



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Realización de los métodos de construcción de ingeniería civil / excavación de la galería bajo presión, y la interfaz con trabajos especiales

Memoria

Trabajo final de máster

Programas de movilidad- Doble Titulación

Titulación: Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2018/19

Autor: Celia Traver Abella

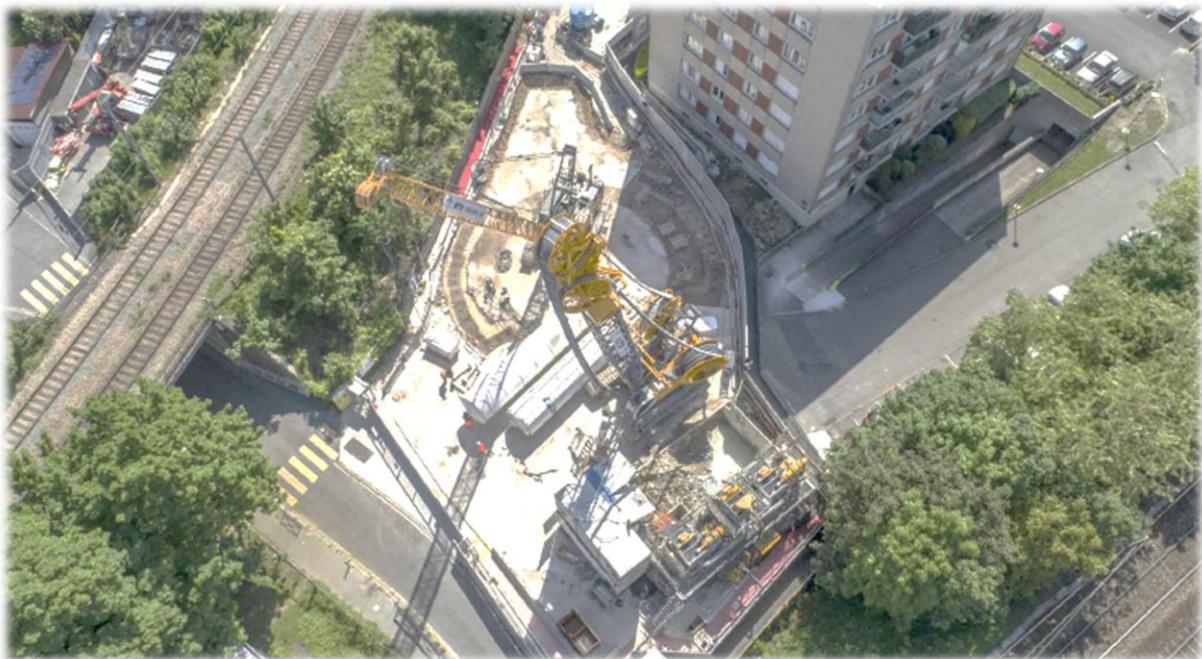
Tutor UPV: Juan B. Marco Segura

Valencia, septiembre 2019

Établissement méthodes génie civil / rameaux sous hyperbare et interfaces avec travaux spéciaux

Implementation of civil engineering methodology /hyperbaric gallery excavation, and interface with specialised works

LIGNE 15 SUD – LOT T2B



CELIA TRAVER ABELLA

Travaux publics TP3 2018/2019
Option BIM

Entreprise d'accueil : RAZEL-BEC

Mars 2019 – Août 2019

Tuteur entreprise : M. EL KAIDI, Khalid – Ingénieur méthodes/travaux
Tuteur école : Mme. DONY, Anne

TABLE DE MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	5
1. RÉSUMÉS	6
2. LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES	9
3. PRÉSENTATIONRAZEL-BEC.....	10
3.1. Groupe FAYAT	10
3.2. Razel-Bec.....	10
4. DESCRIPTION DE L’OPÉRATION	12
4.1. Projet du Grand Paris.....	12
4.2. Ligne 15 SUD – LOT T2B	14
4.3. Le groupement EIFFAGE GC / RAZEL-BEC	15
5. DESCRIPTION DE L’OUVRAGE – OA 901P	17
6. PRÉSENTATION DU SUJET.....	19
6.1. Introduction : contexte et problématique	19
6.2. Objectifs visés.....	21
6.3. Plan d’action.....	21
7. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES	22
7.1. Données d’entrées	22
7.2. Géométrie du rameau	24
8. MÉTHODE ET HYPOTHÈSES.....	25
9. PHASAGE ET PLANNING DES TRAVAUX.....	28
9.1. Phases préliminaires à la réalisation du rameau (avant la mise en service du système hyperbare).....	28
9.2. Mise en service du système et début des travaux en hyperbarie.....	29
9.3. Phases postérieures aux travaux en hyperbarie	29
10. CONCEPTION DES ÉQUIPEMENTS HYPERBARE	30
10.1. Installation Hyperbare	30
10.2. Conception des SAS	31
10.3. Détermination du débit d’air à produire	31
10.4. Système de production d’air	32
10.5. Gestion de la pression d’air.....	33
10.6. Système de commande et de surveillance.....	34
10.7. Sécurisation des installations.....	36
11. ORGANISATION DES TRAVAUX	37
11.1. Détermination de la durée du poste de travail	37
11.2. Formation « Hyperbare » et encadrement spécifique	38

