

# EUROSWAC

## Module T2.3 Innovation : les conduites auto- ensouilleuses Rapport de tests

Ce document a été préparé par et est la propriété des partenaires EUROSAC et d'Interreg France (Manche) Angleterre. Il ne peut être reproduit ou communiqué à des tiers sans l'accord préalable et écrit des partenaires EUROSAC ou d'Interreg France (Manche) Angleterre.

Rev.	Date	Auteur	Description	Vérificateur	Approbateur
00	02/02/2023	Hugo YOUSOUF-LACOUR	Approuvé pour délivrance à Interreg	Nasser SADI Bruno GARNIER	Claire PEREZ-THOMAS Bruno GARNIER
01	31/03/2023	Claire PEREZ-THOMAS	Approuvé pour délivrance à Interreg	Nasser SADI Hugo YOUSOUF-LACOUR Bruno GARNIER	Claire PEREZ-THOMAS Bruno GARNIER

## Table des matières

<b>1. Introduction</b>	<b>4</b>
1.1. Description du projet EUROSAC	4
1.2. Contexte de T2.3 – Système de conduites rigides auto-ensouilleuses	5
1.3. Objet de ce document	5
<b>2. Résumé et conclusions</b>	<b>7</b>
2.1. Description du prototype et objectifs des tests	7
2.2. Tests et résultats	8
2.3. Conclusion & Perspectives	9
<b>3. Les références</b>	<b>10</b>
<b>4. Définitions et abréviations</b>	<b>10</b>
4.1. Définitions	10
4.2. Abréviations	10
<b>5. Contexte et objectifs</b>	<b>11</b>
5.1. Systèmes SWAC et raison de l'enfouissement des pipelines	11
5.2. Solutions existantes pour enterrer les conduites	11
5.3. Présentation du système auto-ensouilleur	12
<b>6. Spécifications d'essai</b>	<b>14</b>
6.1. Contexte, essais précédents	14
6.2. Échelle du prototype	14
<b>7. Description du prototype</b>	<b>17</b>
7.1. Description générale du prototype	17
7.2. Principe du système d'injection	18
7.3. Description du système d'aspiration de sable	19
7.4. Dimensions	20
<b>8. Assemblage du prototype et conception initiale</b>	<b>23</b>
8.1. Site de test	23
8.2. Préparation de la tranchée	24
8.3. Description et traitement du sable	25
8.4. Remplir la tranchée	27
8.5. Installation de la pompe	28
8.6. Assemblage des modules d'injection	28
8.7. Etabli extérieur	29
8.8. Structure prototype d'assemblage et de manutention	29
8.9. Appareils de manutention	30
8.10. Amorçage de la pompe	31
8.11. Le système	32
8.12. Electronique et commande	33

8.12.1.	Protocole de communication.....	34
8.12.2.	Les interfaces utilisateur .....	35
8.12.3.	Instrumentation .....	38
8.13.	Assemblage électronique sur le prototype.....	46
8.14.	Vue simplifiée du site .....	56
<b>9.</b>	<b>Description des tests et itérations sur le prototype.....</b>	<b>59</b>
9.1.	Deux modules d'injection avec angles de jet, sans le système d'aspiration .....	59
9.1.1.	Descriptif de conception .....	59
9.1.2.	Résultats des tests .....	60
9.2.	2 Modules d'injection avec jets dirigés vers le bas .....	62
9.3.	Injection et circuit d'aspiration avec buse unique .....	63
9.4.	Barre d'injection unique et circuit d'aspiration avec 12 buses .....	66
9.5.	Tube d'aspiration central .....	68
9.6.	L'aquarium et l'air sous pression .....	70
9.7.	Diamètre des buses d'injection .....	76
9.8.	Campagne de test fin 2022 .....	77
9.9.	Campagne d'essais de mars 2023 .....	77
9.9.1.	Activités réalisées.....	77
9.9.2.	Test final et résultats.....	80
<b>10.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>83</b>
10.1.	Première campagne de test et optimisation du prototype .....	83
10.2.	Campagne de mars 2023 et résultats concluants.....	85
10.3.	Suite .....	85
<b>11.</b>	<b>Annexes.....</b>	<b>87</b>
11.1.	Planification (2022) .....	87
11.2.	REX .....	88
11.3.	Équipe de DORIS Engineering et DeProfundis .....	89
11.4.	Première conception du prototype .....	90
11.5.	Conception du prototype .....	92
11.6.	Caractéristiques des conduites rigides .....	93
11.7.	Estimation de la masse linéique du prototype .....	94
11.8.	Calcul de la poussée des jets d'eau sur le prototype.....	94
11.9.	Réservoir de sable et transfert d'eau (non utilisé) .....	98

# 1. Introduction

## 1.1. Description du projet EUROSAC

Le projet EUROSAC est une solution innovante et très efficace de climatisation par eau de mer (SWAC) en eaux peu profondes pour l'espace Manche. Il vise à concevoir et valider une solution innovante, rentable et respectueuse de l'environnement pour la production de froid, utilisant l'eau de mer de la Manche comme fluide frigorigène, grâce à la différence entre la température de l'eau froide de l'océan et la température de l'air ambiant.

Alors que le besoin de refroidissement dans les grandes villes côtières augmente (en raison du changement climatique), le refroidissement est encore principalement produit par des refroidisseurs, une technologie utilisant de grandes quantités d'électricité générée en partie par des combustibles fossiles, ce qui ralentit la capacité à atteindre les objectifs énergie-climat de l'Espace Manche (AC). Le projet EUROSAC entend démontrer la capacité d'utiliser l'eau de mer de la Manche pour le free cooling, en adaptant à la faible profondeur d'eau et au climat tempéré de l'AC, une technologie utilisée dans les zones tropicales.

Basé sur l'expertise complémentaire de 11 partenaires français et britanniques, à la fois académiques et industriels, et sur l'analyse des caractéristiques uniques de la Manche, le projet EUROSAC vise à développer et tester un prototype SWAC au laboratoire de Brixham et à la National Lobster Hatchery au Royaume- Uni. Ce système SWAC basé en eau peu profonde sera le premier à être utilisé pour soutenir l'aquaculture alimentaire, ce qui représentera des avantages majeurs en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>, de durée de vie et de coûts par rapport aux solutions existantes.

Le projet EUROSAC comprendra deux volets Recherche & Développement :

- Un système de conduite rigide auto-ensouilleuse pour les eaux peu profondes et les sections d'atterrissage (où il est nécessaire d'enterrer la canalisation)
- Un système de conduite flexible pour la section offshore (où l'enfouissement du pipeline n'est plus nécessaire)

L'objectif du projet EUROSAC est de minimiser l'investissement nécessaire à l'installation d'un système SWAC, en réduisant à la fois les coûts de matériel et d'installation.

## 1.2. Contexte de T2.3 – Système de conduites rigides auto-ensouilleuses

DORIS Engineering et DeProfundis ont la charge du développement d'un système Sea Water Air Conditioning (SWAC). Dans ce cadre, plusieurs études ont été précédemment réalisées mettant en évidence le coût important des travaux maritimes, nécessaires à l'installation du pipeline SWAC sur le fond marin, avec un impact direct sur les dépenses d'investissement (CAPEX) du système. Une solution prometteuse consiste à utiliser un système de conduites rigides auto-ensouilleuses afin d'éviter la mobilisation de moyens marins dédiés à l'installation du pipeline sous le fond marin, et ainsi réduire significativement le coût des travaux maritimes.

Le système auto-ensouilleur (SBS) est composé de 3 sous-systèmes principaux :

- Sous-système d'injection d'eau à haute pression à utiliser pour fluidifier le sable sous le tuyau rigide afin de pouvoir aspirer le sable.
- Sous-système d'injection d'air à utiliser pour créer des turbulences sous la conduite rigide afin d'améliorer le système d'injection d'eau.
- Sous-système d'aspiration à utiliser pour aspirer l'eau sableuse sous le tuyau rigide.

L'objectif de ce SBS est d'enterrer une conduite rigide à utiliser pour transporter l'eau de mer froide de l'offshore à l'onshore pour la production de froid.

Il convient de souligner que ce concept SBS a déjà été testé avec un prototype à petite échelle dans un aquarium mais n'a jamais été testé avec un prototype à grande échelle.

L'objectif de DORIS Engineering et DeProfundis est de concevoir et construire un prototype à plus grande échelle (18m de long) et de le tester en tranchée dans des conditions les plus proches des fonds marins, afin de confirmer les résultats prometteurs observés.

L'objectif principal de cette étude de R&D est de démontrer que le Système Auto-Ensouilleur (SBS), décrit ci-dessus, sera capable d'effectuer l'enfouissement de la conduite rigide SWAC.

## 1.3. Objet de ce document

Le but de ce document est de présenter les spécifications et la conception de la conduite SWAC avec son SBS et de décrire les tests effectués jusqu'à présent pour démontrer la faisabilité d'enfouir une conduite rigide SWAC sous un fond sablonneux en utilisant uniquement le SBS tel que défini ci-dessus.

Ce document est le livrable de DORIS Engineering et DeProfundis dans le cadre de la tâche 2.3 du projet EUROSAC.

Le document comprend les sections suivantes :

- [Contexte et objectifs](#)
- [Résumé et conclusions](#)
- [Spécifications d'essai](#)
- [Description du prototype](#)
- [Assemblage du prototype et conception initiale](#)

- [Description des tests et itérations sur le prototype](#)
- [Conclusion](#)
- [Retour d'expérience \(REX\)](#)

## 2. Résumé et conclusions

### 2.1. Description du prototype et objectifs des tests

Le prototype est composé de :

- Une conduite rigide de 110mm de diamètre et 18m de longueur
- Le système auto-ensouilleur (SBS) constitué d'un sous-système d'injection d'eau/air (tubes bleus) et d'un sous-système d'aspiration (tube gris), ainsi que leurs pompes et vannes dédiées

Ce prototype a été testé dans une tranchée de 20m de long, remplie de sable et d'eau afin d'être au plus proche des conditions réelles des fonds marins.

L'objectif des tests est de démontrer que le SBS est capable d'effectuer l'enfouissement du tuyau rigide SWAC de 110 mm sous le sable.

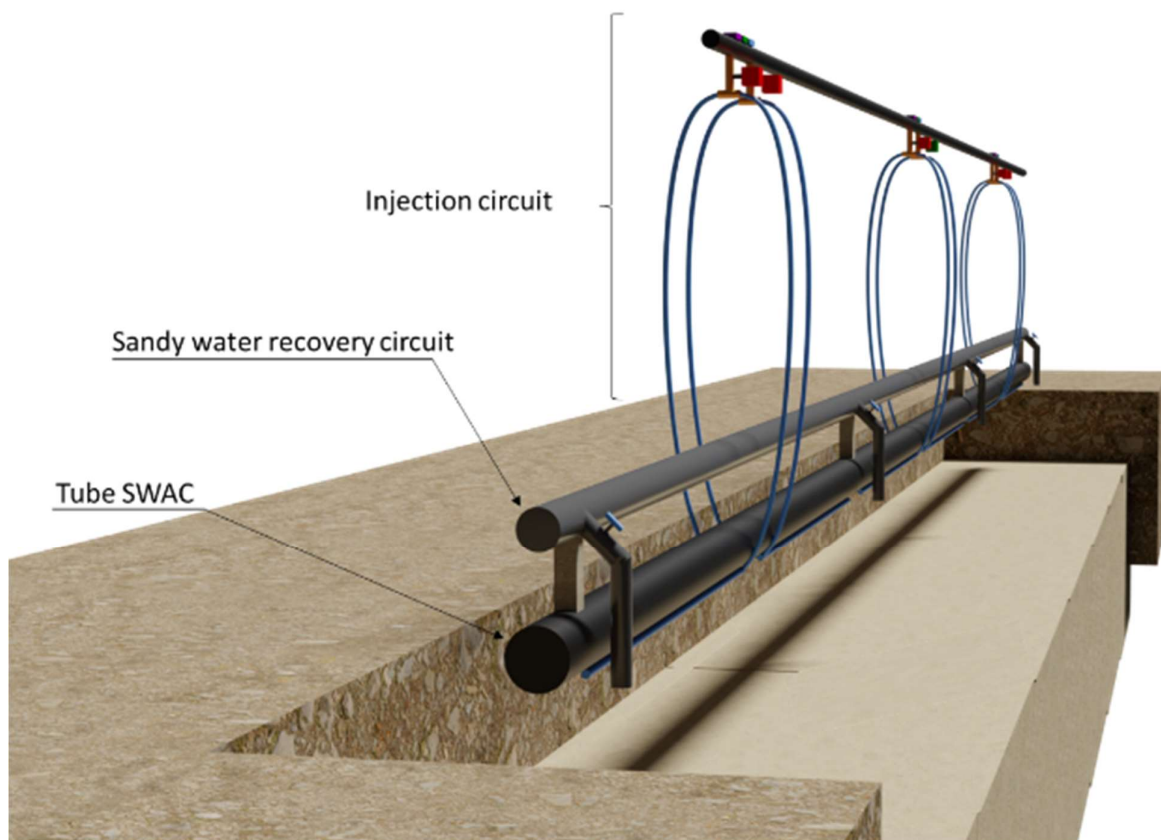


Figure 1 : Schéma du prototype

La photo suivante présente une vue d'ensemble du site où le prototype a été testé. Pour les besoins des tests, une tranchée de 1 m de profondeur et 0,80 m de largeur a été creusée à proximité d'une petite rivière pour y pomper de l'eau. Cette tranchée a été remplie de sable jusqu'à 60 cm de profondeur et le prototype y a été posé.

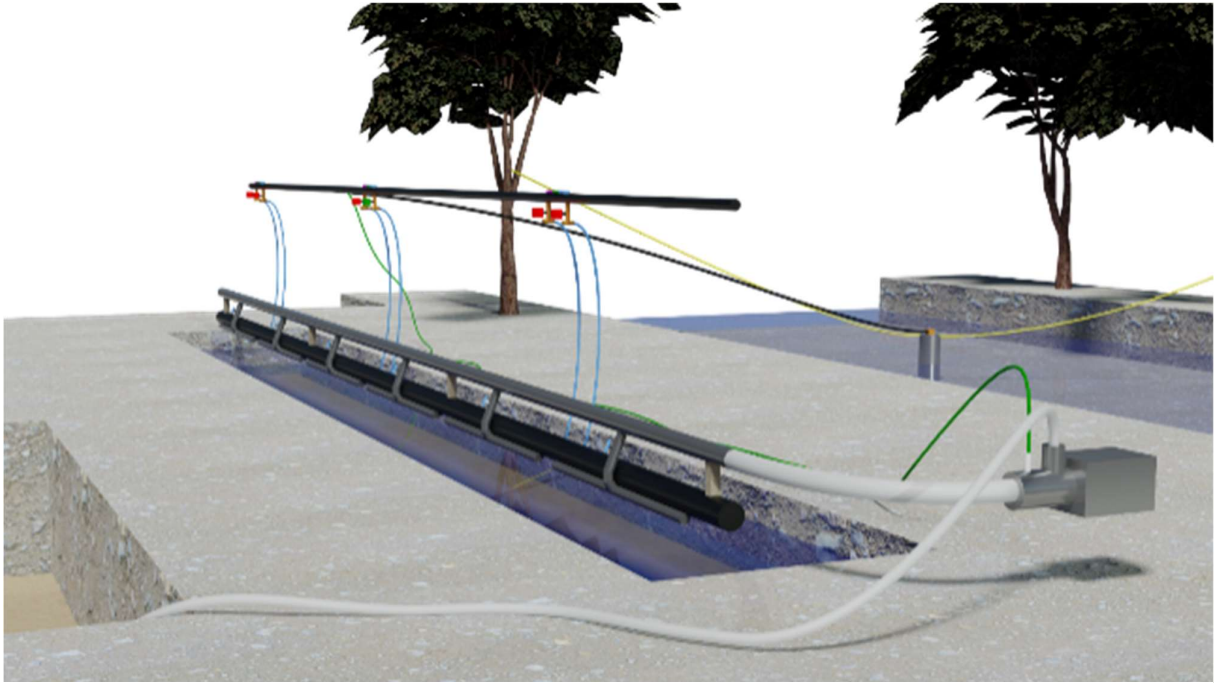


Figure 2 : vue simplifiée du site de tests

## 2.2. Tests et résultats

Le prototype a été assemblé durant l'été 2022, testé à l'automne 2022 et un test final a été réalisé en mars 2023.

Plusieurs tests ont été effectués afin d'évaluer les hypothèses et d'améliorer le SBS.

Les principaux résultats des tests de l'automne 2022 sont les suivants :

- Le tuyau rigide s'enfonce dans le sable de la tranchée d'environ un diamètre (110mm) sur une longueur de 3m.
- Pour atteindre cette performance, les spécifications du SBS sont :
  - Pour le système de jet d'eau :
    - Trous d'un diamètre optimal de 3 mm
    - Trous situés sous le tube SWAC, toujours dirigés perpendiculairement au sable
    - Les trous doivent être espacés au minimum pour permettre une pression de jet uniforme de 12 trous par mètre.
  - Pour le système d'aspiration de sable :
    - Plusieurs petites buses uniformément réparties
    - Buses d'un diamètre de 20 mm
    - Buses d'aspiration à placer devant les trous de projection d'eau
    - Vannes d'aspiration situées au milieu du système d'aspiration





Les tests effectués en mars 2023 avec le prototype assemblé et optimisé ont permis de conclure que:

- Le système d'aspiration était opérationnel.
- Le système d'aspiration du sable était nécessaire mais était aussi le point faible du modèle car la pompe d'aspiration était gérée « à vue ».
- Le sable est bien liquéfié par les injecteurs, broyé par l'injection d'air comprimé, puis aspiré correctement.
- L'enlèvement du sable entraîne l'enfoncement du tuyau.

## 2.3. Conclusion & Perspectives

La principale conclusion que nous pouvons tirer des tests effectués jusqu'à présent est que le système auto-ensouilleur (SBS) est capable d'effectuer l'enfouissement du tuyau rigide SWAC de 110 mm. Il s'agit d'une performance exceptionnelle qui signifie que la conduite SWAC, en conditions réelles, peut être installée sous le fond marin sans avoir besoin de moyens tels que les navires d'installation coûteux habituellement utilisés. Une comparaison préliminaire des estimations de coûts a conclu que le coût d'installation du SWAC pourrait être divisé par 10 avec un système auto-ensouilleur.

Néanmoins, malgré cette conclusion prometteuse, des tests supplémentaires seraient nécessaires pour optimiser le prototype :

- Remplacer le collecteur d'aspiration rigide par un flexible ondulé afin d'augmenter la flexibilité du système et ainsi faciliter l'enfouissement par tronçons (et réduire les itérations)
- Installer une fenêtre (= tuyau transparent) dans le circuit d'aspiration du sable pour juger de la quantité de sable dans l'eau
- Réduire les pertes de charge dans le circuit d'aspiration
- Test avec une seule pompe afin d'évaluer le potentiel d'optimisation

Une campagne d'essais est prévue durant l'été 2023 et sera réalisée à cet effet (hors périmètre du projet Euroswac).

L'extrapolation à un environnement offshore nécessitera des mesures spécifiques telles que :

- L'adaptation des matériaux
- Des raccords soudés pour éviter les fuites
- Une optimisation du mode de pilotage des vannes pour isoler les sections de travail.

## 3. Les références

N°	Numéro de document	Titre
<i>Réf. 1</i>	pas encore de numéro	Estimation du cout du SBS - pas encore publié

## 4. Définitions et abréviations

### 4.1. Définitions

N / A

### 4.2. Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées dans ce document :

CA	:	Espace Manche
CAPEX	:	Dépenses d'investissement (CAPital Expenditures)
PEHD	:	Polyéthylène de haute densité
ID	:	Diamètre intérieur
SBS	:	Self-Burrying System (Système d'auto-ensouillement)
SWAC	:	Climatisation à l'eau de mer

## 5. Contexte et objectifs

### 5.1. Systèmes SWAC et raison de l'enfouissement des pipelines

Le principe du SWAC est de pomper de l'eau froide par des conduites sous-marines pouvant atteindre plusieurs kilomètres de long, pour la ramener à terre et alimenter des échangeurs thermiques. Lors de son transport, l'eau pompée est réchauffée de quelques degrés.

Arrivant en eaux peu profondes, ces conduites sont soumises à de multiples contraintes et risques :

- Contrainte thermique : l'eau peu profonde plus chaude contribue au réchauffement de l'eau froide pompée
- Contraintes mécaniques dues aux houles et aux courants
- Risques de dommages dus aux activités humaines côtières telles que la pêche

L'enfouissement du tuyau est obligatoire pour minimiser ces risques.

### 5.2. Solutions existantes pour enterrer les conduites

Le pipe-jetting est un moyen couramment utilisé pour enterrer les pipelines depuis années 1970. Il consiste à creuser une tranchée avec des jets sous pression. Traditionnellement, cette méthode consiste à pulvériser de l'eau sous pression sur/dans le sable. Comme illustré ci-dessous, le jet d'eau sous pression fluidifie le sable et le transporte. Cela va créer un soulèvement du sable ainsi qu'un dépôt. Le navire fait des allers-retours et creuse progressivement la tranchée.

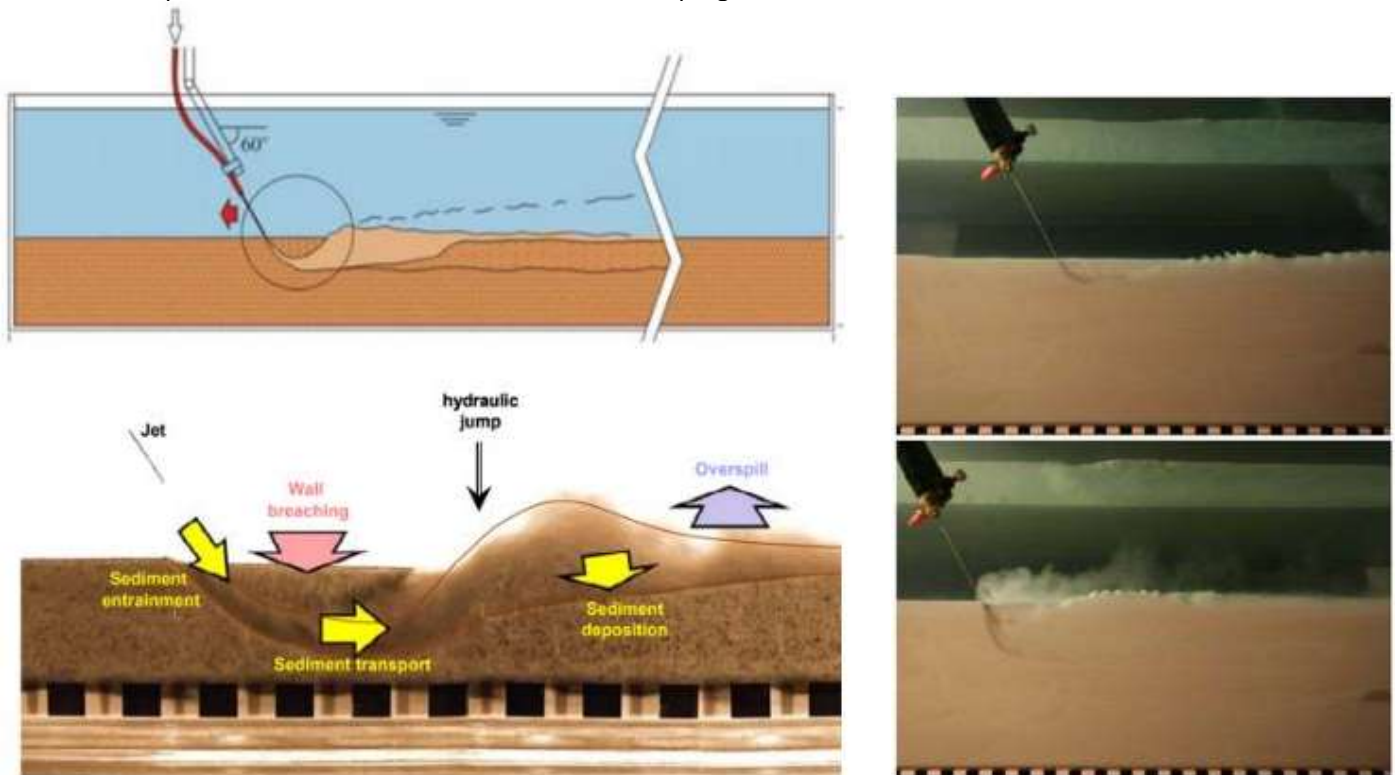


Figure 3 : Schéma et essais en bassin du comportement du sable fluidisé par un jet d'eau sous pression

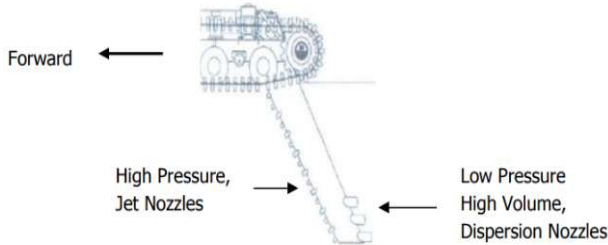
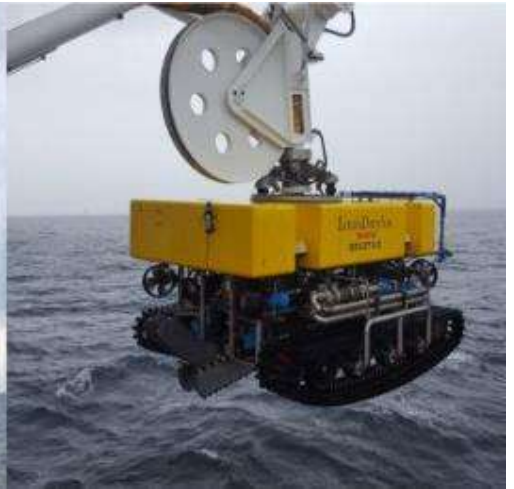
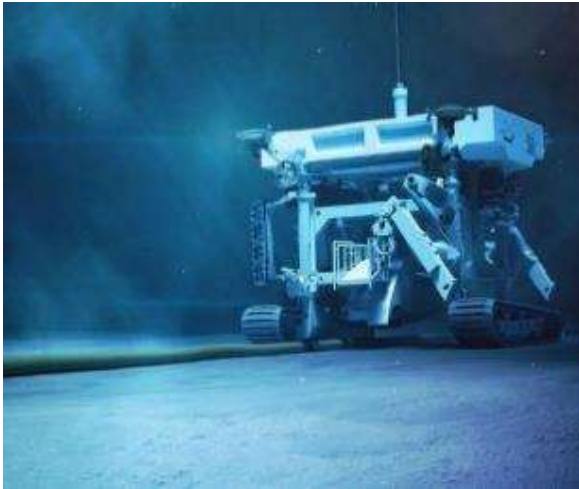


Figure 3.2: Jet swords

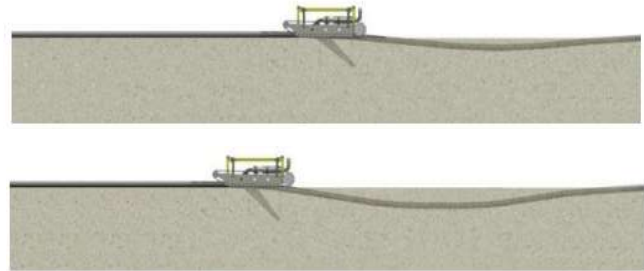


Figure 4 : photos du ROV et schémas explicatifs du principe d'enfouissement

Des véhicules sous-marins dédiés étaient basés sur ce processus. Ces engins se déplacent sous l'eau à l'aide de chenilles et sont toujours reliés au bateau par câble. Ils fluidifient le sable sur lequel le tuyau est posé. Le tuyau s'enfonce dans le sable fluidisé et est enterré.

Cette méthode d'enfouissement des conduites est très coûteuse car elle nécessite l'emploi du ou des ROV, du bateau et des opérateurs spécifiques.

### 5.3. Présentation du système auto-ensouilleur

Le système auto-ensouilleur est fixé à la conduite SWAC et est composé de :

- Deux circuits d'eau sous pression placés directement sous la conduite (bleues sur le croquis ci-dessous) à joindre sur toute sa longueur. Ces deux circuits sont des conduites percées de petits trous à intervalles réguliers qui serviront à projeter de l'eau (et/ou de l'air) sous pression sous le sable pour creuser une tranchée.

- Le système d'aspiration ( en jaune ) pompe l'eau sableuse générée par les jets d'eau dans la tranchée. L'eau sableuse est évacuée vers un réservoir creusé en eau peu profonde pour éviter de perturber la biodiversité en soulevant trop de particules fines dans l'eau.

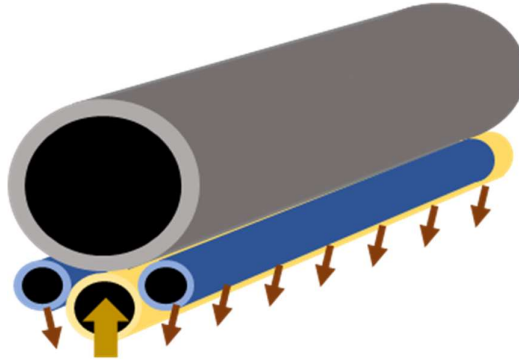


Figure 5 : Schéma de principe de l'injection d'eau sous pression (bleu) et de l'aspiration d'eau sableuse (jaune) sous la conduite SWAC

Ce système vise à enterrer le tube SWAC par tronçons de 10 mètres, grâce à la flexibilité de la conduite SWAC.

Une partie des systèmes d'injection et d'aspiration sera enterrée avec la conduite et donc laissée en place après enfouissement tandis que l'autre partie sera récupérée pour être réutilisée pour d'autres projets :

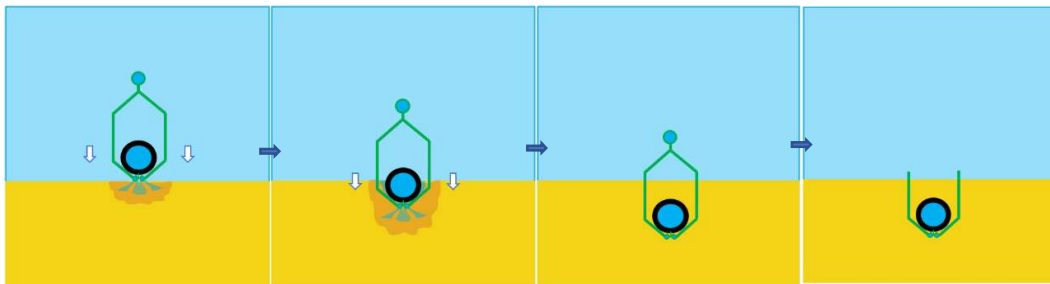


Figure 6 : Coupe transversale de la conduite SWAC dans le sable

D'après une précédente étude, le coût des moyens maritimes représente près de la moitié des CAPEX SWAC, et l'utilisation d'un système auto-ensouilleur pourrait permettre d'économiser une grande partie des CAPEX totaux (voir document dédié à l'estimation des coûts). Cette réduction de CAPEX est liée à l'utilisation d'un système simple piloté à terre au lieu de moyens spécifiques coûteux.

## 6. Spécifications d'essai

L'objectif de ce projet est de concevoir, construire et tester un prototype à échelle réduite qui démontrerait l'efficacité du système d'auto-ensouillage.

### 6.1. Contexte, essais précédents

Un premier prototype à l'échelle 1/27ème (tuyau de 20mm de diamètre) a été réalisé et testé par DeProfundis en 2017 dans un aquarium. Le résultat a été concluant, le tuyau s'enfonce dans le sable de l'aquarium.



Figure 8 : Photos des essais du premier prototype testé 5 ans plus tôt

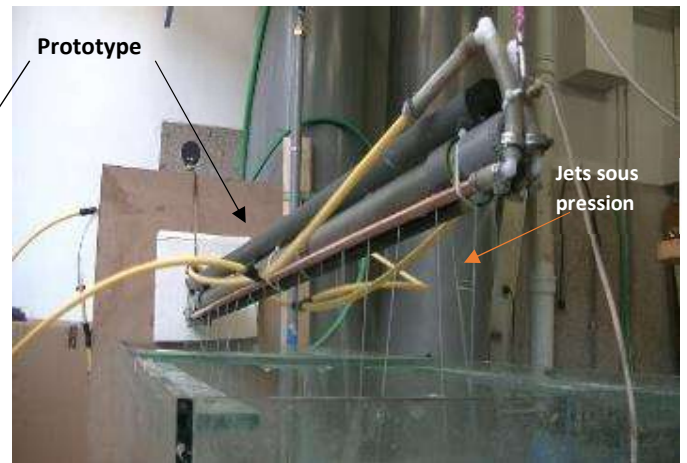


Figure 7 : Photos des essais du premier prototype testé 5 ans plus tôt

### 6.2. Échelle du prototype

Le prototype utilisé pour EUROSAC est à l'échelle 1/5 : SDR 11 de diamètre 110 mm, 18 mètres de long et testé dans une tranchée de 20 mètres de long, 1 mètre de profondeur et 70 cm de large. Le diamètre et le SDR du tube ont été choisis :

- pour s'assurer que la flexibilité du tube est suffisante pour un ensablement par section.

