

Incidence de la qualité des essais pressiométriques sur le cout et le planning d'un ouvrage

Pressuremeter tests quality incidence upon cost and planning of projects

Hervé DUPLAINE^{1#} and Jean-Pierre BAUD²

¹HDMC, Gauriac, France

²EUROGEO, Avrainville, France

#Corresponding author: herveduplaine@orange.fr

ABSTRACT

The pressuremeter is the most comprehensive in-situ test available to geotechnicians for the design of foundations. The representativeness of the data depends directly on the know-how of the operator. The example of a few projects whose foundations were designed from soil studies mainly comprising pressuremeter tests will be discussed. In all cases, poor quality of the pressuremeter tests carried out during the initial investigation campaign led to an oversizing of the planned foundations. The soil studies were repeated, ensuring that pressuremeter tests were carried out in accordance with the rules of the art, thanks to the assistance of experienced personnel. The values obtained from the new pressuremeter tests made it possible to redesign the foundations of the structures and significantly reduce their importance. The consequences in terms of cost and program induced by the poor quality of the initial pressuremeter tests will be analysed. The causes of the lack of representativeness of the initial tests are similar from one project to another: pressuremeter boreholes drilled too quickly, without a good drilling fluid, passes that are too long, always lead to a lowering of the pressuremeter characteristics. The projects presented are diverse: an oil reservoir based on a network of rigid inclusions, a diaphragm wall for a metro station, a footbridge over railway tracks, were all carried out under attractive cost and schedule conditions for the project owners. The conclusions emphasize the fundamental need to ensure good quality pressuremeter tests from the initial soil study.

RESUME

Le pressiomètre est l'essai in-situ le plus complet mis à la disposition des géotechniciens pour la conception des fondations. La représentativité des données dépend directement du savoir-faire de l'opérateur.

L'exemple de quelques projets dont les fondations ont été conçues à partir d'études de sol comprenant principalement des essais pressiométriques sera abordé. Dans tous les cas, une mauvaise qualité des essais pressiométriques réalisés lors de la campagne d'investigation initiale a conduit à un surdimensionnement des fondations prévues. Les études de sol ont été reprises en s'assurant que des essais pressiométriques soient réalisés dans les règles de l'Art, grâce à l'assistance de personnel expérimenté. Les valeurs obtenues à partir des nouveaux essais pressiométriques ont permis de reprendre la conception des fondations des ouvrages et d'en réduire sensiblement l'importance. Les conséquences en termes de coût et de programme induites par la mauvaise qualité des essais pressiométriques initiaux seront analysées. Les causes du manque de représentativité des essais initiaux sont semblables d'un projet à l'autre : des forages pressiométriques forés trop vite, sans un bon fluide de forage, des passes trop longues, conduisent toujours à un abaissement des caractéristiques pressiométriques.

Les projets exposés sont divers, un réservoir pétrolier fondé sur un réseau d'inclusions rigides, une paroi moulée de station de métro, une passerelle sur voies ferrées, ont tous été réalisés dans des conditions de coût et de planning intéressants pour les Maîtres d'Ouvrages. Les conclusions insistent sur la nécessité fondamentale de s'assurer de disposer d'essais pressiométriques de bonne qualité dès l'étude de sol initiale.

Keywords: Pressuremeter surveys, quality control, PMT drilling & tests process,

1. Motivations

Les entreprises de fondations spéciales trouvent couramment, dans les DCE (documents de consultation des entreprises), des campagnes d'essais pressiométriques, qui sont les principales données géomécaniques sur lesquelles elles peuvent justifier le dimensionnement de leurs ouvrages géotechniques,

parfois avec l'aide de coupes géologiques de carottages sur le même site. Selon le cadre du contrat, l'Entreprise reprendra le dimensionnement du Maître d'œuvre, ou se servira de ces données pour proposer une variante plus économique.

Il arrive que le dimensionnement étudié apparaisse, pour le Maître d'ouvrage comme pour l'Entreprise, assez lourdement dimensionné et donc coûteux, en raison de

profils de sols apparaissant comme assez faibles en considération des formations géologiques traversées.

L'engagement, aux frais de l'entreprise générale et de l'entreprise de fondations spéciales, de nouvelles reconnaissances, devient alors un pari que des sondages pressiométriques particulièrement soignés puissent permettre de justifier une fondation nettement plus économique.

Cette communication relate quelques cas pour lesquels ce pari s'est avéré gagnant, démontrant ainsi aux Maîtres d'œuvre et Maîtres d'ouvrage que le soin apporté à la reconnaissance géotechnique initiale est particulièrement important pour le coût global et le planning des projets.

Pour les exemples exposés, les données ont été anonymisées dans un souci de confidentialité vis-à-vis des intervenants à la construction.

2. Cas n°1. Fondations profondes dans des laves basaltiques et altérites Quaternaires

Nous allons traiter le cas d'un bac pétrolier double paroi de 25,5 m de diamètre extérieur et d'une capacité de 4 070 m³ (hauteur 13,85 m). Le bac est fondé sur un radier en béton armé de 0,51 m d'épaisseur d'un diamètre de 27,9 m (1,20 m de débord). Le tout repose sur un réseau d'inclusions rigides via un matelas de répartition de 1,30 m d'épaisseur. Nous étudierons la conception proposée à l'appel d'offres, puis son analyse par l'entreprise de fondations spéciales, et enfin la révision de la conception finale après reprise des données pressiométriques.

2.1. Avant-projet

En raison d'une forte épaisseur (28 m) de terrains compressibles, la conception de base consistait en un réseau d'inclusions rigides. L'avant-projet décrivait des inclusions de diamètre 700 mm, longueur 26 m sur une maille de 2,20 m par 2,20 m, ancrées dans un basalte altéré, comme indiqué (Fig. 1).

L'épaisseur du matelas de répartition était de 1,50 m.

Ce dimensionnement avait été fait (rapport géotechnique G2PRO, phase projet selon la norme NF-P94-500) sur la base d'une étude de sol comprenant trois sondages carottés, dont deux avec SPT, des essais de laboratoire (teneur en eau, granulométrie, sédimentométrie et limites d'Atterberg), quatre sondages destructifs avec enregistrement de paramètres, des essais cross-hole, et un seul sondage pressiométrique.