11.3.	Documents opérationnels associés	39
12.	MÉTHODES DE RÉALISATION DES TRAVAUX.....	40
12.1.	Adaptation de la géométrie du rameau.....	40
12.2.	Adaptation dalle S3.....	45
12.3.	Dimensionnement de la structure des SAS.....	47
12.4.	Adaptation du phasage génie civil.....	50
12.5.	Installation schéma d’air hyperbare	54
12.6.	Protection acoustique des compresseurs en surface	58
13.	ANALYSE ÉCONOMIQUE	59
14.	CONCLUSION.....	62
15.	LISTE DE FIGURES	64
16.	LISTE DE TABLEAUX	65
17.	BIBLIOGRAPHIE	66
	ANNEXES	67
	ANNEXE 1 : CALCUL DES PERTES D’AIR DANS LE TERRAIN.....	68
	ANNEXE 2 : PLAN MÉTHODE EXCAVATION DU RAMEAU.....	70
	ANNEXE 3 : CYCLOGRAMME DE CREUSEMENT DU RAMEAU SECOURS	77
	ANNEXE 4 : PLANNING.....	78
	ANNEXE 5 : PLAN MÉTHODE ADAPTATION GC / CONSTRUCTION DES SAS.....	82
	ANNEXE 6 : INSTALLATION AIR HYPERBARE.....	87
	ANNEXE 7 : EXEMPLE MANUEL D’UTILISATION DES SAS HYPERBARE	99
	ANNEXE 8 : FICHE DE RENSEIGNEMENT AUX SECOURS (EXEMPLE).....	107
	ANNEXE 9 : FICHE D’INTERVENTION HYPERBARE (EXEMPLE).....	108
	ANNEXE 10 : CHECK LIST MATÉRIEL.....	109

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées pendant mes 5 mois de stage. Malgré la barrière de la langue, tout le monde m'a accueilli avec chaleur et gentillesse au sein de Razel-Bec. Depuis le premier jour que je suis arrivé, ils m'ont fait me sentir comme l'un de leur équipe.

Je tiens à remercier vivement M. Senhaji Achraf, Directeur travaux, de m'avoir intégré rapidement au sein du chantier, m'avoir accordé toute sa confiance, et de son amabilité et capacité d'encourager tout l'équipe.

Je remercie également M. El Kaidi Khalid, Ingénieur méthodes/travaux, de m'avoir appris de nouvelles connaissances et avoir toujours le temps de m'expliquer et m'aider à avancer pour accomplir ce Travail de Fin d'Études.

Je n'oublierais pas de remercier M. Mayor Patrick, Projeteur méthodes, de m'avoir accompagné à découvrir le sujet et m'aider à mieux comprendre à travers de ses plans.

Je voudrais remercier spécialement M. Thiam Bamba, Ingénieur méthodes/travaux et aussi tous les membres du chantier. J'ai rencontré de très bonnes personnes et professionnelles, aussi qu'une bonne ambiance dans l'équipe.

Finalement, je souhaite remercier à Mme. Dony Anne, ma tuteur de l'ESTP, pour avoir accepté m'aider pour la réalisation de mon Travail Fin d'Études, pour son aide, ses conseils et sa disponibilité.

1. RÉSUMÉS

Français

Dans le cadre de la réalisation du Grand Paris, j'ai réalisé mon stage chez Razel-Bec sur la ligne 15 Sud du métro Lot T2B. Le projet comprend la réalisation d'un tunnel d'environ 7.2km, trois gares et sept ouvrages annexes qui sont reliés au tunnel avec des rameaux d'accès secours et ventilation. Pendant mes cinq mois de stage, j'ai travaillé en tant qu'Ingénieur Méthodes, dans l'équipe qui s'occupe de la construction de deux ouvrages annexes.