- pour s'adapter aux dimensions du site d'essai sur lequel la tranchée sera creusée

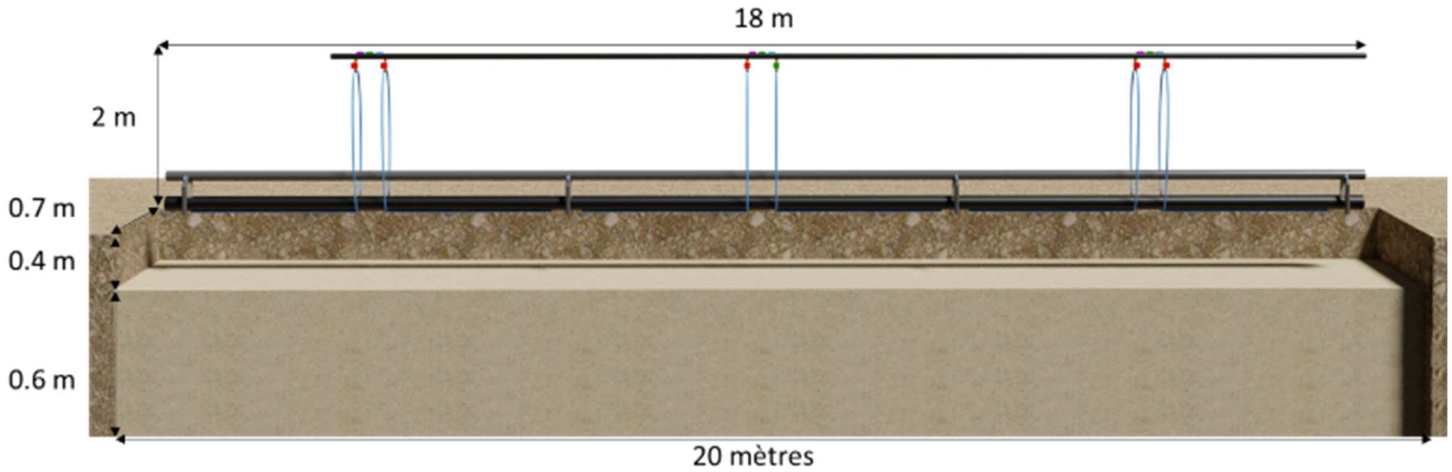


Figure 9 : Schéma de la tranchée

La flexibilité du tube choisi assurera l'ensablement de la conduite par longueur de tronçon de 6m comme indiqué sur les croquis suivants :

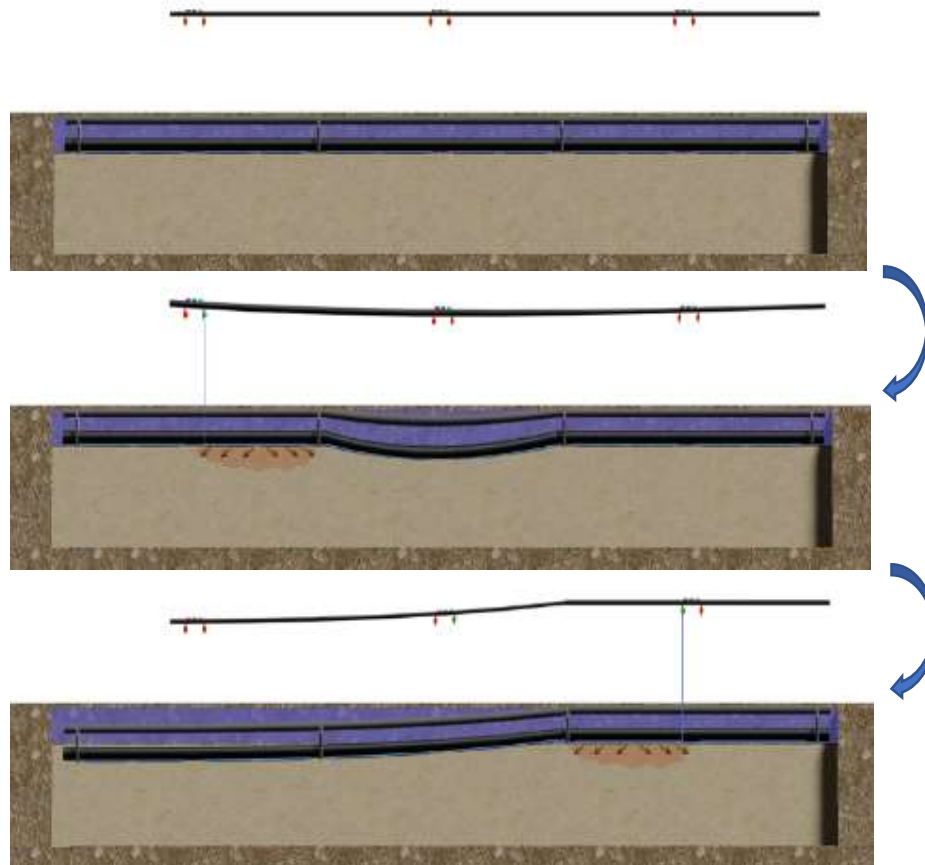


Figure 10 : Schema de l'auto-ensouillage

Une analyse préliminaire réalisée avec RDM7 a confirmé la flexibilité du tube avec une déflexion de 195 mm pour une longueur de section de 6 m.

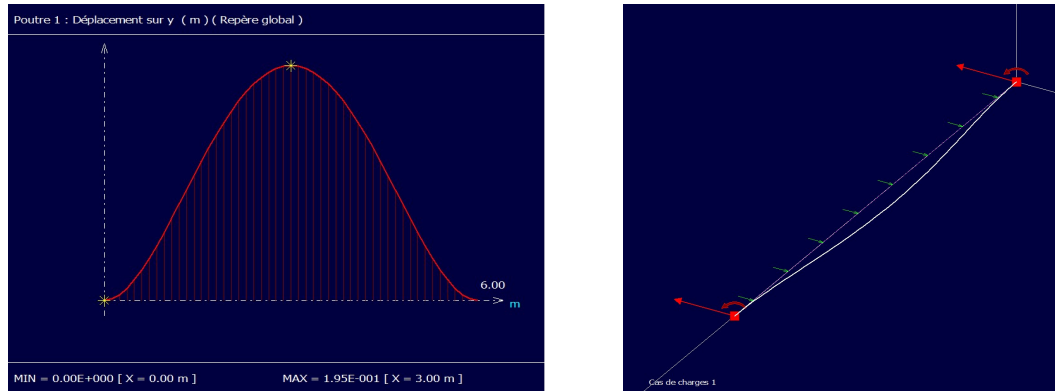


Figure 11: Simulation RDM7 de la flexion du tube SWAC - incluant la masse apparente du ballast

En incluant le lest, la masse apparente de la conduite immergée est de 14,46 kg/m.



## 7. Description du prototype

### 7.1. Description générale du prototype

Le prototype sera équipé de deux circuits comme indiqué sur la figure ci-dessous :

- Le circuit d'injection (tuyaux bleus) est chargé d'injecter de l'eau sous la conduite et ainsi de fluidifier le sable. Il conduit l'eau sous pression sous le tube dans les modules d'injection. L'injection d'air est également réalisée par ce circuit.
- Le deuxième circuit est le circuit de récupération de ce sable fluidisé. Il permettra d'évacuer l'eau sableuse sous la conduite SWAC et ainsi d'accélérer son envasement.

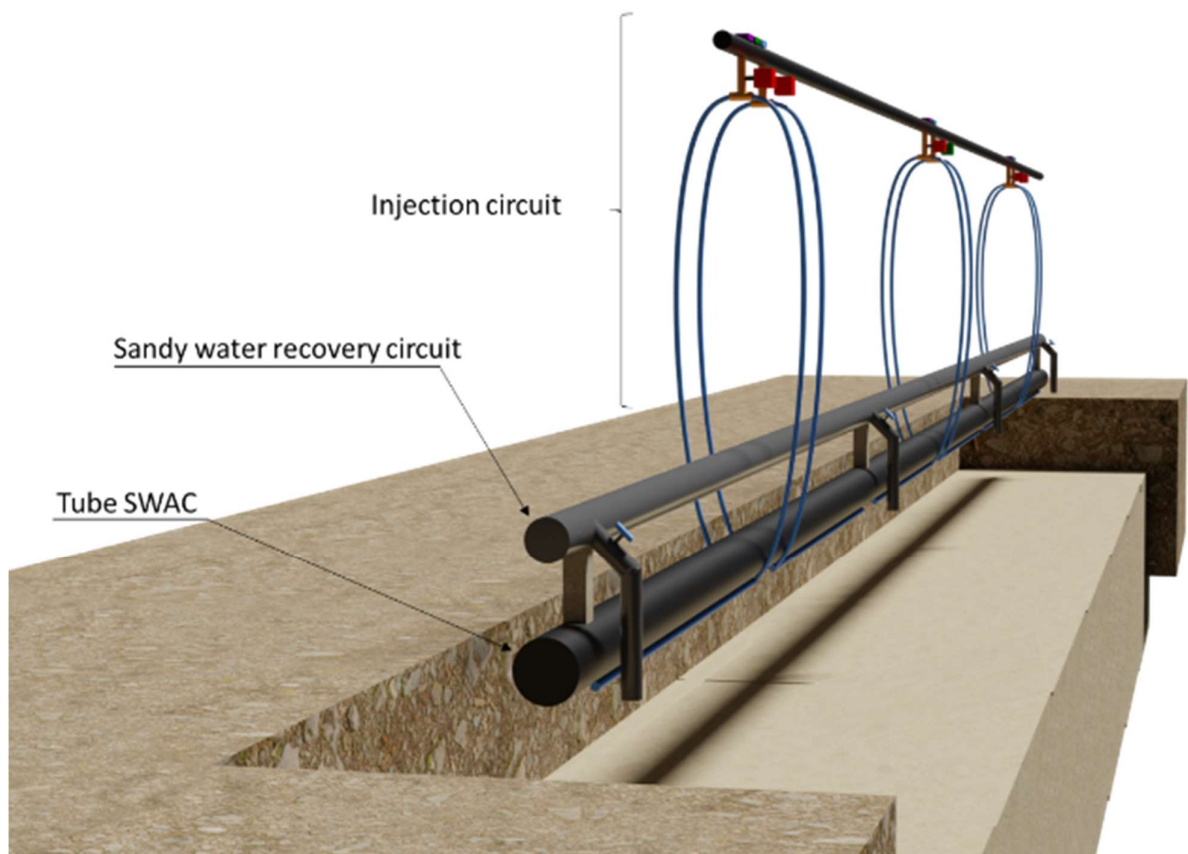


Figure 12 : vue en perspective du prototype

Comme le montre le schéma ci-dessus, des vannes motorisées et manuelles permettent de contrôler les 3 sections du prototype. Elles permettent de sélectionner une tranchée de 3 mètres de long pour y projeter de l'eau sous pression et aspirer l'eau sableuse générée.

## 7.2. Principe du système d'injection

Le circuit d'injection en bleu est alimenté par une pompe reliée à une source d'eau. L'eau passe par le tuyau principal (noir), appelé "Manifold" (ou collecteur), et est distribuée à chacun des "modules d'injection" à travers les "diviseurs". Un "module d'injection" est composé d'un "tuyau", d'un coude en laiton, et de la "barre" dans laquelle sont percés les trous par lesquels sortiront les jets d'eau sous pression (diamètre : 2mm). Chaque barre mesure 2,5 mètres.

La cornière marron est en acier, elle sert à fixer les barres la conduite SWAC mais également à lester l'ensemble du prototype.

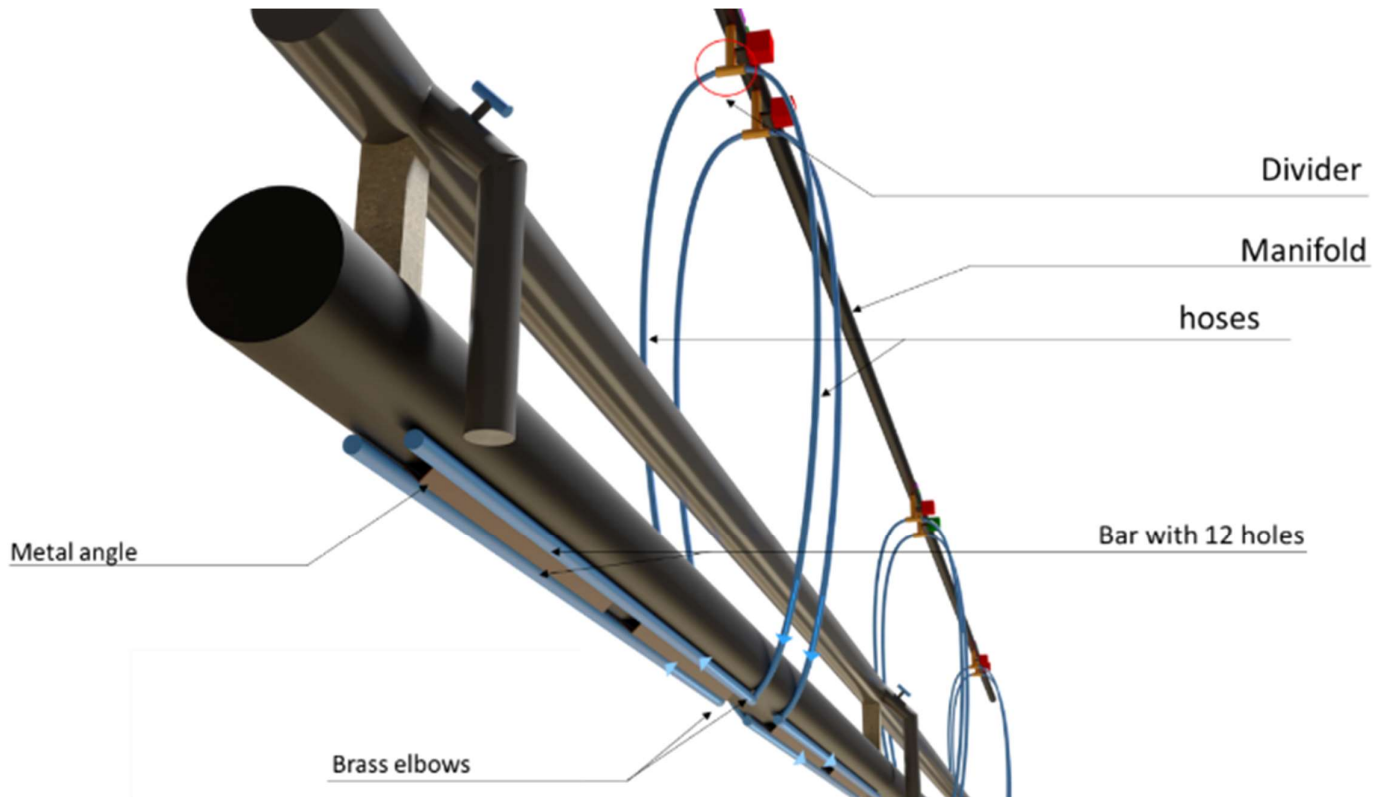


Figure 13 : System d'injection

En première approche, et sur la base de l'expérience de DeProfundis, 12 trous sont utilisés pour chaque barre.

### 7.3. Description du système d'aspiration de sable

Le système d'aspiration de sable, en gris, est alimenté par une pompe centrifuge en aval. L'eau sableuse passe par les tuyaux d'aspiration, puis par le tube principal, par la pompe et est éjectée dans le réceptacle à sable. La pompe centrifuge n'est pas auto-amorçante de sorte que le circuit amont doit être rempli d'eau pour le bon fonctionnement de l'aspiration.

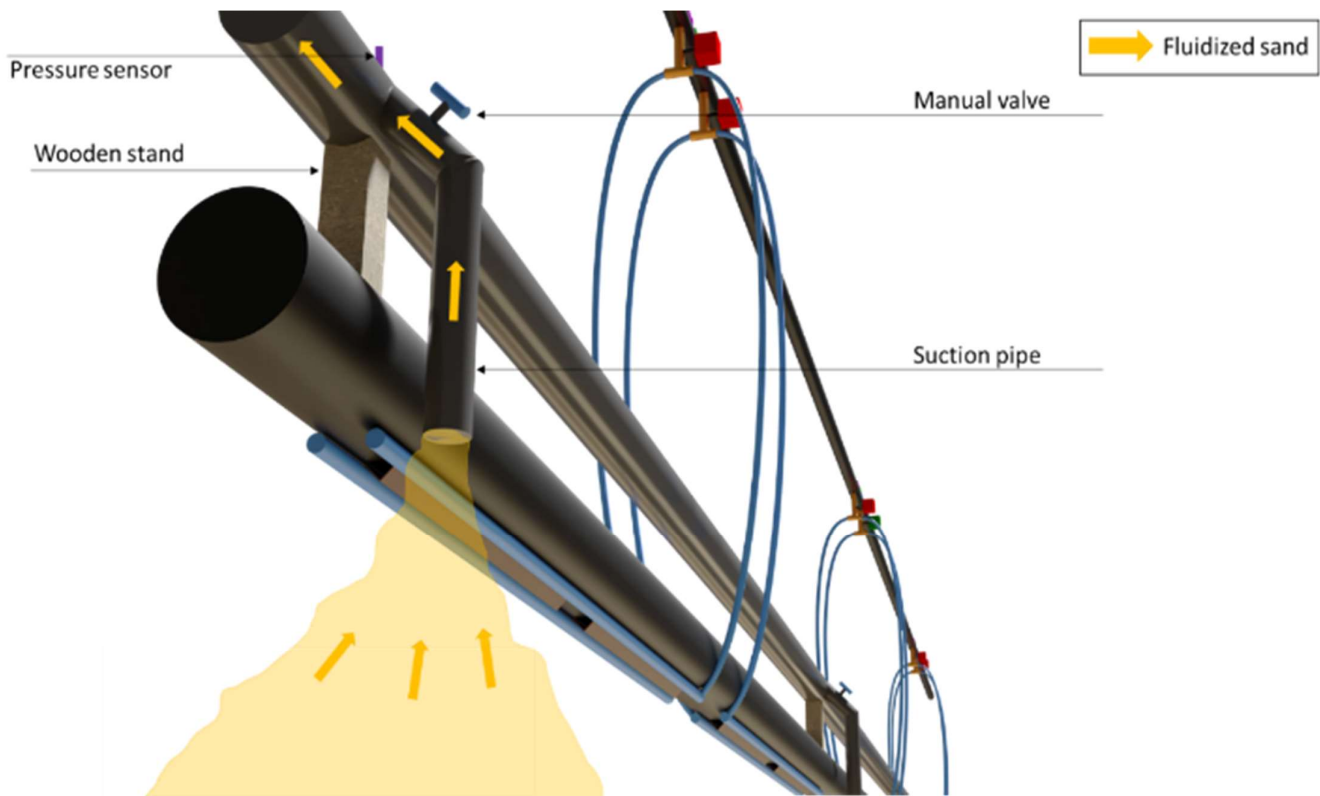


Figure 14 : Système d'aspiration du sable

Chaque tuyau d'aspiration (4 au total) est équipé d'une vanne manuelle pour contrôler la localisation de l'aspiration, qui dépend de la localisation de l'injection d'eau sous pression.

## 7.4. Dimensions

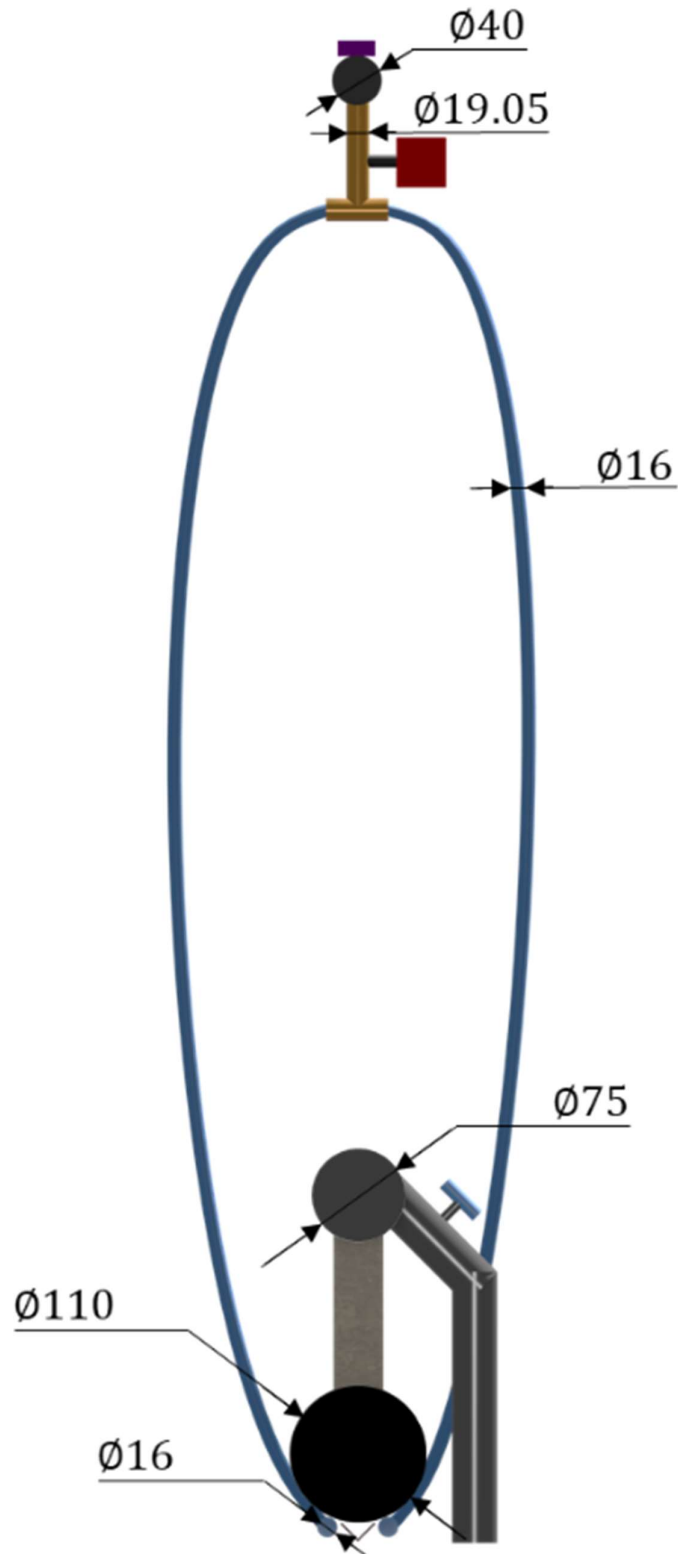


Figure 15: Dimensions du prototype (mm)



Systèmes	Composants	Matériel	Dimensions	Fixations	Quantités	Les références
<b>Système SWAC</b>	Conduite SWAC	PEHD	DN110 SDR11 Longueur : 6 mètres	Connecteur plastique soudure par résistance	3	
<b>Système d'injection</b>	Manifold (collecteur)	PEHD	Longueur DN40 : 3 mètres	Joint	6	
	Connecteur (Manifold)	Plastique / caoutchouc	DN40		6	
	Diviseur	Laiton	Diviseur M3/4 Raccord mariée folle F3/4 vers tube souple DN16 Raccord droit M1 vers F3/4 Raccord droit F3/4 vers M3/8 Raccord F3/8 vers trou	Téflon + Joint	6	
	Tuyau	PER	Longueur DN16 : 2 mètres	Sertissage sur connecteurs laiton	12	
	Bar	PER	Longueur DN16 : 2,5 mètres	Sertissage sur connecteurs laiton	12	
	Coude	Laiton	M1/2 vers tube souple DN16	Sertissage sur connecteurs laiton Téflon + Joint	12	
	Bouchons	Laiton	M1/2 vers tube souple DN16	Sertissage sur connecteurs laiton Téflon + Joint	12	
	Équerre en métal	Acier	60x8 - longueur : 1 mètre	Vis	24	
	Vanne motorisée	Moteur électrique	12V FF3/4	Circuit hydraulique Téflon	6	
<b>Système d'aspiration</b>	Tube principal	PVC renforcé	DN75 - Longueur : 3 mètres	Colle PVC	6	
	Valve manuelle	Plastique	DN63	Vis + Joint	4	
	Tuyau d'aspiration 63	PVC renforcé	DN63	Colle PVC	4	
	Support en bois	Bois	20 cm avec 2 arcs concaves (80 et 110)	Vis	7	

## 8. Assemblage du prototype et conception initiale

### 8.1. Site de test

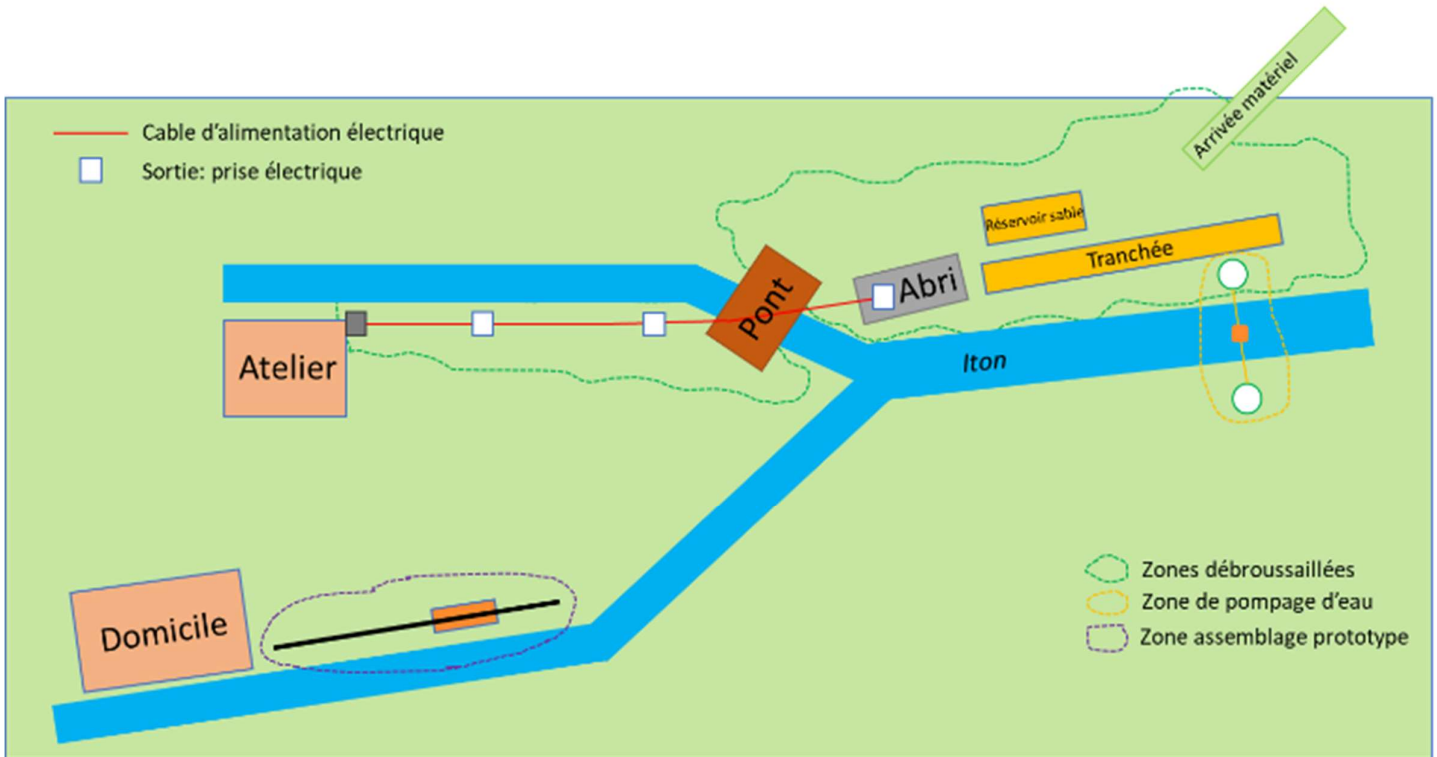


Figure 17 : Moulin du Sacq – Plan du site de tests

Le plan ci-dessus montre l'organisation du site d'essais en Normandie. La tranchée pour les tests mesure 20 mètres de long, 70 cm de large et 1 m de profondeur. 8 m<sup>3</sup> de sable ont été répartis dans la tranchée, soit une épaisseur de sable d'environ 60 cm.

Le réservoir de sable à côté de la tranchée devait servir au stockage du sable pompé par le circuit de récupération mais n'a finalement pas été utilisé (voir [section 10.3](#)). Une connexion entre le réservoir de sable et la tranchée a été installée pour équilibrer le niveau d'eau des deux réservoirs.

## 8.2. Préparation de la tranchée

Le creusement de la tranchée et du réservoir a duré 2 semaines en raison du choix initial d'une machine non optimale. Une trancheuse thermique a été louée la première semaine pour scier les bords de la tranchée afin de faciliter le creusement à la pelle. Malheureusement, le sol normand est rempli de silex. L'utilisation de la trancheuse thermique a finalement été abandonnée. La pelle a été louée la semaine suivante.



Figure 18 : Photos de la préparation de la tranchée et du réservoir

Une protection en mousse et une bâche plastique ont été installées au fond de la tranchée. Cette protection a pour but d'éviter que la bâche ne soit percée par le poids du mélange sable/eau/prototype. La bâche maintient la tranchée suffisamment étanche pour effectuer les tests.

La tranchée est installée le long de la rivière à 2 mètres de celle-ci. Un contact poreux entre les deux a été suspecté, mais aucune migration d'eau n'a été observée une fois la tranchée creusée.





Figure 21 : Installation de la mousse de protection dans la tranchée



Figure 20: Pose de la bâche dans la tranchée

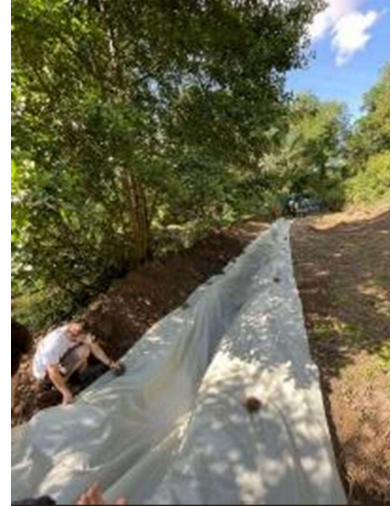


Figure 19 : Pose de la bâche dans la cuve et rendu final

### 8.3. Description et traitement du sable

Le sable utilisé contient des particules très fines qui troublent l'eau et limitent la visibilité sur le prototype lors des essais. Il a donc été décidé de "laver" le sable. Un flocculant écologique chargé de rendre l'eau plus transparente a été ajouté au sable. Il se crée des précipités dans l'eau contenant ces particules, il ne reste plus qu'à les ramasser avec une époussette. Cependant, pour faire ressortir ces particules, il a fallu remuer le sable au préalable.

Un système a été développé à cet effet :

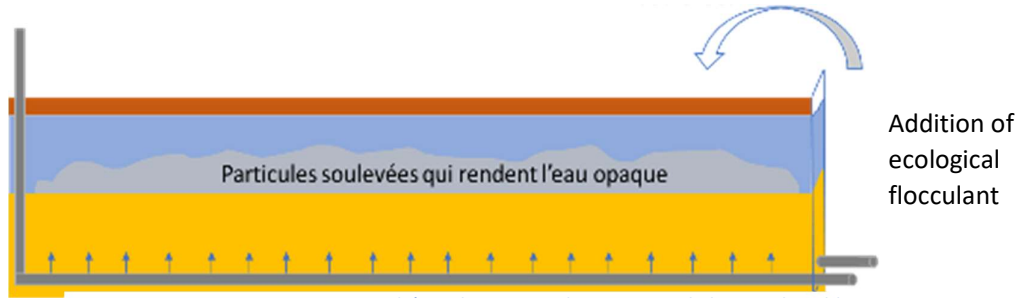


Figure 22 : Schéma de principe du processus de lavage du sable

Deux tubes PVC perforés (trous vers le haut) ont été installés dans la tranchée. Ils ont été utilisés pour injecter de l'eau sous le sable. L'eau a ainsi soulevé les particules de tout le sable contenu dans la tranchée.

La réalisation des tubes percés et des raccords a été assez rapide. Le joint PVC-PVC nécessite l'utilisation d'une colle spéciale et le ponçage des extrémités pour permettre une meilleure adhérence de la colle.



Figure 23 : Perçage de trous d'injection, collage de raccords PVC et enduit.

## 8.4. Remplir la tranchée

Nous avons rempli la tranchée avec du sable fraîchement acheté.

La bâche n'est pas assez large à certains endroits de la tranchée (plis inaccessibles sous le sable). Elle retombe donc dans la tranchée et l'eau se déverse à l'extérieur, entre les bords en terre et la bâche. Pour y remédier, des planches de bois sont installées pour maintenir les extrémités de la bâche sur toute sa longueur. Elles sont ensuite évacuées à l'aide de cordes.



Figure 24 : Remplissage de la tranchée

## 8.5. Installation de la pompe

La pompe est installée dans l'eau grâce à deux cordes : la première corde (bleue) a été attachée à deux arbres en hauteur pour suspendre un mousqueton qui servira de poulie. Une seconde corde (jaune) permet de régler la hauteur d'immersion depuis la berge.



Figure 25 : Installation de la pompe dans la rivière

## 8.6. Assemblage des modules d'injection

Les modules d'injection ont été assemblés en atelier.



Pose du coude



Pose du bouchon



Perçage des trous d'injection selon des orientations particulières

• Pose des raccords en laiton :  
Un coude d'un côté et un bouchon de l'autre

Figure 26: Plomberie

Le raccord en laiton comporte deux parties, le corps et l'anneau. L'anneau viendra serrer le tuyau PER sur le corps.

## 8.7. Etabli extérieur



Figure 27: Construction de l'établi

Un établi extérieur a été construit pour l'assemblage des prototypes et autres opérations impossibles à réaliser à l'intérieur pour des questions de propreté ou de risques sanitaires (assemblage de PVC avec de la colle toxique, des revêtements chimiques, etc.). L'établi a été réalisé en béton armé de parpaings avec une plate-forme en bois.

## 8.8. Structure prototype d'assemblage et de manutention

L'assemblage du prototype a commencé début juillet. Les modules d'injection ainsi que la cornière ont été montés sur la conduite SWAC.



Figure 28 : Photos de la pose des cornières et des barres sur la conduite SWAC

Comme le montrent ces images, la cornière est divisée en sections de 1,5 m de long. L'objectif est d'installer des capteurs de force sous chacun d'eux pour déterminer si le prototype touche le sable lors des essais. Voir la [section 8.9](#).

