



Développement d'outils efficaces pour le contrôle qualité de constructions en terre



Projet de recherche lancé en février 2023 pour une durée de 3 ans, soutenu par l'ADEME et inscrit dans le cadre des travaux de recherche et développement de l'axe « Essais *In-situ* » du [Projet National Terre Crue](#)

Appel d'offre

"Réalisation de mur expérimental en pisé (démonstrateur) et partage des savoirs et réflexions autour du contrôle qualité des éléments constructifs en pisé"

Date limite pour répondre à cet appel d'offre :

29 novembre 2024 à 17 h

Sélection et transmission des résultats : 6 décembre 2024

Période de réalisation du démonstrateur : entre le **6 et le 27 janvier 2025**

Date limite de livraison : au plus tard le 31 janvier 2025

Lieu de réalisation : ENTPE, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin Cedex

Dans le cadre de la réponse à cet appel d'offre, il est requis qu'un devis soit transmis à l'Université Gustave Eiffel, laboratoire SRO, 14-20 Bd Newton, 77454 Marne la Vallée Cedex 2, à l'attention de Mme Yasmina Boussafir

Pour tout complément d'information : yasmina.boussafir@univ-eiffel.fr

Lot 4 : Méthodologies de contrôle applicables au chantier

Tâche 4.1 : Cahier des charges de réalisation du démonstrateur

Sommaire

1.	Introduction	3
1.1	Objectifs du projet Qualit'ère.....	3
1.2	Structuration du projet.....	3
2.	Tâche 4.1 : Cahier des charges de réalisation du démonstrateur	4
3.	Description et principe de conception de l'ouvrage expérimental	4
3.1	Dimensions de l'ouvrage.....	5
3.2	Constitution de l'ouvrage	5
3.3	Anomalies.....	6
3.4	Nature des matériaux utilisés	7
4.	Définition du corps d'épreuve	7
4.1	Géométrie et cubatures	7
4.2	Modalités de préparation de la terre	8
4.3	Modalités de compactage, objectifs de densification.....	9
5.	Instrumentation et mesures sur l'ouvrage.....	9
5.1	Capteurs	9
5.2	Mesure de la densité obtenue par compactage	10
5.3	Suivi et documentation de chantier	11
5.4	Mesures réalisées pendant la construction de l'ouvrage	11
5.5	Mesures réalisées après la construction de l'ouvrage	13
6.	Prestations et conditions d'intervention du maçon	14
7.	Planning prévisionnel.....	15
8.	Fins de travaux et communication	15
	Annexe 1 : Exemple de journal de chantier	16
	Annexe 2 : Schéma démonstrateur	17

1. Introduction

1.1 Objectifs du projet Qualit'ère

Le projet Qualit'ère a pour objectif général de mettre au point des méthodes de contrôle de la qualité des éléments en pisé d'un ouvrage aussi bien lors de leur mise en œuvre que pour des opérations de réhabilitation ou en service. Ces outils devront être peu coûteux et à destination des artisans piseurs.

La démarche de validation performancielle adoptée par ce projet permettra de valider un élément d'ouvrage en fonction d'essais de chantier ou de laboratoire réalisés sur l'élément constructif fini et en fonction des contraintes réelles qui seront appliquées à l'élément d'ouvrage durant la vie du bâti.

Les méthodes qui seront testées dans ce projet visent à étayer scientifiquement la cohérence des essais d'autocontrôle actuellement utilisés par les praticiens sur chantier et/ou proposer des pistes d'améliorations ou alternatives à ces derniers. En particulier, la démarche cherche à repérer leurs éventuelles lacunes en termes de précisions, qui est un point essentiel permettant d'identifier les aspects à améliorer.

Enfin, il est important de noter que le projet Qualit'ère ne vise pas à quantifier les performances du matériau (ce point étant traité dans le projet « Pisez ! »¹). La convenance des terres ne fait pas non plus du périmètre de ce projet.

1.2 Structuration du projet

Le projet est structuré en un lot de coordination (lot 1) et 5 lots opérationnels.

Le lot 2 constitue la base de départ du projet. Il a pour vocation à définir les paramètres et les méthodes de références qui seront utilisés pour la suite des développements. Pour ce faire, l'idée est de se baser sur l'étude de l'existant ainsi que sur une analyse des attentes des professionnels de la terre crue. En particulier, le transfert des connaissances acquises pour la réalisation des ouvrages en terre par compactage (telles qu'elles sont pratiquées pour les remblais d'infrastructure linéaires, les digues ou les plateformes de bâtiments) à la réalisation de murs en pisé sera étudié. Les résultats issus de cette analyse de l'état de l'art seront exploités suivant deux étapes. Le lot 3 visera à vérifier, adapter et/ou établir les liens entre les paramètres clés identifiés et les performances des éléments constructifs. En outre, le degré de précision nécessaire lors de la mesure de ces paramètres sera étudié. Fort de ces résultats, le lot 4 aura pour objectif d'identifier et, si nécessaire de modifier, les moyens et protocoles de mesure afin qu'ils soient conformes aux degrés de précision et de fiabilité souhaités et qu'ils soient adaptés à une mise en œuvre sur site. Un enjeu fort de ce travail sera la définition du cahier des charges d'un démonstrateur de laboratoire. Ce démonstrateur est destiné à tester les méthodes de contrôle de la mise en œuvre et d'identification des défauts (initiaux ou induits) d'un élément constructif en pisé. Les résultats de ce projet ont vocation à être directement applicables par les professionnels de la construction en terre. Ainsi les possibilités d'utilisation des résultats obtenus pour des projets de construction réels par les bureaux d'études et les maçons seront étudiées,

¹ Le projet « [Pisez !](#) » est lauréat de l'AAP ADEME France 2030 SIC et il a pour objectif de développer un outil de dimensionnement pour le pisé. Il est porté par l'Ecole Central de Lyon et inscrit dans le cadre des travaux de recherche et développement de l'axe mécanique du PN Terre.

dans le lot 5, en parallèle des développements des lots 3 et 4. Enfin, le lot 6 a pour vocation à permettre la diffusion des résultats obtenus dans le cadre du projet. La dissémination reposera d'abord sur des publications scientifiques et leur traduction sous forme de guide pratique à destination des professionnels de la construction en terre.