Les critères de tassement sont donnés par le Maître d'Ouvrage et exploitant :

- Tassement absolu maximum < D.int. /200 soit 108 mm
- Tassement différentiel entre centre et périphérie de la cuve intérieure < D.int. /400 soit 54 mm
- Tassement différentiel entre centre et périphérie de la cuve extérieure < D.ext. /400.

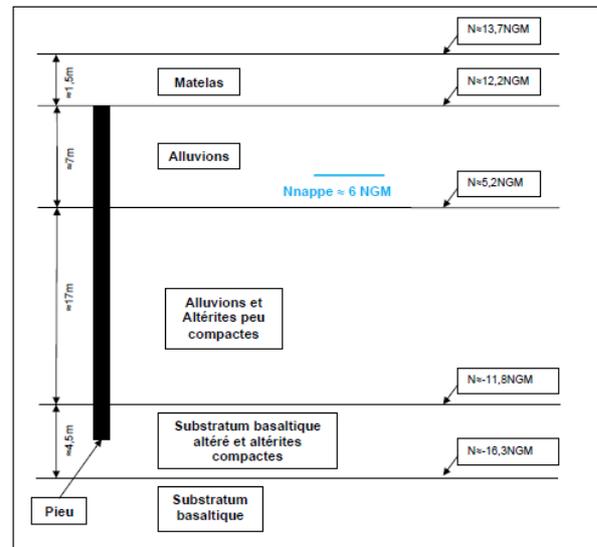


Figure 1. Profil inclusions rigides prévu.

2.2. Analyse de l'avant-projet

La conception d'un réseau d'inclusions rigides repose sur un calcul de tassement, pour lequel l'utilisation d'un modèle pressiométrique du profil donne toujours une prévision fiable.

L'entreprise de fondations spéciales a donc examiné le seul sondage pressiométrique disponible, donné sous la forme suivante (Fig. 2).

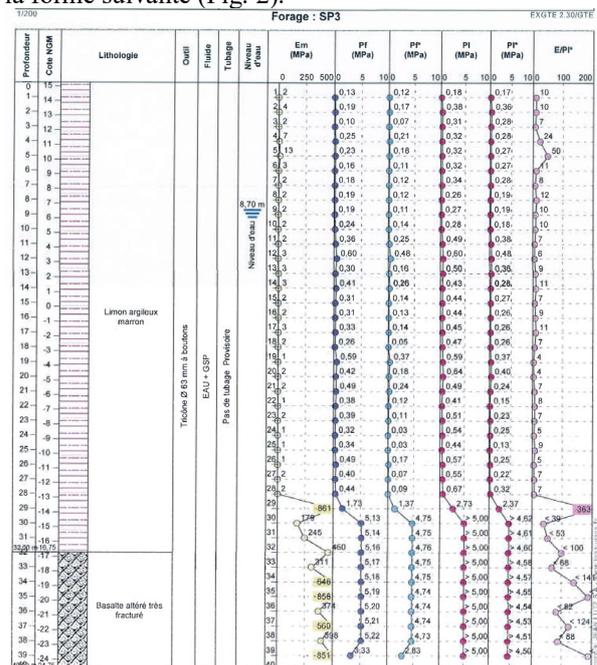


Figure 2. Unique profil pressiométrique disponible.

L'entreprise a tout de suite suspecté une sous-estimation des résultats pressiométriques, au vu de l'épaisse couche monotone de résultats très faibles, décrites comme alluvions et altérites basaltiques limoneuses, sous le seuil d'autoportance, avec des rapports E_M/p^*_{LM} faibles pour un tel sol. Le marché étant forfaitaire, elle a prévu dans ses prix de refaire une campagne géotechnique en début de chantier dans le but de justifier une conception plus économique du réseau d'inclusions rigides. Pendant l'appel d'offres,

l'entreprise n'ayant pas obtenu les feuilles d'essais, Eurogéo a procédé à une analyse de ce sondage pressiométrique initial sur la seule base de la statistique des essais, dans le diagramme Pressiorama (Baud 2021), qui permet de classer et différencier les essais par leur rapport $E_M/p^*_{LM} / p^*_{LM}$. Le diagramme (Fig. 3) confirme un doute sur la série d'essais de 1 à 28 m, contrastant, trop bien avec l'arrivée dans un basalte rocheux caractérisé par des essais systématiquement sans rupture à 5 MPa.

Néanmoins à ce stade, l'espoir de démontrer un profil plus favorable au dimensionnement des inclusions est pour l'entrepreneur un pari dont il prend seul le risque.