La problématique de mon stage consiste à établir la méthode de réalisation de l'excavation d'un rameau sous hyperbare, et l'interface avec les travaux de génie civil de l'ouvrage. L'excavation des différents rameaux est réalisée en méthode traditionnelle, et dans le cas d'étude, la méthode d'excavation sous pression permet d'empêcher les venues d'eau pour la réalisation du rameau de manière sécuritaire.

La nature du terrain oblige à réaliser un traitement préalable avec le but de consolider et étanchéifier le creusement du rameau dans les sables de Beauchamp entre le puits et le tunnel. Dans un premier temps, un traitement en Jet-Grouting a été testé depuis la surface. L'influence pendant la réalisation du Jet-Grouting sur les réseaux sensibles existantes à proximité n'a pas permis de finaliser l'ensemble du traitement. Après l'étude des différentes méthodes alternatives, l'excavation sous hyperbare a été retenue.

Afin de maîtriser la technique, les différents aspects spécifiques de l'installation et de réalisation de la technique hyperbare ont été étudiés. Les méthodes de réalisation du rameau et l'adaptation du génie civil du puits ont été établis.

Après avoir exposé la méthode hyperbare et les hypothèses prises en compte pour le dimensionnement des installations en fonction des caractéristiques du terrain, j'ai établi le système à mettre en place pour alimenter les installations d'air, et l'organisation à suivre pour que les personnes travaillent en sécurité.

Dans un deuxième temps, j'ai établi le phasage de réalisation des travaux pour ensuite étudier et expliquer les différentes adaptations et optimisations à considérer pour la construction de la structure hyperbare et le génie civil.

Dans un dernier temps, une analyse économique a été réalisée pour permettre d'analyser et comprendre le choix de cette méthode d'un point de vue financière.

Finalement, l'étude de la méthode hyperbare et les différentes méthodes d'exécution durant ce stage, m'ont permis d'acquérir des connaissances très enrichissantes de l'environnement des travaux souterrains. Il m'a permis aussi d'apprendre que l'anticipation d'un bon travail de conception des méthodes de réalisation d'un ouvrage est la principale clé pour bien réussir pendant la phase de construction.

Mots clé : méthodes – excavation – rameau – hyperbare – génie civil – phasage – optimisation

Anglais

As a part of the realization of the Grand Paris Express, I have done my internship in the company Razel-Bec in the line 15 Sud of the metro Lot T2B. The project consists of the realization of a tunnel of around 7.2km, three station and seven works annexes which are connected to the tunnel with galleries of access emergency and ventilation. During my five months of the internship, I have worked as an engineer methodologist, in the team which take charge of the construction of two works annexes.

The problematic of my internship consist of setting up the methodology of realization of the excavation of a gallery in hyperbare, and the interface with the works of civil engineering. The excavation of the different galleries is realized by the methodology traditional, and in the case studied, the methodology of the excavation under pressure allows you to avoid the arrivals of water during the realization of the gallery and to work safely.

The ground's nature obligates to realize a preliminary treatment with the objective of consolidating and making watertight the digging of the gallery in the "sands of Beauchamp" between the well and the tunnel. First of all, a treatment of Jet-Grouting have been tested from the surface. The influence during the realization of the Jet-Grouting in the sensitive existing grids hasn't allowed the realization. After of the study of different alternatives methodologies, the realization under pressure has been held.

In order to understand the technique, the different aspects specifics of the installation under pressure have been studied, and the methodology of the realization of the gallery and the adaptation of the civil engineering of the well have been set up.

After having displayed the methodology and the hypotheses taking into consideration for the sizing of the installations according to the characteristics of the terrain, I have set up the system to put in place for feed of air the installations, and the organization for the safety of the people which work inside.

Secondly, I have set up the different phases of the works for after studying and explaining the different adaptations and optimizations for the construction of the structure hyperbare and civil engineering.

Moreover, an economic analyze has been realized to make it possible to analyze and understand the decision of the methodology from a financier point of view.

Finally, the study of the methodology hyperbare and the different methodologies de realization during the internship, have made me able to acquire the knowledge very enriching of the context of the underground works; and I have learned that the anticipation of a good work of conception of the methodology of realization is the main key for being a success during the construction phase.