2. Tâche 4.1 : Cahier des charges de réalisation du démonstrateur

L'enjeu du démonstrateur de laboratoire est de reproduire une partie d'ouvrage à l'échelle 1 :1, qui permettra de tester différentes méthodes d'essais afin de contrôler la qualité de fabrication des murs, et d'étudier l'évolution temporelle de la qualité de l'élément réalisé (analyse des défauts induits). Par qualité on entend la bonne adéquation des performances obtenues sur site par rapport à celles attendues.

Le présent cahier des charges est prévu pour préciser :

- Les principes de construction du mur : ce document servira de support à la consultation d'artisan piseur ayant à sa charge la réalisation du mur moyennant rémunération ;
- Les objectifs recherchés en termes de mesures ou de tests à réaliser par les partenaires du projet ;
- Le phasage, le nombre et l'organisation des mesures et des tests à réaliser par les partenaires dans le cadre du projet.

3. Description et principe de conception de l'ouvrage expérimental

Le démonstrateur est un ouvrage qui permettra de tester des outils de contrôle de chantier, réaliste et adaptés à la construction de murs en pisé par des artisans. Il ne s'agit pas de construire un vrai mur de bâtiment mais de reproduire les conditions de réalisation en vraie grandeur d'un mur utilisant une terre prédéfinie et caractérisée en laboratoire, le matériel de mise en œuvre d'un artisan piseur qualifié, des techniques de mise en œuvre combinant le savoir-faire de l'artisan et des consignes particulières qui permettront de tester différentes configurations de réalisation, y compris des défauts de réalisation.

Un seul démonstrateur est prévu, fabriqué selon les prescriptions du guide de bonnes pratiques pisé, c-à-d, **avec la réalisation d'un muret d'essai servant au maçon pour arrêter les paramètres de fabrication** (teneur en eau, épaisseur de couche, foisonnement, compactage). Le démonstrateur sera construit avec des anomalies (définies au §3.2). A noter que le démonstrateur devra être conçu de manière à permettre le calibrage des méthodes d'essais.

La mise au point définitive du cahier des charges sera validée avec l'artisan piseur. La construction de l'ouvrage expérimental devra respecter intégralement la géométrie prévue au cahier des charges, telle que définie au §3.1.

D'une manière générale, **il est attendu une collaboration et une participation étroite avec l'artisan** dans la mesure où son savoir-faire servira de point de départ des travaux. L'artisan présentera un protocole détaillant sa méthode de travail, en précisant les étapes nécessaires ainsi que le temps et les moyens requis pour chacune. Le protocole inclura les mesures de sécurité nécessaires pour effectuer le travail. Un accord de partenariat pourra être signé avec l'artisan.

Les travaux seront largement documentés, photographiés et filmés. Selon la qualité des films et photographies réalisées, un droit d'utilisation de l'image de l'artisan sera demandé pour être valorisés ultérieurement au titre des livrables du projet.

L'objectif du projet est de définir la ou les méthodes d'essais qui permettront de valider la qualité de réalisation d'un mur en Pisé, à l'exception de la convenance des terres et de la réalisation de points singuliers comme les ouvertures.

Localisation

L'ouvrage sera localisé à l'ENTPE - Vaulx-en-Velin (69). Il sera protégé des intempéries dans un espace sécurisé, où il pourra sécher naturellement.

3.1 Dimensions de l'ouvrage

Le démonstrateur est un mur auto-stable avec un soubassement poreux, reposant sur une dalle béton. **La forme sélectionnée est une portion de mur d'angle (en L).**

Les dimensions de l'ouvrage sont définies par :

- La hauteur du mur : celle-ci sera compatible avec les banches utilisées par l'artisan. Dans l'idéal la hauteur devra être supérieure à 1,50 m. Si possible une hauteur proche de la hauteur d'un mur réel sera recherchée, soit environ 2,00 +/- 0,10m.
- La largeur du mur : celle-ci sera également représentative d'un mur normal, soit environ 0,50 m d'épaisseur. Cette largeur sera compatible avec le matériel de l'artisan.
- La longueur des portions du mur : celles-ci ont été définies à partir des besoins pour les observations finales.
 - La longueur de la petite portion droite (petite aile) sera de 1,50m depuis l'angle intérieur.
 - La longueur de la longue portion droite (grande aile) sera de 3,00m depuis l'angle intérieur.

Certaines parties du mur seront instrumentées par des capteurs fixés à demeure (partie détaillée au §5). D'autres parties serviront à réaliser des tests faiblement destructifs et des tests non destructifs. Pour finir, certaines parties seront complètement détruites au fur et à mesure de la phase de séchage pour réaliser des éprouvettes destinées au laboratoire.

3.2 Constitution de l'ouvrage

Le mur sera constitué de couches de sols compactés jusqu'à atteindre la hauteur définitive définie au §3.1. Il comportera des anomalies (définies au §3.3) localisées en certaines parties du mur d'angle. Les plans de principe précis sont représentés en Annexe 2.

Le mur sera constitué d'environ 18 couches d'environ 10 cm et d'une couche d'environ 20 cm d'épaisseur (soit environ 2,00 m de hauteur en pisé). Les épaisseurs des couches seront constantes sur les 2 ailes, à l'exception de la couche qui constituera une anomalie de compactage.

Les épaisseurs seront a priori de l'ordre de 8 à 10cm fini après compactage mais l'artisan piseur pourra proposer de modifier cette valeur selon son expérience, l'objectif étant de réaliser un compactage dans les règles de l'art pour toutes les couches à l'exception de celles qui présenteront des anomalies de compactage. Les paramètres de fabrications, dont l'épaisseur des couches et la teneur en eau de fabrication, seront arrêtés après réalisation du muret d'essai.

- **La grande aile** sera réalisée avec le matériau dont la teneur en eau correspondra à la teneur en eau optimale pour la mise en œuvre, telle que définie par le maçon sur son muret d'essai.
- **La petite aile** sera réalisée avec le même matériau dont la teneur en eau sera légèrement et volontairement supérieure à la teneur en eau optimale (approximativement +5%).

Fondation de l'ouvrage

L'ouvrage est prévu d'être auto-stable et reposera sur un soubassement en béton, lui-même reposant sur une dalle béton. La dalle béton n'est pas à créer par l'artisan piseur et sera constituée du dallage en place dans le local de fabrication.

Le soubassement sera constitué d'une dalle en béton, d'environ 0,10 m d'épaisseur, dans laquelle seront insérés au plus proche de l'interface avec le pisé, des dispositifs drainants de type tuyaux microporeux. Ces tuyaux serviront à créer une zone d'alimentation en eau libre à la base du mur favorisant des remontées capillaires.