## 8.9. Appareils de manutention

Le prototype pesant 445 kg, plusieurs appareils de manutention doivent être construits. Un système de treillis est nécessaire pour installer le prototype dans la tranchée et pour le retirer. Une structure métallique a été conçue pour maintenir le tout ensemble. Elle est composée de 4 supports répartis sur les 18 m.



Figure 29 : Structure de manutention

La structure de manutention est constituée de barres d'acier (traitées antirouille) et de connecteurs. Ils forment quatre tripodes répartis sur la longueur du prototype. Trois cornières en acier de quatre mètres sont placées sur les trépieds. Ces structures sont utilisées pour connecter les systèmes électroniques, fixation pour collecteur, structure pour soulever le prototype à l'aide de poulies.

## 8.10. Amorçage de la pompe

La pompe est amorcée avec le tuyau vert comme indiqué sur la photo.



Figure 30 : Pompe d'aspiration

La pompe d'injection en rivière sert à remplir le circuit d'aspiration amont. Le débit qui est normalement dirigé vers le collecteur (en noir) est dévié à l'aide de 2 vannes et est injecté à l'entrée de la pompe d'aspiration. Les vannes manuelles du circuit d'aspiration sont toutes fermées pour remplir entièrement le circuit amont. Lorsque l'eau commence à être évacuée vers l'aval, la pompe d'aspiration est mise en marche et l'expérimentation peut commencer.

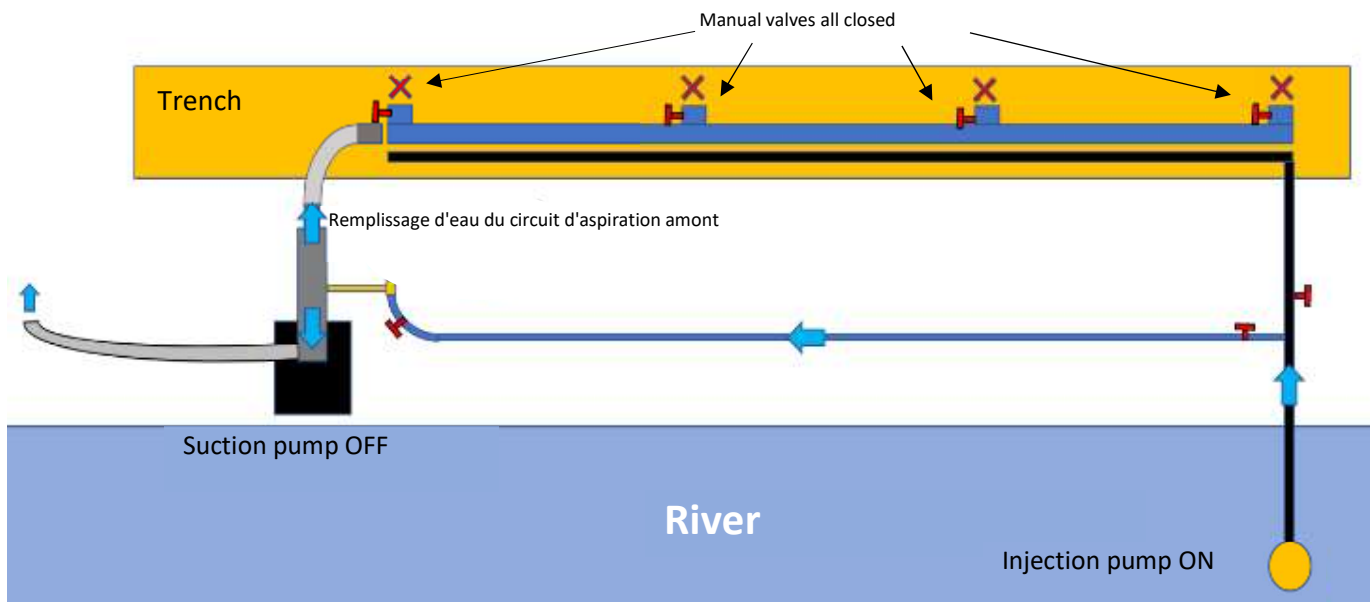
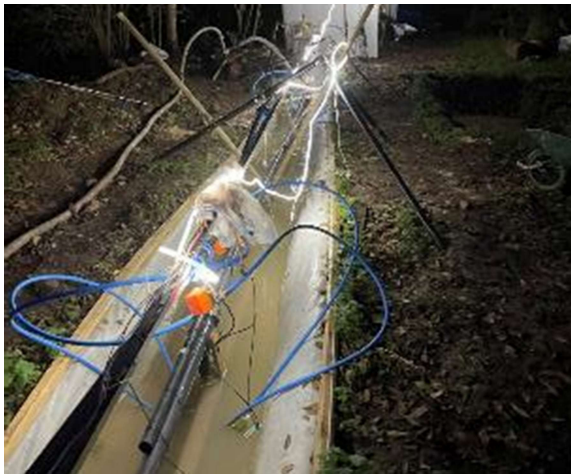


Figure 31 : Schéma de la méthode d'amorçage de la pompe

## 8.11. Le système



Comme les jours raccourcissent en novembre, une guirlande en LED a été installée

Figure 32 : Photos du système



## 8.12. Electronique et commande

L'électronique tient une place importante dans le projet, non seulement pour le contrôle des différents éléments décrits ci-dessous mais également pour l'acquisition de nombreuses données mesurées. Les capteurs et actionneurs du prototype sont connectés à une interface de contrôle et de visualisation sur Excel. L'objectif est d'avoir une interface claire et intuitive décrivant l'état du prototype, avec des boutons on/off pour les vannes motorisées et des tableaux de visualisation en temps réel de l'ensablement.

Il existe plus d'une centaine de composants électroniques de 9 types différents.

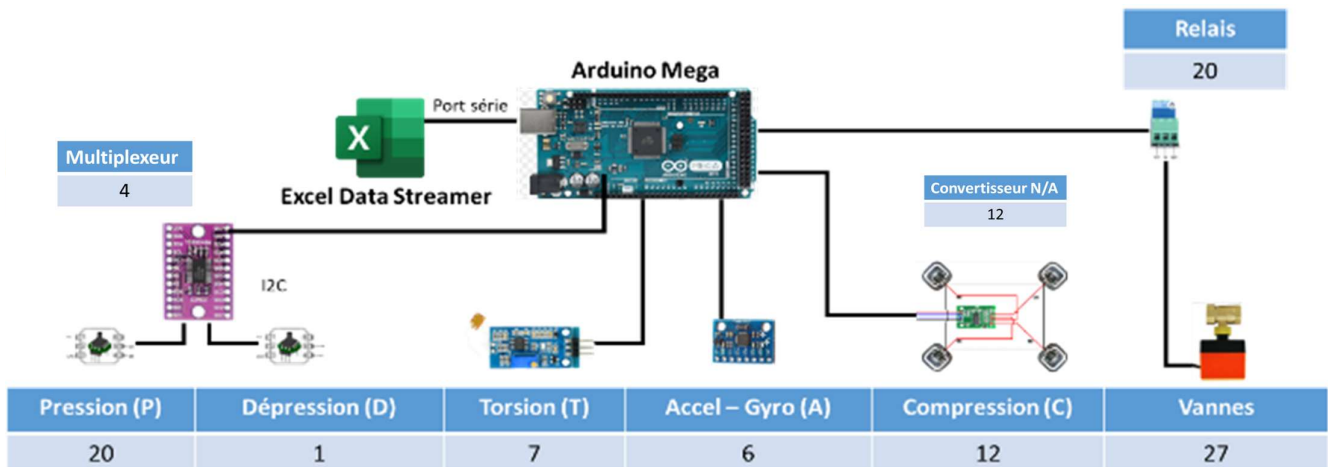


Figure 33 : Récapitulatif des composants électriques du prototype

Les différents capteurs permettent de suivre l'ensablement du prototype et de vérifier les hypothèses formulées dans la partie modélisation hydraulique. Parmi ces types de capteurs :

- (P) et (D) Le capteur de pression (et de dépression) relative des modules d'injection et d'aspiration
- (A) Accéléromètre et gyromètre pour le suivi du déplacement du tuyau
- (C) Le capteur de force sous le tuyau pour suivre les interactions avec le sol
- (T) Une jauge de contrainte destinée à refléter le débit du mélange eau/sable après étalonnage.

Les seuls actionneurs présents :

Vannes motorisées pour injection d'eau sous pression et aspiration de sable fluidisé.

Le schéma suivant est une vue à plat du prototype.

Il regroupe tous les capteurs et actionneurs présents. On distingue les circuits de retour et d'injection respectivement en vert et en jaune. Les capteurs sont représentés par des cercles rouges et les vannes motorisées par des cercles jaunes. 12 vannes motorisées ouvrent ou ferment les modules d'injection. Les vannes motorisées restantes commandent les circuits d'eau sous pression permettant de

déboucher le circuit de récupération du sable si nécessaire. Les cercles verts représentent des vannes manuelles situées à chaque entrée du circuit de récupération.

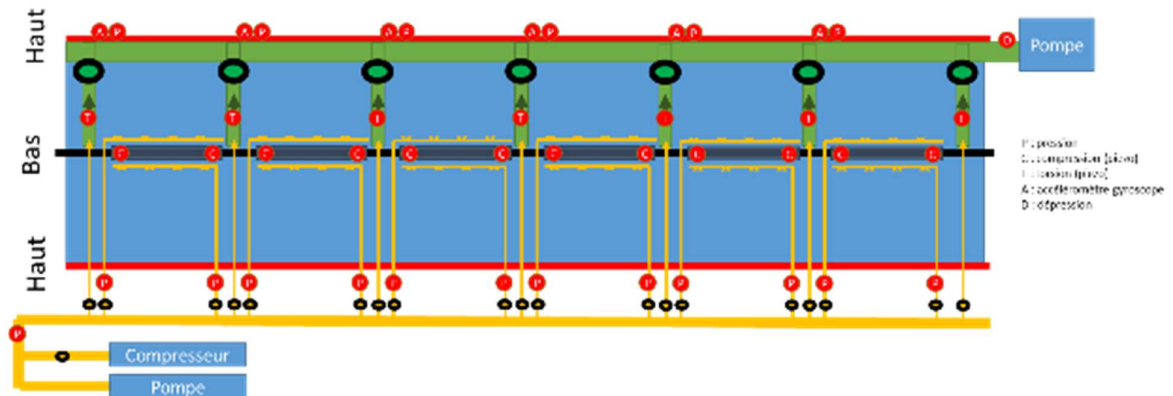


Figure 34 : Schéma à plat de l'électronique embarquée du prototype

## 8.12.1. Protocole de communication

L'utilisation d'un protocole de communication est nécessaire, c'est le langage utilisé pour que la carte Arduino et l'ordinateur puissent échanger de manière compréhensible.

### 8.12.1.1. Capteurs

ID-type- taille\_message-message,

Le protocole contient l'identifiant du capteur (ID), son type, la longueur des données lues (en octets) et enfin les données. Toutes ces données sont séparées par des tirets. La fin du message est une virgule.

A chaque intervalle de temps (prédéfini), la carte Arduino envoie sur le port série la concaténation des données de tous les capteurs, on peut interpréter ce signal comme un tableau dont les cases sont séparées par des virgules qui terminent chaque message (protocole de communication). Par convention, le premier élément du signal contient deux données séparées par un tiret, la taille totale du signal et le nombre de capteurs.

Le signal est donc de la forme :

Taille\_totale-Nombre\_capteurs ,ID -type-taille\_message-message,...,ID-type-taille\_message-message,

Le signal est lu par le module Data Steamer dans Excel. Remarque : Chaque signal est une chaîne de caractères.

	O1E	O2E	O3E	O4E	O5E	O6E	O7E	O8E	O9E	O10E
Données actuelles										
13397627	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
Données historiques										
13382113	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382141	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382166	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382189	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382215	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382240	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382265	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382290	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382315	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382342	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382366	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382391	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382416	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382441	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						
13382466	0237-003	0-1-3-000	6-000000	-3-4-4329						

Figure 35: Interface de Data Streamer sur Excel qui affiche le signal à intervalles réguliers

Un code VBA décode ensuite chaque protocole, classe les données, et renvoie l'ensemble dans le tableau d'une feuille Excel.

	A	B	C	D
1	Réinitialise	0	1	2
2		000	000	255
3				
4				
5		OK		
6	N° capteur	0	1	2
7	Donnée 1	0	0	40
8	Donnée 2		0	29
9	Donnée 3			
10	Donnée 4			
11	Donnée 5			
12	Donnée 6			
13				
14				

Figure 36: Tableau des données une fois traitées par la macro Excel

Le tableau jaune met à jour les données de chaque capteur. Nous pouvons ensuite utiliser ces données pour créer l'interface de visualisation qui nous donnera une vision très claire de l'état du prototype.

### 8.12.1.2. Actionneurs

Le protocole est très similaire à celui des capteurs. Cependant, contrairement aux capteurs, le protocole est envoyé d'Excel à la carte Arduino qui traitera l'instruction et activera un relais qui ouvrira ou fermera la vanne motorisée.

## 8.12.2. Les interfaces utilisateur

### 8.12.2.1. Implémentation de capteurs et d'actionneurs (code C++)

Les commandes *capteurs.add ( type,Pin 1,Pin2)* et *commandes.add ( type,Pin )* permettent de mettre en œuvre respectivement un capteur et un actionneur.

```

cCapteurs capteurs;           Initialisation des variables de capteurs et commandes
cCommandes commandes;
int result=1;                  Prendra la valeur de retour de la lecture

void setup() {
  setupArduino Serial();      Initialisation de la connexion au port série
  capteurs.add(1,A1); capteurs.add(2,A2,A3); capteurs.add(3,2); Déclarations des capteurs
  commandes.add(1,7); commandes.add(1,8); commandes.add(1,9); } Déclaration des commandes

void loop() {
  if (UneSeconde()){          Toutes les secondes
    capteurs.envoi();         On envoie les données des capteurs
    result=commandes.recois(); On lit le port série
    while(result!=0){         En cas d'erreur on relit jusqu'à ce que l'opération réussisse
                              ou que le Port est vide

      if (result<0){ Serial.println(result); }
      result=commandes.recois();
    } } }

```

Figure 37 : Interface Arduino | En vert les lignes pour ajouter des capteurs et actionneurs

classe	taper	nom
capteurs	3	humidité et température
capteurs	4	accéléromètre , gyroscope et température
capteurs	5	Pression et température
capteurs	6	Lester

classe	taper	nom
Actionneurs	1	Vanne motorisée

Figure 38: Tableau récapitulant les différents types de capteurs et d'actionneurs du prototype

Les capteurs et actionneurs sont reliés à la carte Arduino par un ou deux fils. Pin1 et Pin2 sont les broches de connexion à la carte.

#### 8.12.2.2. Interface Excel

Une fois les capteurs implémentés dans le code et connectés à la carte Arduino, tout se passe sur l'interface Excel. Cette interface permet d'une part la visualisation très condensée de l'état du prototype. Il permet également d'ouvrir/fermer les vannes motorisées.

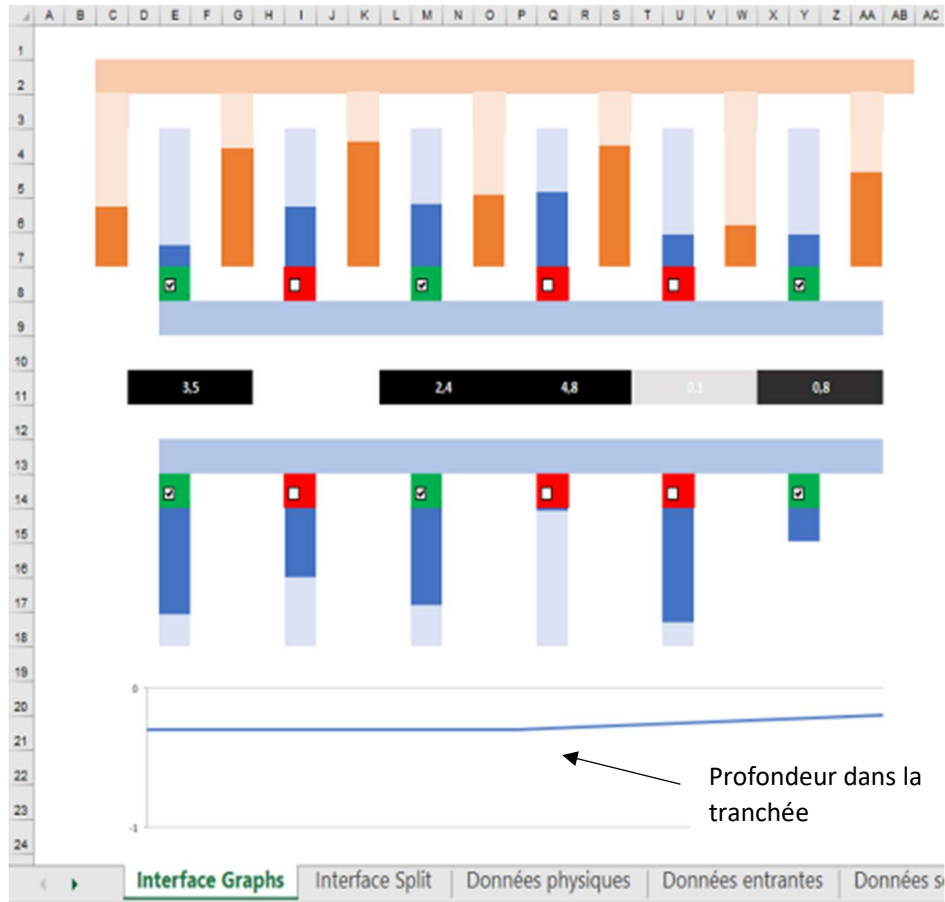


Figure 39 b : Interface Excel pour la visualisation et le contrôle du prototype | Légende

## 8.12.3. Instrumentation

### 8.12.3.1. Vannes motorisées

Les 6 vannes sont contrôlées par la carte Arduino via des relais dans la case bleue sur le schéma ci-dessous.

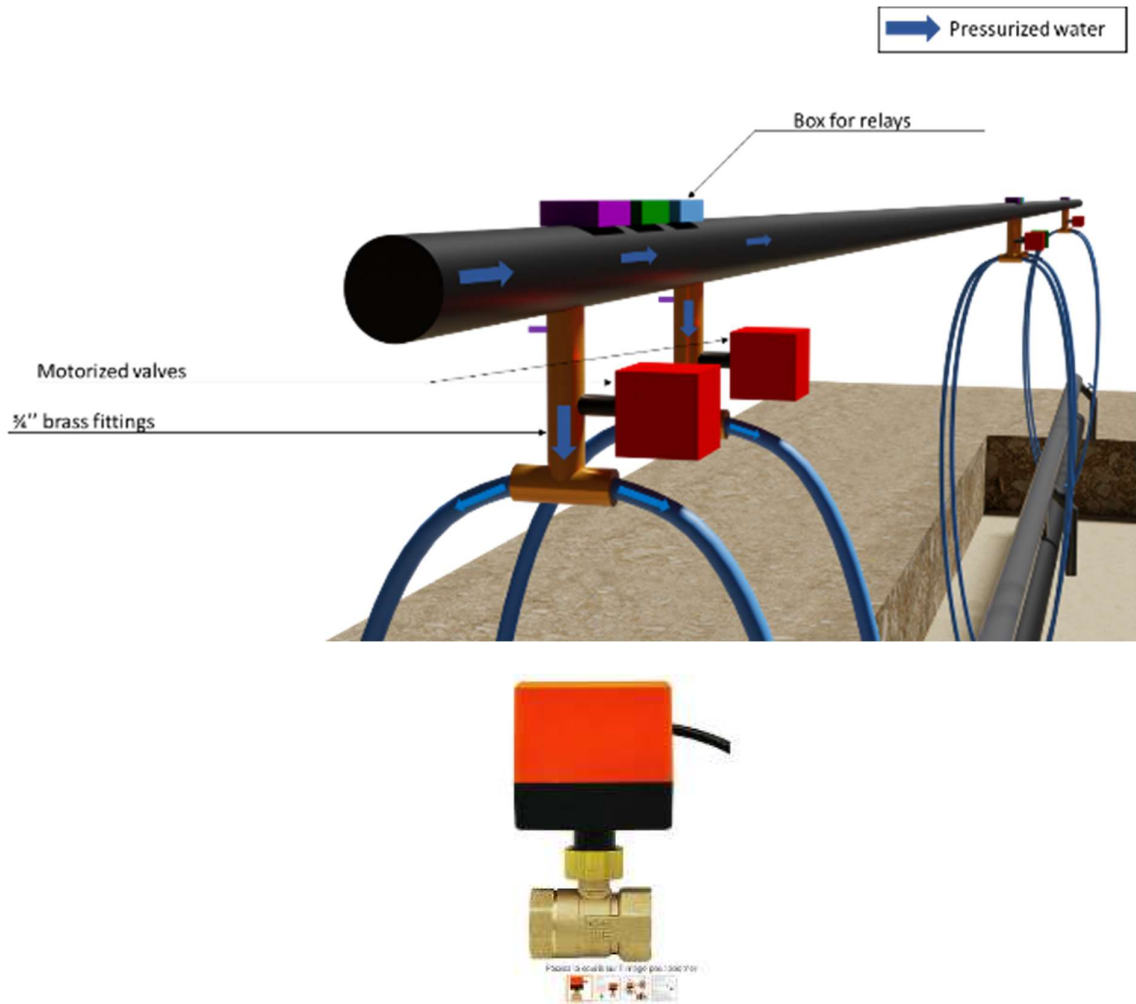


Figure 40 : Photo de la pompe commandée

### 8.12.3.2. Capteurs de pression

Pour des raisons d'économie, le capteur de pression sélectionné ne peut être utilisé que pour mesurer la pression pneumatique et non la pression hydraulique. Le dispositif suivant est utilisé pour convertir la pression hydraulique du débit d'eau en pression pneumatique :

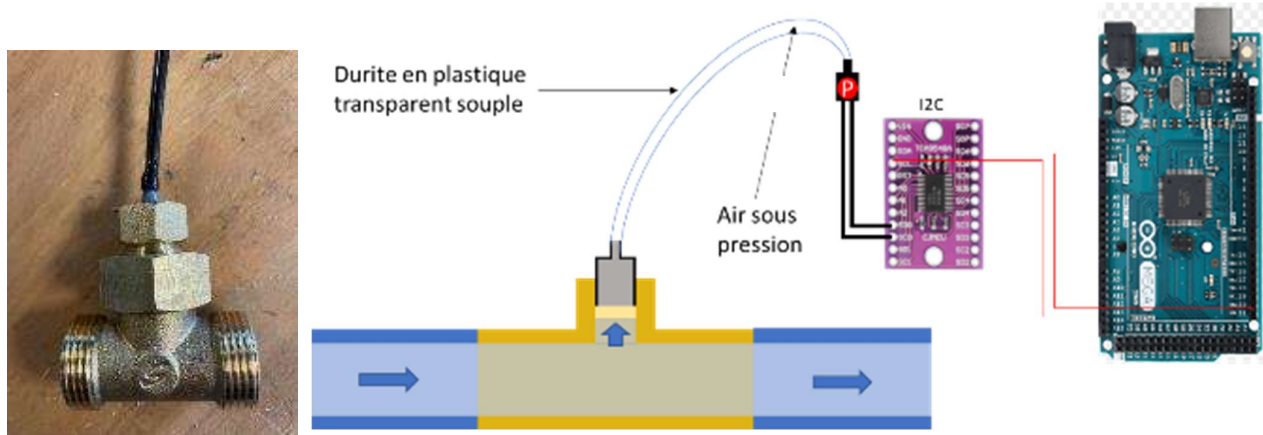
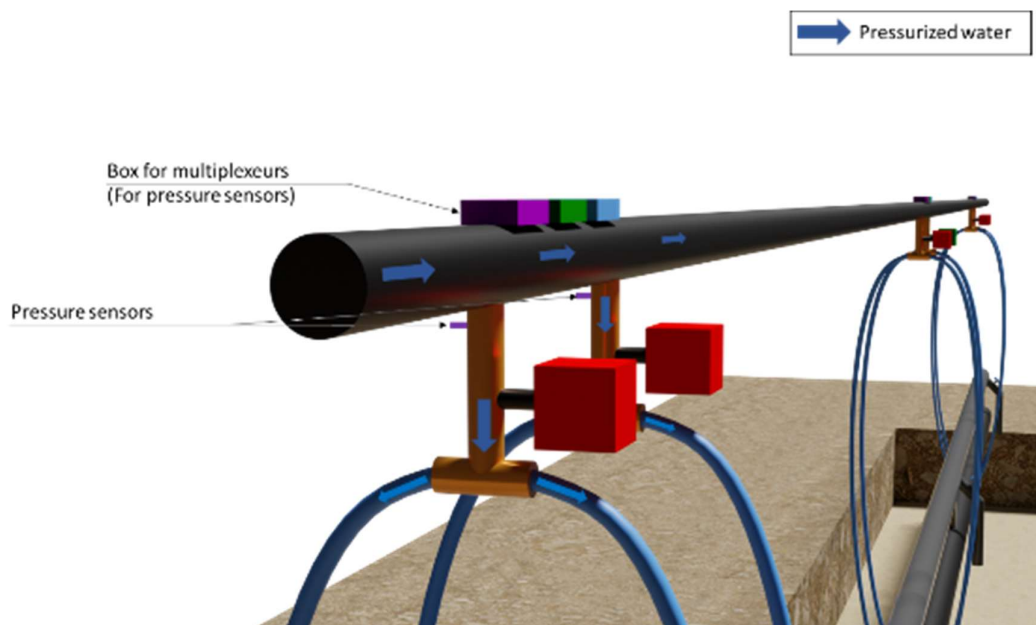


Figure 41 : Schéma de principe du capteur de pression

Le capteur est relié au débit d'eau par un tuyau en plastique. Plus le débit est fort, plus l'eau va monter dans le tuyau et comprimer l'air emprisonné à l'intérieur. La difficulté réside dans la détermination de la solution optimale pour sceller le capteur.



Le capteur est calibré à l'aide d'une pompe à vélo équipée d'un manomètre fiable.



Figure 42 : Étalonnage

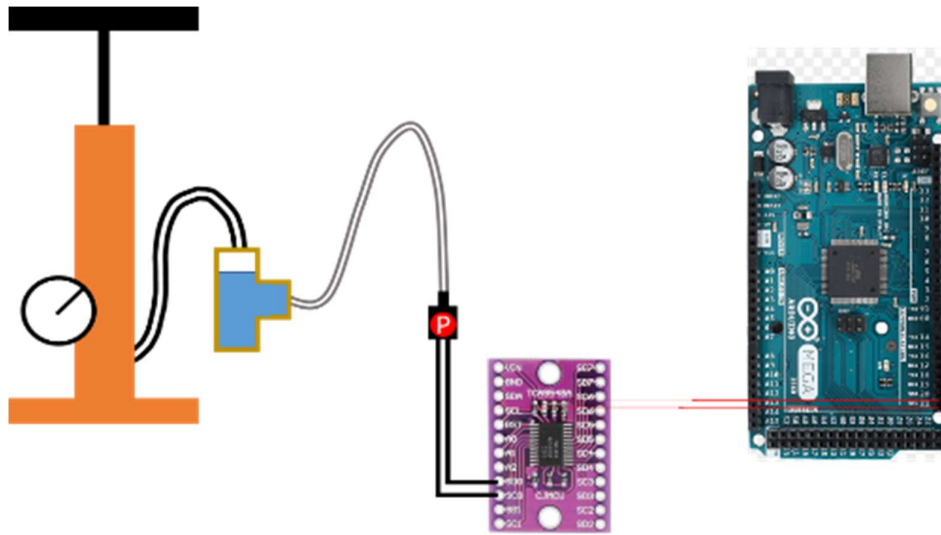


Figure 43 : Schéma de la méthode d'étalonnage

### 8.12.3.3. Électronique

Etant donné le nombre important de capteurs de pression sur le prototype, il est impossible de tous les connecter directement à la carte Arduino. De plus, les capteurs d'un même type ont la même adresse, ils ne sont donc pas différenciables par le bus I<sup>2</sup>C de la carte Arduino. Pour pallier ce problème, nous connectons tous les capteurs de pression à des multiplexeurs pouvant contenir jusqu'à 8 capteurs. Chaque multiplexeur est ensuite connecté au bus I<sup>2</sup>C de la carte Arduino via les broches SCA/SCL. Le bus I<sup>2</sup>C peut gérer au maximum 127 adresses.

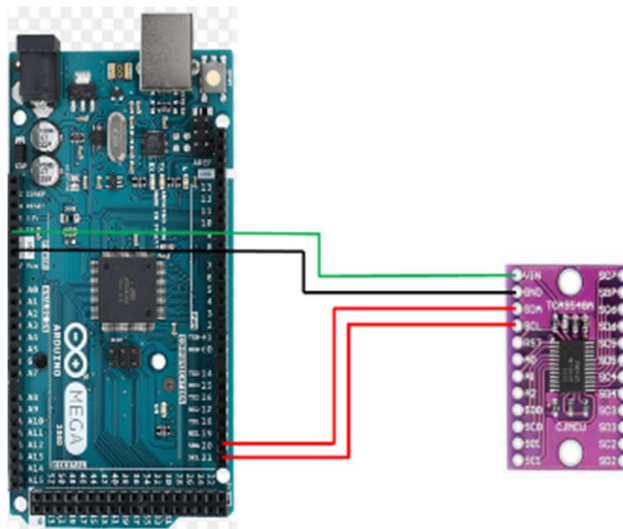


Figure 44 : Schéma de raccordement du multiplexeur à la carte

Chaque multiplexeur est différencié à l'aide des broches A0, A1, A2 sur lesquelles on applique un potentiel soit nul soit de 5 volts. Cela donne 8 combinaisons d'adresses possibles. On peut donc connecter au maximum 8 multiplexeurs à la carte Arduino.



MUX ADDRESS			
A0	A1	A2	PC Address correspondant
LOW	LOW	LOW	0x70
HIGH	LOW	LOW	0x71
LOW	HIGH	LOW	0x72
HIGH	HIGH	LOW	0x73
LOW	LOW	HIGH	0x74
HIGH	LOW	HIGH	0x75
LOW	HIGH	HIGH	0x76
HIGH	HIGH	HIGH	0x77

Figure 45 : Tableau des adresses possibles des multiplexeurs connectés à l'Arduino

#### 8.12.3.4. Capteurs de vide

Le capteur de vide est du même modèle que le capteur de pression utilisé. Placé juste avant la pompe à sable, il mesurera une différence de pression négative. Le principe est donc le même.

Pour calibrer le capteur, une pompe d'amorçage manuelle est utilisée pour créer un vide dans le tube avec la configuration suivante :

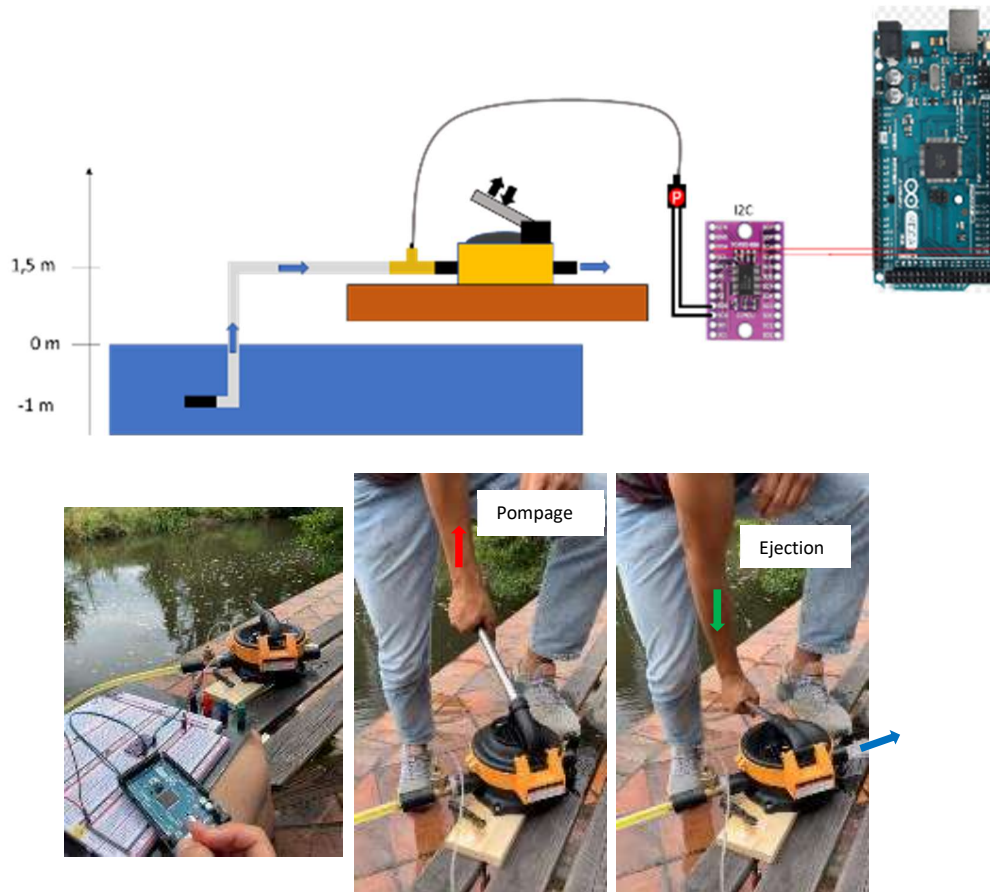


Figure 46 : Schéma et images de l'étalonnage du capteur de vide

Deux valeurs sont importantes, la valeur du capteur à pression atmosphérique puis celle après pompage. Le capteur est situé à 1,5 mètre au-dessus de l'eau, la valeur de la pression absolue après pompage correspond à la pression sous 1,5 mètre de colonne d'eau, soit 0,15 bar. Dans notre cas, -0,15 bar car il s'agit d'un vide.