Woks key : methodology - realization - gallery - hyperbare - civil engineering - phase - optimization

Español

En el marco de la construcción del Gran París Express, mi trabajo de fin de máster ha sido desarrollado mediante un periodo de prácticas en la empresa constructora Razel-Bec en la línea 15 Sud de metro Lote T2B. El proyecto consiste en la construcción de un tramo de túnel de unos 7.2km, tres estaciones y siete obras anexas que son conectadas al túnel mediante galerías que serán utilizadas como salida de emergencia y ventilación.

Desde el principio de mi periodo de prácticas, he mostrado especial atención al estudio y la comprensión de los diferentes métodos de excavación de las galerías mediante la técnica tradicional, así como por la realización de la estructura de obra civil de los diferentes pozos a construir.

El objeto de este documento es establecer el método de realización de la galería mediante la técnica de trabajo bajo presión, y la interfaz que genera en los trabajos de obra civil. La excavación de las diferentes galerías se realiza mediante el método tradicional, y en el caso de estudio, el método de excavación bajo presión permite evitar las llegadas de agua para realizar la excavación de la galería con la mayor seguridad posible.

La naturaleza del terreno obliga a realizar un tratamiento previo con el objetivo de consolidar y sellar el terreno para poder realizar la excavación de la galería en las arenas de Beauchamp que une el pozo con el túnel. Inicialmente, el tratamiento debía realizarse mediante la técnica del Jet-Grouting desde la superficie. Sin embargo, la influencia observada durante la realización del Jet-Grouting sobre canalizaciones sensibles que se encuentran a proximidad, no lo ha permitido. Tras estudiar diferentes métodos y técnicas alternativos, la excavación bajo presión ha sido retenida como solución.

Los objetivos de este documento son estudiar y comprender los diferentes aspectos específicos de la instalación y la realización de la técnica hyperbare, así como establecer los métodos de realización de la galería y la adaptación de la obra civil del pozo.

En primer lugar, se expone la técnica del hyperbare y las hipótesis consideradas para el dimensionamiento de las instalaciones en función de las características del terreno. Se establece el sistema para alimentar las instalaciones de aire, y la organización a seguir para que las personas realicen los trabajos de forma segura.

En segundo lugar, se establecen las fases de realización de los trabajos para después estudiar y explicar las diferentes adaptaciones y optimizaciones a considerar para la construcción de la estructura del hyperbare y de obra civil.

Por último, se ha realizado un análisis económico para permitir analizar y entender la elección de esta técnica desde un punto de vista financiero.

Finalmente, el estudio del método de excavación bajo presión y los diferentes métodos de ejecución que he tenido la oportunidad de estudiar y conocer durante la realización de las prácticas, me han permitido adquirir conocimientos muy útiles e interesantes en el ámbito de las obras subterráneas; así como aprender que realizar un buen trabajo de concepción es la clave principal para obtener unos buenos resultados en la fase de construcción.

Palabras clave : métodos - excavación - galería - hyperbare - obra civil - fases – optimización

2. LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

UPV	Université Polytechnique de Valence
ESTP	École Spéciale des Travaux Publics
BTP	Bâtiment Travaux Publics
MOA	Maître d'ouvrage
MOE	Maître d'œuvre
GME	Groupement Momentané d'Entreprises
BVC	Bry-Villiers-Champigny
CLE	Créteil l'Echat
CHC	Champigny Centre
SMC	Saint Maur-Créteil
ITE	Installation Terminale Embranchée
DSEA	Direction des Services de l'Eau et de l'Assainissement
NGF	Nivellement Général de la France
PM	Parois Moulées
GC	Génie Civil
PAC	Paroi au coulis

3. PRÉSENTATION RAZEL-BEC

3.1. Groupe FAYAT

Le groupe FAYAT, c'est avant tout une histoire d'hommes et de femmes, une PME familiale devenue le 4ème groupe français de BTP (Bâtiment et Travaux Publics) et le premier constructeur métallique.

Aujourd'hui, comme catalyseur des synergies de l'ensemble de ses 152 filiales, le groupe FAYAT leur permet de proposer des offres globales couvrant tous les métiers de la Construction. Le groupe, avec 19000 collaborateurs dont 30% à l'étranger, est réparti en sept divisions :

- Travaux Publics
- Bâtiment
- Fondations
- Energie Services
- Métal (bâtiments métalliques, équipements et levage)
- Matériel Routier (centrales d'enrobages, machines, maintenance et véhicules spéciaux)
- Chaudronnerie

Le secret de sa réussite est l'association de la puissance et la stabilité d'un groupe non coté en bourse à une culture d'entrepreneurs, avec des filiales constituées en différents pôles, présentes sur tous les continents et dans tous les grands métiers de la construction et de l'industrie.