3.3 Anomalies

L'objectif de ce travail étant de vérifier que les outils de contrôle sont en mesure de détecter des anomalies pouvant mettre en cause la qualité requise, il est donc prévu de constituer volontairement plusieurs anomalies dans l'ouvrage.

I. Anomalie de compactage (locale) :

La couche qui constituera une anomalie de compactage aura le double de l'épaisseur normale et sera compactée avec la moitié de l'énergie de compactage recommandé.

Par exemple, au lieu d'une couche de 10 cm, cette couche aura une épaisseur de 20 cm et au lieu de 2 passes de fouloirs, il n'y en aura qu'1.

II. Anomalie de teneur en eau (générale) :

La petite aile sera réalisée selon la procédure de compactage définie pour la grande aile, convenue pour obtenir un ouvrage de qualité, avec un matériau ayant une teneur en eau nettement supérieure à la teneur en eau optimale. Le pourcentage d'eau ajouté sera évalué avec l'artisan pour permettre encore une mise en œuvre correcte et garantir la tenue du mur. Ce pourcentage pourra être de l'ordre de +5%.

III. Anomalie de type nid d'abeille (aussi désigné nid de cailloux) :

Non retenue : Cette anomalie, bien que recensée comme étant représentative des anomalies de chantier, ne sera pas retenue dans le cadre de ce projet.

Ce genre d'anomalie est en général constitué d'un matériau creux, formant une structure qualifiée de nid d'abeille et typique d'un défaut de type ségrégation au moment du régalage de la couche. Pour la réaliser, il aurait été nécessaire de modifier la granulométrie du matériau (avec moins de fine et plus de cailloux) et définir un moyen de contrôle et d'évaluation qualitative de la gravité de l'anomalie.

3.4 Nature des matériaux utilisés

La méthodologie générale de sélection de terre pour ce projet considère deux contraintes opérationnelles et scientifiques comme suit :

- Contraintes opérationnelles. Les différentes terres choisies doivent être :
 - Disponibles en grande quantité
 - Utilisées dans d'autres projets de recherche
 - Déjà caractérisées (si possible)
 - Déjà ou prochainement utilisées dans des opérations de construction en pisé
- Contraintes scientifiques. Les différentes terres choisies doivent avoir :
 - Une granulométrie et une activité argileuse différentes
 - Un comportement à la compaction différent (c'est-à-dire optimum Proctor et formes de courbes Proctor différents).

Sur la base de ces critères, et tenant compte des options de terres disponibles au moment de lancement du projet, la terre suivante a été sélectionnée :

- **STA (Saint-Antoine l'Abbaye)** : Cette terre est issue d'un champ et utilisée pour la construction de plusieurs logements individuels en pisé. Elle a été étudiée dans le cadre de plusieurs thèses à l'ENTPE. Ainsi, l'ensemble des caractérisations géotechnique, minéralogiques, chimiques ont déjà été réalisées et son comportement thermo-hydro-mécanique lorsqu'elle est compactée est déjà connu.

Le matériau sera mis à disposition de l'artisan.

La teneur en eau de mise en œuvre sera préalablement définie par l'artisan piseur. Des mesures en laboratoire permettront d'en déterminer la valeur.

4. Définition du corps d'épreuve

4.1 Géométrie et cubatures

L'ouvrage expérimental sera constitué des couches élémentaires, chacune numérotée de manière à assurer la traçabilité des résultats obtenus in-situ. Toutes les couches auront les mêmes épaisseurs, à l'exception d'une couche précise qui constituera un défaut et qui aura le double de l'épaisseur normale.

Cette couche présentant une anomalie de compactage se situera dans la partie centrale du mur pour éviter les effets d'extrémités, et constituera ainsi la 9^{ème} couche.

- Couche 0 : soubassement poreux 10 cm d'épaisseur – délai de prise avant poursuite
- Couche 1 à 8 : compactée en épaisseur standard
- Couche 9 : compactée en double épaisseur et moitié de passe de compacteur
- Couche 10 à 12 : compactée en épaisseur standard
- Couche 13 (~1,50 m) : compactée en épaisseur standard et mesures au Panda avant décoffrage de la première partie du mur (la hauteur théorique du coffrage).

Décoffrage de la première partie du mur – relevé d'observation des états de surface puis poursuite du mur jusqu'à atteindre la hauteur finale recherchée.

- Couche 14 à 18 (ou plus) : compactée en épaisseur standard

La mise en œuvre sera exécutée selon les guides de bonnes pratiques.

Calcul des cubatures de l'ouvrage

Le bilan des cubatures s'élève :

- Pour le démonstrateur le volume de terre compactée correspond à L 5,50m × h 2,00 m × e 0,50 m = 5,504 m³
- Pour le muret d'essai, on considérera les dimensions suivantes 1,00 × 1,50 × 0,50 m = 0,750 m³
- Pour les essais de sol environ 0,050 m³ (teneur en eau, identification, Proctor, etc.)
- Soit un total de 6,3 m³

En considérant un coefficient de foisonnement de l'ordre de 1,1, cela donne approximativement 6,93 m³ de terre foisonnée, soit 7 big bags standards de 1 m³ chacun.

NB : aucun coefficient de perte n'est pris en compte dans ce calcul et il convient donc d'appliquer un facteur multiplicatif à ces valeurs pour prendre en compte les pertes occasionnées par les différentes opérations de stockage et de reprise. Par sécurité, le nombre de Big Bag sera augmenté à 8.

4.2 Modalités de préparation de la terre

La terre sera mise à disposition de l'artisan sur le lieu de réalisation des murs. L'artisan sera chargé de la préparer selon sa méthodologie.

L'artisan doit prévoir tous ses outils nécessaires à l'élévation des murs prototypes en pisé (malaxeur, coffrage, fouloir, compresseur...)

L'artisan proposera sa méthode de contrôle de teneur en eau. Il déterminera notamment la teneur en eau optimale. Cette détermination pourra être le résultat de son expérience personnelle.

Dans le cadre du projet, la teneur en eau optimale sera mesurée à l'étuve sur un prélèvement représentatif. Au cours de la réalisation du mur d'essai, différentes mesures seront réalisées par

l'équipe projet, incluant notamment : des mesures de teneur en eau à l'étuve, à la plaque chauffante, au micro-onde, à l'essai de chute de boule.