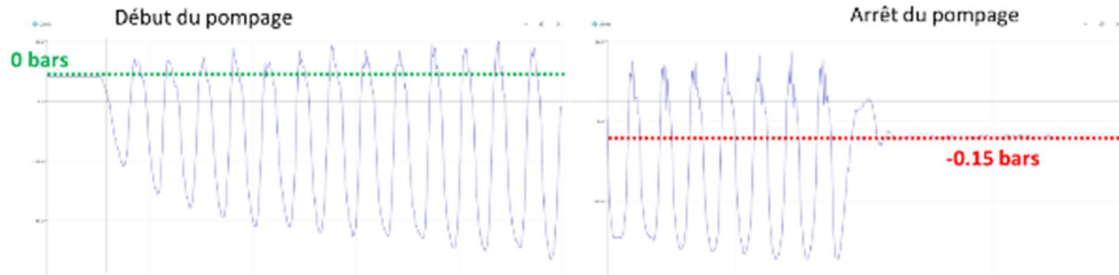


Figure 47 : Signal de port série illustrant le principe d'étalonnage

On peut donc décaler le 0 et effectuer un produit vectoriel pour calibrer le capteur.

Remarque : Cette méthode aurait très bien pu être utilisée pour calibrer des capteurs de pression. La méthode est également plus fiable que l'utilisation d'une pompe à vélo. Comme la pompe d'amorçage a été achetée par la suite, il était utile de présenter les deux méthodes. À l'avenir, nous étalonnerons les capteurs de pression avec cette méthode.

#### 8.12.3.5. Capteurs de débit

Il est important d'avoir une estimation du débit de sable fluidisé pompé dans le circuit de récupération. Nous n'utiliserons pas de débitmètre conventionnel pour les deux raisons suivantes :

- Le prix d'un capteur de débit est trop élevé et donc hors budget.
- Les grains de sable peuvent endommager le capteur

Une solution indirecte et beaucoup moins coûteuse consiste en une jauge de contrainte fixée sur une plaque métallique souple. Celle-ci est fixée à la paroi du tube de récupération. Les grains de sable pompés heurteront la plaque métallique et appliqueront une contrainte. Nous mesurerons cette contrainte avec la jauge pour essayer de quantifier le volume de sable fluidisé et pompé.

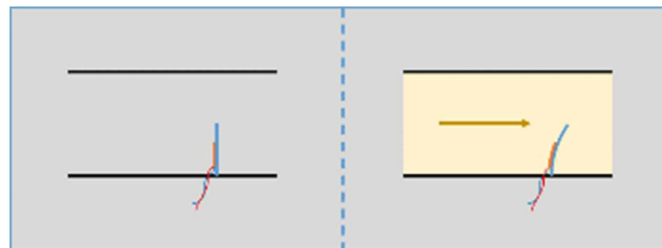


Figure 48 : Principe du capteur de débit de sable

L'étalonnage se fera directement sur le prototype.

#### 8.12.3.6. Accéléromètre - Gyromètres

Six accéléromètres-gyromètres sont placés sur le prototype pour suivre l'ensablement. Tous sont calibrés.

### 8.12.3.7. Capteurs de compression

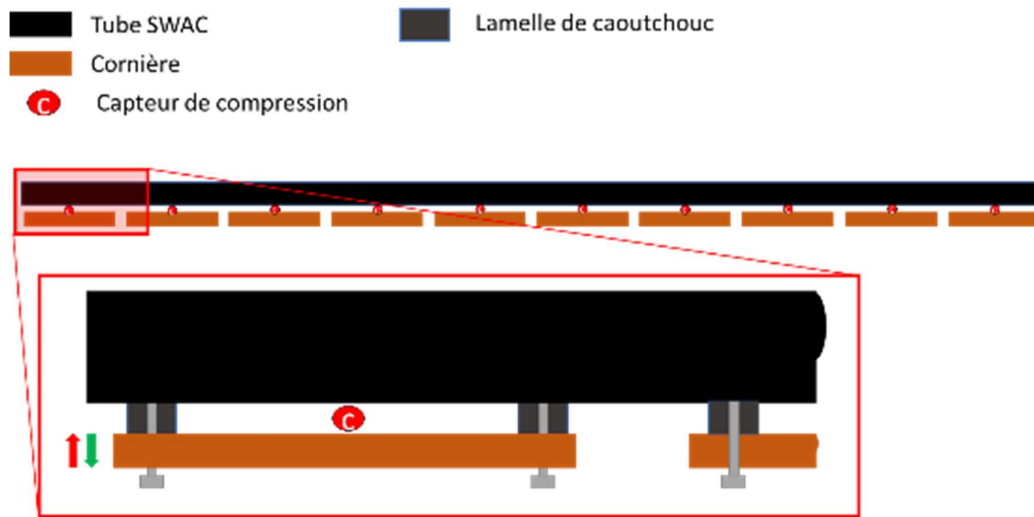


Figure 50 : Schéma d'installation des capteurs de compression

Ces capteurs de compression serviront à déterminer si le prototype touche ou non le sable et également à détecter les obstacles (ex. cailloux) qui empêcheraient l'enfouissement du tuyau. Cette mesure est importante car elle servira à évaluer l'enfouissement. La cornière est découpée en 12 sections de 1,5m (deux par module d'injection). Chaque cornière est fixée par deux vis noyées dans le tube SWAC et montées avec jeu dans la cornière afin que cette dernière puisse coulisser le long de l'axe vertical. Des bandes de caoutchouc écartent le tube SWAC de la cornière. Le capteur de compression est fixé à la cornière. C'est un capteur de compression ; il mesure une contrainte dans un matériau et renvoie un potentiel électrique à la carte Arduino. Le capteur est fixé sur une plaque métallique sur laquelle on applique une contrainte normale. Un trou est percé à l'extrémité de cette plaque, le trou est taraudé pour visser un écrou dont la tête plate viendra s'appuyer contre le tube SWAC de la manière suivante :

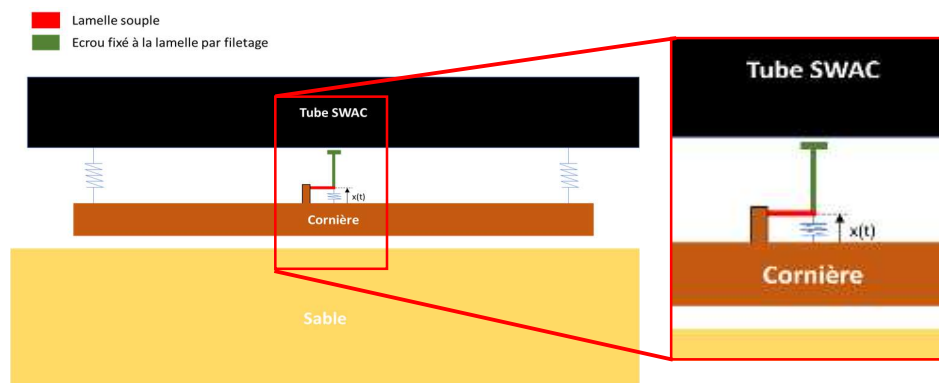


Figure 49 : Schéma de principe

Lorsque le prototype s'appuie contre le sable, les cornières montées avec jeu vont glisser le long de l'axe vertical et s'appuyer contre les lamelles de caoutchouc. La tête d'écrou au milieu de la cornière viendra toucher le tube SWAC, la lamelle flexible se pliera et un potentiel sera créé aux bornes du matériau piézoélectrique.

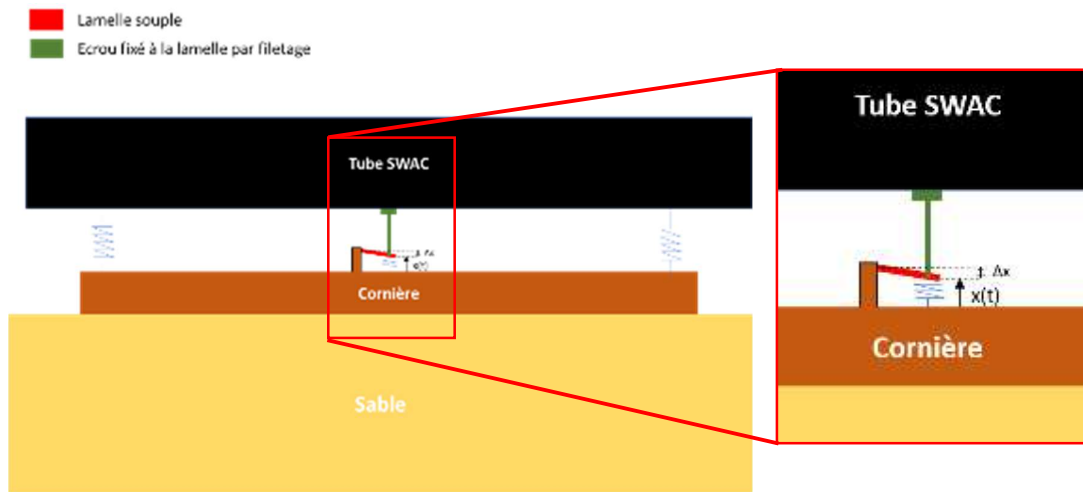


Figure 51 : Schéma de principe

Le capteur est fixé à l'angle par 4 serflex :



Figure 52 : Photos

i. Électronique assemblée

Le raccordement du capteur à la carte n'est pas direct, il se fait via un convertisseur numérique/analogue comme suit :

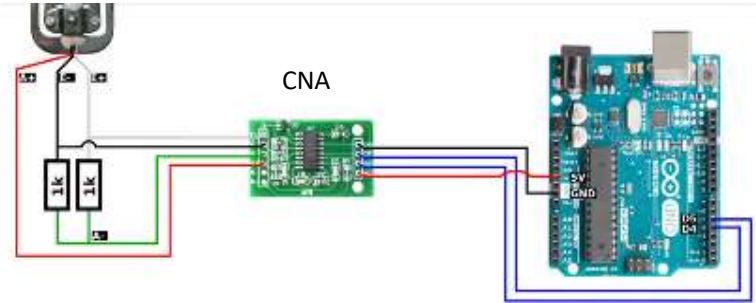


Figure 53 : Schéma de montage électronique

ii. Étalonnage

Connaissant la masse linéique du tube SWAC (en PER), il est facile d'effectuer l'étalonnage. L'étalonnage de tous les capteurs de compression se fera en même temps sur le prototype assemblé. Il suffira de lancer le code de calibration spécifique pour chaque capteur. Ce dernier consiste en deux étapes :

- Déterminer la valeur à vide de chaque capteur, c'est à dire avec le tube immergé sans toucher le fond
- La valeur chargée de chaque capteur, c'est-à-dire avec le prototype immergé posé sur le sable

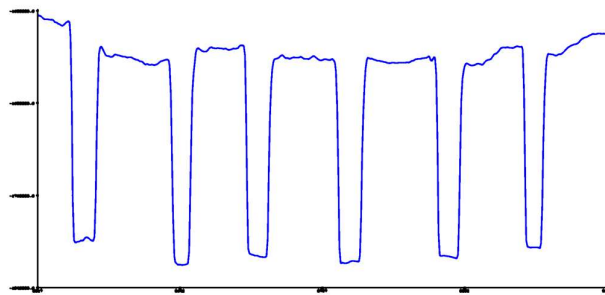


Figure 54: Signal reçu du capteur, alternant montage à vide et en charge

iii. Essais avec la barre d'injection

Comme indiqué précédemment, nous craignons que l'eau sous pression dans le système ne génère des vibrations importantes dans tout le prototype. Si tel était le cas, les vibrations interféreraient avec

la mesure des capteurs de compression. Nous voulions avoir une idée de l'ampleur de ces vibrations sur la mesure. Un dispositif a donc été mis en place pour tester cette hypothèse.



Figure 55: Photos du système

Un module d'injection est fixé au tube SWAC avec une seule cornière et le dispositif de mesure. Le module d'injection est directement relié à une pompe. Le test a été concluant, aucune vibration n'est détectée par le capteur. Il reste à déterminer si le circuit de récupération du sable génère des vibrations importantes.

iv. Erratum

Il est apparu lors des premiers essais que la distance entre le tube et la cornière était trop importante pour que le sable soufflé se redépose dedans. Comme il serait très contraignant de réaliser des séries d'essais dans l'eau, il a été décidé de supprimer ces capteurs.

## 8.13. Assemblage électronique sur le prototype

Le montage du prototype a conduit à des choix pragmatiques quant à l'utilisation ou non des capteurs décrits dans la partie précédente.

Le capteur de débit a été supprimé suite à un problème technique empêchant de le faire fonctionner correctement dans un temps limité. L'accéléromètre-gyromètre a également été supprimé pour une question de précision, une solution plus simple a été choisie. Il est possible de mesurer l'enfouissement en temps réel à l'aide des cordes utilisées pour soulever le prototype. Deux poulies sont liées par la corde. Le plus bas est attaché au prototype par une autre corde. Lorsque le prototype plonge dans la tranchée, la distance entre les deux poulies augmente. Un simple marqueur dessus permet de lire facilement la valeur.

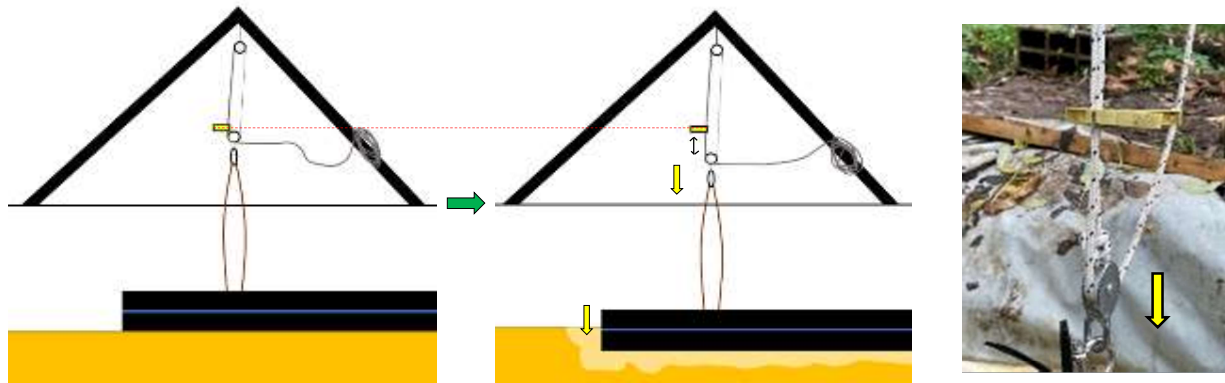
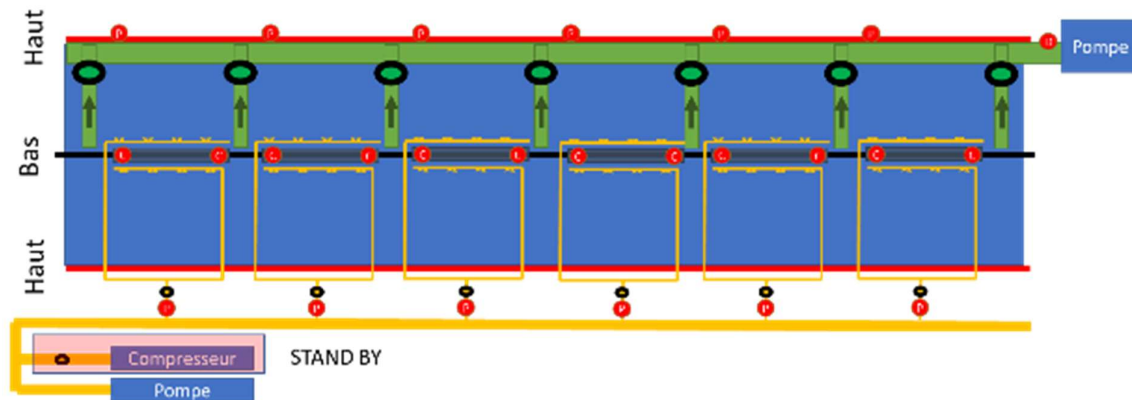


Figure 56 : Schéma illustrant la méthode

Les capteurs sélectionnés sont les plus importants : le capteur pression/dépression et le capteur compression. Cela fait 3 composants électroniques avec les vannes motorisées nécessaire pour se connecter au système de contrôle/commande. Le diagramme mis à jour est maintenant :



Ces trois composants sont connectés à l'Arduino via des composants électroniques : le capteur de pression doit être connecté via un multiplexeur (MUX), le capteur de compression via un convertisseur numérique/analogique et la vanne motorisée via un relais et alimenté par un générateur de 12 volts.

Une contrainte supplémentaire est que les boîtiers électroniques du prototype ont été sélectionnés au moindre coût. Ils font 11x6 cm<sup>2</sup> de surface ce qui est très réduit. Il est donc nécessaire d'adapter la conception électronique. Les connexions se font sur des planches à pain.

Remarque pour les parties suivantes : les câbles 5V (VCC) et terre de la carte Arduino sont respectivement colorés en rouge et noir. Ce sont toujours les sortants de la boîte. Les autres câbles sortants sont soit des câbles d'information qui vont directement sur une broche de la carte Arduino, soit des câbles qui vont vers les capteurs/actionneurs.

### 8.13.1.1. Capteur de compression

Dans cette disposition, 2 CNA peuvent être ajoutés dans un même boîtier qui relie 4 capteurs à compression. Ainsi, seulement 3 boîtiers sont nécessaires pour tous les capteurs. Les résistances sur le schéma sont de 1K Ohm.

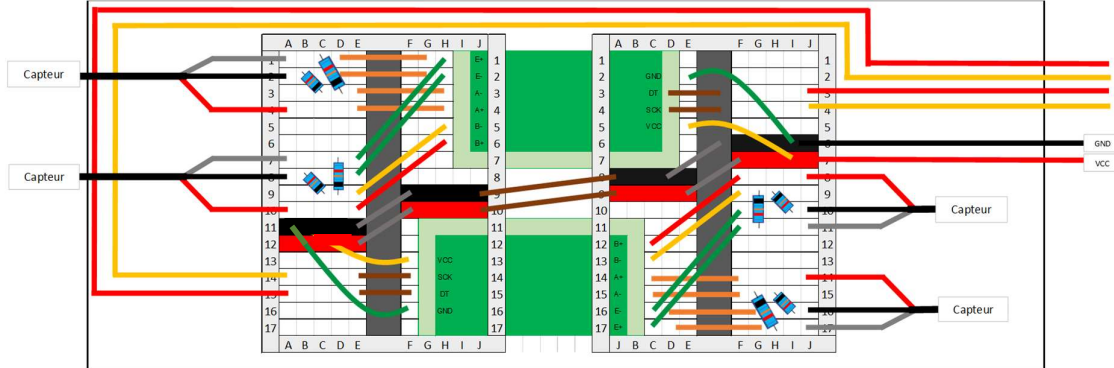


Figure 57: Schéma électronique de la carte électronique

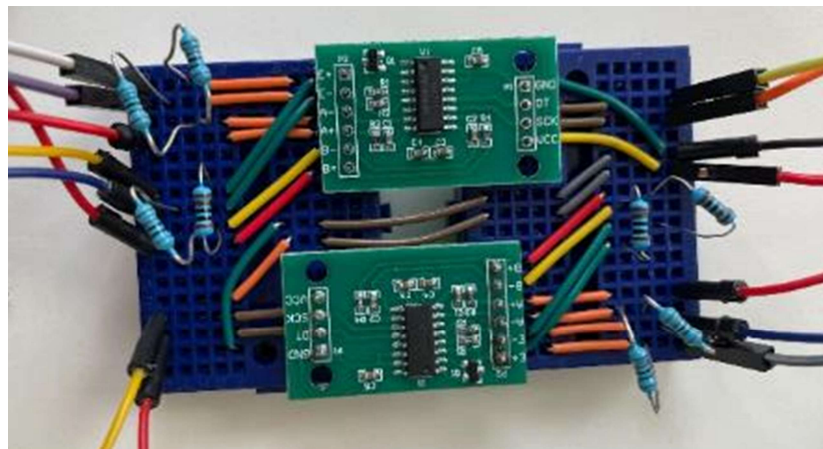


Figure 58: Photo de la carte électronique



### 8.13.1.2. Capteur de pression

4 capteurs de pression peuvent être ajoutés dans chaque boîtier.

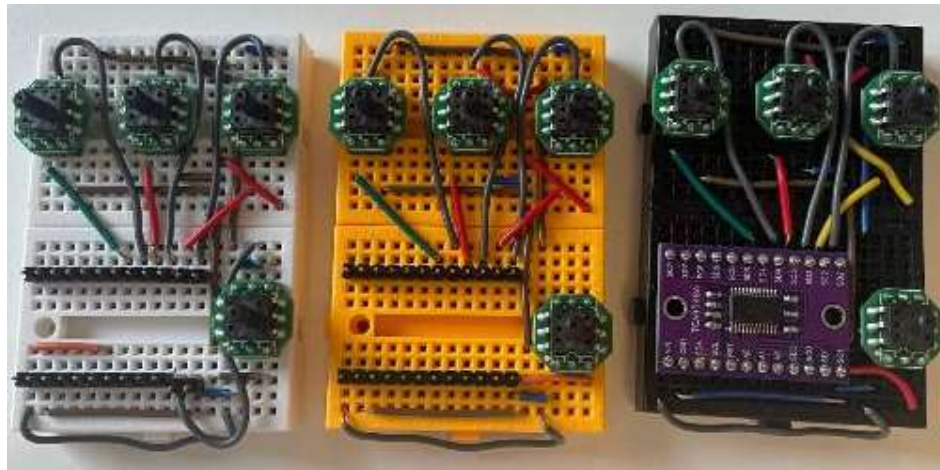
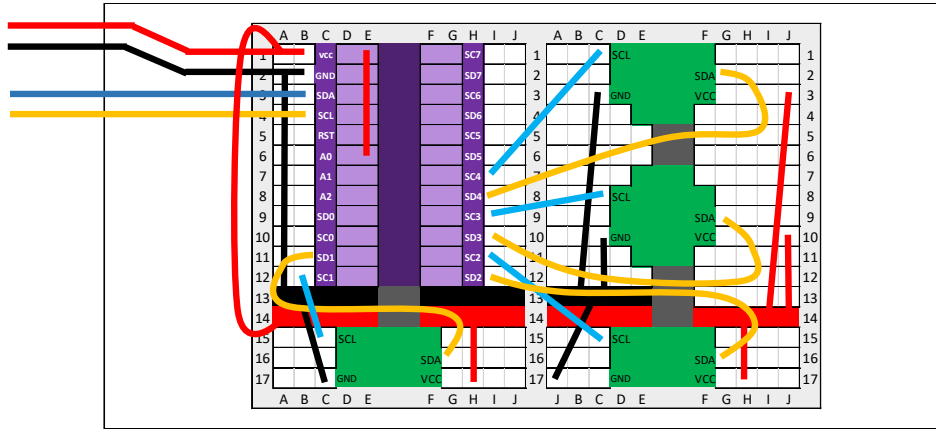


Figure 59 : Schéma et réalisation des cartes électroniques

Le bout de chaque capteur sort du boîtier par de petits trous et est relié au tuyau. Cela le rend suffisamment étanche pour l'expérience :



Figure 60 : Photo des capteurs connectés aux raccords hydrauliques en laiton

### 8.13.1.3. Vanne motorisée

Le coffret peut contenir deux relais contrôlant chacun une vanne motorisée.

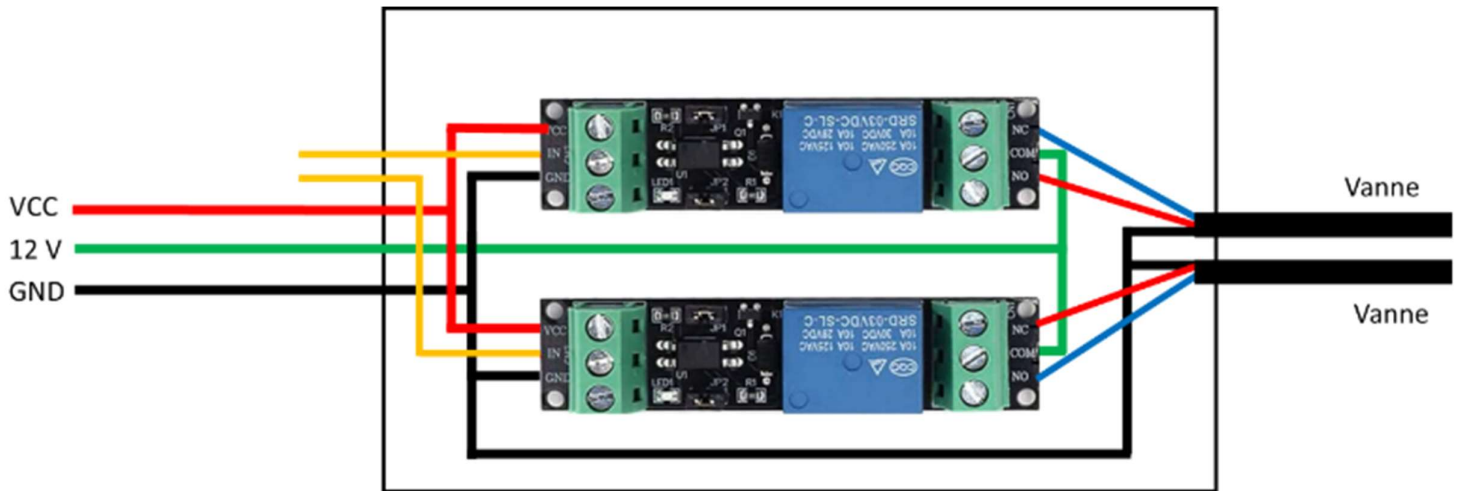
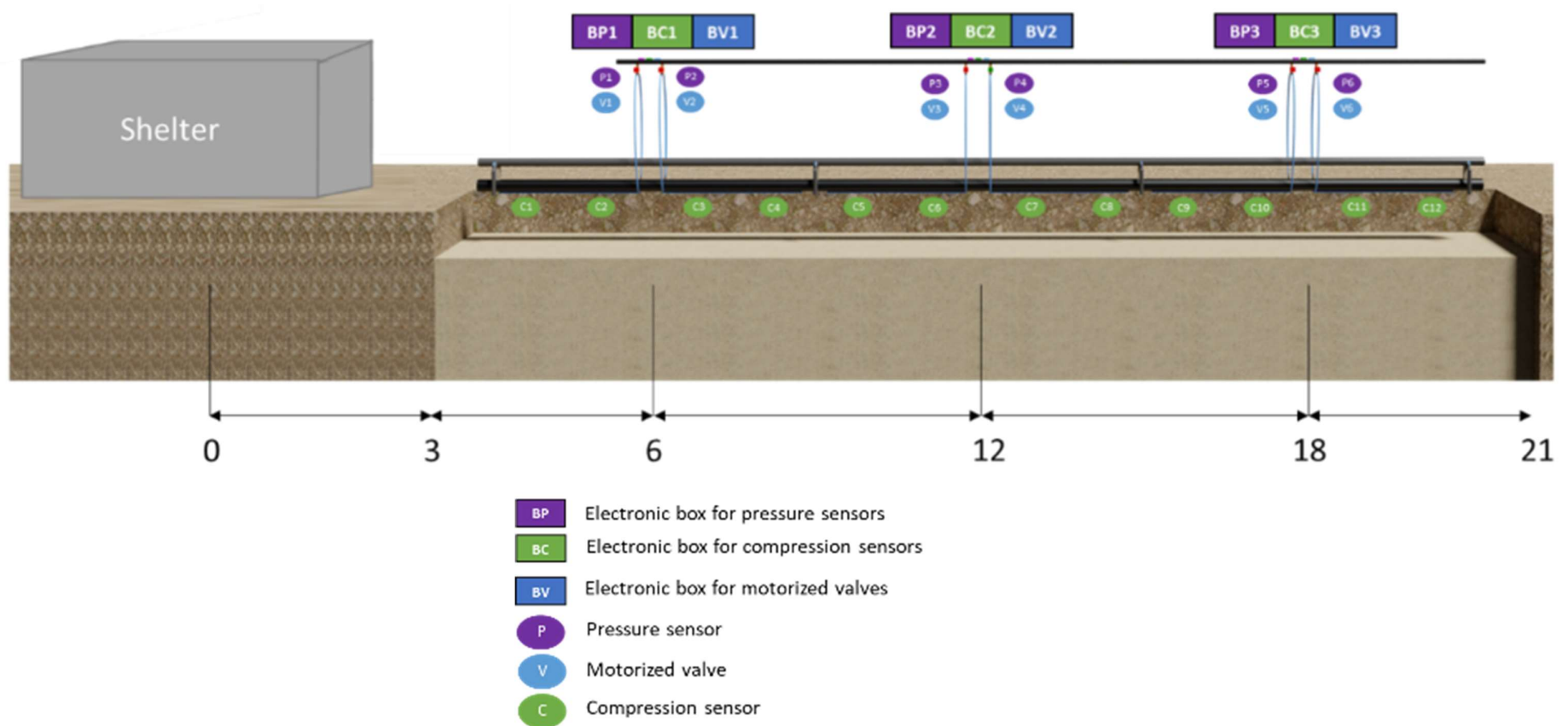


Figure 61 : Croquis et photo du boîtier électronique de pilotage des vannes motorisées

#### 8.13.1.4. Connexions avec carte Arduino

Tout est question d'optimisation des coûts et des équipements. Les boîtiers sont sur le prototype et doivent être reliés à la carte Arduino qui est connectée à l'ordinateur. Le contrôle/commande se fait à distance sous un abris. Le raccordement se fait par des câbles en cuivre regroupés par 8 (de 20 mètres pour les plus longs). Chacun des 8 câbles a une gaine en plastique de couleur différente. Les groupes de boîtiers (en haut sur le schéma ci-dessous) sont reliés entre eux par 3.



Les capteurs et les vannes sont classés par ordre croissant. C1, C2, C3 et C4 sont liés à la case BC1. C5, C6, C7 et C8 vers le boîtier BC2. C9, C10, C11 et C12 à la boîte BC3.

8 câbles d'information sont nécessaires pour chaque 3 boîtiers reliés entre eux, une gaine pour 3 boîtiers ; cela facilite le montage. Le code couleur des câbles d'information (afin de limiter les erreurs), remontant à la carte Arduino, est le suivant :

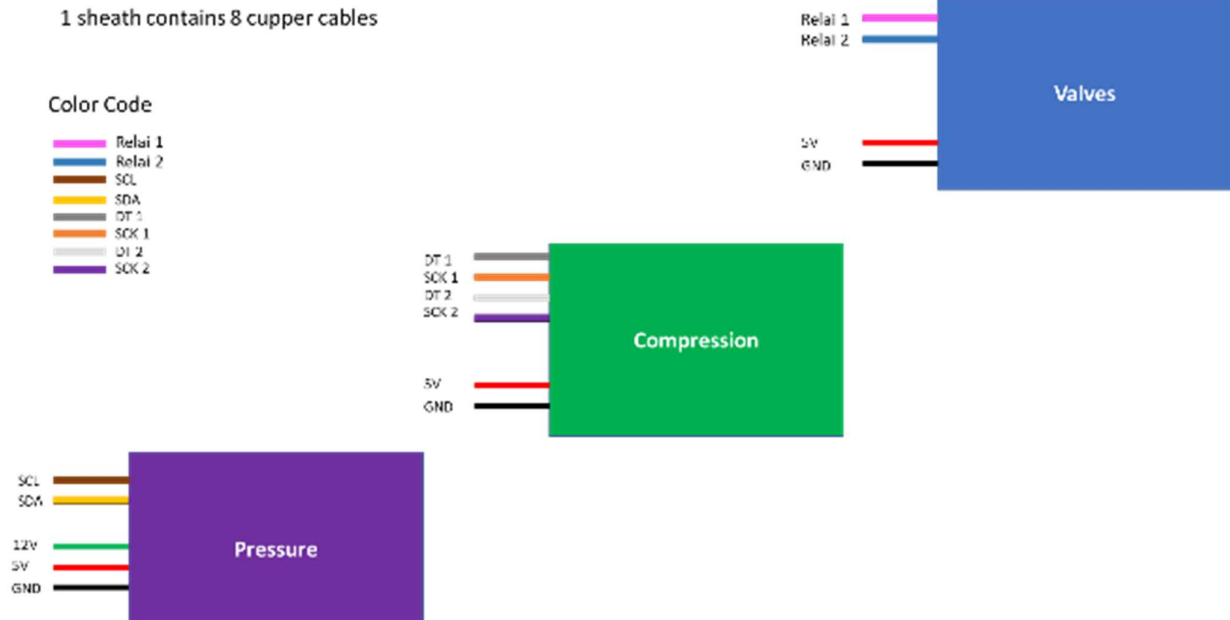


Figure 62 : Code couleur des gaines de 8 câbles

SCL/SDA sont les sorties du multiplexeur et sont directement reliées aux entrées SCL/SDA de la carte Arduino. DT, SCK sont les sorties des cartes CAN dans le boîtier de compression, elles sont reliées aux broches analogiques de la carte Arduino. Les deux " Relai " sont les entrées sur les deux relais dans les boîtes à vannes, elles sont reliées aux broches numériques de la carte Arduino.

