez profonds. Ce constat conduit également à écarter de l'analyse les sondages historiques (datant d'avant les travaux) dans cette zone, notamment pour la caractérisation des sédiments.

Ce sujet d'investigation est rendu d'autant plus complexe par les moyens à mettre en place pour les reconnaissances par voie maritime et la possibilité réelle de l'implantation des sondages en fonction de l'ensemble des contraintes (accès, bathymétrie, environnement, sécurité, etc.).

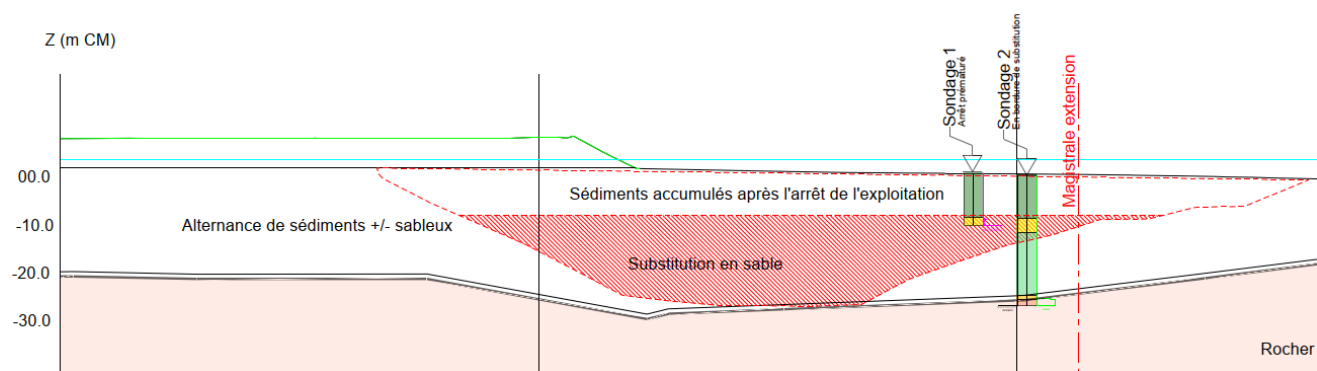


Figure 2 . Exploitation d'archives permettant d'identifier d'anciens travaux invisibles sur les reconnaissances récentes – source : Egis

La découverte de cette substitution et de cet important volume de sable a été intégrée et valorisée dans la solution technique retenue.

4 ACQUISITION DES DONNEES

4.1 Une exigence forte

Les densités de reconnaissances géophysiques et géotechniques nécessaires à un projet font l'objet de publication des sociétés savantes ou de sociétés représentantes des professions.

L'USG par exemple propose des densités minimales par type de projet et par phases. La nouvelle version

de l'EN1997-2 :2024 (prépubliée) propose également des densités minimales de reconnaissance (c.f. Tableau 1 ci-dessous). Ces densités, qualifiée par la norme elle-même comme informative, peuvent se révéler être un argument juridique important en cas de litige.

Il reste une marge d'adaptation relativement importante, mais dans la planification de son opération un maître d'ouvrage doit respecter ces exigences.

Table H.1(NDP) — Maximum spacing and minimum number of investigation locations for structures in Geotechnical Category 2

Structures		Maximum spacing X_{max}	Minimum number N_{min}
Low-rise structures		30 m	3
High-rise structures	4-10 storeys	25 m	3-4 ^b
	11-20 storeys	20 m	3-5 ^b
	> 20 storeys	15 m	3-6 ^b
Estate roads, parking areas and pavements		40 m	2
Silos and tanks		15 m	3
Bridges piers and abutments		1 per pier/base	
Power lines		1 per pylon	
Wind turbines		2 per turbine	
Retaining structures		150 m	- ^a
Slopes and cuttings	< 3 m high	100 m	- ^a
	≥ 3 m high	50 m	- ^a
Embankments and reinforced fill structures	< 3 m high	200 m	- ^a
	≥ 3 m high	100 m	- ^a
Excavations in urban areas > 5 m deep from ground surface		25 m	3

^a Where no spacing or number of locations is given, it is assessed on a project-specific basis.
^b Underlined numbers are more appropriate for complex structures.