L'artisan sera invité à tester ces essais et à donner son avis sur leur pertinence.

Pour la réalisation de la petite Aile, il sera demandé de constituer un stock de terre humidifié à une teneur en eau plus humide que la teneur en eau optimale définie au départ. La teneur en eau ne doit cependant pas rendre impossible le travail. L'artisan proposera une nouvelle teneur en eau pour cette tâche.

4.3 Modalités de compactage, objectifs de densification

L'artisan utilisera son matériel pour compacter les couches de sol. Sa technique ainsi que la chronologie des différentes tâches qui seront réalisées pour construire le démonstrateur, seront consignées dans le journal de chantier (voir §5.3).

Au démarrage, des échanges seront organisés pour se mettre d'accord sur la technique de mise en œuvre et sur les anomalies qui devront être réalisées. C'est à l'artisan de définir l'objectif de densification. Cet objectif sera étudié au cours de la réalisation du chantier. La réalisation d'un muret d'essai, conformément au guide de bonne pratique permettra de caler les paramètres d'exécution (modalités de compactage, teneur en eau).

Après avoir défini les paramètres d'exécution, des mesures in situ par gamma densimètre seront organisées sur quelques couches en marge du muret d'essai et du démonstrateur. Les mesures seront réalisées par un prestataire externe ou par l'université Gustave Eiffel (voir §5.2).

Le démonstrateur sera réalisé à la suite de ces deux tâches préalables.

5. Instrumentation et mesures sur l'ouvrage

L'ouvrage sera instrumenté pour pouvoir suivre différentes propriétés physiques au cours du temps. **L'instrumentation comprendra des capteurs qui seront installés durant la mise en œuvre** au cœur du mur. L'instrumentation est du ressort des partenaires du projet Qualit'ère. Ils permettront de monitorer l'état hydrique du mur et serviront de référence pour les essais non destructifs conduits sur le mur.

Le phasage sera présenté à l'artisan pour l'intégrer dans son planning de travaux. Les temps de pose des capteurs ou les tâches annexes à l'instrumentation sont détaillés dans §5.3.

5.1 Capteurs

L'instrumentation de l'ouvrage a été définie par les membres du projet Qualit'ère. Celle-ci comprendra :

- 12 Sondes TDR (type CS655) permettent la mesure de la teneur en eau volumique avec mesure de température associée au cœur du mur (Figure 1).
- 8 sondes de succion (type TEROS21) permettent d'évaluer la succion au cours du séchage, en parallèle de la mesure de teneur en eau volumique
- 4 Réservations seront prévues pour les capteurs d'humidité relative, type sonde

Rotronic (photo ci-dessous)



Figure 1 : Exemple d'installation de sonde TDR (photo de droite) et de réservation (photo de gauche) dans un ouvrage en pisé.

Il y aura 3 profils instrumentés, positionnées entre la 2^{ème} et la 3^{ème} couche et entre le 13^{ème} et la 14^{ème}. L'implantation des différents capteurs est donnée Figure 4. Les capteurs seront reliés à une centrale d'acquisition Campbell installée à proximité par des câbles qui seront centralisés dans une gaine située dans l'angle des 2 ailes (cf. plans en Annexe 2).

Les capteurs seront posés en surface des couches compactées puis recouverts par la couche suivante. Certains capteurs seront posés après la réalisation du mur.

Différentes mesures et essais sont prévus durant la montée de l'ouvrage. **Ces essais ne seront pas réalisés par le maçon, mais par les chercheurs, ingénieurs et techniciens du projet Qualit'ère.** Des capteurs seront aussi posés, **par le personnel du projet Qualit'ère**, à l'avancement selon un plan défini à l'avance. Le muret sera testé avec des méthodes non destructives et faiblement destructives. La localisation des sondes permet la réalisation des essais invasifs sur le mur et sont compatibles avec les essais de Panda, prélèvement de blocs et drilling-test. Pour information, la position de ces tests est repérée sur les plans en annexe 2.

5.2 Mesure de la densité obtenue par compactage

Après l'exécution du muret d'essai, sur une surface de très bonne portance, une série de mesure destinée à suivre l'évolution du compactage en fonction du nombre de passe de psoirs sera réalisée, par le personnel du projet Qualit'ère, sur une couche qui pourra être déconstruite. L'emplacement de cette planche d'essai sera à définir avec le maçon de même que le type de coffrage qui pourra être adapté à la petite épaisseur de couche testée. Le matériau sera régalaé sur une couche foisonnée d'épaisseur définie entre coffrage. Plusieurs points de mesure seront positionnés à la surface de la couche avec une bombe de peinture. Après compactage, des mesures de la masse volumique in situ seront réalisées sur chacun de ces points à l'aide d'un gamma-densimètre de type Troxler. Les densités in situ seront mesurées après 2, 4, 8 et 16 passes de compactage, et ceci au même endroit. L'objectif n'est pas d'imposer 16 passes de compactage mais de mesurer l'évolution du taux de compactage sur l'épaisseur de la couche en fonction du nombre de passe et d'étudier la loi de comportement du sol. Cette première couche pourra

éventuellement être prélevée pour faire d'autres mesures en laboratoire. Dans l'idéal elle devra être déconstruite surtout si l'essai a été réalisé à la place du démonstrateur. La terre pourra être réutilisée.

5.3 Suivi et documentation de chantier

Le journal de chantier permettra de consigner les informations obtenues, notamment celles concernant les épaisseurs foisonnées et compactées ou les difficultés de mise en œuvre. **Le format du journal de chantier sera discuté avec l'artisan.** Son avis sera consigné dans le rapport définitif. Le format devra prendre en compte les remarques de l'artisan de manière à rendre le document le plus acceptable possible pour la démarche.

Un exemple de journal de chantier utilisable pour la réalisation du démonstrateur est donné en Annexe.1. Le journal renseigne l'ensemble des informations nécessaires au suivi de la réalisation de l'ouvrage, notamment les moyens matériels utilisés ainsi que les conditions de réalisation.

Pour le matériel, le fouloir utilisé, de même que le psoir manuel, seront décrits précisément. Des mesures complémentaires pourront être réalisées le cas échéant, notamment sur la mesure de l'énergie dégagée par le fouloir utilisé par l'artisan.