Comme il y a 3 boîtiers de chaque type, voici le schéma électrique des connexions à la carte Arduino, utilisant le même code couleur :

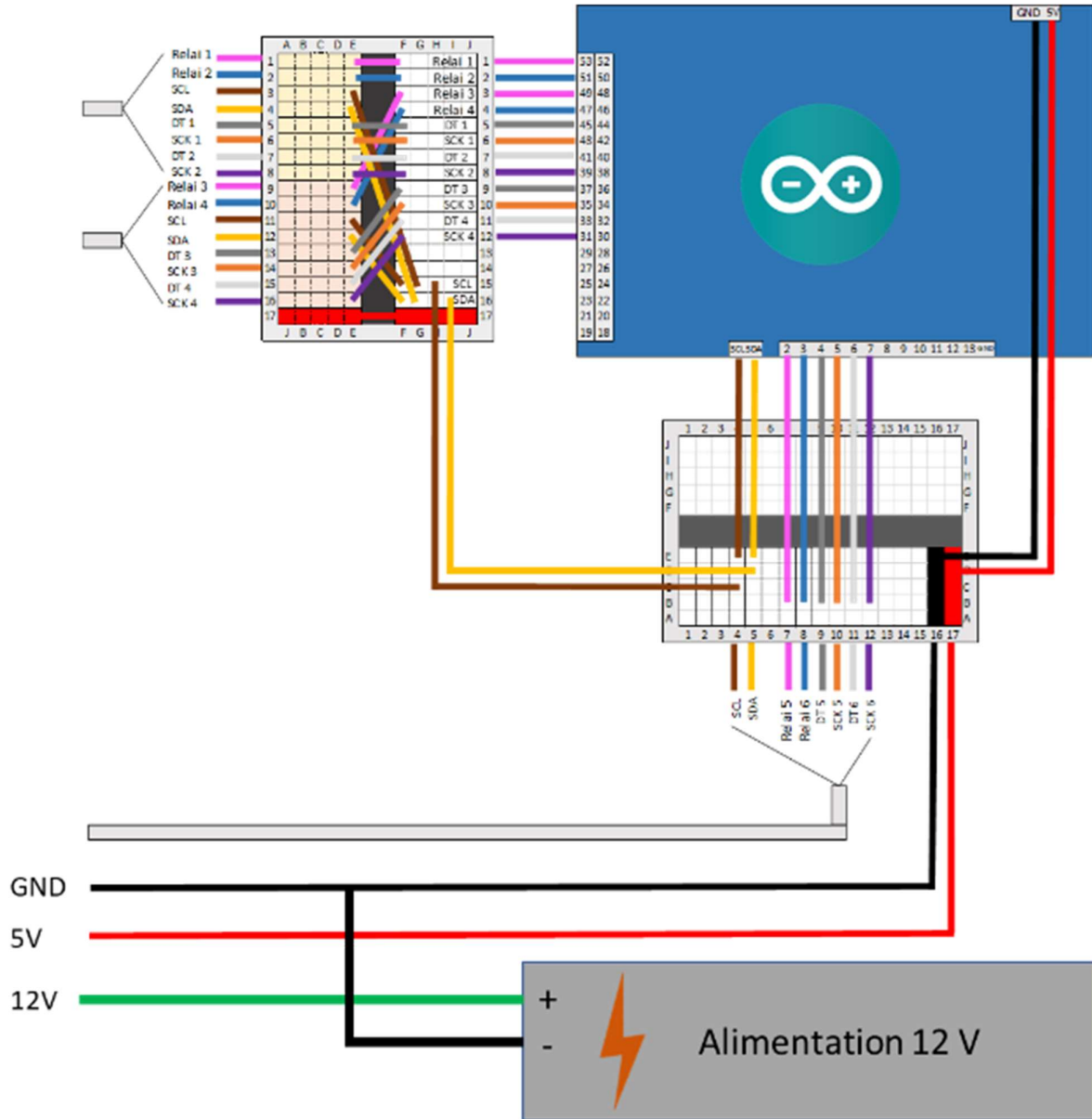


Figure 63 : Schéma électronique des connexions à la carte Arduino

Deux planches et un générateur 12V sont utilisés.

Connecter tous ces câbles a représenté une importante charge de travail principalement les itérations effectuées afin de détecter les erreurs de connexions et de les corriger.

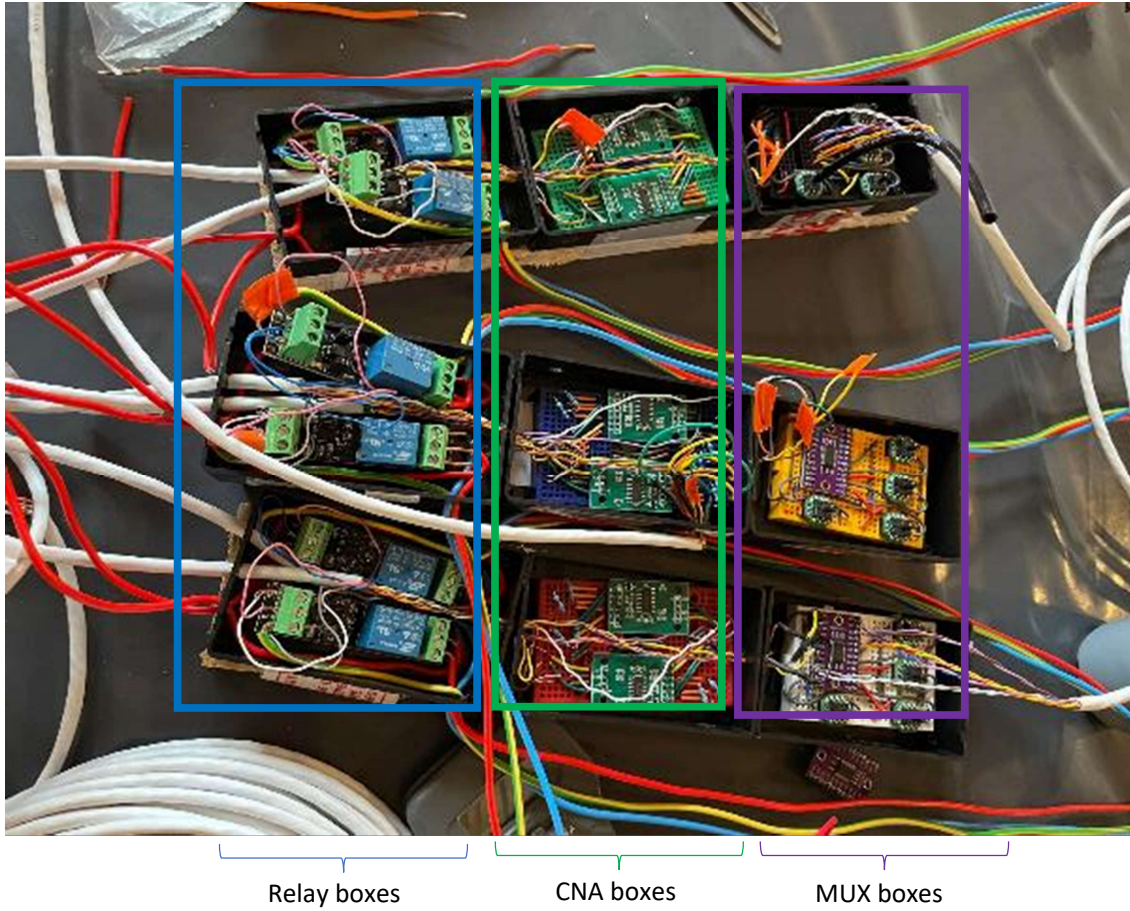


Figure 64 : Photos du système réel et tests des vannes

Deux problèmes ont été rencontrés lors de cette phase :

- La taille limitée du buffer des commandes pour piloter les vannes motorisées. Une taille tampon de 64 bits est définie par défaut. Comme une simple commande d'une vanne est 0009-001 , 00-2-1-1 qui fait déjà 17 bits, il n'est pas impossible de délivrer une commande dépassant 5 commandes vannes :

0045-001 , 00-2-1-1, 01-2-1-1, 02-2-1-1, 03-2-1-1, 04-2-1-1

53 bits

Si une commande supplémentaire est ajoutée (pour la sixième vanne motorisée) à la commande réelle, il y a automatiquement un message d'erreur. Il n'est ensuite plus possible de contrôler quoi que ce soit. Pour modifier la taille du buffer, un tutoriel est disponible en ligne [ici](#).

Mais il est malheureusement impossible de commander les six vannes motorisées en même temps car les broches VCC et GND sur la carte Arduino ne peuvent pas supporter un courant supérieur à 200 mA (en théorie). Plus le courant s'additionne les vannes motorisées sont activées via le générateur, il arrive un certain point où le courant délivré par le générateur est trop élevé et la carte Arduino s'éteint automatiquement. Il est fort probable que ce problème était lié au fait que le GND de la carte Arduino est lié au générateur 12V .

Cet obstacle n'en est finalement plus un.

- Le deuxième problème était la longueur du câble qui, dépassant une certaine valeur, rend le signal déformé de sorte qu'il ne peut pas être lu par la carte Arduino ; qui renvoie un message d'erreur. Le problème étant l'épaisseur du câble en cuivre, très faible. Le câble le plus long (25 mètres) a finalement été retiré et les derniers capteurs de pression connectés au multiplexeur du milieu qui avait 4 entrées inutilisées.

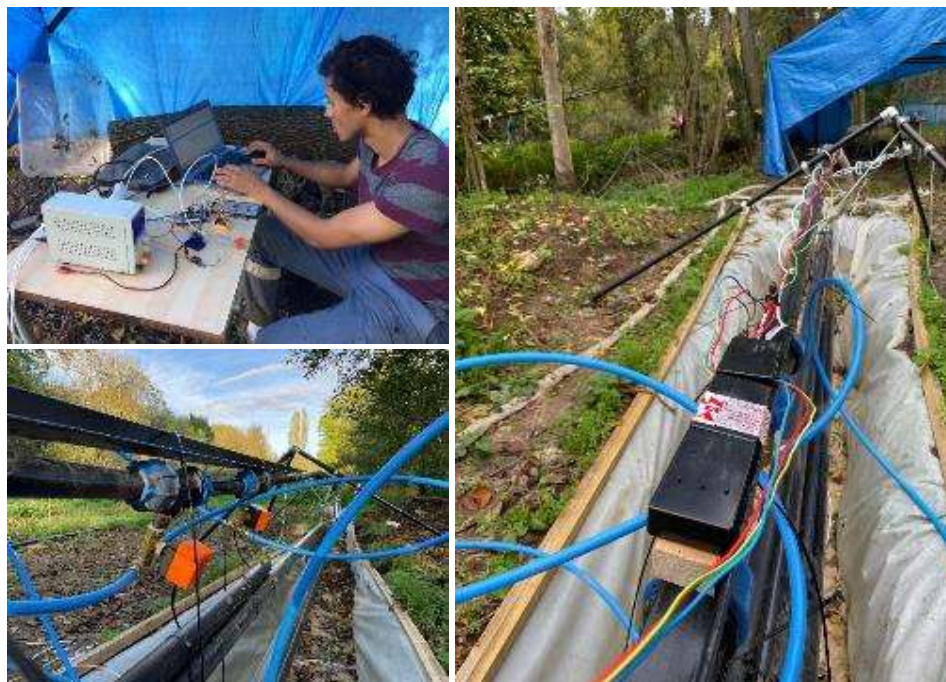
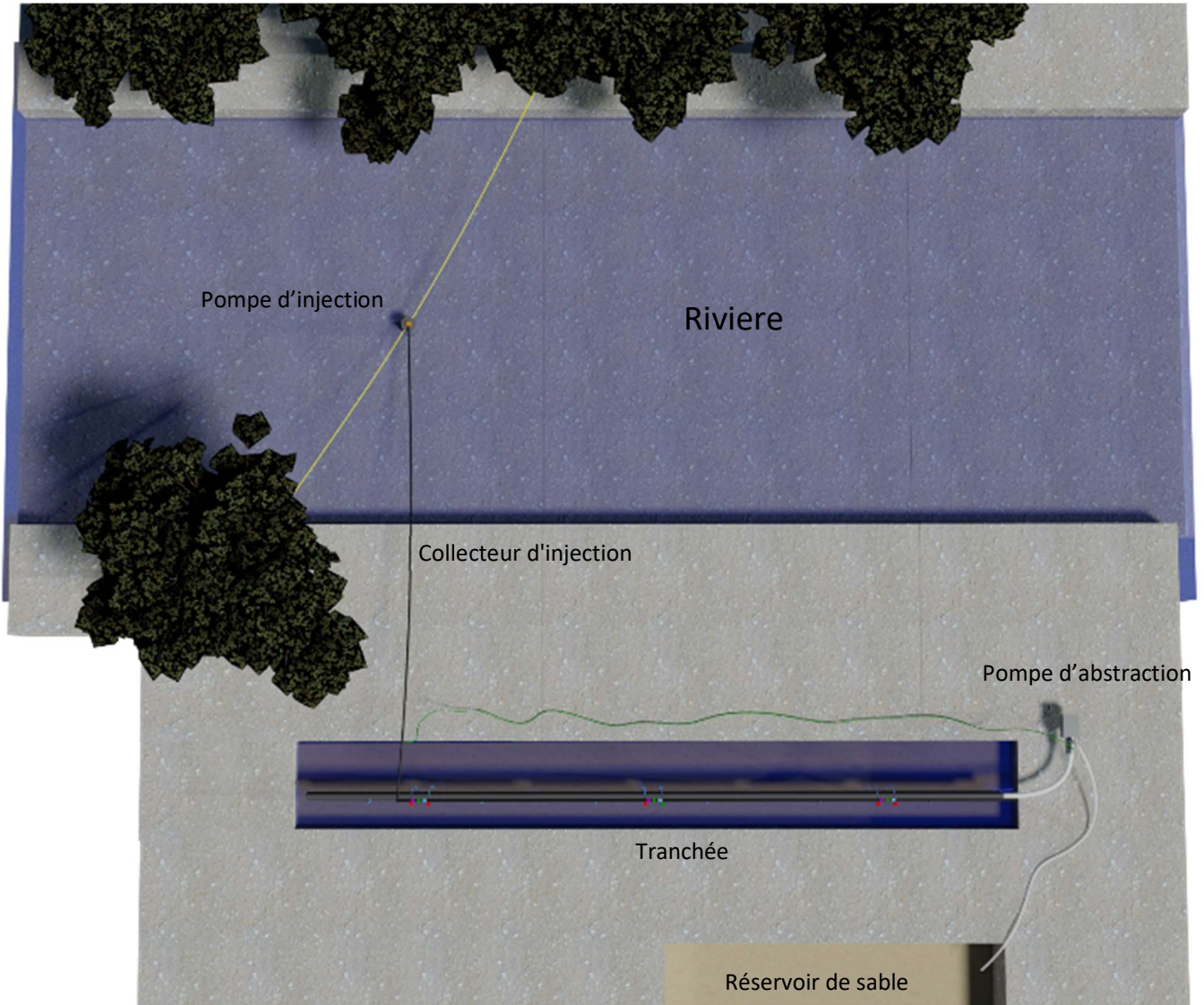
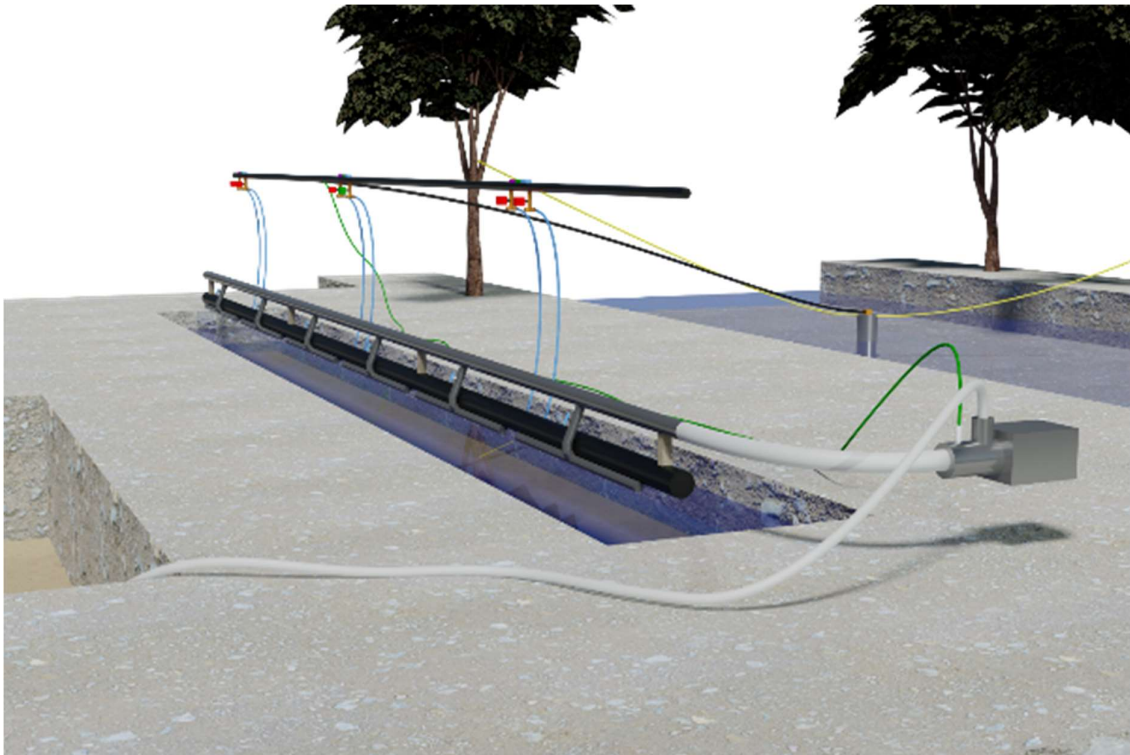
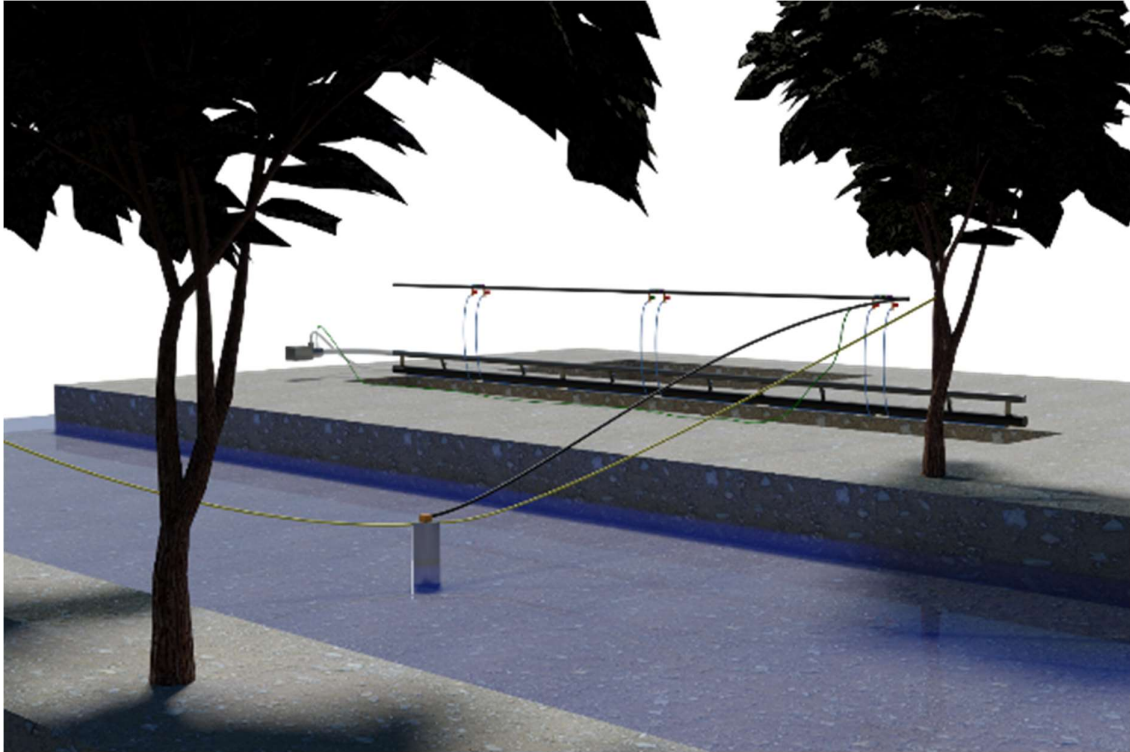


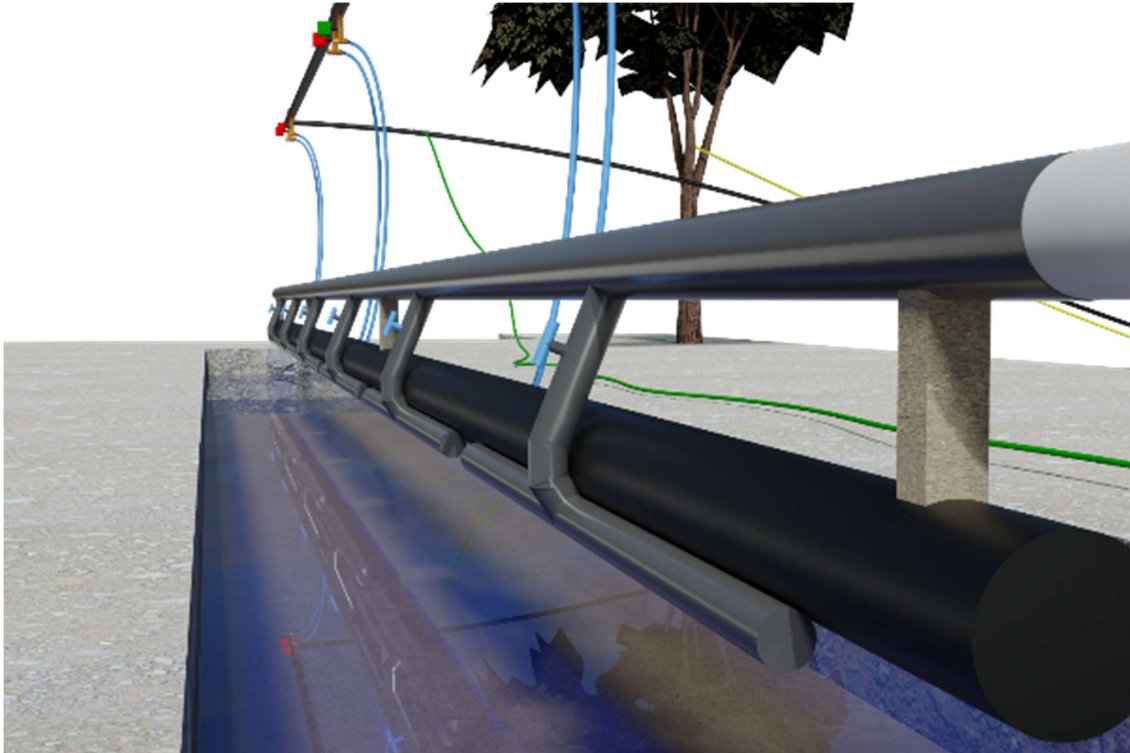
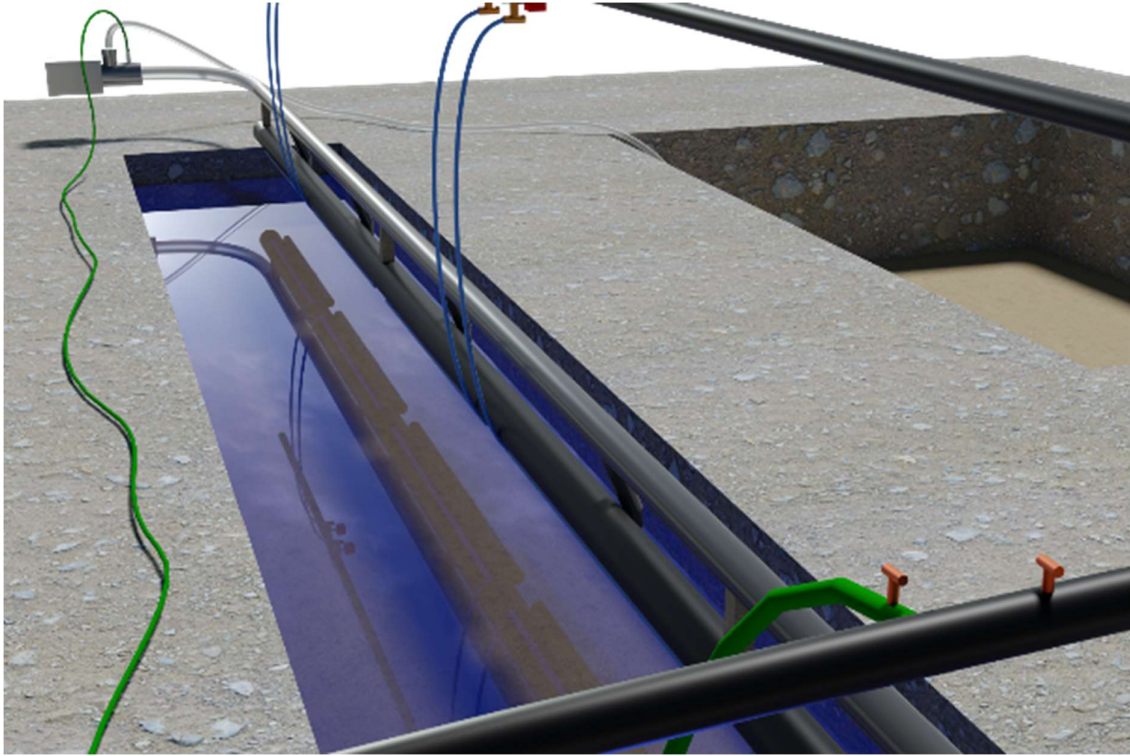
Figure 65 : Phase de test des capteurs

## 8.14. Vue simplifiée du site







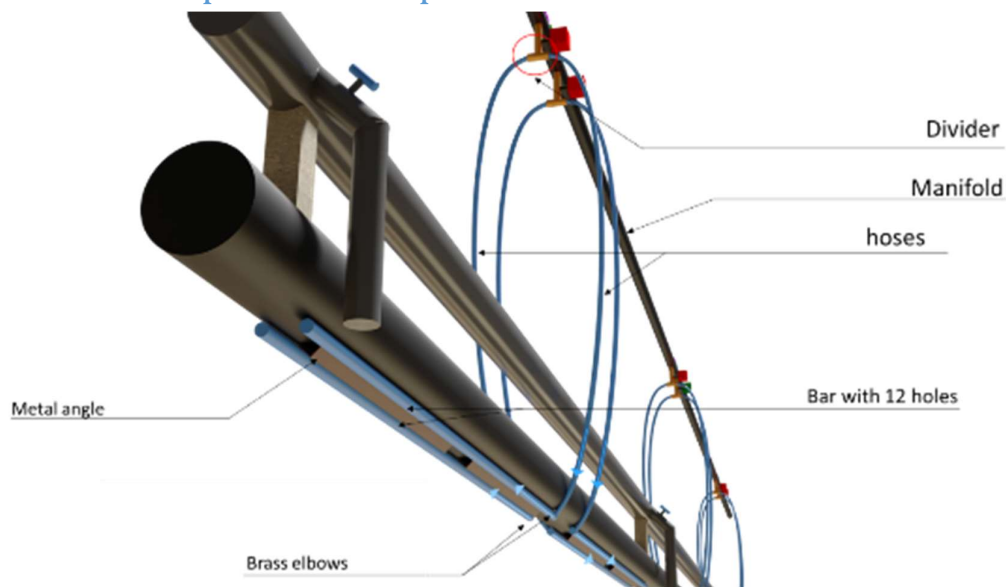


## 9. Description des tests et itérations sur le prototype

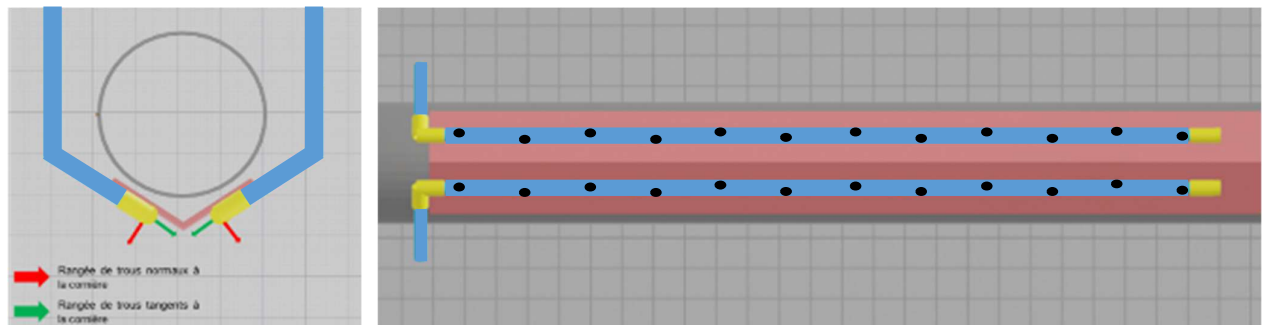
Cette section décrit les itérations effectuées lors des tests. Le prototype est composé de sections de 6 m de long avec des modules d'injection de 3 mètres de long. L'objectif était d'enfouir toute la conduite, mais les difficultés rencontrées lors de ce chantier ont conduit à n'enfouir que le premier tronçon.

### 9.1. Deux modules d'injection avec angles de jet, sans le système d'aspiration

#### 9.1.1. Descriptif de conception



La première approche consiste à tester le prototype initial comme décrit dans [la sixième section](#). Les jets ont une disposition particulière. Sur chaque barre, il y a 2 rangées de trous. La première rangée est perpendiculaire à la surface de la cornière (flèche rouge) et l'autre lui est parallèle (flèche verte).



L'axe des trous fait un angle de 45° ou 135° avec l'axe de la barre selon leurs positions sur la barre : Chaque trou est orienté vers l'extrémité de la barre la plus proche (voir [Figure 67](#)) pour diriger le flux

de flux de sable fluidifié vers la buse d'aspiration la plus proche (les buses d'aspiration d'eau sableuse étant situées entre chaque couple de modules d'injection).

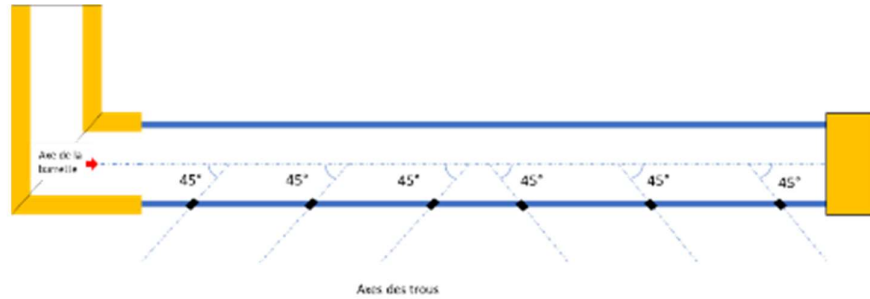


Figure 68 : Schéma montrant les directions des trous percés

Les trous sont disposés de manière à ce que les jets ne se rencontrent pas.

Une modélisation hydraulique couplée à des essais expérimentaux a permis de déterminer le meilleur diamètre de trous pour maximiser la puissance des jets d'eau : 2 mm. Ce résultat sera remis en cause lors de la phase d'expérimentation.

### 9.1.2. Résultats des tests

Les premiers tests sont effectués sur le sable sans eau (sable sec) puis dans l'eau sans le système d'aspiration. Les résultats sont similaires :

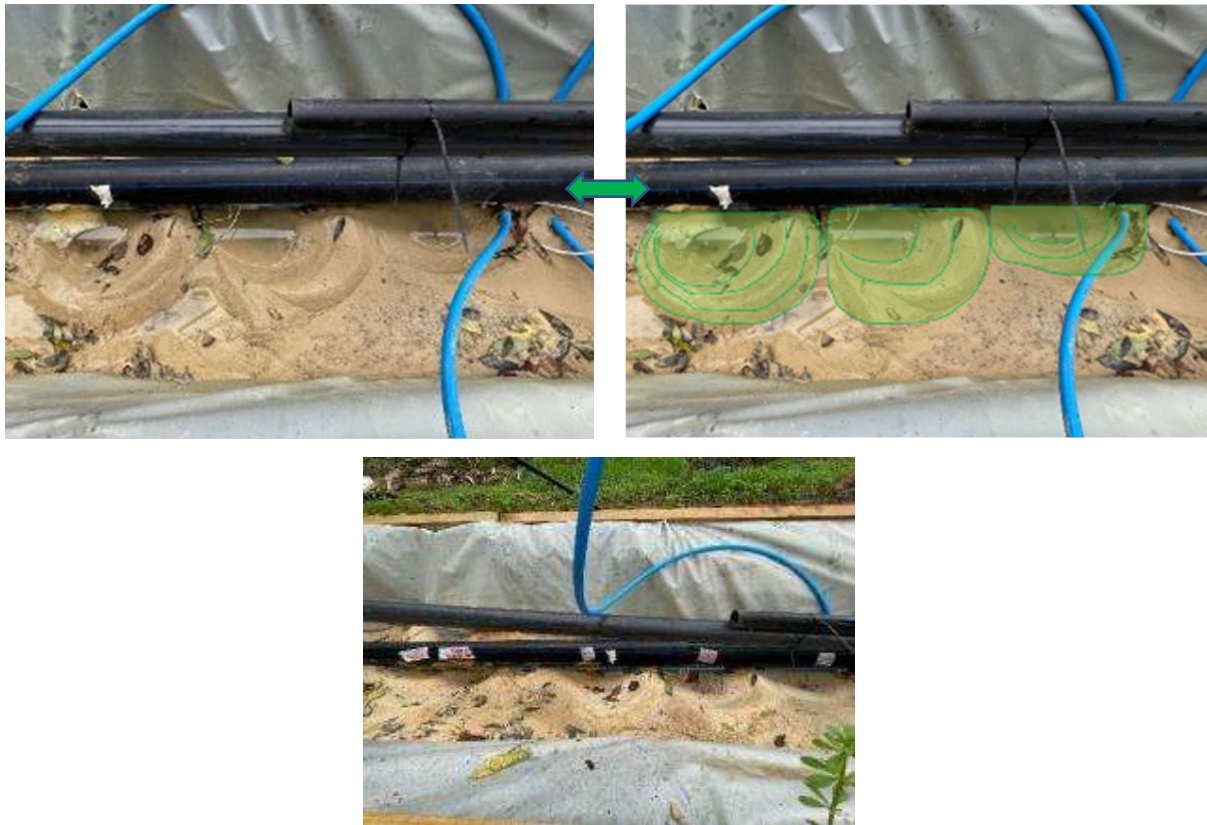


Figure 69 : Premiers résultats

- o Les jets d'eau sont très puissants : Ils pénètrent sur 20 cm à travers le sable.