Tableau 1 : Densité minimale de reconnaissance selon l'annexe H de l'EN1997-2 :2024 prépubliée

Par conséquent, du côté de l'ingénieur géotechnicien, il est nécessaire de ne pas s'auto-censurer sur un programme et de se positionner sur les écarts choisis ou subis par rapport à ces mêmes règles.

4.2 Programmation et adaptation

Le programme de reconnaissance, cela va de soi, doit se baser sur une bonne connaissance de l'environnement du projet. Cela permet de l'adapter et de l'optimiser et donc in fine de réduire le temps et le coût d'acquisition (en limitant les risques en lien avec leur réalisation).

Dans le cas présenté précédemment, il est probable qu'en ayant eu connaissance de la présence de la substitution en sable, le programme aurait été amendé pour caractériser la compacité des sables jusqu'au substratum, notamment pour caractériser le risque de liquéfaction. Les zones concernées ont été accessibles, mais les sondages inadaptés compte tenu de la méconnaissance de l'enjeu spécifique au droit du sondage.

Le programme de reconnaissance doit s'adapter à l'évolution du projet et doit être itératif. Le besoin dans la connaissance du substratum n'est pas la même si on le sollicite superficiellement ou si on doit le faire travailler sur une partie de sa hauteur par le biais de pieux, et cela même si dans les deux cas les profondeurs à investiguer peuvent être proches. Un projet qui débute en quai bloc, et qui se transforme en quai sur pieux ne nécessite pas les mêmes données. Dans ce dernier cas, l'optimisation du projet passe probablement par :

- La présence permanente d'un géologue lors des opérations de forage. Les valeurs de RQD,

souvent critiques pour la description du massif rocheux, relevées après 3 transbordements, quelques kilomètres dans des conditions variables sont probablement sous-estimées, ce qui ne permet pas d'optimiser le projet et peut conduire à des difficultés en phase de chantier.

- La mise en œuvre d'imagerie de paroi (optique ou ultrasonique) pour le substratum.

Si l'on regarde sous cet angle d'adaptation, la réalisation de deux campagnes en phase de conception répond en général bien à cette nécessité. La maîtrise d'ouvrage aura intérêt à intégrer cette approche en deux temps dans son marché de reconnaissance.

Cette démarche peut générer un surcoût, mais il est le plus souvent compensé par une meilleure maîtrise du projet (e.g. aléa technique, estimation, planning, délai d'études, etc.)

4.3 Réflexions issues de la pratique

La lecture de ce qui précède laisse deviner qu'en forfaitisant les études et les reconnaissances, sans BPU/DE spécifique pour ces dernières, désincite l'investissement dans la donnée, ce qui est préjudiciable à l'économie du projet. La même remarque est valable si l'on repousse les reconnaissances en phase d'exécution.

Les niveaux piézométriques peuvent impacter la conception, la connaissance de leur plage de variation à l'échelle annuelle doit être mesurée. Un réseau de quelques piézomètres couvrant la zone gérée par la maîtrise d'ouvrage, relevés régulièrement sur le long terme, même en l'absence de projet immédiat, sera valorisable dans les projets, et les piézomètres dédiés au projet installés sur des durées plus courtes pourront être rattachés à ces chroniques plus longues. Il semble aussi nécessaire que le maître d'ouvrage, quand il fournit des données, puisse s'engager sur la fiabilité de ces données, que ce soit d'ailleurs des reconnaissances géotechniques ou des plans de l'existant. Peut-on imaginer que la responsabilité d'un décalage entre les données d'un sondage réalisé en l'absence de l'ingénieur et de l'entreprise, et les constats en phase de travaux, leur soit d'imputable ?

On peut par exemple rappeler qu'au Canada, dans certaines provinces, il est interdit à un ingénieur d'utiliser des données non « signées et scellées » par un professionnel certifié. Il est introduit au niveau national le concept de « data reliance » qui a de fortes implications contractuelles. La conformité stricte d'un essai pressiométrique aux normes en vigueur et sa validité, et de tout autre essai in situ ou au laboratoire, la description factuelle d'un sondage carotté, devraient être garantie de manière explicite

par son producteur via des rapports factuels exhaustifs.