Les descriptions comprendront au minimum :

- Les dimensions des outils
- Les poids des outils
- Leur mode de fonctionnement
- Les conditions d'utilisation
- Le % de temps d'occupation
- Cadence / pulsation et amplitude du fouloir pneumatique + dimensions et nature de la ou les dalles fixées en about de fouloir.
- Les équipes (si changement éventuel)

Les éléments à consigner dans le journal de chantier ou au titre du rapport de construction qui constituera un des livrables du projet Qualit'ère, pourront être les suivants :

- Les épaisseurs de couches foisonnées
- Le nombre de passes de compacteur
- Le contre-foisonnement
- La teneur en eau et ses ajustements éventuels (humidification ou séchage)
- Les difficultés observées
- La météorologie (T°C, %HR, Vent, ensoleillement...)
- Les volumes journaliers
- La temporalité : dates, délais de réalisation de chaque tâche
- Localisation des zones de travaux par rapport au plan d'ensemble.

5.4 Mesures réalisées pendant la construction de l'ouvrage

Pendant la construction de l'ouvrage, différents contrôles seront réalisés, **par le personnel du projet Qualit'ère**, afin de vérifier l'obtention des objectifs visés en termes de géométrie, teneur en eau, masse volumique et de portance. Pendant la durée de ces contrôles, l'atelier de mise en œuvre sera arrêté.

Au cours de la réalisation du démonstrateur, l'artisan devra adapter la cadence de réalisation devant permettre des essais de suivi de mise en œuvre. Le tableau ci-dessous synthétise les essais à réaliser et les temps approximatifs d'immobilisation du chantier. Ce tableau est donné à titre indicatif et sera sujet à ajustement selon le matériel du maçon et les épaisseurs réelles compactées.

Nom de l'essai	Localisation	Temporalité
Mesure au pénétromètre dynamique (Panda).	Approximativement à la 13 ^{ème} couche (~1.50m de hauteur). - 3/4 sur la grande Aile - 2/3 sur la petite aile <i>Optionnel : idem sur la dernière couche (~2,00m de hauteur).</i>	30min/essai, soit ~1/2 journée pour l'ensemble.
Mesure Drilling-Test	Dernière couche (~2,00m de hauteur).	1h/mesure
Pose/Installation Capteurs (TDR/Fiches réservation)	Entre la couche 2 et 3 et entre la couche 13 et 14 : - 2 profils verticaux dans la grande Aile de 4 capteurs TDR chacun - 1 des profils de la Grande Aile sera également équipé de sonde de succion - 1 profil dans la petite Aile de 4 capteurs TDR et 4 capteurs de succion	10-15min/capteurs.
Suivi de chantier à réaliser par l'équipe Qualit'ère		
Epaisseur foisonnées/ Epaisseur compactée	Pour chaque couche, mesures réalisées en 3 points sur la Grande Aile et 2 points sur le petites Aile	10 min/couche
Nombre de seaux de terre/ Mesure de volume de terre foisonnées	A chaque couche.	<i>Pour information</i>
Teneur en eau : - Réalisation d'un test à la boule par l'artisan. - Prélèvement de la terre foisonnée sur seaux.	A chaque couche, 5 prélèvements.	15min/couche

5.5 Mesures réalisées après la construction de l'ouvrage

Avant décoffrage

Certaines performances seront évaluées immédiatement après le compactage de la couche 13 soit approximativement à 1,50 m de hauteur (la hauteur théorique d'un coffrage), et avant le décoffrage. La construction du mur sera poursuivie après la réalisation de cette phase d'essai pour atteindre la hauteur finale définie (approximativement 2,00 m).

- Mesures au Panda : cet outil est un pénétromètre dynamique portatif qui permet de restituer l'enfoncement d'une tige de diamètre 2cm en fonction de la profondeur. L'utilisation de cet outil dans le cadre du contrôle de compactage de tranchée par exemple mais également de compactage de remblai selon la norme NF P94-105 permet de déceler les épaisseurs de couches et d'évaluer la qualité du compactage grâce à une banque de courbes de références.
- Mesures au drilling test : l'appareil est prévu pour tester la qualité du bois. Il permet de restituer une vitesse d'avancement en fonction de la profondeur forée. Selon la vitesse obtenue, l'outil permet d'évaluer les zones de faiblesse.

Dans les deux essais, il s'agira de consigner les difficultés observées et leur faisabilité. Les résultats seront interprétés a posteriori, mais il sera possible de procéder à une impression papier sur place.

Après décoffrage

A la suite du décoffrage du mur, le suivi et le monitoring commencera par un relevé initial du démonstrateur ;

- L'état de surface des murs sera observé et décrit finement.
- Des photographies seront prises et une évaluation de la colorimétrie sera réalisée.
- Des mesures d'abrasion de surface et de pénétromètre de poche seront réalisées ponctuellement.
- Des échantillons seront directement prélevés sur le mur.

Le suivi du séchage du mur sera effectué à partir de l'instrumentation du démonstrateur et des essais non destructif conduits sur le mur :

- Des capteurs seront installés sur la surface (points repère pour de la photogrammétrie).
- Mesure de propagation d'onde : l'appareil d'auscultation ultrasonique (Pundit) permet de mesure la vitesse de propagation d'une onde dans un milieu. Il permet l'estimation de la rigidité d'un milieu et l'évaluation de zones hétérogènes. Les mesures seront réalisées régulièrement durant le séchage du mur
 - Mesures journalières pendant les premières semaines suivant le décoffrage
 - Mesures semainières puis mensuelles après t+2mois.

Après séchage

Des mesures au Drilling seront réalisées après une période de séchage. Lorsque le mur sera suffisamment sec, le mur sera scié pour réaliser des éprouvettes qui seront analysées au laboratoire.

Mesure Drilling-test	Dernière couche (~2,00m de hauteur). A t+1mois A t+6mois	1h/mesure
Prélèvement de blocs	Toute hauteur de la grande aile. Après décoffrage (à t+0 mois) A t+6mois	A préciser selon le matériel disponible (~1/2 journée)

Prélèvement de blocs

Des prélèvements sur les murs sont prévus sur la grande aile et la petite aile après décoffrage et après séchage (~6mois). Les blocs seront prélevés sur toute la hauteur du mur sur une épaisseur d'environ 20cm, pour réaliser des mesures à la double sonde gamma en laboratoire à Nantes.

La prestation de sciage sera à la charge de l'artisan. La méthode de découpe sera mise au point en fonction du matériel proposé par l'artisan et sera réalisée une fois à la fin des travaux et une deuxième fois 6 mois après séchage du mur.