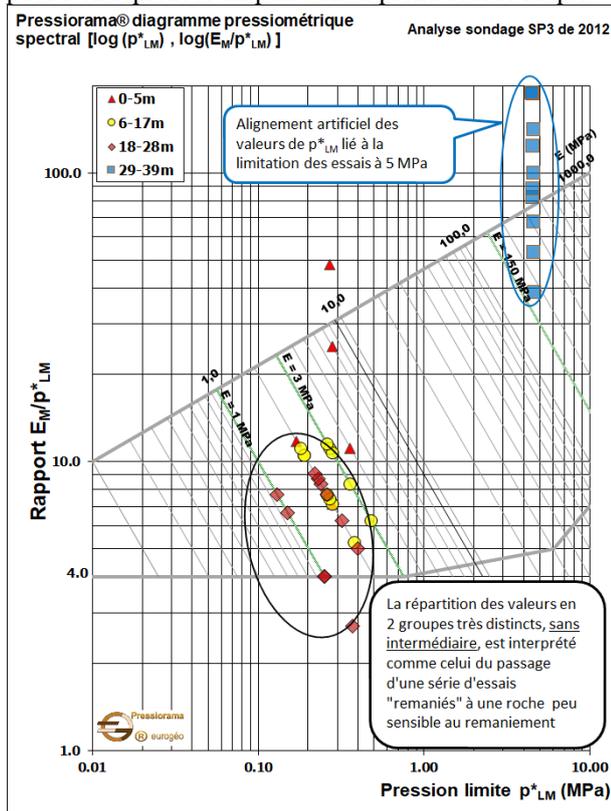


Figure 3. Diagramme Pressiorama des essais initiaux

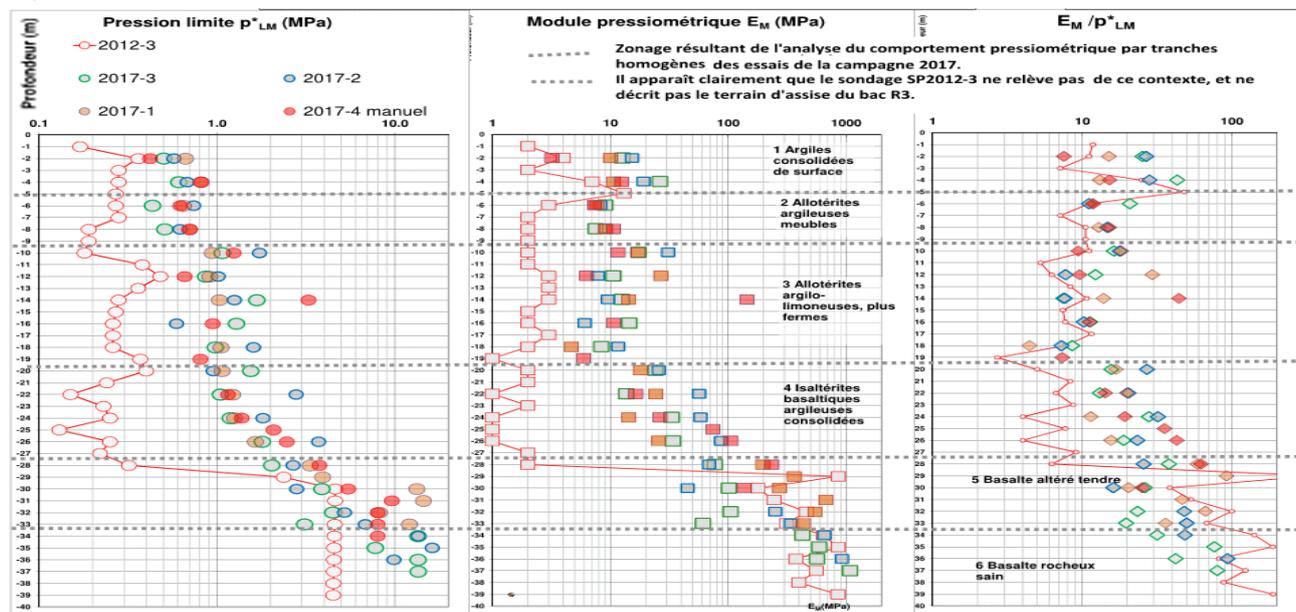


Figure 4. Profils pressiométriques comparés

2.3. Campagne pressiométrique de qualité pour l'étude G3

Dès l'obtention du marché, l'entreprise a donc engagé une nouvelle campagne d'investigations du sol consistant en 4 sondages pressiométriques descendus à une profondeur allant de 34 à 37 m, avec essais tous les 2 m, espacement large, dans le but de vérifier rapidement ses attentes sur la couche très molle annoncé en tête.

L'entreprise de sondages qui avait réalisé l'étude de sol initiale a été reprise en sous-traitance, avec le même atelier de forage, placé cette fois sous la supervision d'un spécialiste détaché par Eurogéo pour conseiller les outils et méthodes de forage et essais, et les superviser.

Les résultats ont été, comme espéré, dès le premier sondage bien meilleurs que ce qui avait été pris en compte à l'avant-projet, les 3 autres sondages, dont un en doublage à 2 m du sondage de 2012, ont confirmé (Fig.4) un profil moyen bien au-dessus du profil initial, croissant assez régulièrement avec la profondeur.

2.4. Rétro-analyse du sondage disqualifié

Cette nouvelle campagne permettait une comparaison sans appel avec le sondage initial, dont nous avons alors obtenu les feuilles d'essais par le Maître d'Ouvrage, curieux de comprendre les causes d'une telle distorsion.

Les essais jusqu'à 28 m sont tous faits en 6, 7 ou 8 points, trop peu nombreux par rapport à la demande de la norme EN ISO22479-4 « environ 10, minimum 8 ». Un nombre de points trop limité rend moins bien interprétable le dessin de la courbe. Ce constat n'est que le symptôme de non-conformités plus graves : généralement 2 ou 3 de ces points, avant contact de la paroi, sont à éliminer ; les forages s'avèrent de diamètre trop grand par rapport à la sonde ; d'où une difficulté pour les points restant à atteindre ou dépasser la pression de fluage, et donc une extrapolation compromise vers la pression limite

Les essais étaient faits en sonde caoutchouc 60 mm (appelée historiquement "sonde 60") dans un forage au tricône de 66 mm à boutons. Ceci représente un espace annulaire important, d'autant que la sonde Ménard dite 60 fait en réalité 58 mm aux bagues, donc un espace annulaire théorique de 164 cm³. L'usage de cet outil reste à la limite de tolérance de la norme ISO22476-4: 2012 (d. outil < 1,15 fois d. sonde soit 66,7 mm), la décompression provoquée par un tel espace annulaire a conduit dans la norme actuelle ISO22476-4:2021 à une tolérance beaucoup plus sévère (1,08 fois, soit un outil de 62,6mm, on tolérera un outil de 63 mm usé).

L'opérateur suit à la lettre la tolérance d'arrêt de l'essai à 700 cm³ pour cette sonde, au détriment de la recherche d'un nombre de points suffisant après le fluage ; souvent donc l'extrapolation de la pression limite n'est pas correctement assurée, d'autant plus que le contact sonde-sol étant théoriquement vers 165 cm³, il ne reste que moins de 500 à 550 cm³, pour le développement de l'essai. Ces cm³ se trouvent donc entièrement utilisés pour la phase pseudo-élastique où l'on calcule le module, et les modules étant tous très faibles et inférieurs à 4 MPa, les points P1 et P2 donnés dans le logiciel pour le calcul sont très souvent un seul intervalle de 2 points consécutifs, rarement plus de 2 intervalles, alors qu'un essai en 10 à 12 points, plus correct aux termes de la norme, permet de décrire la plage de calcul du module par au moins 5 à 6 intervalles. C'est la raison pour laquelle ces modules faibles et calculés sans précision, sont donnés aux valeurs 1, ou 2 ou 3 MPa qui résument la plus grande partie des altérites. Malgré la remarque ci-dessus sur le grand espace annulaire prévisible avec les outils utilisés, sur la plupart des essais de 1 à 28 m, on ne voit pas de gonflement à vide dans les 160 premiers cm³, mais une montée progressive vers une rupture vers 4 à 6 bars bruts (2 à 4 bars corrigés). On est ainsi amené à constater que l'espace annulaire attendu n'est pas vide mais rempli de « quelque chose » qui fait contact dès le début de l'essai, et qui ne peut-être qu'une bouillie de sol remaniée et éboulée dans un espace annulaire agrandi par l'éboulement et qui "mange" autour de 500 cm³ sur les 700 disponibles. Ce n'est donc pas la mesure du terrain en place, mais la mesure d'un terrain complètement remanié, et qui pour cette raison donne une PL toujours à peu près la même, de 0,2 à 0,3 MPa corrigée, c'est le seuil d'autoportance de Ménard. Ce n'est qu'entre 500 et 700 cm³, qu'on observe sur une grande partie des essais un point ou maximum 2 points, qui commencent à présenter une expansion volumétrique moins rapide, et qui représentent le vrai début d'influence sur l'essai du sol en place non remanié. Autrement dit le vrai contact marquant le début de l'essai et le calcul du module serait là, mais comme c'est à ce moment-là qu'on arrête l'essai, on mesure très mal un module abaissé et jamais la pression limite réelle du sol en place.