Dans un environnement où l'innovation s'accélère et où les exigences de rentabilité s'accroissent, le groupe Fayat a su depuis sa création développer et diversifier son activité, tout en restant proche de son métier d'origine : les travaux publics.

3.2. Razel-Bec

RAZEL-BEC, filial du Groupe FAYAT, est un acteur majeur des Travaux Publics, pouvant répondre à des projets d'envergure à l'échelle nationale et internationale.

L'entreprise Razel-Bec a considérablement participé à la construction d'infrastructures de transport, chemins de fer et routes, ainsi qu'à la production d'énergie, aménagements hydro-électriques, centrales et autres infrastructures liées à l'alimentation et au traitement de l'eau.

Bien que les techniques ont évolué, la mission de l'entreprise reste la même : améliorer les transports par les terrassements, les tunnels et les ouvrages d'art. En plus, son expertise du génie civil industriel lui permet d'accéder à des marchés de stations d'épuration ou de construction/déconstruction dans le secteur nucléaire.

En plus, elle a choisi de s'adapter en accroissant sa capacité d'écoute et de proximité locale vis-à-vis des élus et des responsables techniques et en plaçant au cœur de ses compétences l'insertion des ouvrages dans l'environnement naturel et humain, la maîtrise de l'eau et du traitement des déchets, le confort et la sécurité des riverains.

Razel-Bec, ce sont 6000 collaborateurs, hommes et femmes, constituant et animant nos unités opérationnelles et d'appui, et grâce auxquels la constitution d'un pôle Travaux Publics fort a été envisageable et rendu possible.

Avec un chiffre d'affaires en 2017 de 687 M€ où le 30,5% correspond au génie civil, Razel-Bec a devenu une importante entreprise autant au niveau nationale que international, en étant présente dans 15 pays autour du monde.

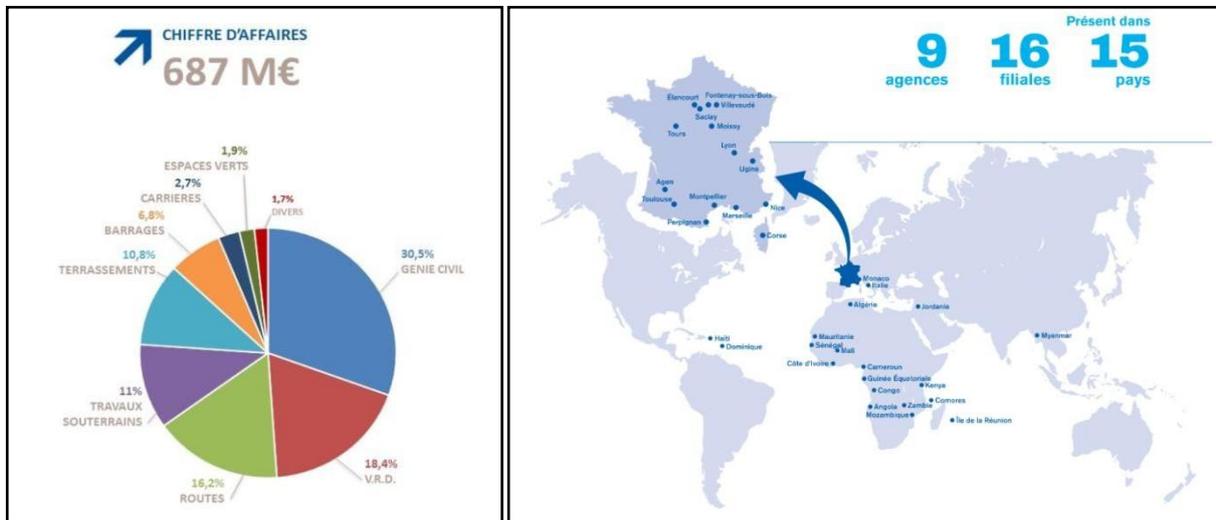


Figure 1. Chiffres clés de l'entreprise en 2017 et localisations.

4. DESCRIPTION DE L'OPÉRATION

4.1. Projet du Grand Paris

Le projet du Grand Paris, initié en 2007, a pour ambition de transformer l'agglomération parisienne en une grande métropole du XXIème siècle, à même d'assurer son rang dans la compétition des mégapoles internationales.