5 DEFINITION DES CRITERES DE PERFORMANCE

Il est nécessaire de fixer les performances à atteindre à toutes phases du projet, y compris en phase de travaux. L'ingénieur est force de proposition et de conseils, mais la responsabilité du choix définitif incombe au maître d'ouvrage ou à son exploitant.

5.1 Performances en phase d'exploitation

La définition des performances en phases d'exploitation nécessite dans un premier temps la définition précise des charges d'exploitation et donc des fonctions performantielles en vue de l'activité attendues pour l'ouvrage.

Dans un projet portuaire, par exemple il est nécessaire de connaître les bateaux projets, les modalités d'amarrage, les tirants d'eau objectifs, mais aussi les tolérances des dragages d'entretien, les charges vues par le terre-plein.

Il est également nécessaire de connaître les outils de manutention de manière « détaillée » dans le sens qui permettent de saisir la charge maximale vue. Pour un portique STS de type Overpanamax par exemple, au-delà des charges statiques, il est nécessaire de connaître les charges en manutention jusqu'au vent de service, les charges à la position de stockage tempête. Ces données peuvent nécessiter des démarches auprès des constructeurs pressentis de la part du maître d'ouvrage ou de son exploitant. L'usage de valeurs « génériques » portant un risque que l'infrastructure à construire nécessite finalement une machine « sur mesure » coûteuse, il est nécessaire d'avoir ces informations disponibles pour les études d'exécution.

Dans un second temps, les différentes tolérances durant la vie de l'ouvrage doivent également être clarifiées. L'ingénieur peut partager son expérience et son analyse de l'état de l'art, mais in fine, c'est bien le maître d'ouvrage qui doit définir ces critères en fonction de sa pratique de gestion patrimoniale.

Pour les thématiques de tassement sous charges d'exploitation réparties, selon la nature de sols, les temps de consolidations sont différents, ainsi la définition des critères de tassement à échéances relativement proches de la livraison peut être finalement plus dimensionnante que le critère de tassement admissible à long terme. Idem pour le critère de tassement annuel admissible. Ces situations sont à identifier le plus tôt possible et à discuter entre

l'ensemble des acteurs de la conception du projet (MOA/AMO/MOE).


5.2 Performances en phase de travaux

Le maître d'ouvrage doit définir clairement les fonctionnalités qu'il souhaite maintenir en phase de travaux pour ces ouvrages existants. Des exigences de maintien d'exploitation peuvent conduire à exclure certaines solutions techniques pourtant optimales financièrement dans l'absolu. Un soutènement que l'on doit réaliser le long d'une route que l'on ne peut fermer totalement ou même partiellement introduit une complexité supplémentaire. Cette information est de nature à influencer lourdement sur la nature de la solution globale proposée, et potentiellement induire des fonctions dégradées sur les avoisinants (e.g. réduction de vitesse de circulation, impossibilité de stockage).

Le cas échéant les tolérances spécifiques sur les ouvrages existants, dans différentes conditions d'exploitation, pour ces phases provisoires peuvent être définies.

Les interventions sur le Réseau Ferré National (RFN) sont notamment bien cadrées les excavations et soutènements provisoires dans l'IG00033 « Règles de conception, réalisation et contrôle concernant les ouvrages provisoires et les opérations de construction » comme présenté dans le Tableau 2 ci-dessous.