- Le problème est leur orientation qui n'est clairement pas la plus efficace : on distingue facilement ces « flaques » qui se créent dans le sable. Les jets d'eau dirigés vers l'extérieur liquéfient le sable et le poussent à l'extérieur. Cependant, cela ne fonctionne qu'à proximité du jet et pas entre les jets.

Une grande quantité de sable reste donc entre les tronçons, et empêche l'enfouissement de la conduite.



Figure 70: Vue de profil

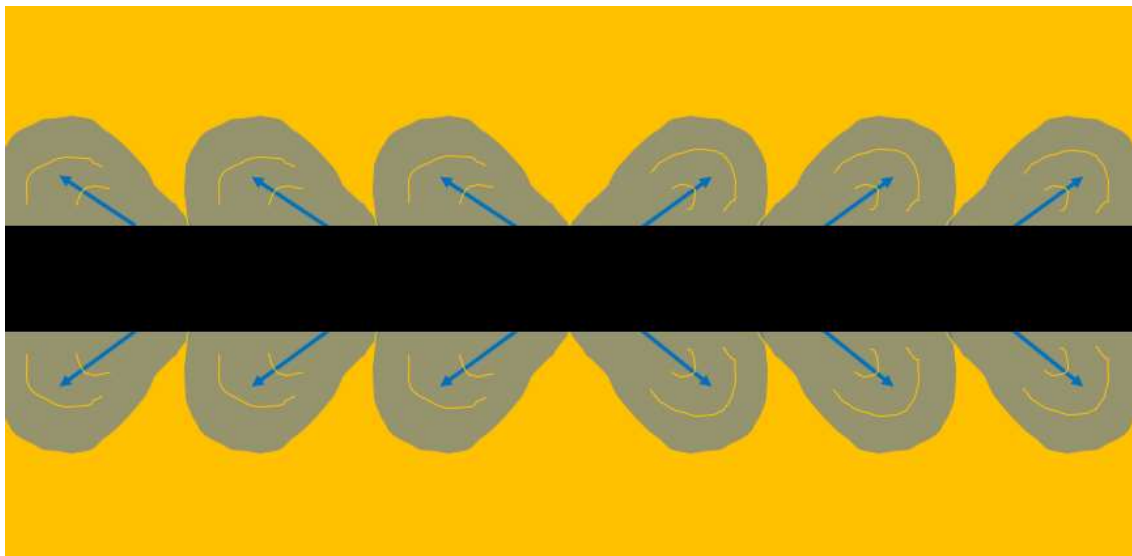


Figure 71: Vue de dessus

## 9.2. 2 Modules d'injection avec jets dirigés vers le bas

Après plusieurs tests, l'orientation des jets a été modifiée vers le bas afin que la puissance des jets soit entièrement dirigée vers le sable.

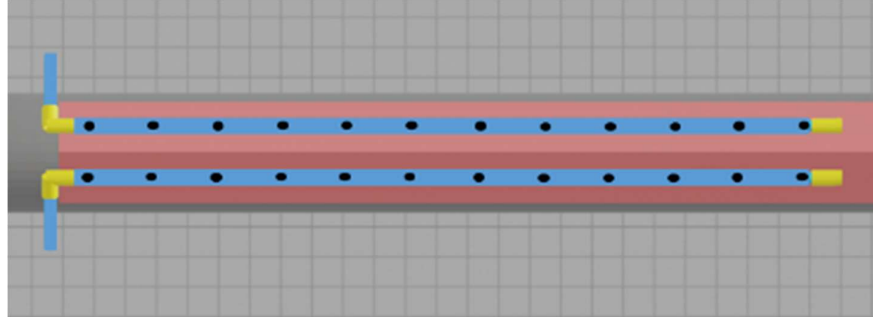


Figure 72 : Vue du dessous

On constate une amélioration :



Figure 73 : Résultat

Les cavités formées sont plus petites, moins visibles et plus désordonnées. C'est un pas en avant puisque le désordre généré est plus important et orienté sous le tube SWAC. Deuxièmement, les monticules qui obstruaient auparavant l'enfouissement sont plus petits, de sorte que le tube SWAC ne repose plus que sur très peu de sable.

Le résultat pourrait être amélioré en doublant le nombre de jets, permettant certainement l'élimination des derniers blocs de sable. Doubler les jets aurait nécessité de doubler le débit et d'ajouter une autre pompe en parallèle (faisable) mais, à cette étape, il a été supposé que l'ajout du circuit d'aspiration pouvait résoudre le problème sans ajouter d'autre pompe.

### 9.3. Injection et circuit d'aspiration avec buse unique

Ce test est basé sur l'hypothèse que la buse d'aspiration induira un courant dans le sable liquéfié et fera peu à peu s'éparpiller les blocs de sable sur toute la section du jet d'injection.

Les schémas suivants montrent le principe attendu de l'aspiration :

- Les flèches rouges et bleues représentent les injecteurs et le jaune pâle autour montre le sable liquéfié. Chaque injecteur crée une "flaque" de sable liquéfié, chacun séparé l'un de l'autre par un bloc de sable (jaune foncé).
- Le courant créé par l'aspiration est censé casser les blocs de sable et liquéfier le sable de l'un à l'autre et ainsi liquéfier tout le sable sous le tronçon de conduite.

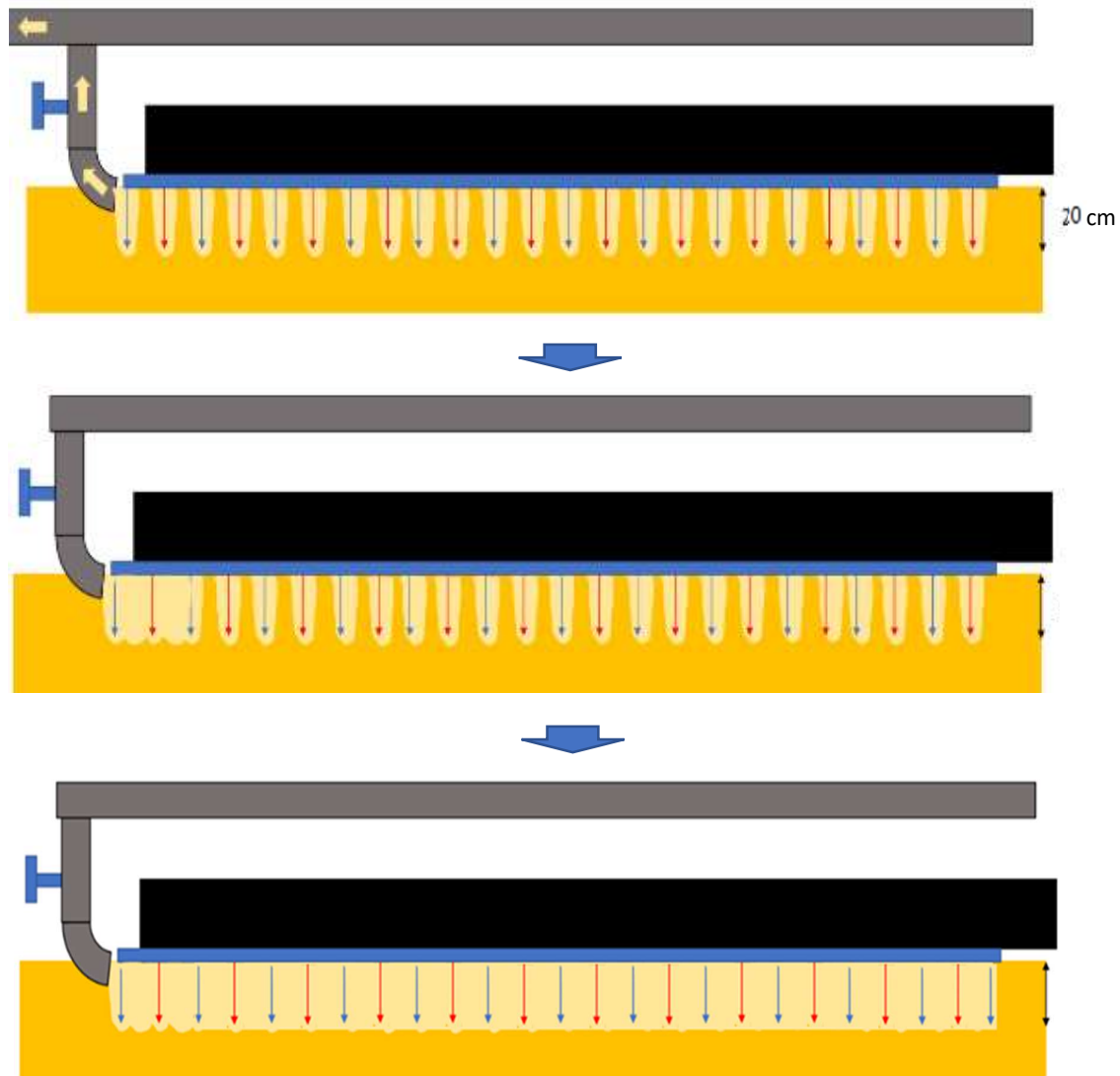


Figure 74 : Principe d'aspiration

L'hypothèse est vérifiée au premier mètre. L'extrémité du tube descend rapidement d'environ 5 cm (la moitié du diamètre du tube). Cependant, au bout d'un mètre, des blocs de sable restent en place et empêchent l'enfouissement.

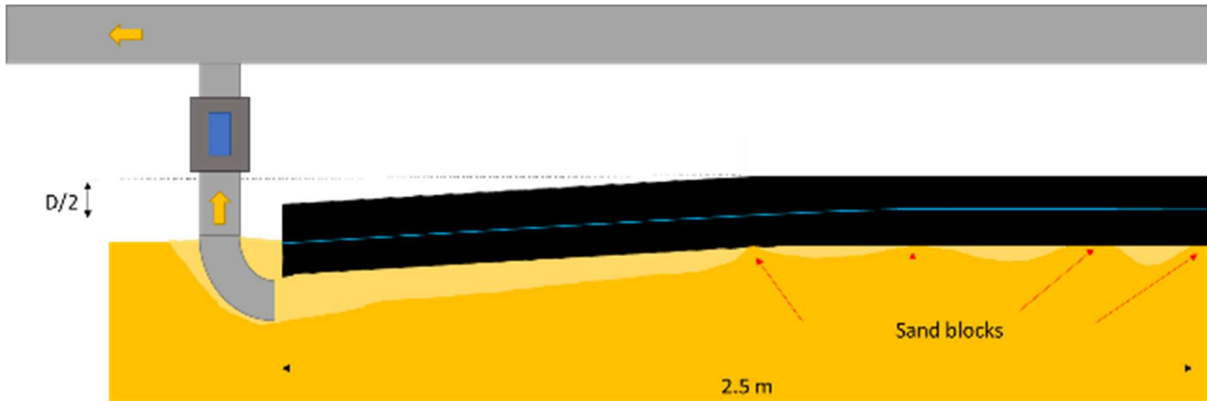


Figure 76 : Schéma de l'extrémité du tube semi-enfoui



Figure 76 : des résultats explicites

Plusieurs causes :

- o La flexibilité du tuyau est limitée. L'étude rapide [partie 6](#) montre que pour un tube en PEHD de 6 mètres de long bloqué aux deux extrémités, la flexion maximale sera inférieure à 2 diamètres. Mais cela ne suffit pas à expliquer le résultat.



- L'aspiration de l'eau sableuse n'est pas assez puissante pour générer un courant dépassant le mètre de longueur.

Il est possible de mesurer l'enfouissement en temps réel à l'aide des cordes utilisées pour soulever le prototype en mettant un repère sur la corde.



Figure 77 : Mesure de l'enfouissement

## 9.4. Barre d'injection unique et circuit d'aspiration avec 12 buses

Il apparait clairement que pour améliorer les performances de l'aspiration sur la totalité du tronçon de 3 mètres, la buse d'aspiration unique doit être divisée en buses plus petites et réparties sur la longueur totale. Toute la section de la buse a été divisée en 13 morceaux avec une section croissante à mesure qu'elle s'éloigne de la vanne :

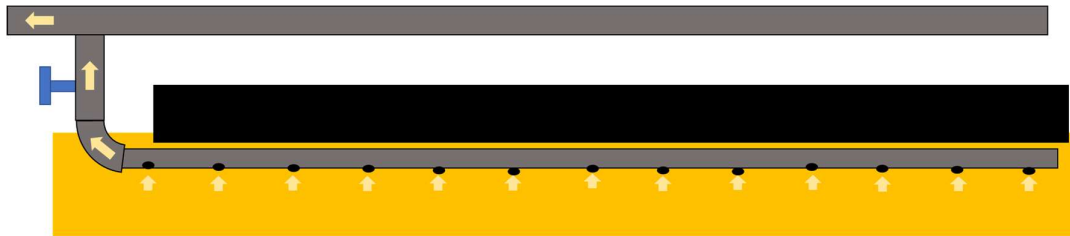


Figure 78 : Schéma du nouveau système d'aspiration

Ainsi, comme les buses d'aspiration sont devant les jets d'eau, le sable en suspension ira directement dans la buse.

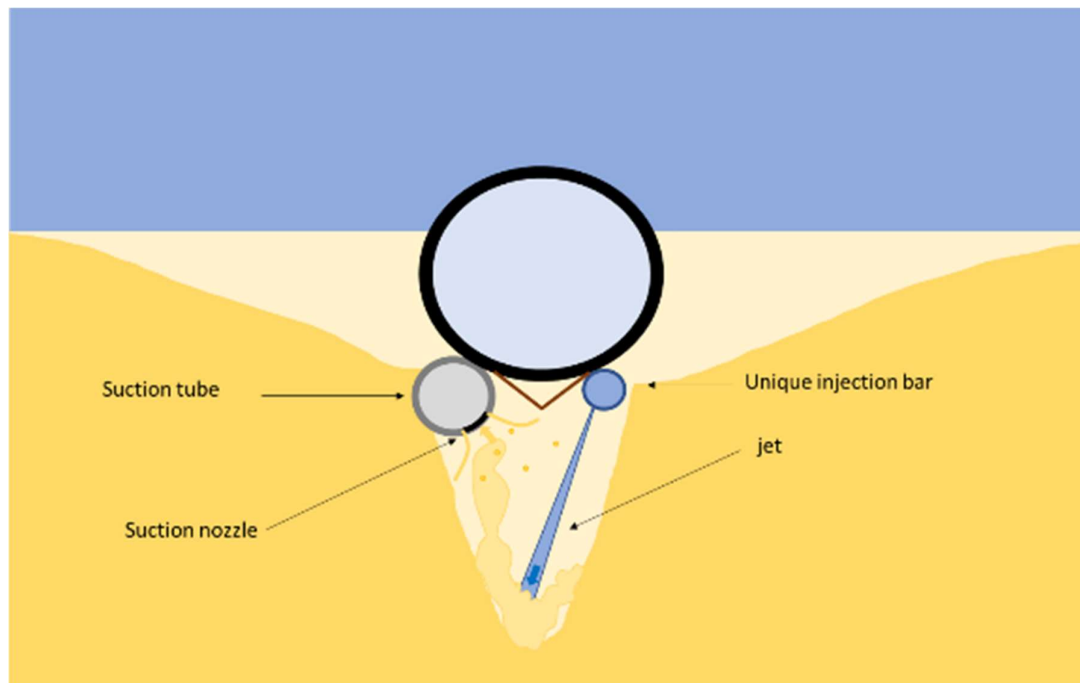


Figure 79 : Schema de principe

Le premier constat est que les monticules de sable sont moins nombreux. Cela signifie que le couple injection/aspiration fonctionne bien. Le sable en suspension ne se redépose pas au même endroit, et est évacué de la tranchée par les buses d'aspiration, constaté notamment par la grande quantité de sable circulant dans les tuyaux translucides.



Figure 80 : Résultats en image

Des monticules de sable empêchent toujours le tuyau de s'enfouir et le résultat est pire qu'une aspiration par buse simple car :

- Avec le collecteur d'aspiration raccordé en extrémité de barre, les pertes de charge en bout sont élevées. Ainsi, l'aspiration dans les dernières buses est quasi nulle.
- Les buses sont bouchées par des feuilles et des broussailles. Par conséquent, la section des trous a été augmentée pour améliorer les performances.

## 9.5. Tube d'aspiration central

Pour réduire les pertes de charge, le tuyau d'aspiration est déplacé au milieu. Cela permettra également de percer des trous plus gros. Pour cela, il faut percer un trou sur le collecteur, coller les raccords et ajouter une autre vanne.

La quantité de sable aspiré étant plus importante, il est difficile de faire fonctionner le système. La quantité de sable était si importante qu'elle obstrue le tuyau, bloquant le système d'aspiration.

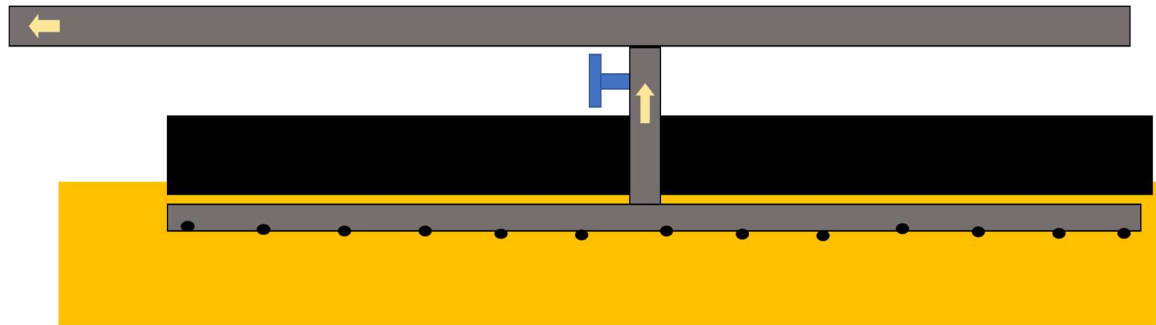


Figure 82 : Schéma du nouveau système d'aspiration



Figure 81 : Résultats

Finalement, le test a été un succès car tout le système a plongé dans la tranchée. Cependant, il semble que le tuyau ait glissé lentement sur la pente sablonneuse que le couple injection/aspiration a créé.

Ce problème était prévisible du a la forme du système qui n'est pas symétrique. En effet, le diamètre des barres d'aspiration est légèrement supérieur à celui des barres d'injection. Cela rend l'ensemble du système instable puisqu'il ne repose que sur la barre d'aspiration.

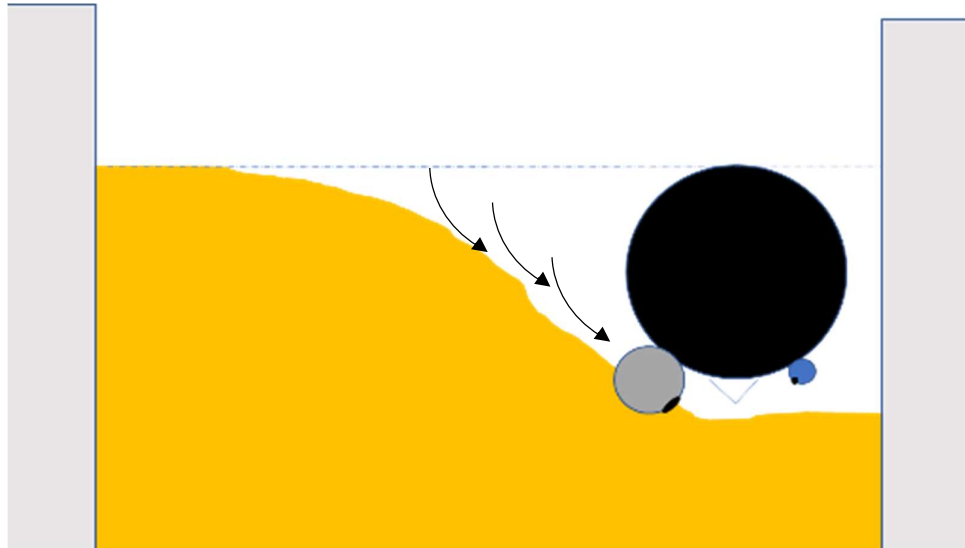


Figure 83 : Diagramme illustrant le phénomène

Les performances d'enfouissement sont meilleures, mais les mêmes problèmes persistent comme les monticules de sable et quelques bouchons.

Il est nécessaire de comprendre précisément le processus d'injection/aspiration afin d'améliorer le système, mais l'eau opaque empêche d'observer visuellement le déroulement.

## 9.6. L'aquarium et l'air sous pression

Pour résoudre les derniers problèmes rencontrés (dépôts de sable, trous bouchés), la solution envisagée est d'utiliser un aquarium de 1 m de long, avec un fond en verre transparent, qui remplacera le tube SWAC pour permettre la visualisation de l'enfouissement dans la tranchée.

Les dimensions de l'aquarium sont de 1 m x 0,35 m x 0,45 m. Le circuit d'injection est percé tous les 20 cm. Le nombre de trous sera doublé (donc tous les 10 cm). Le circuit d'aspiration est percé tous les 15 cm.

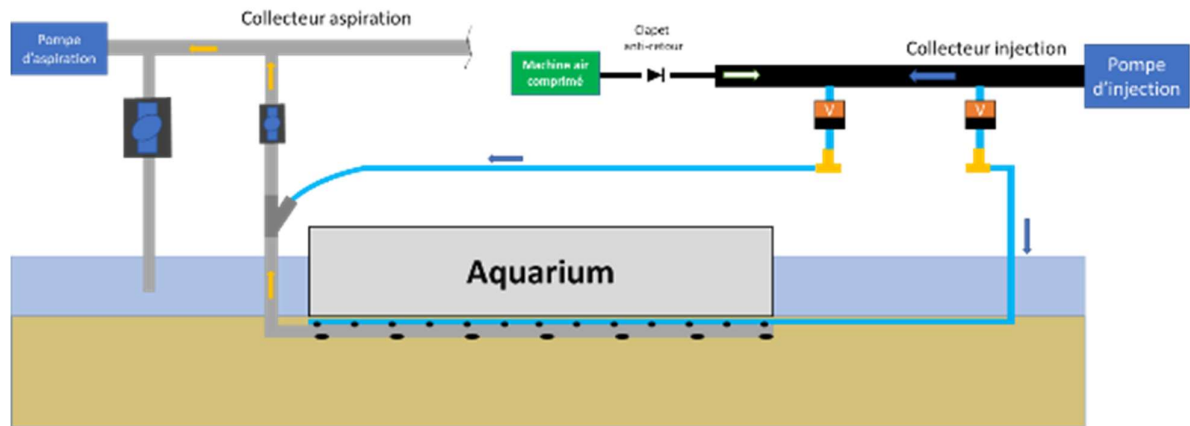


Figure 84 : Schéma de l'installation de l'aquarium

Le circuit d'injection est relié par une vanne motorisée au circuit d'aspiration pour injecter de l'eau via les trous d'aspiration. Le but est de dessabler les trous d'aspiration si nécessaire.

Le système d'air sous pression a été ajouté au cours de cette phase. Cela nous a permis de le tester avec des résultats plus visibles pour décider de son utilité.

Remarque : Pour éviter d'aspirer de l'air, le système d'aspiration ne peut pas être activé pendant l'injection d'air comprimé.

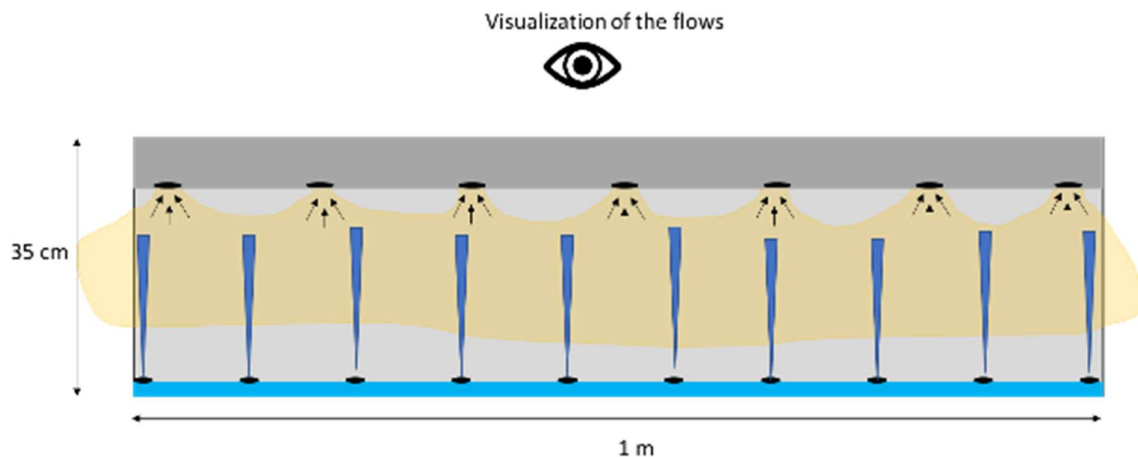


Figure 85 : Vue du dessus

L'aquarium est vide (plein d'air) pendant le test. C'est une contrainte car il est à moitié immergé, la pression de l'eau sur ses surfaces verticales/inférieures est élevée. Pour empêcher l'aquarium de flotter, deux armatures en métal sont ajoutées pour le lester suffisamment. Une à l'extérieur et l'autre à l'intérieur de l'aquarium.



Figure 86 : Armatures en metal

Les tests avec des trous d'injection tous les 15 cm ont fait ces traînées de sable caractéristiques :



Figure 87 : Characteristic sand trails



Figure 88 : Illustration des résultats pour des jets tous les 20 cm

Cela indique que les jets ne sont pas assez proches, aussi puissants soient-ils. Pour générer le maximum de désordre, il faut les rapprocher. Le nombre de trous a été doublé et l'expérience a été testée à nouveau.

Les résultats les plus intéressants se trouvant à ce niveau :



Figure 89 : Démarrage des jets



L'allumage des jets prend 5 secondes, le temps nécessaire pour évacuer l'air des canalisations.

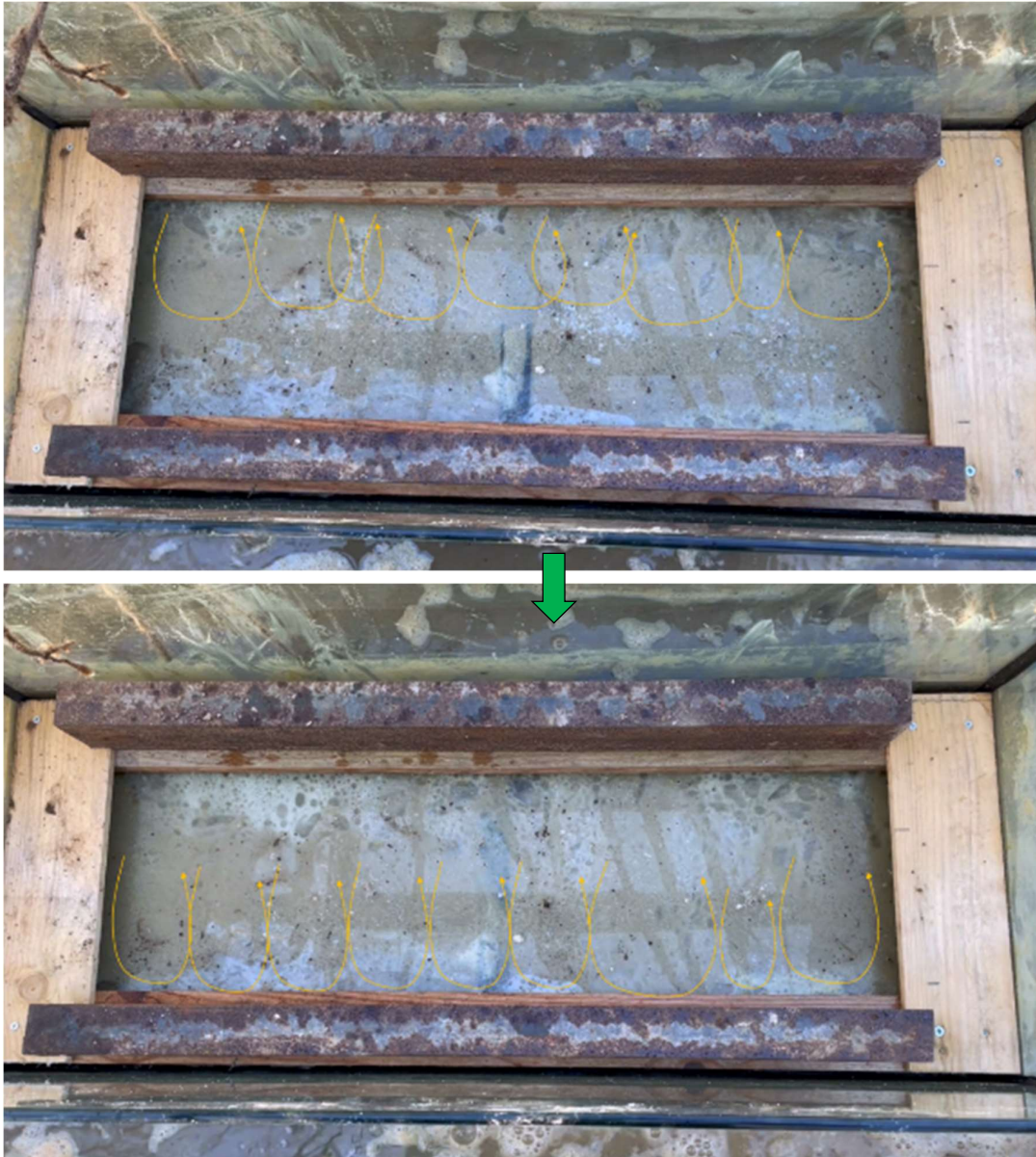


Figure 90 : Phase 1: jets allant à leur portée maximale

Distinguons deux phases. La première sur les images ci-dessus est celle où les jets tentent d'atteindre leur portée maximale. On remarque que leur épaisseur est réduite. L'explication étant que chaque jet est, à ce moment, coincé entre deux traînées de sable comme auparavant. Ils n'ont pas d'autre choix



Figure 91 : Phase 1 : Circuits étroits de convection. Vue de face

que de continuer dans la direction la plus facile. Chacun d'eux crée un petit circuit de convection qui repart en sens inverse :

Comme les jets sont très proches, les monticules de sable sont très fins et faciles à éliminer.



Figure 92 : Phase 2 : Chaos

Une fois les monticules de sable éliminés par les jets d'eau, le "chaos" peut commencer. On peut voir que des circuits de convection plus importants ont été formés par des associations de jets. Le courant peut facilement souffler des particules de sable statiques et créer un désordre maximal qui est aspiré par les buses d'aspiration.

#### 9.6.1.1. Analyse

Ces observations doivent être mises en perspective avec le système réel : le prototype auto-ensouilleur.

Pour cette expérience, comme nous avons besoin de voir clairement le comportement cinématique des jets d'eau et les mouvements des particules de sable, nous avons placé les jets horizontalement. Dans la réalité, ils sont placés verticalement. Néanmoins, le comportement du sable est similaire à l'exception des monticules de sable qui tombent verticalement dans les trous creusés par les jets.

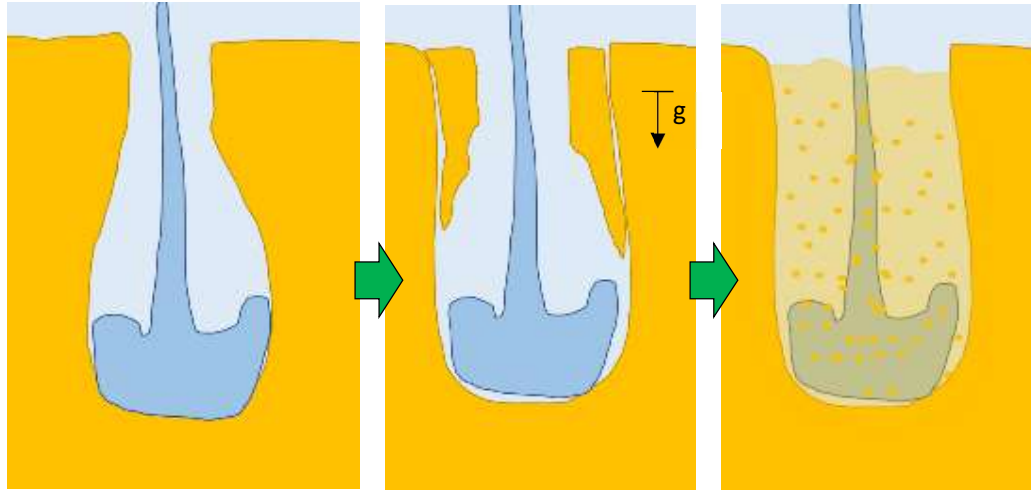


Figure 93 : Ecoulement des monticules de sable

Si les jets sont suffisamment proches, ils feront donc sauter les derniers monticules de sable qui empêchaient auparavant le prototype de s'enfouir. Une partie du sable en suspension est aspirée par le circuit d'aspiration, l'autre partie retombe dans la tranchée ou à l'extérieur. L'élément majeur est que le niveau de sable sous le prototype diminue de manière significative.

En conclusion, ce test nous a permis de constater que les jets devaient être plus proches pour avoir un impact significatif et global sur toute la surface sous le prototype.

### 9.6.1.2. Système d'air sous pression

Comme illustré sur les schémas du système global, la machine à air sous pression est connectée à l'extrémité du collecteur.

Machine à air sous pression



Raccord machine / collecteur

Figure 94 : Photos de la machine et du montage

L'injection d'air sous pression n'a été testée qu'avec l'aquarium. Le résultat est satisfaisant car il a généré du désordre sur le lit de sable. Cependant, une partie de l'air éjecté est entrée dans le système d'aspiration par la barre d'aspiration et a désamorcé la pompe d'aspiration. Il ne peut donc pas être utilisé pendant que l'aspiration est activée.