Le Grand Paris est le plus grand projet urbain en Europe avec la réalisation de 200km de lignes automatiques de métro, soit autant que le réseau de métro actuel, et 68 gares. Il ouvre des nouveaux horizons et offre de nombreuses opportunités qui feront devenir la métropole plus grande et plus unie.

Les principaux objectifs du projet sont :

- Améliorer la vie quotidienne des habitants, en facilitant l'accès à l'emploi, à la formation, à la culture et aux loisirs.
- Faciliter l'accès entre les territoires métropolitains qui sont aujourd'hui difficiles d'accès.
- Construire une ville durable, car comme une nouvelle alternative à la voiture, le Grand Paris Express permettra réduire la pollution, les embouteillages et contribuera à la création d'une métropole plus respectueuse de l'environnement.

Le schéma du projet du Grand Paris Express ci-dessous montre les différentes parties qu'il comprend :

- La création de quatre nouvelles lignes automatiques de métro (15, 16, 17 et 18), ainsi que le prolongement de la ligne 14 au nord et au sud ; c'est-à-dire, une infrastructure de 200km de réseau supplémentaire.
- La construction de 68 gares, qui s'accompagne de projets urbains prêts à accueillir des milliers de Franciliens.

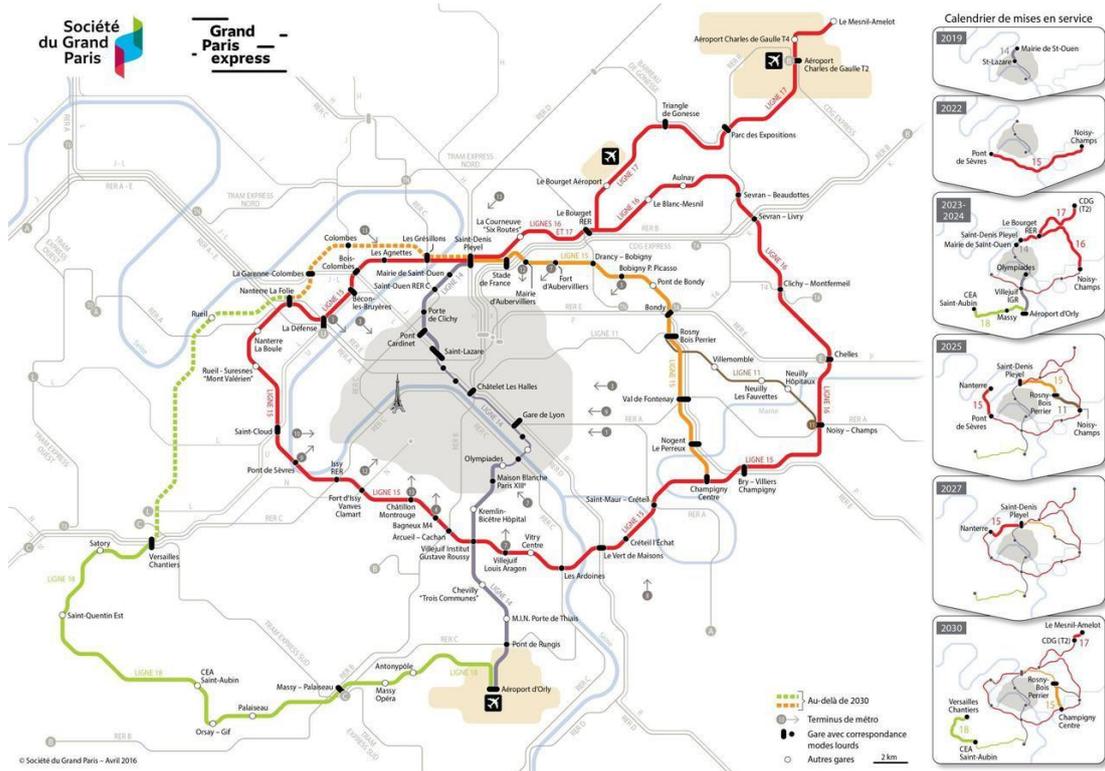


Figure 2. Schéma du futur projet du Grand Paris Express

Dans le cadre de réalisation du projet du Grand Paris Express, plus d'un million d'habitants profiteront la construction de la ligne 15 du métro, et bénéficieront des nouvelles connexions vers le reste de la métropole. À l'horizon 2030, quand la construction de la ligne 15 Ouest et Est sera finie, elle formera une grande rocade de 75 km tout autour de la capitale.