Le programme d'analyse comprendra au minimum :

- Des mesures de teneurs en eau
- Des mesures de masse volumique sèche par pesée hydrostatique
- Des mesures de masse volumique mesurée au banc-gamma

6. Prestations et conditions d'intervention du maçon

Le présent cahier des charges a pour objectif de présenter le démonstrateur, les travaux de recherche envisagés, la consistance des murs prototypes à mettre en œuvre par le maçon et les conditions d'intervention, afin que les maçons consultés puissent chiffrer et proposer leurs services en connaissance de cause.

En complément des précisions déjà apportées dans le présent texte, nous tenons à souligner que la mission qui sera confiée au maçon n'est pas uniquement de construire le démonstrateur de manière autonome mais bien de le construire en liens étroits avec les chercheurs, de manière concertée, dans une démarche de partage de connaissance et réflexions et avec une série de mesures, observations réalisées et instrumentations mises en place à l'avancement de l'élévation. La cadence d'élévation sera donc bien plus faible que celles usuelles pour l'élévation d'un mur hors protocole de recherche. Le maçon doit tenir compte de cette démarche, des délais qui en découle et avoir la volonté de participer pleinement à ce projet de recherche comme un acteur à part entière de cette phase de mise au points, fabrication et instrumentation du démonstrateur.

Le programme de recherche et laboratoire accueillant le démonstrateur fournira le lieu, la terre à pisé, l'eau courante et l'électricité.

Le maçon doit prévoir tout le matériel nécessaire à l'élévation des murs en pisé : malaxeur, coffrages, fouloirs, compresseur... Si nécessaire à la mise en œuvre, le maçon doit prévoir d'être

accompagné par un compagnon additionnel.

Comme indiqué précédemment, les dimensions du démonstrateur doivent se rapprocher de celles d'un véritable mur en pisé, mais peuvent être ajustée en fonction des moyens de coffrage et préférence du maçon, dans une logique de simplification et d'optimisation du prix de la prestation du maçon.

→ Dans le cadre de la remise de sa proposition technique et financière, **le maçon doit préciser le nombre et les dimensions de murets / démonstrateurs qu'il propose et a pris en compte dans son chiffrage.**

A titre indicatif, l'équipe projet estime que cette phase de mise au point initiale, fabrication, instrumentations et mesures à l'avancement de l'élévation des murets, nécessitera 5 jours pleins de présence et disponibilité sur site de fabrication et d'échange et collaboration avec les chercheurs.

7. Planning prévisionnel

La date de démarrage de fabrication doit être comprise entre le **6 et le 27 janvier 2025** pour une livraison au plus tard le **31 janvier 2025**.

Des réunions préparatoires au nombre de 3 seront à prévoir avant le démarrage du chantier. Des réunions de fin de travaux au nombre de 3 seront également à prévoir par l'artisan. L'artisan sera sollicité pour participer à la restitution des travaux avant la fin du projet Qualit'ère.

Le planning définitif prendra en compte la réalisation :

- Du muret d'essai
- D'une planche test de compactage (évolution de la densité avec le nombre de pass) avec mesure de masse volumique
- Du démonstrateur sensu stricto

Les trois parties peuvent être réalisées à trois périodes différentes ou dans la foulée, selon accord avec l'équipe de recherche Qualit'ère qui devra également s'organiser pour être disponible pendant les travaux.

8. Fins de travaux et communication

Les travaux de l'artisan s'achèveront avec le décoffrage des dernières couches. L'artisan sera invité à participer à certaines réunions du projet Qualit'ère qui se dérouleront après la réalisation du démonstrateur.

Le mur pourra servir pour communiquer autour des résultats du projet Qualit'ère.

Annexe 1 : Exemple de journal de chantier

SOCIETE D&CRB	JOURNAL DU CHANTIER Chantier: Travaux d'aménagement de RNC du pk0+000 au pk6+888 (liaison <u>zeganghane-lhyanène</u>)	DPETL Nador
		Marché :09/2015/CFR

Date:
Lieu:
Fiche n°:

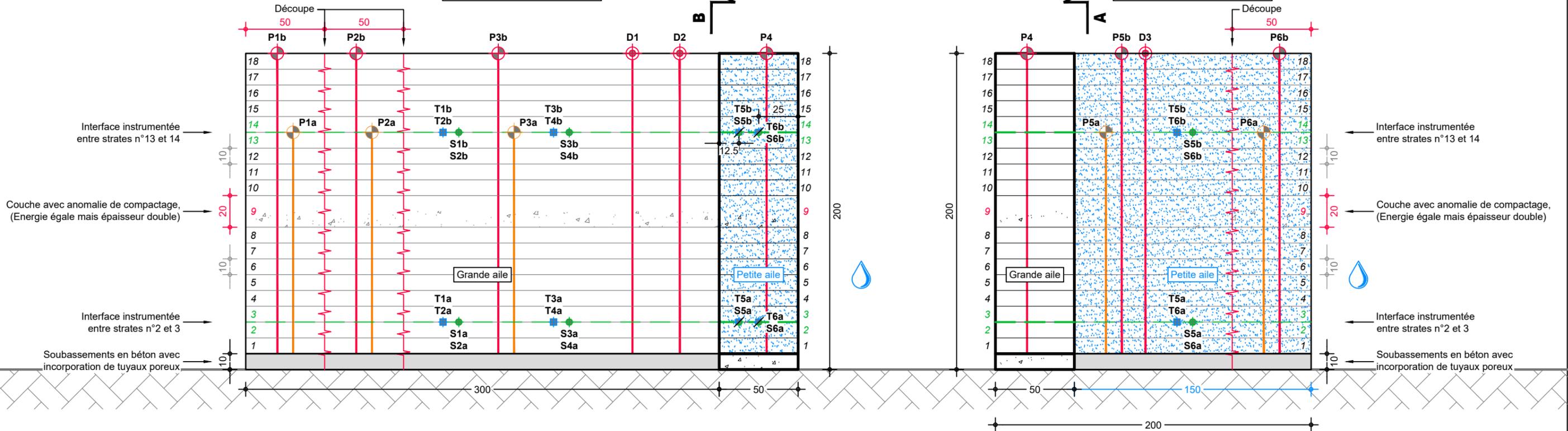
1	Conditions atmosphériques	température			pluie		vent	
2	Personnes ayant visité le chantier	nom:					heure:	
3	Arrêt du chantier	période:			cause:			
4	Inventaire du matériel sur chantier	Matériel	nombre	Etat	Matériel	nombre	Etat	
		pelle			niveleuse			
		buldozer			compacteur			
		chargeur			malaxeur			
		camion			compresseur			
Autre:								
5	Moyens humains	ingénieur:			conducteur des travaux:			
		Chef du chantier :			chef d'équipe :			
		Manceuvre et ouvriers spécialisés :			Autre:			
		Référence des travaux	emplacement		Travaux réalisés		quantité estimée	