Uref (mm) pour 120 < V ≤ 160 km/h		D (m)								
		3	4	5	6	7	8	9	10	
H (m)	2	10	15	20	25	30				
	3	15	20	25	30	35	40	45		
	4	20	25	30	35	40	45	45	50	
	5		30	35	40	40	45	45	50	
	6				40	40	45	45	50	
	7					45	45	50	50	
	8							50	50	
	9								55	
	10									55

Légende :  : fouilles situées au dessus du plan P0 et ne et ne risquant donc pas de déstabiliser la voie (vérification structurale sans limite de déplacement)


 : configurations géométriques ne respectant pas la condition Hécran ≤ 3 m

Tableau 2 : Exemple de prescription de valeur limite de déformation sur pour des soutènements provisoires auto-stable de hauteur H situé à une distance D de l'axe de la voie la plus proche sur le RFN pour une catégorie de vitesse – source : IG00033 SNCF Réseau¹

5.3 Exemple du contrôle de réception de pieux

Sur certains projets, particulièrement ceux contractualisés en conception réalisation, le maître d'ouvrage se fait assister pour réceptionner les travaux.

¹ Le plan P0 mentionné dans le Tableau 2 est le plan de pente 2H/1V débutant à 3m de l'axe de la voie la plus proche du talus.

Le cahier des charges à destination du titulaire du marché précise l'ensemble des éléments relatifs à la conception et les performances attendues. Le contenu est basé sur la finalité du projet. Il est établi sur les normes et règlements en vigueur dans le pays ainsi que l'état de l'art international. Un ordre de préséance des documents est préalablement défini dans le cahier des charges. Si ce n'est pas le cas, le titulaire du marché peut proposer l'ordonnancement et une validation du maître d'ouvrage ou son conseil doit être faite.

Cet ensemble documentaire (documents de référence et cahier des demandes) constitue un cahier des charges. Il doit définir le cadre de la conception, les grandes lignes de la réalisation (essentiellement les contraintes associées au chantier) et de la réception de l'ouvrage. Il définit aussi les méthodes et les procédures en vue de vérifier la performance de la structure. Les critères permettant de juger la performance doivent y figurer avec la méthode ad-hoc.

Le titulaire du marché effectue la conception selon les exigences du cahier des charges puis définit ses procédures et méthodes de réalisations. Le corpus documentaire produit étant soumis en général à l'approbation de l'assistant au maître d'ouvrage. Ce dernier conseille le maître d'ouvrage vis-à-vis de la recevabilité des documents et prononce un avis sur possibilité ou non de réception de l'ouvrage ainsi que sur les éventuelles réserves.

Cette réception se base donc sur les éléments produits par le constructeur et l'analyse de ces éléments par le conseil.

En fonction des enjeux, la réception peut se baser sur des essais de contrôle de performance. On peut citer par exemple pour la capacité portante des pieux battus les essais type PDA, les essais statiques.

Un des principaux enjeux est de fixer le critère de réception à atteindre.

Le facteur de sécurité cherché en conception dépend d'un modèle "représentatif" de sol, de facteur de sécurité sur le modèle de calcul, d'une pondération sur la charge.

Ainsi, si l'on conçoit selon les Eurocodes, pour la situation de chargement ELU, il convient de rechercher sur la capacité portante mesurée un facteur de [pondération charge ELS] x [pondération modèle de sol] $\sim 1.35 \times 1.40 = 1.89$ fois la charge ELS calculée pour un pieu calculé avec un modèle pressiométrique.

Sur la base de ce critère, si l'on mesure une capacité portante de 1.35 fois la charge ELS attendue sans incertitude, le pieu peut être refusé bien qu'il réponde à la charge attendue selon la mesure.

Comme mentionné précédemment, le modèle utilisé est un modèle représentatif qui se base, hormis cas particulier, sur la notion de valeur statistique moyenne. En conséquence, s'il est effectué des essais sur un grand nombre de pieux, les capacités portantes mesurées vont être comprises de part et d'autre du coefficient de 1.89.

Les difficultés rencontrées lors de la réception sont donc de juger des éléments suivants la valeur minimale à atteindre à la mesure connaissant la charge attendue, et de juger de la représentativité de la mesure.

Cet exercice a mis en évidence la nécessité de maîtriser l'interprétation de l'essai demandé, de juger les biais possibles sur la mesure finale en cours de chantier, et de se mettre d'accord entre les parties pour clarifier le critère de rejet.

Lors de l'interprétation d'une telle campagne de mesure en vue d'une réception, un des points clés est le recours au modèle géotechnique de conception. Celui-ci sert de modèle de référence et permet de définir les performances attendues.