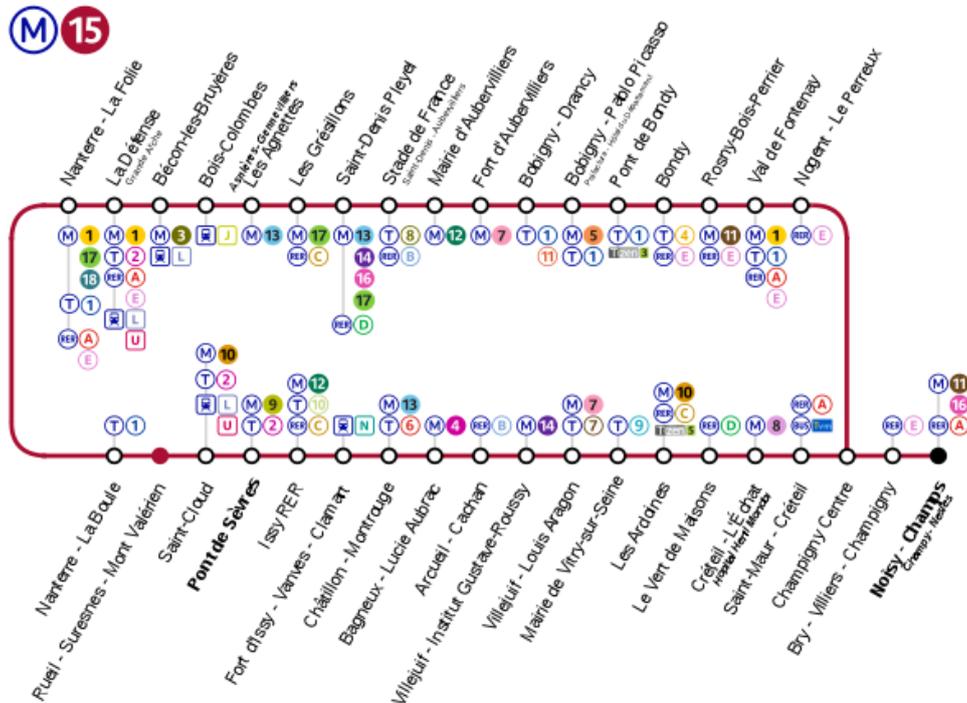


Figure 3. Stations desservies Ligne 15 Grand Paris Express

Après le début des travaux de génie civil en Juin 2016, la ligne 15 Sud reliera les gares de Pont de Sèvres et Noisy-Champs. Cette ligne améliorera l'accessibilité aux grands équipements régionaux, et offrira des gains de temps importants. Ce tronçon, qui est entièrement en souterrain, s'étend sur une longueur de 33 km et il traverse principalement des zones urbaines denses.

Il dessert de 16 gares en correspondance avec des transports urbains et ferroviaires existants ou en construction.



Figure 4. Ligne 15 Sud

Le lot T2B de la ligne 15 Sud attribué au groupement Eiffage Génie Civil/Razel-Bec, reliera la gare Bry-Villiers-Champigny et Créteil l'Echat dans le Val du Marne et sa mise en service est prévue pour Mai 2024. Un chantier qui est un vrai défi au niveau logistique et technique.

4.2. Ligne 15 SUD – LOT T2B

Le projet à réaliser, compris dans la création de la ligne 15 Sud, est la création d'une ligne automatique de métro entre la gare de Bry–Villiers–Champigny (BVC) et la gare de Créteil – L'Echat (CLE – gare non incluse dans le présent ouvrage).

Il comprend les ouvrages et prestations suivants :

- Un tunnel foré bi-voies d'environ 7,20km et un diamètre intérieur de 8,70m. La réalisation du tunnel sera à l'aide de deux tunnelier : la gare BVC sera l'entrée du tunnelier n°3 et la gare CLE du tunnelier n°6.
- 7 ouvrages annexes intergares.
- Un ouvrage annexe spécial d'entonnement de la ligne 15 « rouge » avec la future ligne 15 « orange », qui servira de puits de sortie des deux tunneliers.
- L'enveloppe extérieure d'un puits de sortie du tunnelier de la ligne orange.
- 3 gares : Bry-Villiers-Champigny (BVC), Champigny Centre (CHC) et Saint-Maur Créteil (SMC).
- Ouvrages provisoires
 - Une plateforme logistique à Villiers-sur-Marne comprenant une Installation Terminale Embranchée (ITE) raccordée au réseau ferré national pour le tri et l'évacuation par voie ferroviaire des déblais du tunnelier n°3 et de la gare de BVC.
 - Une plateforme logistique sur le port de Bonneuil sur Marne pour le tri et l'évacuation par voie routière, ferroviaire ou fluviale des déblais du tunnelier n°6.