Cotations en [cm]

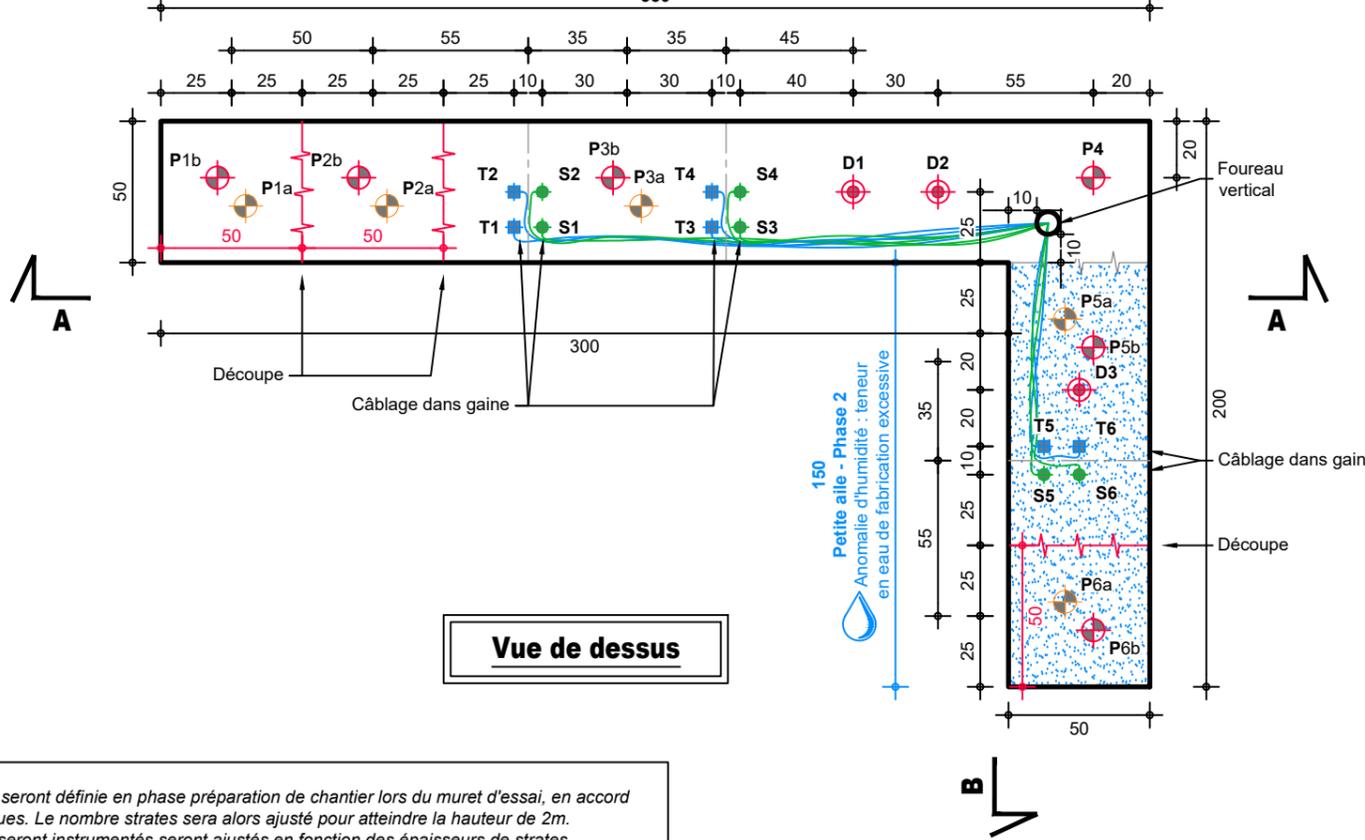
Cotations en [cm]

Coupe A-A

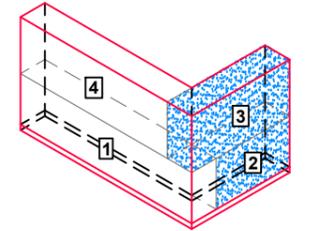
Coupe B-B



Grande aile - Phase 1 (Teneur en eau normale) 350



Axométrie d'ordonnement de réalisation



Réalisation en deux banchées superposées et croisées dans l'angle.
 Ordonnement de réalisation : 1 → 2 → 3 → 4

LEGENDE

- T : Sondes TDR (12U) } Pose par les chercheurs, à l'avancement de la fabrication du mur
 - ◆ S : Capteurs de Succion (12U) }
 - ● P : Panda / Pandito (11U) } Essais réalisés **après fabrication**, à l'exception des essais panda n°P1a, P2a, P3a, P5a et P6a réalisés **à l'avancement**
 - D : Drilling (3U) }
- Emprise de la zone avec anomalie d'humidité : teneur en eau de fabrication excessive
 = Petite aile

Représentation des essais "Panda" et "Drilling" en coupes et élévation

NOTA :
 Les épaisseurs réelles de strates seront définies en phase préparation de chantier lors du muret d'essai, en accord avec les guides de bonnes pratiques. Le nombre strates sera alors ajusté pour atteindre la hauteur de 2m.
 Les interfaces entre couches qui seront instrumentés seront ajustés en fonction des épaisseurs de strates.