En l'absence de la feuille sondeur en minute de terrain, qui doit exister pour que l'on ait pu donner les indications sur le log de sondage, on n'a pas non plus la longueur des passes forées pour chaque série d'essai, qui est limitée par les normes (en l'occurrence les deux, l'ancienne et l'actuelle), à 3 voire 2 m maximum dans ce type de sol mou. Même si on disposait de cette minute, cette information déclarative des longueurs de passes

n'est malheureusement pas toujours correctement notée par les opérateurs. Avec un CPV de type B ou C, l'enregistrement horodaté numériquement des heures d'essai permet, sinon de les reconstituer en détail, au moins d'en vérifier la durée.

L'accumulation de ces observations permet de conclure à des passes certainement très longues, peut-être jusqu'à une seule passe pour la journée, ce qui suffit à expliquer déjà une forte décompression pour les derniers essais de la journée qui sont faits 6 à 8 heures après le forage ; ou pire, une seule passe de forage pour les 2 jours, ce qui pourrait expliquer que les premiers essais jusqu'à 18 ou 20 m sont du premier jour et assez décomprimés mais encore dessinables, et les essais de 21 à 28 m sont du deuxième jour, complètement décomprimés et éboulés, alors même que - dans la coupe de forage de la campagne 2017, comme dans le carottage de 2012 - on arrive dans un terrain meilleur (isaltérites basaltiques). Plus profond, à partir de 29 m dans le basalte moins altéré, ce phénomène de décompression et remaniement est normalement beaucoup moins marqué, et il y a moins de conséquences sur la valeur des essais.

Il apparaît donc certain que ces essais ne reflétaient qu'une image très dégradée d'un sol, certes faible, mais pas à ce point, et que la prise en compte de ce profil conduisait à un fort surdimensionnement de la fondation.

2.5. Conception finale du projet

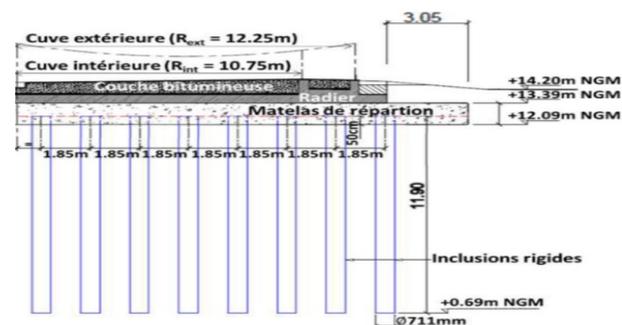
L'entreprise de fondations spéciales a confié le dimensionnement du réseau d'inclusions rigides au bureau d'études géotechniques Terrasol.

La nouvelle campagne d'investigation permettant de valider un profil géotechnique tout à fait nouveau et fiable, la base des inclusions rigides a été positionnée à la cote +0,69 au lieu de -18,00. La longueur des inclusions a volontairement été limitée à 11,90 m pour des considérations logistiques. Une longueur supérieure aurait en outre nécessité une enture qui aurait renchéri le coût.

Les inclusions étant ancrées dans un sol moins résistant que le basalte altéré, la maille a été réduite de 2,20 m à 1,85 m. Cette diminution de la maille a également permis de réduire l'épaisseur du matelas de répartition de 0,20m.

Figure 5. Nouveau dimensionnement des inclusions rigides. A comparer à la figure 1.

La nouvelle conception du réseau d'inclusions rigides (Figure 5) a été dimensionnée pour le tassement contractuel au centre inférieur à 10,8 cm.



2.6. Réception et performances de l'ouvrage

La nouvelle conception a été acceptée par la Maîtrise d'œuvre et la Maîtrise d'ouvrage grâce à la qualité démontrée des nouveaux sondages pressiométriques ainsi qu'à leur nombre.

Il a été demandé à l'entreprise avant lancement de la production une validation du comportement individuel des inclusions rigides sous la forme d'essais de chargement de deux colonnes isolées.

Les inclusions d'essai ont été positionnées au droit d'essais pressiométriques de la nouvelle campagne afin de faciliter l'interprétation. Les essais de chargement n'allant pas jusqu'à la rupture, ils ont été réalisés sur des inclusions incorporées au réseau. Ils ont confirmé la justesse de prévision du dimensionnement «Taspie +», modélisation 1D aux courbes de transfert t-z (courbes de Frank et Zhao) (Terrasol 2024) (Fig. 6).

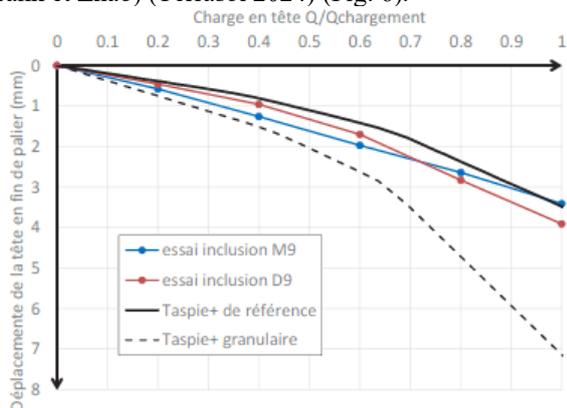


Figure 6. Courbes des essais de chargement (Terrasol).