Pour toutes les mesures, la valeur obtenue doit être comparée à celle attendue. L'écart doit être critiqué afin de juger si la mesure est représentative ou si c'est un problème plus profond (e.g. : méthode de mesure inadaptée, modèle trop erroné).

Afin d'éviter des discussions en cours de construction, il convient de bien cadrer la procédure de réception à suivre. Une identification préalable des points scientifiquement/techniquement discutables, des incertitudes de mesures et de l'incidence de ces éléments permet de fixer des indicateurs acceptés par l'ensemble des acteurs et des valeurs seuils admises. Le cas échéant une procédure pour les actions correctives éventuelles à mettre en œuvre est à construire. Dans le cas de changement d'interlocuteurs, une documentation précise de la procédure de réception et de ces détails permet une meilleure acceptabilité et reconnaissance de celle-ci.

Enfin, étant donné que l'ensemble des pieux est rarement testé, il est nécessaire de bien fixer les limites spatiales représentatives des pieux testés. La difficulté étant qu'en cas de détection d'un pieu défaillant, des actions correctives sont « normalement » à mener sur la zone.

6 CONCLUSION

La fiabilisation des entrants, et particulièrement en géotechnique, ne peut être réduite à une simple étape administrative ou à une campagne de sondages standardisée. En se basant sur l'expérience et à travers quelques projets présentés, nous avons rappelé que cette étape constitue le socle de la sécurité

structurelle et de l'optimisation économique d'un ouvrage.

Pour lever les incertitudes, plusieurs leviers s'imposent :

- L'intelligence normative : Savoir adapter les référentiels aux spécificités de l'ouvrage plutôt que de subir des codes inadaptés.
- La culture du partage : La donnée géotechnique doit être envisagée comme un actif commun. L'implication du Maître d'Ouvrage dans la transmission des archives et la définition des performances est un puissant moyen de limiter les aléas en phase de chantier et les litiges ultérieurs en phase d'exploitation. Lorsque cette donnée est insuffisante le partage des risques doit être clarifié et équilibré.
- La réalisation d'étude de sensibilité, qui permettent de prendre du recul sur la variabilité des différents paramètres de calcul et de leurs effets.
- La transparence contractuelle : Fixer des critères de réception clairs et partagés dès la phase de conception pour éviter les blocages lors de l'exécution.

En définitive, si les outils de calcul deviennent de plus en plus sophistiqués, leur pertinence reste en grande partie dépendante de la qualité des données qu'on leur injecte.

La maîtrise du risque géotechnique n'est pas qu'une affaire de spécialistes, c'est une responsabilité partagée tout au long de la vie du projet entre le spécialiste qualifiant l'aléa et le maître d'ouvrage qualifiant les enjeux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AIPCN (2001). *Seismic design guidelines for port structures*. Report of Working Group n°34 of the Maritime Navigation Commission, AIPCN, 2001, 46 p.
- ASCE/COPRI 61-14 (2014). *Seismic Design of piers and wharves*, American Society of Civil Engineers, Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute, 2014, 90 p.
- AFCEN (2018) RCC-CW, *Rules for design and construction of PWR nuclear civil works*, AFCEN, 2018, 836 p.
- British Standard Institution (2013).BS6349-1 à 8 *Maritime works. General. Code of practice for planning and design for operations*. 2013, BSI.
- CEREMA (2001). *ROSA 2000 : Recommandations pour le calcul aux états-limites des Ouvrages en Site Aquatique*, CEREMA, 2001.
- CFBR (2015). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. Comité Français des Barrages et Réservoirs, 2015, 264 p.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire (2018). *Arrêté du 6 août 2018 relatif aux prescriptions techniques applicables aux barrages*. Journal Officiel de la République Française n°0205 du 7 septembre 2018.
- NF-EN1997-2 :2024 prépubliée. *Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2: Ground properties*, 2024, AFNOR, 148 p.
- SNCF Réseau (2018). *Règles de conception, réalisation et contrôle concernant les ouvrages provisoires et les opérations de construction*, I&P – Département Ouvrages d'Art, 2018, 137 p.