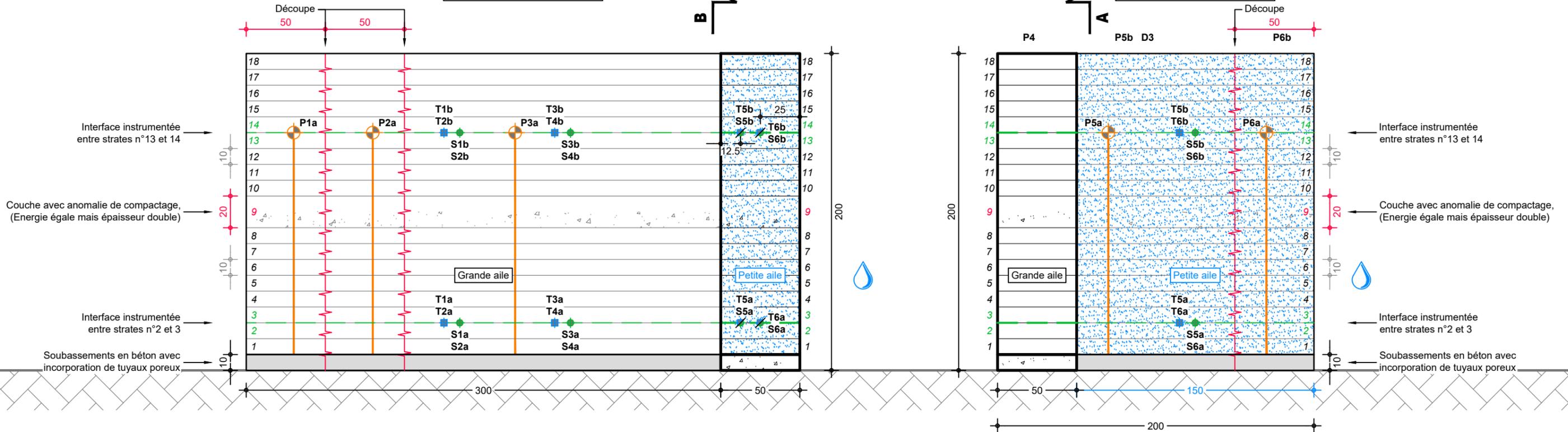
Cotations en [cm]

Cotations en [cm]

Cotations en [cm]

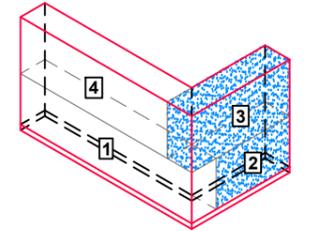
Coupe A-A

Coupe B-B

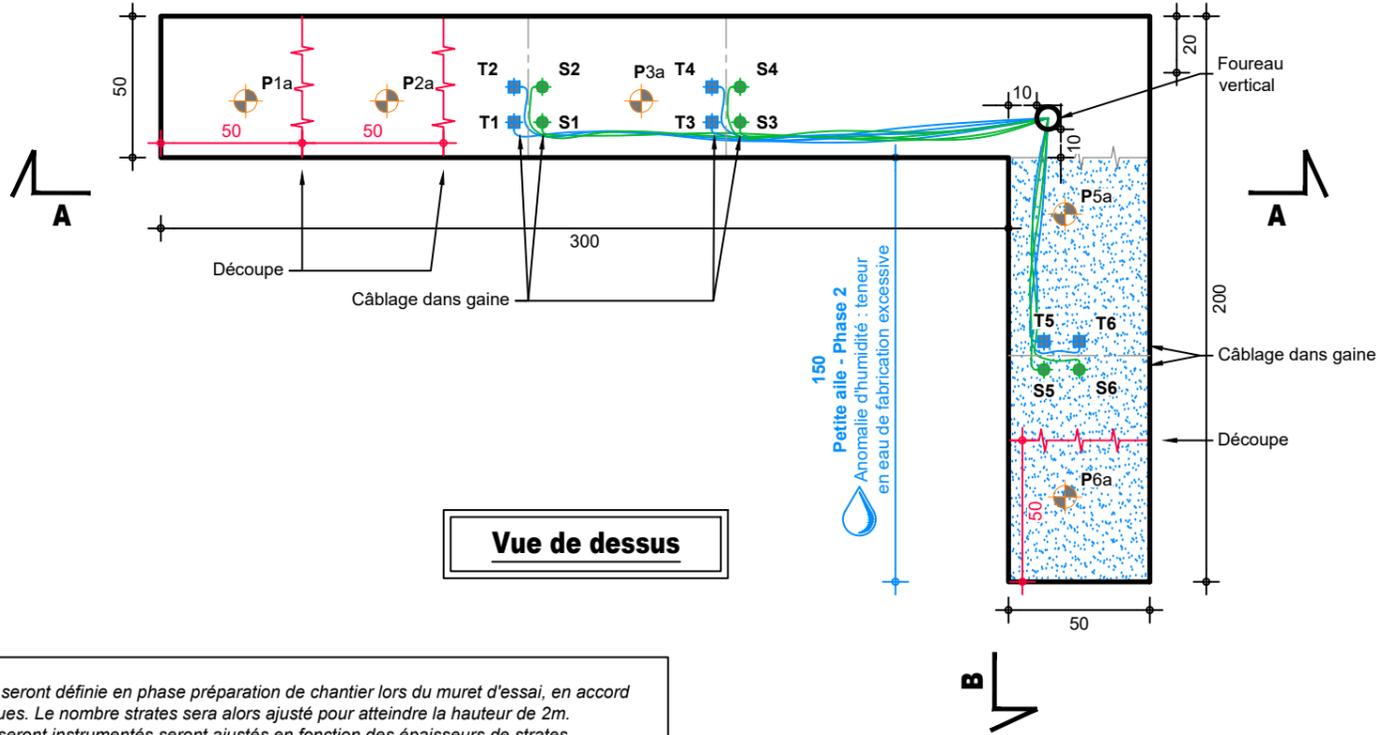


Grande aile - Phase 1
(Teneur en eau normale)
350

Axonométrie d'ordonnement de réalisation



Réalisation en deux banchées superposées et croisées dans l'angle.
Ordonnement de réalisation : 1 → 2 → 3 → 4



Vue de dessus

LEGENDE

- T : Sondes TDR (12U) } Pose par les chercheurs, à l'avancement de la fabrication du mur
- ◆ S : Capteurs de Succion (12U) }
- P : Panda / Pandito (11U) pénétromètre dynamique ultraléger } Essais réalisés à l'avancement, pour les essais panda / pandito n°P1a, P2a, P3a, P5a et P6a

Emprise de la zone avec anomalie d'humidité :
→ teneur en eau de fabrication excessive
= Petite aile

Représentation des essais "Panda" en coupes et élévation

NOTA :
Les épaisseurs réelles de strates seront définies en phase préparation de chantier lors du muret d'essai, en accord avec les guides de bonnes pratiques. Le nombre strates sera alors ajusté pour atteindre la hauteur de 2m.
Les interfaces entre couches qui seront instrumentés seront ajustés en fonction des épaisseurs de strates.

Cotations en [cm]