L'épreuve hydrostatique de réception du bac a également permis de réaliser un essai de chargement en vraie grandeur, et de vérifier ainsi que les critères de tassement spécifiés étaient respectés.

Une instrumentation conséquente a été installée au sein du matelas de répartition afin de pouvoir mesurer les tassements sous le radier en son centre. Deux lignes perpendiculaires de 9 capteurs tassométriques hydrostatiques ont ainsi été installées. Certains capteurs ont été installés au-dessus d'une inclusion et d'autres entre deux inclusions.

Un nivellement topographique de cibles fixées sur la périphérie du bac métallique a complété le dispositif.

Les tassements observés ont été de 15 à 20 mm au centre du bac et quasiment nuls à la périphérie du bac à comparer aux 108 mm de tassement au centre calculés et autorisés dans les spécifications.

Cet écart peut s'expliquer d'une part par une connaissance incomplète des transferts de charges dans un réseau d'inclusions rigides, et surtout par une sous-estimation persistante des caractéristiques mécaniques.

En effets les sondages pressiométriques de la nouvelle campagne gardent encore une certaine sous-estimation des caractéristiques réelles du sol, parce que l'utilisation d'une boue à la bentonite, demandée à l'entreprise de sondages, n'a pas été approvisionnée et pas pu être mise en œuvre. Elle aurait à coup sûr conduit à une mesure de caractéristiques encore plus élevées et plus proches de la résistance réelle du terrain. De même une technique d'autoforage du tube fendu aurait été

adaptée à ce site et aurait également relevé le niveau des résultats d'essais (Arsonnet et al. 2013).

2.7. Conclusion sur cet exemple

La détection par l'entreprise de fondation au cours de l'appel d'offres de la mauvaise qualité des essais pressiométriques ayant conduit à la conception initiale a permis de transformer un réseau de 120 inclusions rigides de 27 m de profondeur, soit 3240 m, en 180 inclusions rigides de 11.90 de profondeur représentant 2142 m, soit 34% de moins. Cette économie a bénéficié à l'entreprise dans le cadre d'un marché forfaitaire. Si l'étude de sol initiale avait été de qualité, l'économie aurait bénéficié au Maître d'Ouvrage.

Le projet a bénéficié également d'un temps de réalisation plus faible que prévu.

On voit donc l'intérêt d'assurer dès l'avant-projet une qualité des essais pressiométriques, qui a un coût supérieur à des essais traités sans souci des contraintes rappelées par la norme EN ISO 22476-4. Le prix des essais dans les règles de l'Art est largement amorti par un impact économique positif sur le dimensionnement. Les opérateurs de sondage ne sont pas directement en cause, ils ont cru bien faire mais l'ont fait sans comprendre les conséquences de leur travail, qui n'a pas été surveillé avec l'attention nécessaire. Le fait qu'on peut reprendre la même équipe de sondage avec le même matériel, et l'amener avec le conseil et l'assistance d'opérateurs chevronnés, à des résultats sans commune mesure montre, une fois de plus, que la réussite des essais n'est pas dans le Pressiomètre toujours fiable et de traçabilité croissante selon le type A, B ou C, mais dans la procédure de forage et essais pressiométriques par passes maîtrisées.

3. Cas n°2. Paroi moulée d'une station de métro

Nous allons traiter un exemple dans lequel les travaux dans le sol, engagés sur la base des reconnaissances initiales, ont buté sur des difficultés qui ont amené l'entreprise de fondations spéciales à s'interroger sur ces données et les réviser pour réadapter la conception du projet.

3.1. Avancement du projet

Les travaux de paroi moulée d'une station de métro étant tellement en retard, ils se trouvaient sur le chemin critique de l'ouverture de la ligne. L'entreprise en charge des travaux a déclenché une mission d'assistance auprès d'un Expert géotechnique du groupe.

La mission portait initialement sur la résolution de problèmes de forage. Avec deux haveuses de paroi, la production était seulement de 2 panneaux par semaine.

Les difficultés de forage étaient liées à la présence d'une couche d'argile plastique. Les haveuses de paroi n'étant pas adaptées pour ce type de matériau, des bennes à câbles ont été utilisées pour le forage de la couche d'argile plastique.

Le forage n'était pas la seule source de retard sur le projet. L'expert au vu de l'étude de sol a détecté un

surdimensionnement de la paroi moulée. En effet, la nappe, située en-dessous du fond de fouille n'amenait pas la poussée d'eau prise dans le dimensionnement. La paroi traverse d'abord des sables grésifiés jusqu'à 5 mètres sous le fond de fouille, puis on retrouve les argiles plastiques avec des valeurs de SPT supérieures à 30, donc des poussées des terres relativement faibles (Fig. 7). Malgré cela, la paroi moulée d'1,2 m d'épaisseur présente une fiche mécanique de 31 mètres (profondeur totale 60 mètres) et un ratio d'acier supérieur à 300 kg/m³.

Elevation, [m]	Soil type	γ_d , [kN/m ³]	K_0	ϕ , [°]	c, [kPa]	E_s , [kPa]
25+22	SC Clayey Sand	20.9	0.426	35	0	60,000
	Aeolian quartz sandstone with carbonate cement (calcarenité)					
22+18	K1	19.8	0.400	37	0	70,000
18+0	K1-K2_t	19.8	0.380	38	0	110,000
0+ -9	K1-K2_b	19.8	0.380	38	0	100,000
-9+ -25	CH Fat clay	18.8	0.641	21	40	60,000

Table 1. Coupe-type du marché. On notera que les résultats pressiométriques ne sont pas mentionnés.

La paroi est butonnée sur deux niveaux. Un buton-radier en jet-grouting situé dans la couche d'argile complète le dispositif.

Le rattrapage du retard passait par une révision de la conception de la paroi moulée.

L'épaisseur de la paroi ne pouvait être modifiée dans la mesure où les murette-guides étaient déjà coulées. La profondeur de la fiche pouvait être réduite. La quantité d'acier pouvait être réduite sachant que la cage proposée nécessitait 10 heures d'assemblage.

Le buton-radier en jet-grouting pouvait éventuellement être supprimé. Le programme prévoyait 6 mois pour la réalisation de celui-ci alors qu'il est dans une argile présentant des valeurs de SPT supérieures à 30.