## 9.7. Diamètre des buses d'injection

Au cours des expérimentations, il a été constaté que de nombreuses buses d'injection étaient partiellement bouchées. L'eau sous pression sortant de ces buses a perdu la moitié de sa puissance. Ce problème est dû à des défauts de perçage. Lors du perçage, le matériau PER se laminait localement et créait de petits éclats qui restaient bloqués dans la buse. Afin d'éviter ce problème, le diamètre des buses, initialement fixé à 2 mm, a été augmenté à 3 mm.

## 9.8. Campagne de test fin 2022

En décembre 2022, le froid rend les essais impossibles (gel de l'eau dans les circuits), et il est décidé d'arrêter la campagne d'essais jusqu'au printemps prochain.

## 9.9. Campagne d'essais de mars 2023

En mars 2023, une campagne de tests de 2 semaines a été réalisée (13-24 Mars 2023). L'objectif était d'enterrer tout le tuyau.

### 9.9.1. Activités réalisées

- Réinstallation du prototype dans la tranchée et le système de pompage dans la rivière (voir Figure 95 et Figure 97)
- Changement d'huile moteur
- Modification du prototype comme suit :
  - o Équiper les sections restantes du tube SWAC avec des modules d'injection selon l'optimisation 2022 (notez que seulement 5 sections ont été équipées : la sixième section n'a pas été équipée) - voir Figure 98
  - o Équiper les sections restantes du tube SWAC d'une aspiration d'eau sablonneuse conformément à l'optimisation 2022 (notez que seules 5 sections ont été équipées : la sixième section n'était pas équipée) - voir Figure 98
  - o Corriger les fuites sur le circuit d'injection d'air comprimé
  - o Ajouter une deuxième pompe sur le circuit d'aspiration (Figure 96)



Figure 95: Mars 2023 - prototype dans la tranchée



Figure 97: Mars 2023 - prototype dans la tranchée



Figure 96: Mars 2023 - 2 pompes installées dans la rivière

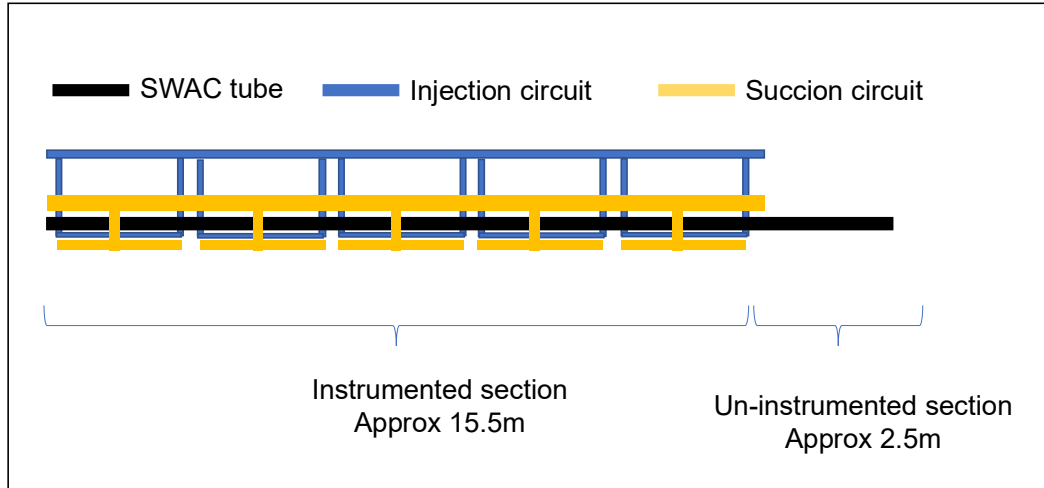


Figure 98: schéma de l'instrumentation le long de la conduite

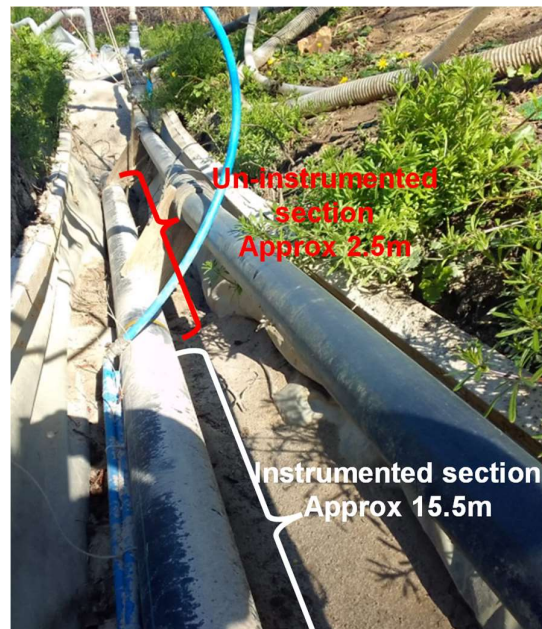


Figure 99: schéma de l'instrumentation le long de la conduite

Des tests unitaires ont été réalisés avec la première section pour s'assurer que la deuxième pompe a le résultat attendu (amélioration de l'efficacité de l'aspiration des eaux sableuses).

Un essai final pour enfouir l'ensemble de la conduite a été effectué le dernier jour.

## 9.9.2. Test final et résultats

Le test final a été réalisé le 24 mars 2023. La séquence de test est disponible en annexe 11. (Section **Error! Reference source not found.**) et est résumée dans le tableau ci-dessous:

# Etape	Description	Résultats et observations	Difficulté et action ultérieure
1	- Configuration initiale du prototype : - Inspection finale - Remplissage de la tranchée avec de l'eau - Démarrage de l'aspiration dans la première section - Démarrage de la deuxième pompe dans la rivière	La première section du tuyau s'enfouit	N / A
2	- Ouverture de l'aspiration et des injecteurs de la 2ème section - Fermeture de l'aspiration et des injecteurs du 1er tronçon	La deuxième section du tuyau s'enfouit (moins que la première)	N / A
3	- Ouverture de l'aspiration et des injecteurs de la 3ème section - Fermeture de l'aspiration et des injecteurs de la 2ème section	N / A	Les électrovannes ne fonctionnaient pas comme prévu et ont été remplacées par des vannes manuelles.
4	- Ouverture de l'aspiration et des injecteurs de la 3ème section - Fermeture de l'aspiration et des injecteurs de la 2ème section Puis - Ouverture de l'aspiration et des injecteurs de la 4ème section Fermeture de l'aspiration et des injecteurs du 3e tronçon	La troisième et la quatrième section du tuyau s'enfouissent	L'un des tés d'aspiration était fissuré. La tranchée a été vidée afin de réparer le té d'aspiration
5	- Remplissage de la tranchée avec de l'eau - Début de l'injection et de l'aspiration sur le premier tronçon, puis le deuxième, puis le troisième etc.		Une large fissure est à nouveau observée sur le té réparé. Une nouvelle réparation a été tentée mais sans succès.

Les résultats sont les suivants :

- La conduite SWAC s'est enfouie dans la tranchée et de grandes quantités de sable ont été enlevées ( Figure 100, Figure 101et Figure 102).
- La section non instrumentée n'était évidemment pas enterrée, ce qui empêchait tout le tube de s'enfoncer entièrement ( Figure 98)
- La conduite ne s'est pas enfouie uniformément : la première section est celle qui s'est enfouie le plus profondément. Trois mesures d'enfoncement ont été réalisées le long de la conduite :



35 cm près du 1<sup>er</sup> tronçon, 46 cm au milieu de la conduite et 12 cm à l'extrémité ( Figure 103).  
Les explications à cela peuvent être les suivantes :

- La section non instrumentée a empêché la section voisine de s'enfoncer (la flexibilité de la conduite limite l'enfoncement)
- On ne s'attend pas à ce que la pompe d'aspiration perde de son efficacité le long des sections de conduite, mais cela devra être confirmé lors d'autres tests



Figure 100: vue du tuyau enfoncé dans la tranchée

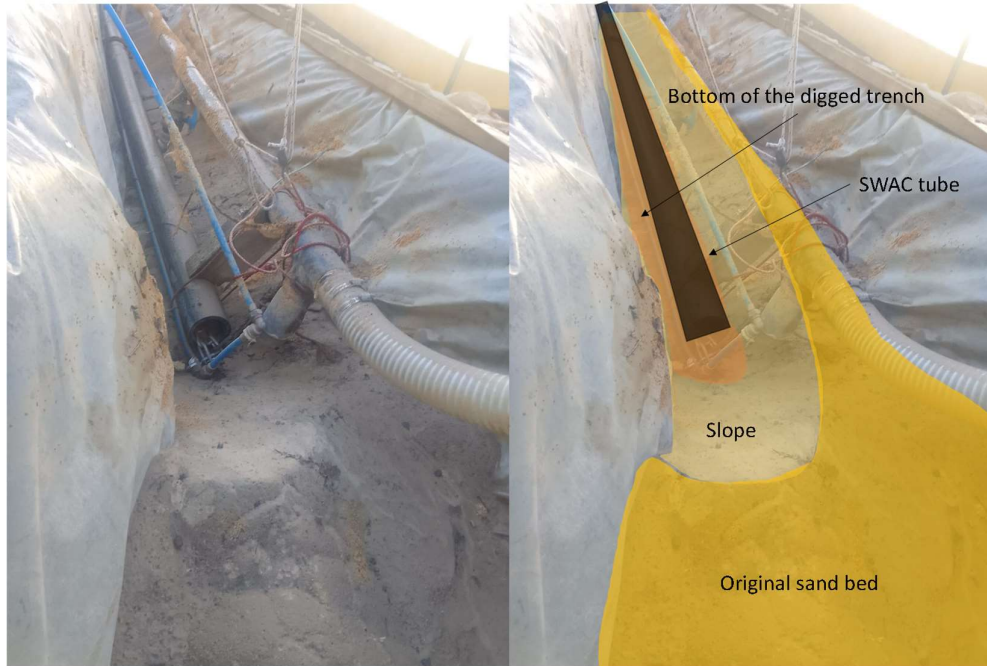


Figure 101: vue de la conduite dans la tranchée

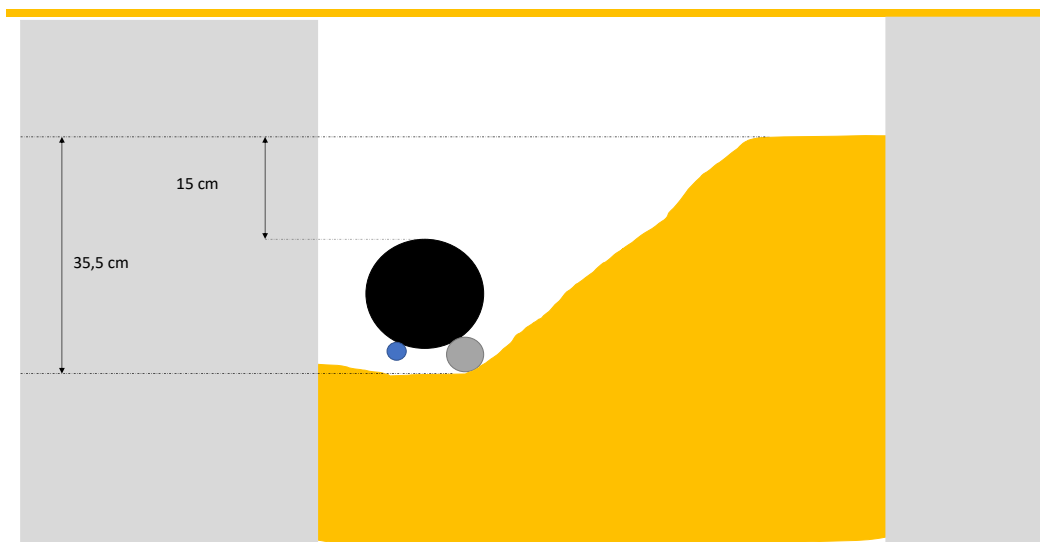


Figure 102: croquis du résultat du premier enfouissement

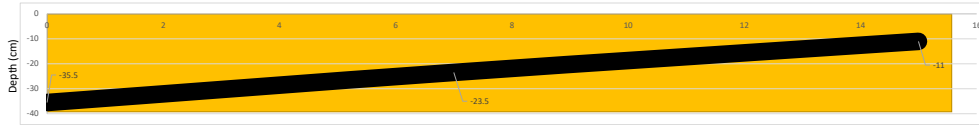


Figure 103: résultat de test : la section instrumentée de la conduite est enterrée



Figure 104: measurement of buried height at first section level

## 10. Conclusion

### 10.1. Première campagne de test et optimisation du prototype

La première campagne d'essais a commencé début novembre et s'est terminée début décembre. De nombreuses expérimentations ont été réalisées qui ont permis d'améliorer rapidement le prototype et de converger vers des solutions de plus en plus performantes. Les principaux résultats de ces tests sont :

- Les jets d'injection doivent toujours être dirigés sous le tube SWAC
- Les jets d'injection doivent être proches les uns des autres pour éliminer les monticules de sable. La distance entre eux doit être réduite de moitié. Il faut donc doubler les jets (24 jets pour 2,5 mètres, puis 46 jets).

L'auto-enfouissement par section est contraint par la rigidité du tube SWAC. Comme vu en partie 6, le prototype peut être enterré par tronçons de 6 mètres minimum. Cela implique une conception du circuit d'eau pour l'injection avec des dimensions précises. La longueur des barres d'injection forcées est fixée à 2,5 mètres. Doubler les jets revient à doubler le nombre de trous sur chaque barre. Pour cela, il faut ajouter une deuxième pompe avec les mêmes performances.

- Le système d'aspiration de sable est recommandé pour améliorer l'efficacité du système
- L'injection d'air sous pression est nécessaire pour les mêmes raisons

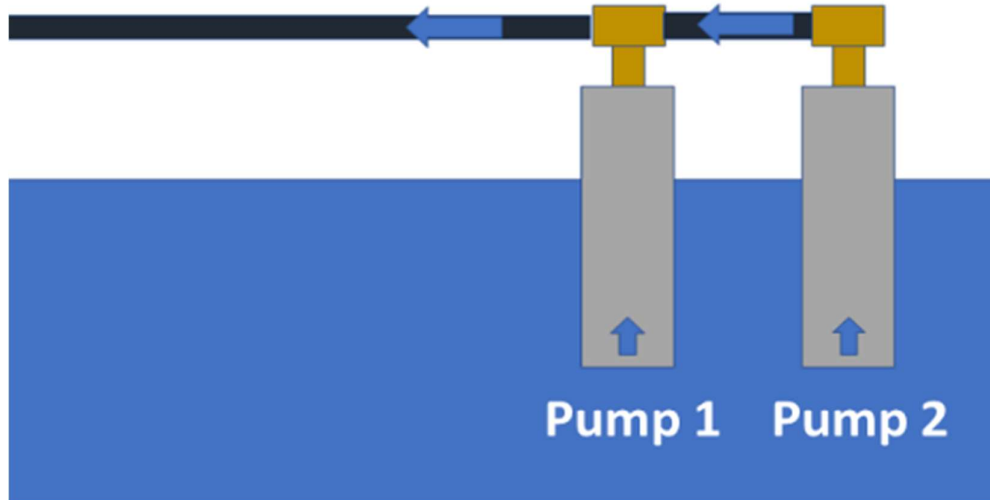


Figure 105 : Pompes en parallèle dans la rivière pour doubler le débit d'eau

Si les résultats sur la première section sont concluants, le test sur l'ensemble du système sera effectué.

## 10.2. Campagne de mars 2023 et résultats concluants

Le prototype assemblé, optimisé et testé était adapté à la réalisation des tests prévus pour le projet EuroSwac :

- Le système d'aspiration était opérationnel et efficace.
- Le système d'aspiration du sable était nécessaire mais était aussi le point faible du modèle car la pompe d'aspiration était gérée « a vue »
- Le sable est bien liquéfié par les injecteurs, broyé par l'injection d'air comprimé, puis aspiré correctement.
- L'enlèvement du sable déclenche l'enfoncement de la conduite.

## 10.3. Suite

De nouvelles optimisations **sur le prototype** ont été identifiées (essais provisoires à l'été 2023, hors périmètre Euroswac )

- o Couper la section non instrumentée du tuyau ( Figure 98)
- o Remplacer le collecteur d'aspiration rigide par un flexible annelé afin d'augmenter la flexibilité du système et ainsi faciliter l'enfoncement par tronçons (et réduire les itérations) ( Figure 106)
- o Installer une fenêtre (= tuyau transparent) dans le circuit d'aspiration du sable pour mieux évaluer la quantité de sable aspirée dans l'eau ( Figure 107)
- o Remplacer les connecteurs par des connecteurs plus appropriés dans le circuit d'aspiration afin de réduire les pertes de charge
- o Test avec une seule pompe afin d'évaluer le potentiel d'optimisation

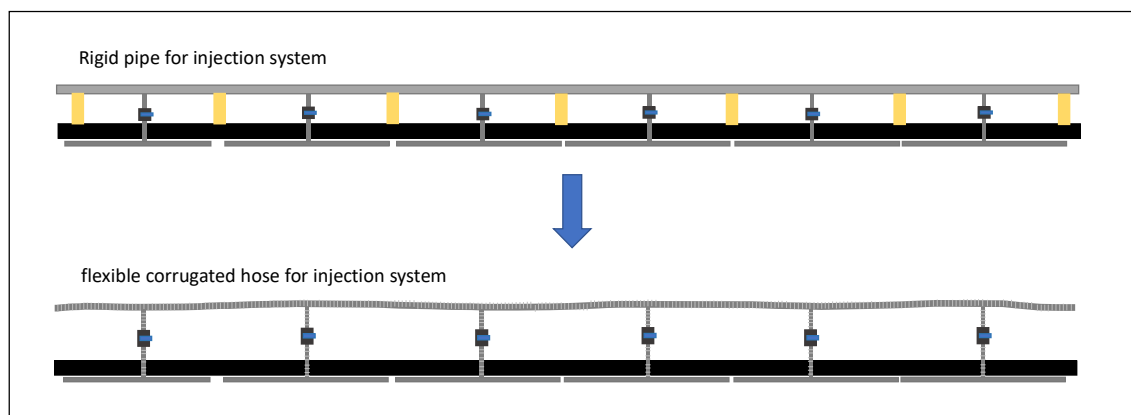


Figure 106: remplacement du tuyau d'injection rigide par un flexible annelé

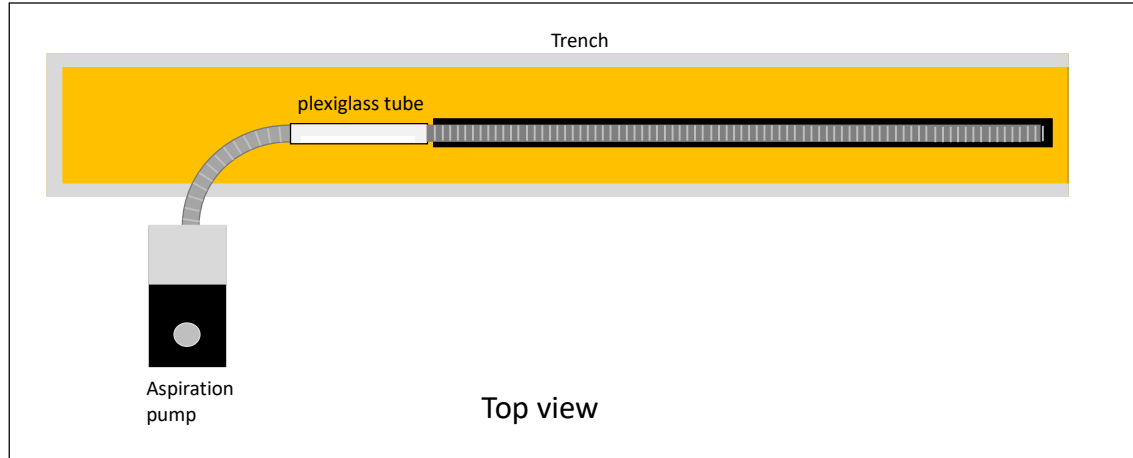


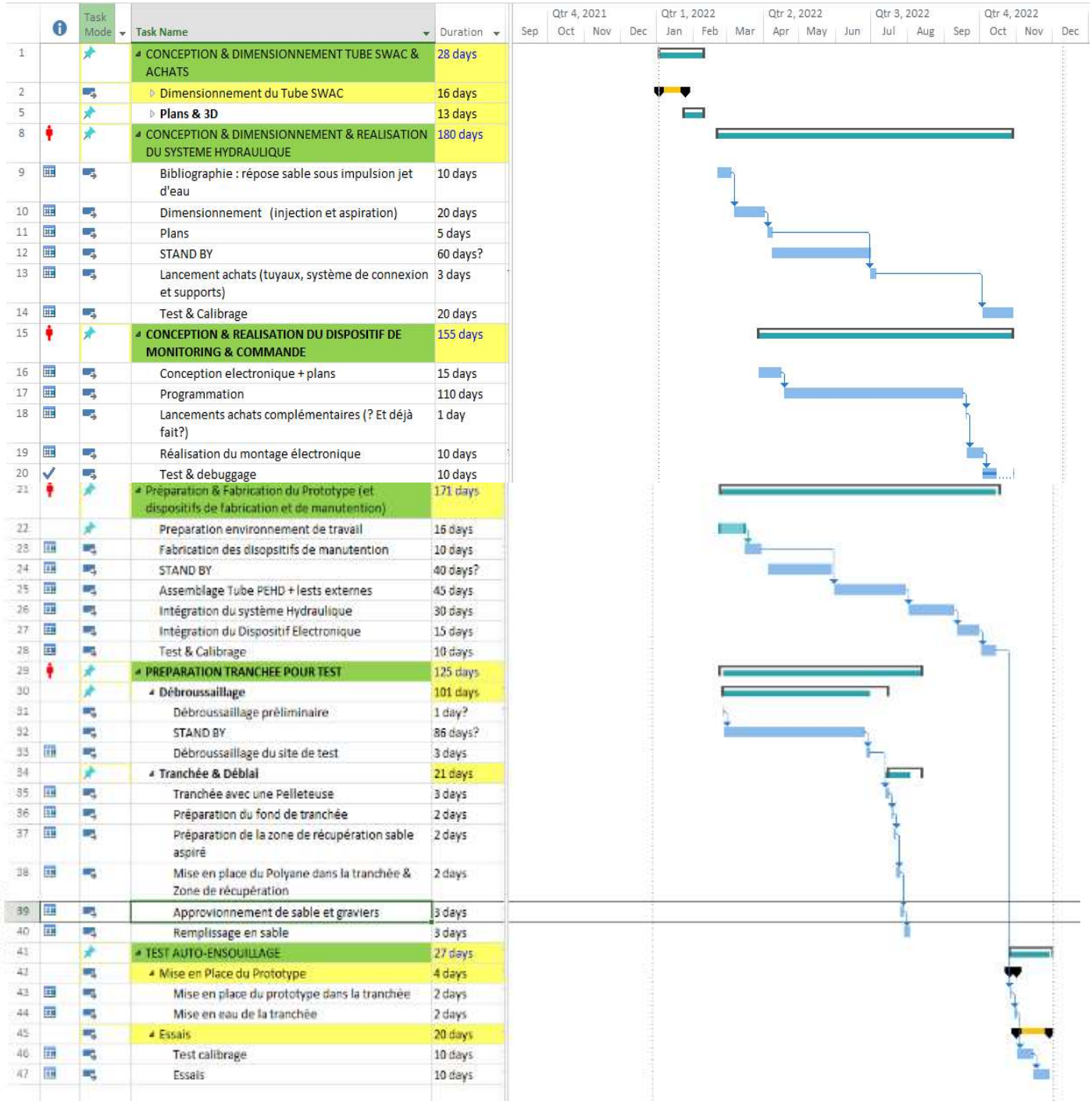
Figure 107: installation d'un tube transparent pour la visualisation de la quantité de sable

**L'extrapolation à un environnement offshore** nécessitera les mesures suivantes :

- Le choix des matériaux des circuits d'injection et d'aspiration doit être adapté pour assurer la souplesse des raccords (PE au lieu de PVC par exemple)
- Toutes les connexions doivent être soudées pour éviter les fuites
- La commande à distance par électrovannes et relais n'a pas été couronnée de succès, ainsi des vannes ¼ de tour actionnées par un plongeur seraient une meilleure solution avec un impact limité sur le coût du concept.

# 11. Annexes

## 11.1. Planification (2022)



## 11.2. REX

Problèmes		Cause	Solution
Fuites	Tube d'aspiration souple	Le silicone n'a pas tenu. Non recommandé	Silicone remplacé par de la colle pvc
	Connecteurs	Inclinaison due à l'hyperstatisme de certains montages	Ajouter une couche de colle pvc
	Vannes encrassées	Les vannes manuelles en contact direct avec le sable pompé s'ensavent à chaque ouverture/fermeture. A la longue, elles sont presque bloqués	Laver régulièrement les vannes
	Fils	Fléchissement des fils dû à l'hyperstatisme de certains montages. La courbure se produit lorsque la longueur du guide est beaucoup plus petite que le diamètre du tube fileté.	Trouver la fuite (le plus dur) et serrer au maximum
Tube d'injection percé	Tuyau d'incendie	Cause 1) Pourriture de la doublure en tissu due à l'humidité de la rivière Cause 2) Microfissures dues au déplacement	Tube souple
	Tube souple	Simplement fissuré sur 2 cm sûrement avec un outil pointu	Nous avons essayé d'installer un raccord, mais tout a explosé à cause de la pression. Nous avons remplacé le tuyau par un tuyau en PEHD DN50. Nous avons dû acheter des connecteurs DN50 à DN40 en conséquence.
Électricité	Courant électrique	Le câble d'alimentation des deux pompes et du compresseur était trop fin. Le courant électrique induit par l'allumage de ces trois machines était trop fort, ce qui arrêta systématiquement la pompe d'aspiration	Achat d'une multiprise supplémentaire avec des câbles plus épais
	Relais de vannes motorisées	Câbles fins coupés et complètement inaperçus	Soudage à l'étain
Trop de flexibilité	Collecteur de vide	Les connecteurs en caoutchouc du collecteur d'aspiration étaient beaucoup trop flexibles et tombaient littéralement sur le sable de la tranchée.	Création de supports en bois supplémentaires



## 11.3. Équipe de DORIS Engineering et DeProfundis

DeProfundis :

- Bruno Garnier PDG, expert SWAC et chef de projet DeProfundis.
- 3 ingénieurs stagiaires : Léonard Brun, Cecilia Rocha, Ghilès Touazi

DORIS Engineering:

- Claire Perez-Thomas – Chef de projet DORIS Engineering
- Nasser Sadi - Responsable
- Norbert Kergastel - Dessinateur
- Hugo Youssouf-Lacour - Ingénieur
- François Thiébaud – Conseiller