Afin de justifier cette révision de la conception, il a été proposé de faire une nouvelle campagne d'étude de sol, les données très faibles de la campagne initiale étant soupçonnées d'être pessimistes du fait de la mauvaise qualité des essais pressiométriques.

3.2. Analyse des reconnaissances initiales

La série d'essais pressiométriques de la campagne initiale était faite avec référence à la norme ASTM D4719-07 (ASTM 2016). Elle était caractérisée par le fait que les forages étaient de diamètre nettement beaucoup trop grand, avec des contacts vers 300 à 400 cm³, d'où pour les opérateurs l'impossibilité de poursuivre les essais au-delà du fluage et même parfois même pas jusqu'au fluage. De plus même les essais en forages de diamètre un peu plus faibles étaient arrêtés vers 1,5 à 1,6 MPa, comme si l'opérateur craignait de développer l'essai plus loin. Au total, ces observations, déjà faites par l'Expert du groupe d'entreprises, conduisaient à une sous-estimation systématique des pressions limites et un doute sur les modules par présomption de décompression des forages surdimensionnés puisqu'on ne savait rien du temps d'attente entre forage et essais.

Cette analyse ne met pas en cause la probité de la société de forage ni des opérateurs, dont on voit bien qu'ils ont réalisés les essais de façon correcte du point de vue opérations de mesure, avec un matériel pressiométrique adéquat, mais sans comprendre que le diamètre de forage doit être beaucoup plus proche de celui de la sonde, pour diminuer le risque de décompression et garder suffisamment de possibilité d'expansion de la sonde pour approcher le fluage et le début de la rupture. Cette constatation confirme bien que les fondamentaux du forage pressiométrique ne sont pas suffisamment « rabâchés » aux utilisateurs de matériel pressiométrique. La diffusion, en français et en anglais, des principes de base du forage pressiométrique (Ménard, 1970), reste insuffisante, certains utilisateurs ignorant même qu'il existe des normes.

Il est récurrent de constater que les débutants en pratique du pressiomètre sont souvent très « focalisés » sur la compréhension du fonctionnement et du maniement de l'appareil de mesure, et peu attentifs aux méthodes de forage calibrés par passes, qui sont pourtant plus essentiels à la représentativité des essais. On constate que la diffusion de CPV de type C à régulation automatisée permet de libérer le sondeur de cette obsession de bien faire chaque palier, et de l'orienter vers une plus grande attention à la qualité des alternances forage calibré / essais par passes.

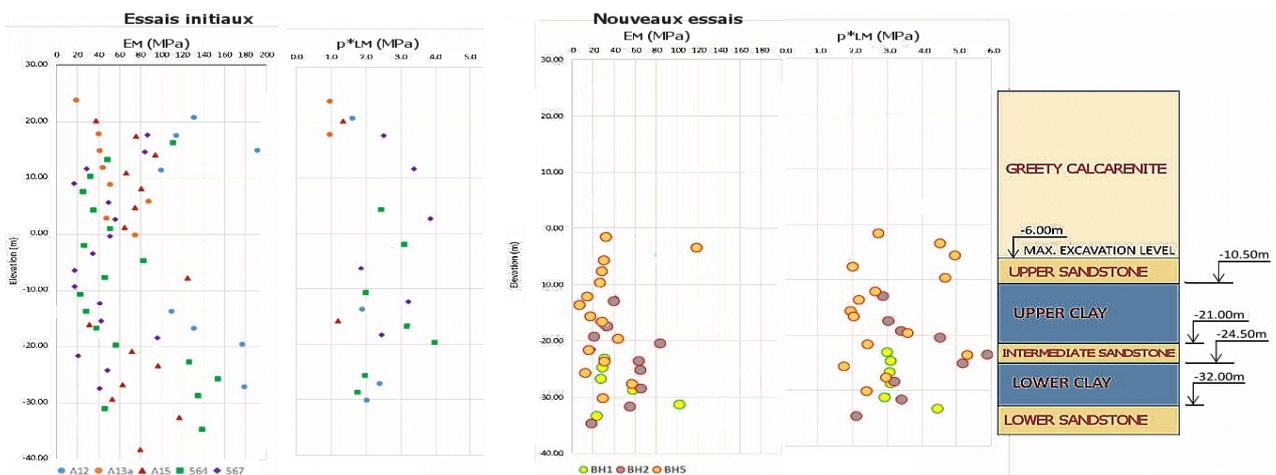


Figure 7. Comparaison des profils initiaux et des nouveaux essais pressiométriques.

3.3. Réalisation et analyse de nouveaux sondages pressiométriques

Une campagne de forages pressiométriques complémentaire a été réalisée, par la même société locale, avec conseils et supervision d'un opérateur senior, retraité après avoir passé sa carrière dans le groupe Ménard, de l'époque de Louis Ménard à la société actuelle du groupe Vinci. Dans l'ensemble (fig. 8), les pressions limites mises en évidence sont plus élevées, les modules sont équivalents, ou plus faibles dans les argiles où ils semblaient surestimés, le rapport E_M/p^*_{LM} et les conséquences sur le comportement des sols s'en trouvent donc modifiés, notamment le coefficient rhéologique α proposé pour les calculs.

3.4. Allègement et redimensionnement du projet

Malgré une révision de la note de calcul, la Maîtrise d'Œuvre s'est opposée à la réduction de la fiche mécanique de la paroi moulée ainsi qu'à une réduction des quantités d'acier. Il a été toutefois convenu de supprimer le buton-radier en jet-grouting, ce qui a permis de récupérer six mois sur le programme. On notera que réaliser ce radier dans ces argiles plastiques aurait très certainement pris beaucoup plus de six mois.

L'entreprise de fondations spéciales reste persuadée que le dimensionnement de la paroi est surdimensionné en raison du maintien des données pressiométriques initiales pessimistes par rapport au terrain rencontré.

4. Cas n°3. Fondation d'une passerelle sur micropieux.

Ce cas est celui d'une passerelle enjambant plusieurs voies ferrées dans une grande gare, pour laquelle les reconnaissances initiales, fournies à un groupement de conception-construction, donnaient des résultats à la fois très mauvais et trop courts en profondeur pour dimensionner une fondation obligatoirement profonde.

Le groupement a donc été amené à prendre en charge une campagne complète de reconnaissances pour mener à bien son offre.

4.1. Données d'avant-projet

Les données d'avant-projet pour le concours de conception-construction étaient basées sur 3 sondages pressiométriques entre les voies (Fig. 9), décrivant un ensemble d'argiles résiduelles, de résistance homogène et très faible, $0,2 \text{ MPa} < p^*_{LM} < 0,7 \text{ MPa}$, sur 10 à 12 m, et sur certains sondages une tendance à l'amélioration de 12 à 15 m, sans caractériser un véritable substratum géotechnique. La conclusion du rapport d'avant-projet (G2AVP selon la norme NF-P94-500) était qu'aucune fondation directe n'étant envisageable, la recommandation de fondation était de prévoir des micropieux, dont le dimensionnement nécessitait des reconnaissances nettement plus profondes. Quelques sondages un peu éloignés versés au dossier, sur un projet voisin d'aménagements urbains et immobiliers,

identifiaient un substratum de craie avec des valeurs variables mais plus élevées.

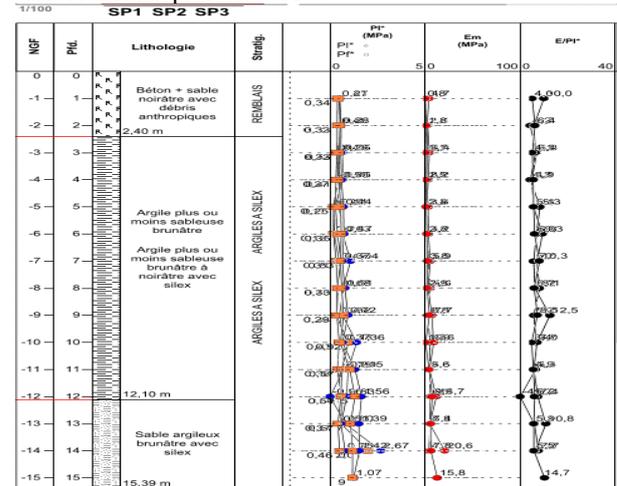


Figure 8. Superposition des 3 sondages pressiométriques d'avant-projet.

4.2. Reconnaissances pour la conception du projet

La passerelle était conçue comme un mail, large voie piétonne de 15 m de largeur, sur 5 appuis pour s'adapter aux contraintes d'implantation sur les quais des escaliers et ascenseurs d'accès. Nous avons réalisé 5 sondages pressiométriques de 25 m de profondeur.

Les sondages ont été réalisés par la méthode du tube fendu autoforé en rotoperçusion Rotostaf® (Arsonnet et al. 2013) que nous considérons comme susceptible de produire la meilleure qualité de forage calibré au diamètre exact de la sonde et mise en place immédiate de l'enveloppe de la sonde au contact de la paroi, et qui produit la mesure des modules pressiométriques la plus proche de la réalité du terrain. De plus la méthode était particulièrement adaptée aux contraintes d'exploitation de la gare, ne laissant à l'équipe de sondage que quelques heures de nuit, insuffisantes pour un sondage entier, dont le tubage pouvait rester en place en dégagant totalement le quai pour la journée, avant de revenir la nuit suivante sur le point de sondage sans décompression du terrain et sans risque pour la remise en place de la sonde dans le tube fendu à l'emplacement de l'essai suivant.

L'image du site donnée par cet ensemble de sondages est totalement révisée (Fig. 10).

Les raisons de cette différence sont bien sûr dans les très mauvaises méthodes de réalisation des sondages du rapport G2AVP, qui s'égrènent comme suit, après reconstitution par l'analyse des logs de forage, enregistrements de paramètres de forage et des feuilles d'essai :

- Vitesse de foration la plupart du temps saturée à 750 m/h, par un appui sur l'outil constamment maintenu au maximum (50 bar), avec rotoperçusion probable, sur une foreuse de 100 CV, hyperpuissante par rapport aux terrains à traverser.

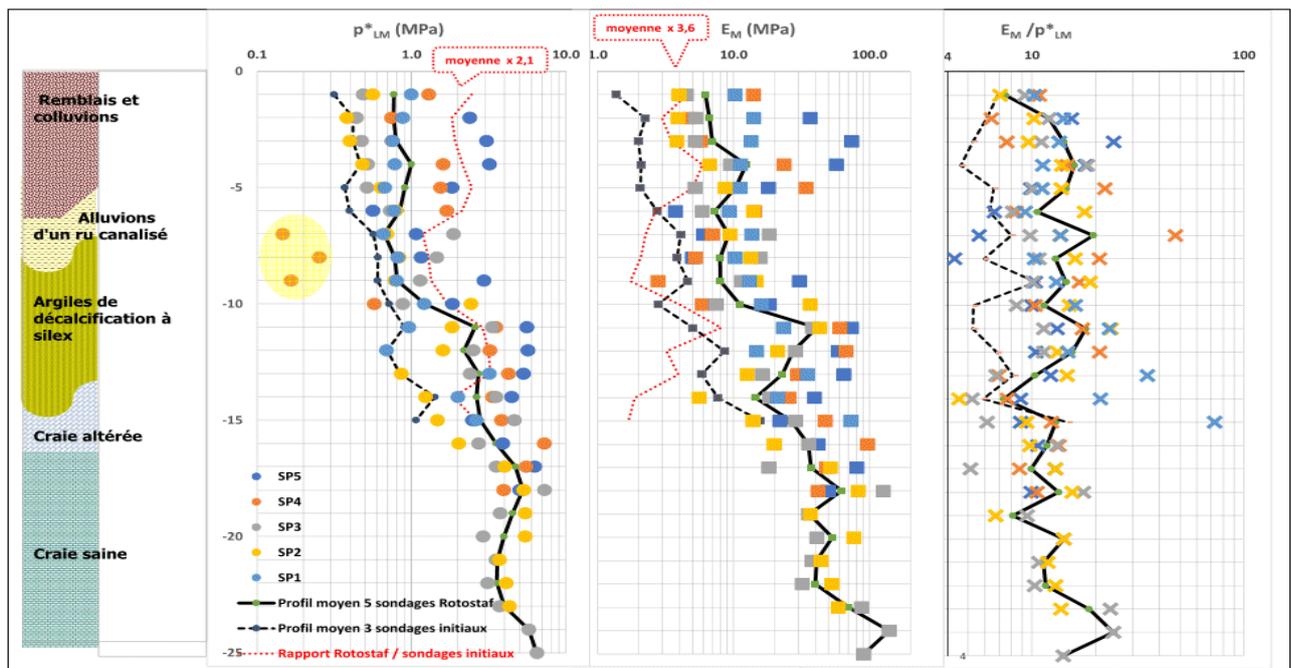


Figure 9. Moyenne et répartition des 5 sondages pour le groupement conception -construction. Comparaison avec le profil donné à l'appel d'offres