## 11.4. Première conception du prototype

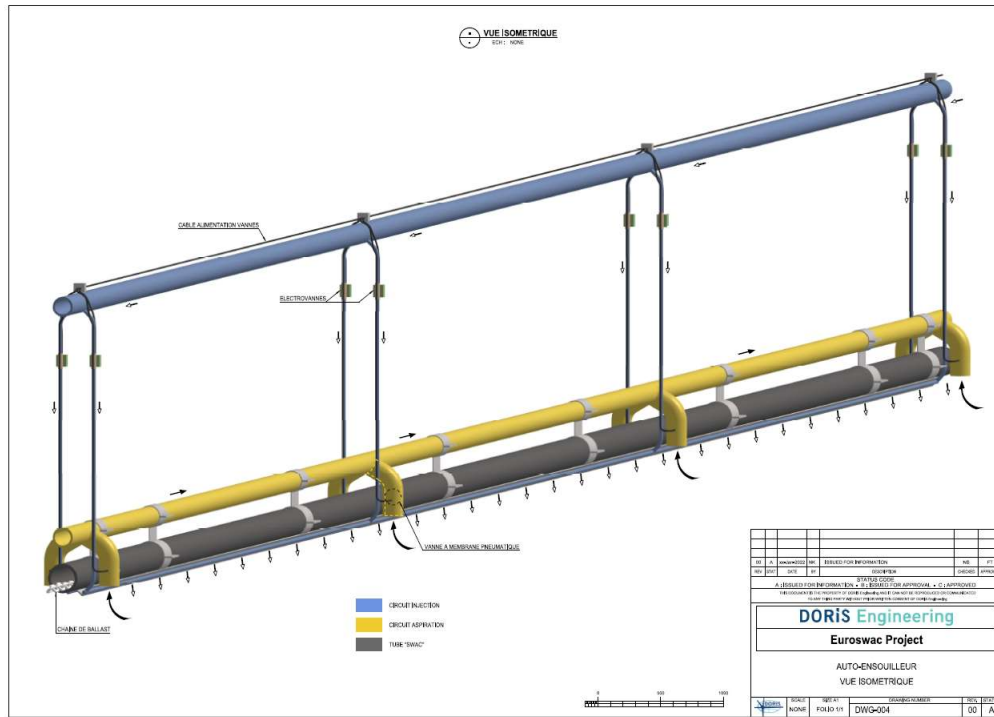


Figure 108: Plan de la première conception du prototype

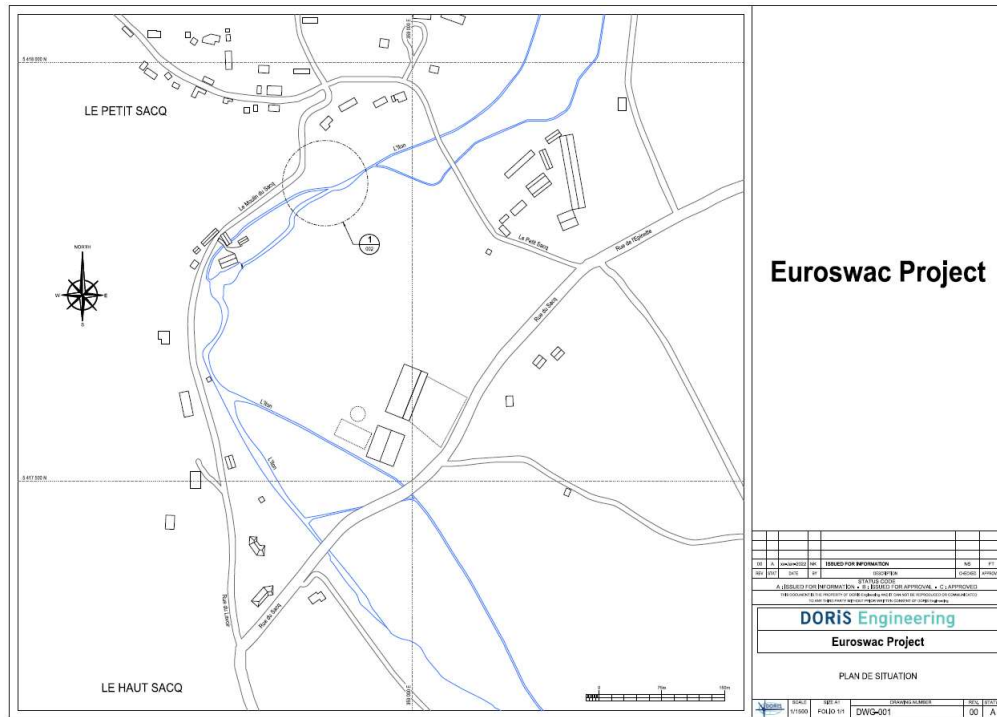


Figure 109: Plan du site : Mesnil-sur-Iton

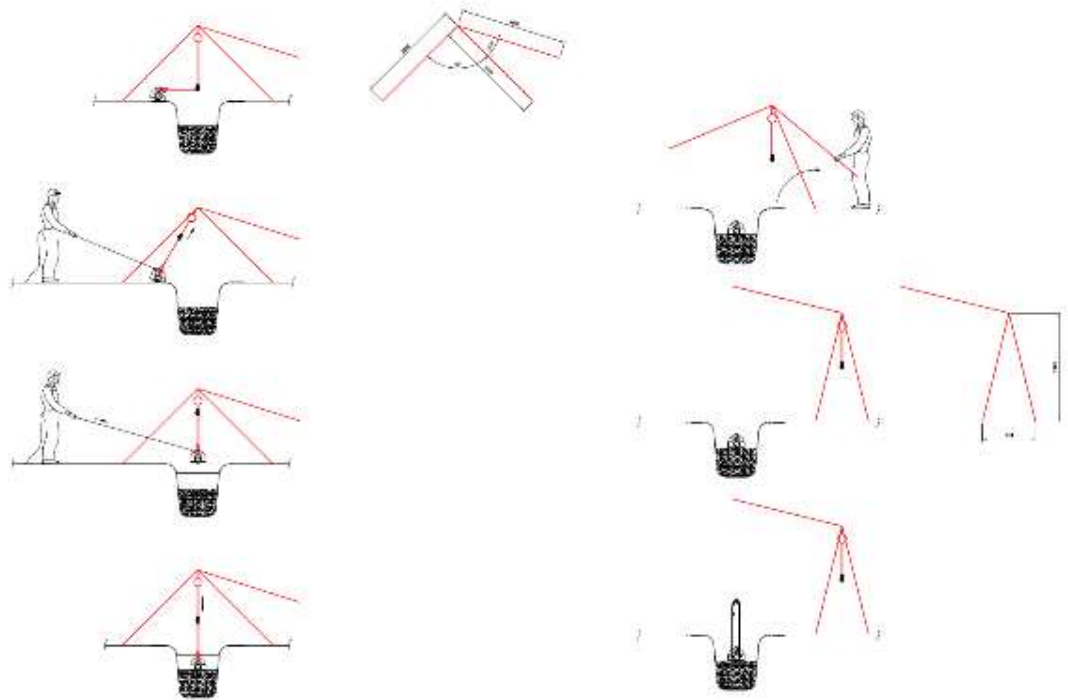
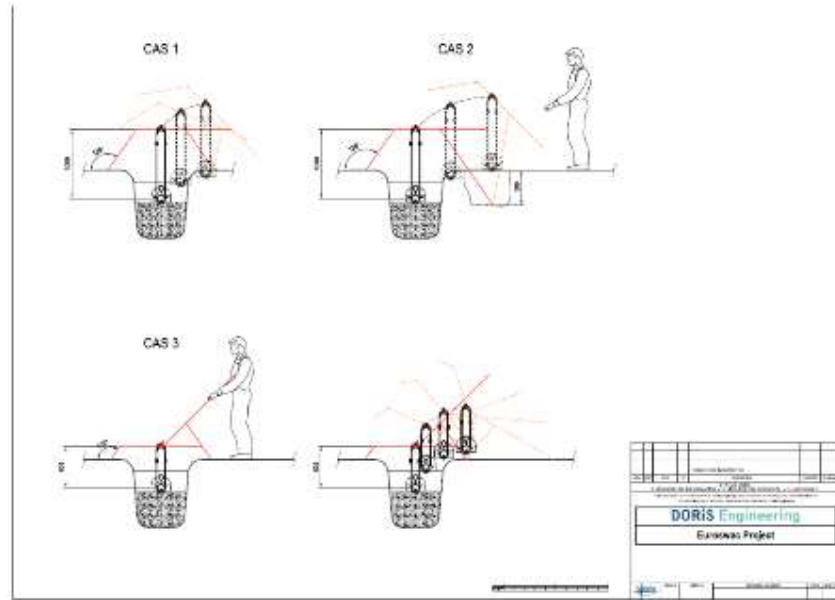
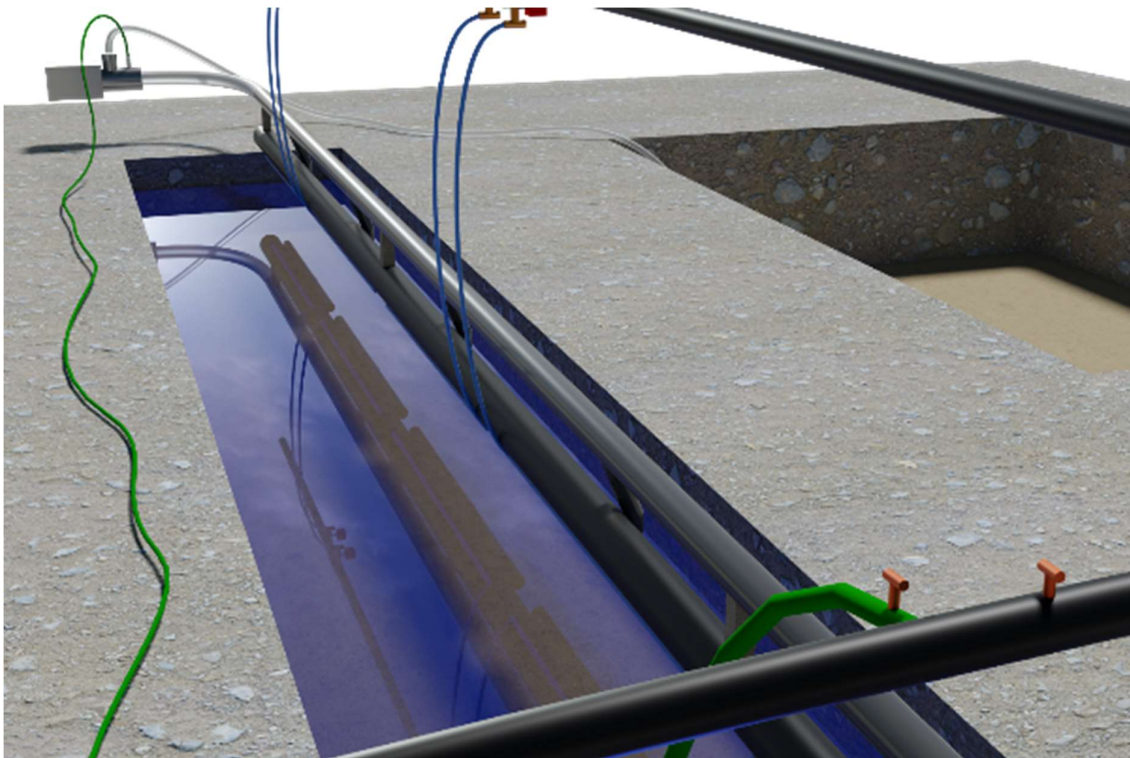
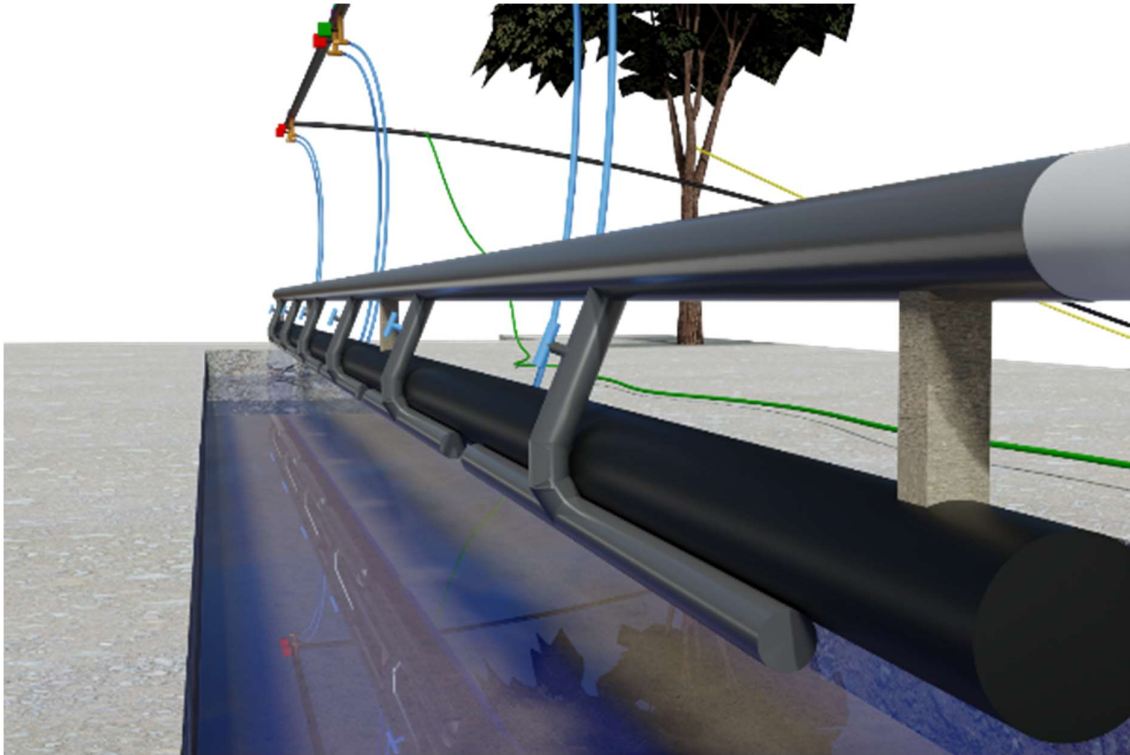


Figure 110 : Schéma du premier appareil de manutention

## 11.5. Conception du prototype



## 11.6. Caractéristiques des conduites rigides

<b>Tube PEHD</b>	<b>Module d'Young pour HDPE =</b>	630 N/mm <sup>2</sup>	
<b>DTS</b>	<b>Interne diamètre</b>	<b>Externe diamètre</b>	<b>Épaisseur</b>
11,0	0,09 m	0,1100m	0,01 m
<b>Aire interne</b>	<b>Aire extérieure</b>	<b>Aire HDPE</b>	<b>Densité</b>
0,006361725 m <sup>2</sup>	0,009503318 m <sup>2</sup>	<b>0,003141593 m<sup>2</sup></b>	<b>960 kg.m-3</b>
<b>W, air , vide</b>	<b>Flottabilité .</b>	<b>W,contenu</b>	<b>Sous . poids</b>
3,02 kg/m	9,50 kg/m	<b>6,36 kg/m</b>	<b>-0,13 kg/m</b>

Comme calculé ci-dessus, la conduite rigide flotte seule au-dessus de l'eau. C'est pourquoi elle est lestée d'une chaîne métallique dont les principales caractéristiques sont présentées ci-dessous.

### Chaîne

<b>d</b>	<b>L</b>	<b>O</b>	<b>W,air</b>	<b>W, sous</b>
16 millimètres	80 millimètres	56 millimètres	<b>16,72 kg/m</b>	<b>14,59 kg/m</b>

Ainsi, le poids total au mètre est de 14,46 kg. La conduite plonge dans l'eau.

### Total

<b>Sous . poids</b>
<b>14,46 kg/m</b>

Ce calcul ne tient pas compte du système hydraulique et des autres ballasts qui seront ajoutés ultérieurement. Cependant, plus le prototype est lesté, plus il s'enfoncera facilement dans le sable fluidisé.

## 11.7. Estimation de la masse linéique du prototype

Afin de garantir que le prototype ne remontera pas à la surface lorsqu'il sera immergé en raison de la flottabilité, il faut estimer sa flottabilité et le lester si nécessaire. Les principaux composants sont les suivants : La cornière, le tube HDPE, l'eau passant dans ce tube et une chaîne en acier également à l'intérieur du tube (ballast).

	cornière	Tube (PEHD)	Eau	Chaîne	
Données	e	8 mm			
	l	60 mm	Dint	90 mm	
	p	7500 kg/m <sup>3</sup>	p	1000 kg/m <sup>3</sup>	
	section (m <sup>2</sup> )	0,000896 m <sup>2</sup>	section (m <sup>2</sup> )	0,003141593 m <sup>2</sup>	
	masse linéique	6,72 kg/m	masse linéique	6,361725124 kg/m	
	Volume	0,896 l/m	Volume linéique	0,006361725 m <sup>3</sup> /m	
			Volume linéique	6,361725124 l/m	
				masse linéique	10 kg/m
				Volume linéique	0,001333333 m <sup>3</sup> /m
				Volume linéique	1,33333333 l/m
			Masse linéique interieur tube		15,02839179 kg/m
			Volume linéique total	0,010399318 m <sup>3</sup>	
			masse linéique totale	24,74232959 kg	
			masse volumique	2379,226226 kg/m <sup>3</sup>	

La masse linéique du prototype est ainsi de 24,74 kg/m soit 445 kg au total. Il s'agit d'une première estimation avec les éléments les plus lourds du système. Le poids de l'électronique embarquée (capteurs et vannes) ainsi que le circuit d'injection et de récupération ne sont pas encore pris en compte.

## 11.8. Calcul de la poussée des jets d'eau sur le prototype

Il faut s'assurer que la poussée verticale des jets d'eau sous pression est négligeable par rapport au poids de la structure. Cela pourrait faire monter le prototype, alors qu'il est normalement conçu pour s'enfoncer dans le sable. Nous modélisons cette poussée comme suit :

Comme vu précédemment, chaque module d'injection possède quatre directions de poussée. Les trous sont disposés en deux rangées sur le tube comme indiqué sur le schéma de droite.

L'angle  $\theta$  prend deux valeurs, 45° pour la première rangée et 135° pour la seconde. L'angle  $\alpha$  prend également ces deux valeurs en fonction de sa position sur la barre.

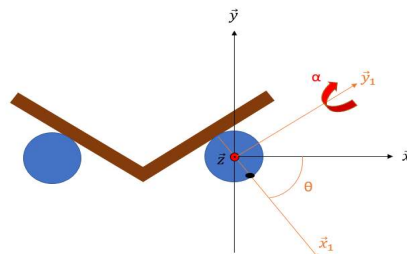
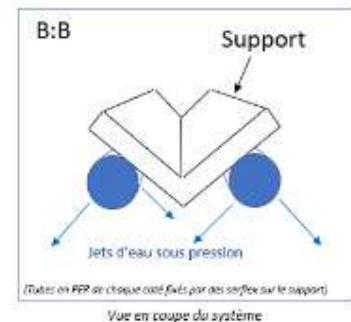


Figure 1121 : Vue en coupe de 2 modules

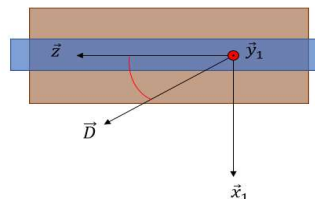


Figure 112 : Vue OZ1 du module d'injection avec

la cornière en marron

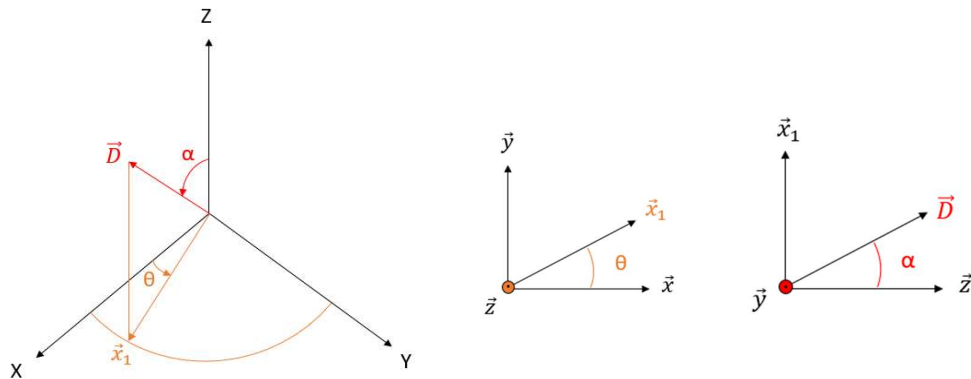


Figure 113 : Repères utiles

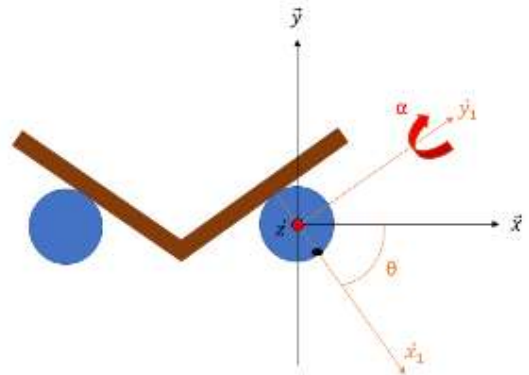
La direction est alors calculée en faisant deux projections successives :

$$\vec{D}(\alpha, \theta) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\theta) \vec{x} + \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta) \vec{y} + \cos(\theta) \vec{z}$$

Nous pouvons maintenant calculer la poussée pour un trou. Selon la 3ème loi de Newton, principe d'action et de réaction, de l'eau projetée avec une certaine énergie cinétique impliquera automatiquement une poussée de même intensité sur la structure prototype.

La force de poussée s'exprime par :  $\vec{F}_{poussée}(\alpha, \theta) = \rho \cdot Q_v \cdot V_{eau} \cdot \vec{D}(\alpha, \theta)$  avec  $Q_v$  le débit volumique et  $V_{eau}$  la vitesse de l'eau à sa sortie du trou.

Cette force de poussée peut aussi être un atout dans un cas très particulier. L'auto-ensouillage n'est possible que si le sol n'est que du sable ou avec de petits obstacles. Si le tube rencontre une pierre sur son chemin, il n'est pas possible de l'installer. Si le problème survient et est détecté (voir section capteurs et actionneurs), l'idée serait d'arrêter le débit d'eau dans l'un des modules d'injection gauche (arbitrairement) avec l'électrovanne afin que la poussée générée par le tube droit crée un effet latéral déplacement de la structure qui permettrait d'éviter l'obstacle.



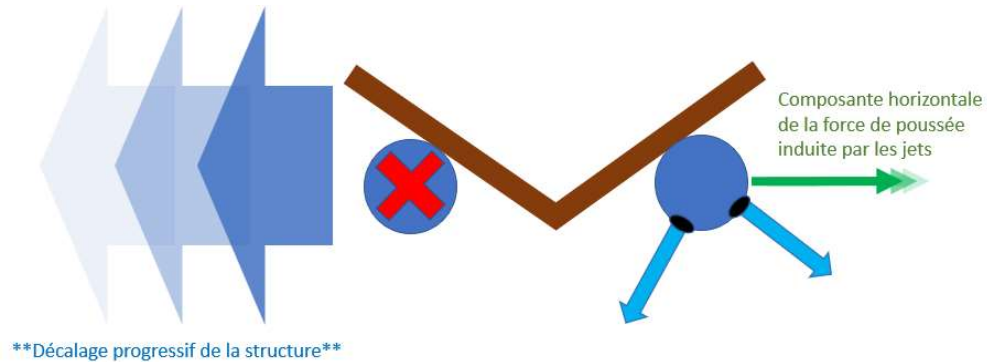


Figure 114 : Schéma de principe

Cette idée vaut la peine d'être conservée mais n'est peut-être pas nécessaire. Au vu des vibrations que l'écoulement d'eau sous pression va engendrer sur la structure, on peut s'attendre à ce que le système tende naturellement vers une position d'équilibre stable. En d'autres termes, qu'il se déplace progressivement pour éviter l'obstacle.

Avec les paramètres suivants,

rayon tube	0,016 m	
Vitesse	12,50 m/s	
Diamètre du trou	2,00 mm	0,002 m
Qv	0,04 l/s	3,93E-05 m3/s
$\rho$ eau de mer	1024,93 kg/m <sup>3</sup>	
Masse du tronçon	445,36 kg	
Volume du tronçon	0,19 m <sup>3</sup>	
Longueur tronçon	18,00 m	
Nombre d'injecteurs extérieurs du prototype	12	
Nombre d'injecteurs intérieurs du prototype	12	
Angle alpha d'injection (p.r. horizontale) $\alpha$	45 °	0,79 rad
Angle Theta d'injection extérieure $\theta$	-45 °	-0,79 rad
Angle Theta d'injection intérieure $\theta-\pi$	-135 °	-2,36 rad

Les poussées verticale et latérale sont calculées pour les deux rangées de trous :

Trou vers l'extérieur	
Force de poussée suivant $D \rightarrow$	0,50 N
Force de poussée verticale	-0,25 N
Force de poussée latérale	0,25 N
<b>Force de poussée verticale totale extérieure</b>	<b>-3,02 N</b>
<b>Force de poussée latérale totale extérieure</b>	<b>3,02 N</b>

Trou vers l'intérieur (angle theta décalé de 90°)	
Force de poussée suivant $D \rightarrow$	0,50 N
Force de poussée verticale	-0,25 N
Force de poussée latérale	-0,25 N
<b>Force de poussée verticale totale intérieure</b>	<b>-3,02 N</b>
<b>Force de poussée latérale totale intérieure</b>	<b>-3,02 N</b>



Poids du tronçon	-4369,00 N
Poussée d'archimède	1882,10 N
Frottements fluides (négligeables?)	N
<b>Force poussée verticale totale des injecteurs</b>	<b>-6,04 N</b>

<b>Ratio Fpoussée/Poids structure</b>	<b>0,14%</b>
---------------------------------------	--------------

La force de poussée totale des jets sous pression atteint 1,52 N ce qui est très négligeable par rapport au poids de la structure.

Le rapport  $\frac{\text{Total thrust force of the jets} + \text{Archimedean thrust}}{\text{Weigh of the prototype}}$  est de 43 %. Le prototype est donc bien lesté, il coulera quoi qu'il arrive.

<b>Force poussée verticale totale d'un tronçon</b>	<b>-2492,94 N</b>
--	-------------------

## 11.9. Réservoir de sable et transfert d'eau (non utilisé)

Le transfert d'eau entre la tranchée et le réservoir mentionné dans l'introduction a été réalisée avec un tuyau en PVC de 10 cm de diamètre. Deux brides situées aux extrémités pincant les couvercles de réservoir pour garantir l'étanchéité. Les filtres à mailles minimisent le transfert de sable dans le tuyau. Une première tentative avec des filtres en tissu s'est avérée être un échec car le sable comprimé sur le filtre empêchait tout transfert d'eau.

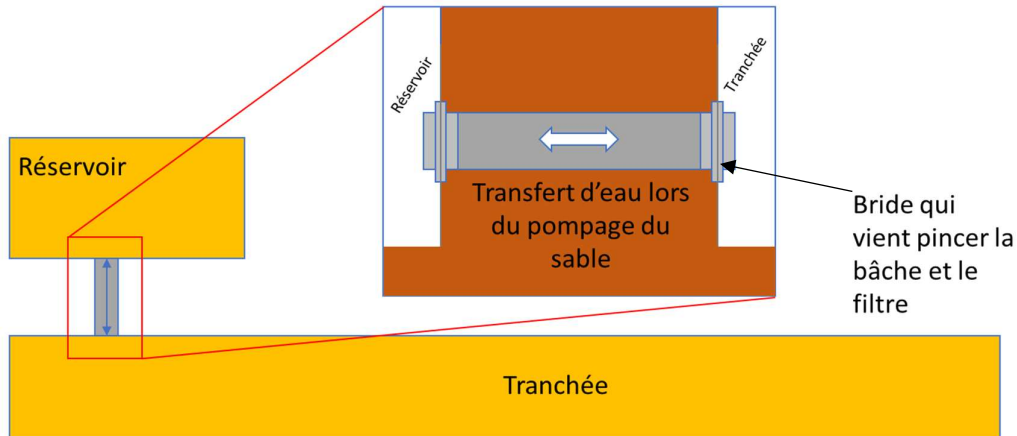


Figure 115 : Schéma de raccordement tranchée/réservoir et mise en œuvre

La tranchée doit ensuite être remblayée pour égaliser la pression sur les deux bâches. Après avoir rempli la tranchée de sable et d'eau, nous avons rencontré plusieurs problèmes. Des trous non visibles dans la bâche, en raison du poids du contenu, laisse l'eau s'écouler et la tranchée se vide en quelques heures ; il faudra donc rajouter de l'eau toutes les heures.

## 11.10. Tutoriel

### Arduino Serial Port Buffer Size Mod

#### Arduino Serial Port Buffer Size Mod

Whilst developing the software for our Arduino based [Serial Graphic TFT Display](#) a problem with transmitting too much data at once occurred. When using our TFT display we expected the controlling program to send a big burst of serial data initially to set various configuration settings on the screen and to display a screenfull of data.

The Arduino core code contains a nice little round robin data buffer where you can keep throwing data at it and the arduino code will read the data and process it in order. However, this data buffer is by default only 64 bytes in size. This value is hard coded in the Arduino core source code and applies to all Arduino boards, even those with a vast amount of RAM available.

The 64 byte limit meant that sending a burst of data longer than 64 bytes would cause data to be truncated as the ATmega328 could not process the data sent fast enough.

The solution is easy, increase the buffer size to 256 bytes.

This is easy enough to implement but it is a real pain because the Arduino core code which includes this setting is compiled before your actual program code is, so you cannot simply setup a #define or similar function to be able to select buffer size at compile time.

We found a number of convoluted methods on the internet which claim to work, but we thought an easier solution might be of use to others who need to increase the buffer size. The method described below is the option we chose to implement, and while not exactly elegant is easy to use and understand.

#### Solution

The solution is to create a complete copy of the arduino core code (it's really not that big and disk space is cheap), modify the buffer size in the new core code and then to create a new board which is listed in the Arduino IDE which uses this new core directory. The steps to follow are as follows.

The whole of the Arduino core code is located in a directory similar to

```
C:\Program Files\arduino-1.0.1\hardware\arduino\cores\arduino
```

Make a complete copy of this directory and save it to

```
C:\Program Files\arduino-1.0.1\hardware\arduino\cores\arduino_256_serialbuf
```

The hard coded buffer size is stored in a file called **HardwareSerial.cpp** (or **USBAPI.h** in more recent versions)

Here is the standard definition located near the top of the file

```
#define SERIAL_BUFFER_SIZE 64
```

Here is the standard definition located near the top of the file

```
#define SERIAL_BUFFER_SIZE 256
```

Now we need to add an option to the **boards.txt** file to use this new directory. The boards.txt file should be in a directory similar to

```
C:\Program Files\arduino-1.0.1\hardware\arduino
```

Below is part of the boards.txt file. The first section is for the standard Arduino Uno. We have added a section below it which will display in the Arduino IDE as **Arduino Uno (256 Serial Buffer)**. You can see the core directory is referenced to our new directory with the modified file (uno256.build.core=arduino\_256\_serialbuf)

```
#####

uno.name=Arduino Uno
uno.upload.protocol=arduino
uno.upload.maximum_size=32256
uno.upload.speed=115200
uno.bootloader.low_fuses=0xff
uno.bootloader.high_fuses=0x00
uno.bootloader.extended_fuses=0x00
uno.bootloader.path=optiboot
uno.bootloader.file=optiboot_atmega328.hex
uno.bootloader.unlock_bits=0x3F
uno.bootloader.lock_bits=0xBF
uno.build.mcu=atmega328p
uno.build.f_cpu=1600000L
uno.build.core=arduino
uno.build.variant=standard

#####

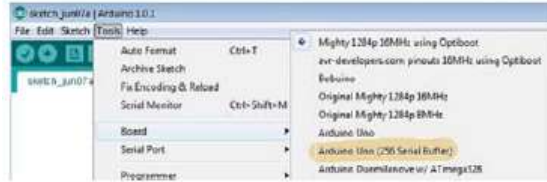
uno256.name=Arduino Uno (256 Serial Buffer)
uno256.upload.protocol=arduino
uno256.upload.maximum_size=32256
```

```

uno256.upload.speed=115200
uno256.bootloader.low_fuses=0xFF
uno256.bootloader.high_fuses=0x00
uno256.bootloader.extended_fuses=0x00
uno256.bootloader.path=optiboot
uno256.bootloader.file=optiboot_atmega328.hex
uno256.bootloader.unlock_bits=0x3F
uno256.bootloader.lock_bits=0x0F
uno256.build.mcu=atmega328p
uno256.build.f_cpu=16000000L
uno256.build.core=arduino_256_serialbuf
uno256.build.variant=standard

#####
    
```

That's all you need to do. Now when you want a larger serial buffer (for a specific board) you just choose this as the board in the Arduino IDE and compile as normal



## 11.11. Détails du test final

Cette annexe fournit les notes de François Thiébaud concernant le test final réalisé le 24 Mars. Ces notes ne sont disponibles qu'en Français.

### PROJET EUROSAC

#### ESSAIS D'AUTO-ENSOUILLAGES DU 24 mars 2023

Moulin du Sacq sur la rivière Iton

Pour mémoire, voici les notes et compte-rendu de ce qui a été fait vendredi 24 mars, vu d'un oeil extérieur

Le modèle complet était prêt dès vendredi matin pour un essai de toutes les sections ensemble.

#### Procédure adoptée pour l'essai :

##### 1<sup>ère</sup> étape

- Le modèle est levé au maximum pour une dernière inspection (Fig 1)
- Démarrage d'une pompe d'aspiration dans la rivière
- Circulation d'eau à 100% dans le circuit d'aspiration pour enlever le sable résiduel
- Le modèle est reposé dans le fond de la tranchée
- En même temps, remplissage progressif de la tranchée (Fig 2)
- Mise en service du circuit d'injection dans la première section
- Mise en route de l'aspiration dans la première section
- Démarrage de la deuxième pompe dans la rivière
- Occasionnellement, ajout d'air comprimé dans le circuit d'injection pendant 3 à 5 secondes



Figure 1



Figure 2

## PROJET EUROSAC

### Remarques

L'aspiration est un mélange d'eau, de sable et d'un peu d'air à cause de fuites mineures dans le circuit d'aspiration ; quand le débit solide est trop important (vu à l'œil dans le flexible transparent), l'eau pompée dans la rivière est ré-orientée vers le circuit d'aspiration en partie ou complètement en coupant l'injection. Cette gestion « à l'œil et à l'oreille » a été un souci tout au long de la journée. Il faudra trouver un moyen de mesurer la part des solides dans le circuit d'aspiration.

### Résultat :

La première partie du tuyau s'enfonce assez nettement ; cet ensouillage est repéré par un nœud sur la corde de supportage du modèle.

L'injection d'air a l'air d'avoir un impact positif sur l'enfoncement, confirmant l'intention de « casser » les dernier monticules de sable entre les zones injectées.

### 2<sup>e</sup> étape :

Ouverture des injecteurs de la 2<sup>e</sup> section

Ouverture de l'aspiration de la 2<sup>e</sup> section

Fermeture des injecteurs de la 1<sup>ère</sup> section

Fermeture de l'aspiration de la 1<sup>ère</sup> section

### Remarques :

Chaque changement de séquence donne lieu à des modifications de solide aspiré et nécessite une circulation d'eau dans le circuit d'aspiration ainsi que des « retours en arrière » sur la première section. Le pilotage « à l'œil et à l'oreille » est nécessaire et les 3 opérateurs ne sont pas superflus pour actionner toutes les vannes.

### Résultat :

La deuxième section s'enfonce mais moins que la première. Il n'est pas facile de garantir que les circuits d'injection sont en action à moins de glisser la main sous le tuyau ce qui n'est pas facile en bord de tranchée.

Voir la Figure 3 ci-contre :



## PROJET EUROSAC

### 3e étape :

En procédant de la même manière pour la 3e section on s'est rendu compte que les électrovannes ne s'étaient pas ouvertes comme prévu. Décision de les démonter pour installer des vannes manuelles ¼ tour ; il y en avait 3 disponibles ; Bruno est allé en chercher 2 autres.

### 4e étape

Vers 11 :30, on reprend les essais après avoir changé les électrovannes en vannes manuelles (Fig 4).

L'aspiration des sections 2 & 3 étant ouvertes, la section 1 restant fermée.

Puis de la même manière, ouverture de la 4e puis dernière vanne d'aspiration avec la section d'injection correspondante.

### Résultat :

On observe un enfoncement rapide initialement quand on met en service une section, puis plus lente ensuite.

On a observé un débit d'air important vers midi ; après inspection, on a découvert qu'un des tés d'aspiration était fendu. Cette fissure est liée à un déplacement latéral du tuyau sous son propre poids et une mise en porte-à-faux du té rigide qui n'a pas tenu.

Décision de vider partiellement la tranchée pour réparer la fissure.

La pompe de vidange est mise en route, arrêtée pour nettoyage du filtre puis redémarrée. La tranchée est partiellement vidée dans la fosse adjacente.

Le té est réparé en appliquant de la colle PVC en abondance sur la fissure (Fig 5).

Décision d'arrêter les essais pour le déjeuner en attendant le séchage de la colle.



Figure 4



Figure 5

### Déjeuner

## PROJET EUROSAC

### Reprise – 5<sup>e</sup> étape :

Le modèle est dans une tranchée presque vide (Fig 6). On remplit la tranchée en circulant l'eau pompée dans la rivière par le circuit d'aspiration puis d'injection comme précédemment.

On observe sur la Figure 7 l'injection d'eau sur le circuit d'aspiration (à gauche) et sur le circuit d'injection (à droite).



Figure 6



Figure 7

Mise en service de l'injection et de l'aspiration sur la 1<sup>ère</sup> section à nouveau, puis la 2<sup>e</sup> puis la 3<sup>e</sup> etc ...

On observe une fissure très importante sur le té réparé des deux côtés du té. Essai de réparation avec la colle mais sans beaucoup de succès. En circulant l'eau dans la tranchée qui se remplit, la fissure s'enfonce progressivement dans l'eau ce qui élimine le problème d'aspiration de l'air.

Il n'est pas possible de faire de vidéo du pipe qui s'enfonce car le processus est lent.

Le pompage de sable et l'injection d'eau sont poursuivis jusqu'à 16 :00 environ avec de grandes quantités de sable transportées.

### Remarque :

Après rangement des outils, Hugo et FT quittent le site à 17 :00. Bruno vide la tranchée.



## PROJET EUROSAC

### Résultats :

Une fois la tranchée vidée, on observe que :

- Une très grande quantité de sable a été aspirée, le pipe restant en fond de tranchée (Fig 8);
- Le sable rejeté à l'extrémité de la tranchée est accumulé sur une hauteur importante (Fig 9);
- Le modèle constitué de deux pipes (dont un lesté) n'est pas stable dans l'air et se couche sur le côté ; c'est probablement ce qui a conduit aux fissures dans le circuit d'aspiration quand les tés ont été mis sous contrainte ;



Figure 8



Figure 9

## PROJET EUROSAC

### Bénéfice final des essais d'auto-ensouillage

Le modèle tel qu'il était monté vendredi était adapté à la conduite des essais prévus pour le projet EuroSwac.

Les circuits d'aspiration étaient opérationnels.

Le système d'aspiration du sable était nécessaire (je ne le pensais pas initialement) mais a aussi été le point faible du modèle. La gestion de la pompe d'aspiration « à l'œil et à l'oreille » impose qu'une solution opérationnelle soit trouvée tel qu'un débitmètre liquide-solide. Ceci doit exister dans les industries de transport de « slurry » tel que l'agro-alimentaire ou les mines.

Le sable est bien liquéfié par les injecteurs, cassé par l'injection d'air comprimé, puis aspiré correctement. L'enlèvement du sable entraîne l'ensouillage du pipe.

Une fois réglés les problèmes de contrôle des vannes, le séquençage aspiration-injection par section est efficace.

On ne pouvait pas démontrer plus que ça avec le modèle en place.

L'extrapolation à un milieu offshore nécessitera les mesures suivantes :

Choix des matériaux des circuits d'injection et d'aspiration : il faudra utiliser du PE et pas du PVC pour assurer une souplesse des connexions.

Il faudra souder tous les raccords pour éviter les fuites.

Le contrôle à distance par des électro-vannes et des relais n'a pas été un succès. Des vannes ¼ tour opérées par plongeurs pourraient être une solution. Mais le coût aura un impact négatif sur la solution d'auto-ensouillage.

Un temps très important a été investi dans ces essais en particulier par Bruno et Hugo qu'il faut remercier. Je pense que le résultat remplit l'engagement pris auprès d'InteReg. Ces essais permettent une promotion de la solution d'auto-ensouillage pour des projets SWAC futurs dont l'atterrage sera dans du sable.

### Mesures d'enfoncement relevées en fin de test

Sur les trois premières potences, la longueur déroulée de la corde a été mesurée à :

- potence 1 : corde 71 cm -> enfoncement 35 cm
- potence 2 : corde 46 cm -> enfoncement 23 cm
- potence 3 : corde 24 cm -> enfoncement 12 cm