- Forage à l'eau claire sans additifs ni boue de forage ; la vitesse d'avancement ne laissant pas le temps de toutes façons pour la remontée des déblais de forage dans l'espace annulaire.
- Forage de la totalité d'un sondage de 15 m en une seule passe.
- Réalisation des essais en descendant la sonde dans un forage non dégagé de ses déblais. Le témoignage d'un agent SNCF de surveillance de nuit est éloquent : aucune remontée de boue et de déblais de forage sur le quai.
- Dans ces conditions, le forage « préalable » s'apparente plus à un fonçage avec injection sous pression, et la mise en place de la sonde est faite en refoçant le tube fendu dans l'axe du forage bouché.
- Les mesures faites lors des essais représentent alors de façon dominante la réaction d'un anneau de « terrain » constitué par les déblais de forage écartant les parois du forage et s'y amalgamant.
- Les essais eux-mêmes témoignent de la méthode employée : contact direct sans expansion dans un espace annulaire, obtention de relation contrainte déplacement qui donnent des paramètres de module et de pression limite non nuls, mais qui ne représente pratiquement rien du terrain existant au-delà de l'anneau qu'on peut considérer comme du terrain malaxé et recomprimé entre la sonde et le terrain vierge.

4.3. Redimensionnement des fondations

Les résultats obtenus ont confirmé aussitôt au groupement d'entreprises que la conception des fondations des appuis sur micropieux allait être réalisable à des profondeurs bien inférieures. La répartition des efforts des longrines longues et étroites dans le sens des quais a permis de répartir au mieux les micropieux en

limitant leur fiche avant même d'atteindre le toit de la craie. La limitation de profondeur a permis de gérer de façon plus souple la réalisation des micropieux de nuit en rendant les voies et les quais à la circulation en journée.

5. Conclusions

Les auteurs se sont limités à quelques cas. Ils ont tous deux une carrière dans les études ou dans les travaux géotechniques, depuis une formation initiale dans le groupe de Louis Ménard, dont la forte personnalité a laissé chez tous les salariés de ses sociétés, outre une solidarité sans faille après le décès prématuré de Louis Ménard, l'exigence commune du respect de la qualité des reconnaissances pressiométriques comme garant de la meilleure gestion des risques des ouvrages de fondation. Cette expérience a également développé une aptitude à repérer les potentiels défauts dans un ensemble de données pressiométriques. Les auteurs ont vécu de nombreuses autres situations où le manque de soin apporté aux reconnaissances géotechniques initiales – pas seulement pressiométriques – conduisait les projets vers une impasse, ou un renchérissement sans commune mesure avec les gains d'une reconnaissance faite dans les règles de l'Art.

L'analyse des causes des reconnaissances déficientes est toujours la même : les terrains ne supportent pas la recherche de gain de productivité en sondage, qui produit systématiquement des paramètres géomécaniques dégradés par rapport à la résistance réelle du sol. L'investigation géotechnique doit être de qualité artisanale (Magnan 2002), la recherche de sa rentabilité propre et son industrialisation conduisent à une inflation du coût des fondations. D'autres cas de même nature pourraient donc faire l'objet d'une suite à cet article.

Only careful soil testing gives cost-effective design.

Remerciements

Les auteurs remercient Benoit Pezot, Géotechnicien Expert, Jean-Pierre Depreux, retraité Ménard, Thierry Lartigaud, Eurogé, et les entreprises qui leur ont confié des travaux d'analyse des sites de construction par l'examen des reconnaissances initiales et d'organisation de campagnes de reconnaissances rétablissant une vision réaliste des sols de fondation. Les entreprises concernées se reconnaîtront dans la description des projets remis en selle et menés à bien.

Références

Arsonnet, G, J.-P. Baud & M. Gambin, 2013. "RotoSTAF®, une amélioration déterminante de l'autoforage du pressiomètre Ménard. RotoSTAF®, a major improvement in self bored Ménard pressuremeter." In: 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Parallel session ISP 6, Paris, France. [In French].

<https://www.issmge.org/publications/publication/rotostaf-a-major-improvement-in-self-bored-menard-pressuremeter-2178>

ASTM "D4719-07 Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils" American Society for Testing Materials, 2016

Baud, J.-P. 2021. "Soil and Rock Classification from Pressuremeter Data. Recent Developments and Applications. Classification pressiométrique des sols et des roches. Développements récents et applications." In: 6th Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, ISC6, Budapest. <https://doi.org/10.53243/ISC2020-154>

Magnan, J.-P. 2002. "L'organisation du travail en géotechnique : développement, normalisation et artisanat. Organisation of labour in geotechnical engineering: development, standardisation and craftsmanship." Rev. Fr. Géotech. N° 99, pp. 73–80, Paris (2002). [In French].

<https://doi.org/10.1051/geotech/2002099073>

Ménard L. 1970 à 1976. "D10. Notice de base dite 'notice exécution'. Règles relatives à l'exécution des essais pressiométriques sur le terrain". Revue Sols-Soils n°27, 1976, pp. 4-24, M.P. Gambin et J. Rousseau eds, Saulx-les-Charteux, France. [In French]. [In English:

<https://web.archive.org/web/20190410121222/http://icp-pressuremeter.com/wp-content/uploads/2018/04/D10-field-memorandum.pdf>]

Organisation internationale de normalisation "EN ISO 22476-4:2021 Reconnaissance et essais géotechniques — Essais en place - Partie 4: Essai pressiométrique dans un forage préalable selon la procédure Ménard", ISO, Vernier (Genève) Suisse, 2021 [In French]

International Organization for Standardization "ISO 22476-4:2021(en) Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 4: Prebored pressuremeter test by Ménard procedure", ISO, Vernier (Genève) Switzerland, 2021 [In English]

<https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:22476:-4:ed-2:v1:en>

Terrasol "Notice technique de TASPIE+ v4.x 2022_indC" [In French], 2024 [last version on line]

<https://orbow.com/wp-content/uploads/2025/06/Foxta-v4-Manuel-utilisateur-Partie-C.6-TASPIE-indD-Novembre-2024.pdf>