La figure suivante illustre le synoptique des tunneliers prévus pour l'ouvrage du Lot T2B de la Ligne 15 Sud du Grand Paris Express.



Figure 5. Synoptique des tunneliers pour le lot T2B.

4.3. Le groupement EIFFAGE GC / RAZEL-BEC

Les entreprises EIFFAGE, au travers de sa filiale Eiffage Génie Civil comme mandataire du groupement, et RAZEL-BEC, travaillent en groupement pour la réalisation du lot T2B de la ligne de métro 15 Sud. Il s'agit d'un GME (Groupement Momentané d'Entreprise) qui permet aux entreprises de se positionner sur de nouveaux marchés de travaux. La complémentarité des acteurs du groupement permet de répondre pleinement aux enjeux organisationnels, techniques, environnementaux et temporels du projet T2B.

Le schéma d'organisation (figure 6) présente des acteurs principaux dans le projet :

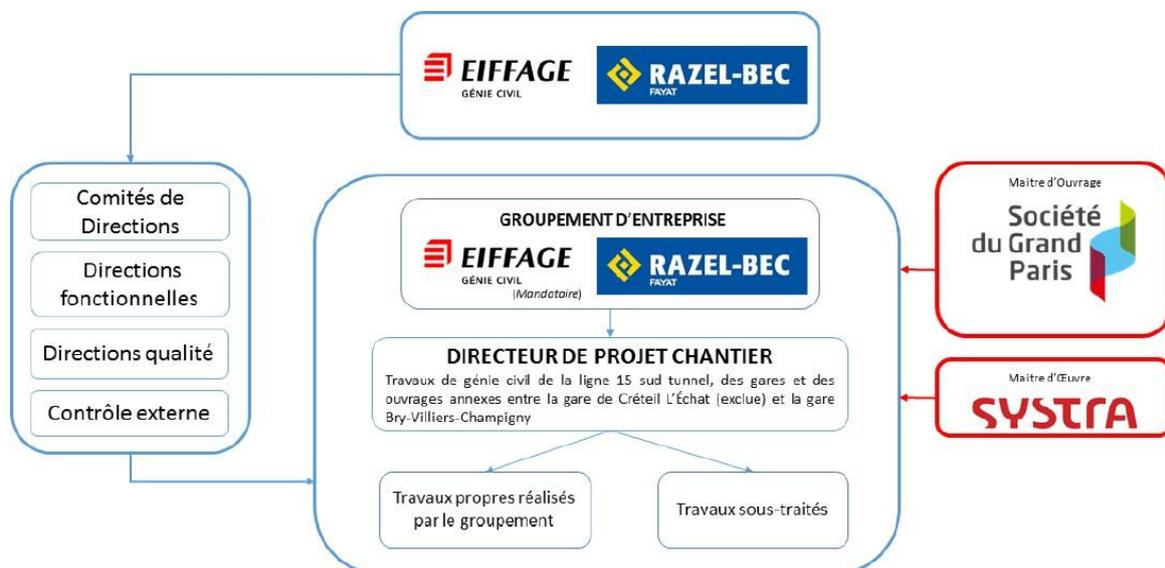


Figure 6. Organisation du projet

- Maître d’Ouvrage (MOA) : La société du GrandParis.
- Maître d’œuvre (MOE):Systra est l’entreprise qui gère tout le projet et assure le suivi des travaux et la coordination des différents corps de métiers. Il s’agit d’un groupe de conseil et d’ingénierie, leader mondial de la conception des infrastructures de transport.
- 2 sous-traitants pour la réalisation des travaux de fondations spéciales :
 - Le groupement Eiffage fondations / ICOP
 - Sefi-Intrafor

Le groupement est responsable de l’exécution du lot T2B avec un budget de 795 millions d’euros.

5. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE – OA 901P

Sur le parcours du tunnel décrit, la construction des plusieurs ouvrages annexes va assurer en phase d'exploitation plusieurs fonctions liées à l'accès des secours, la ventilation, le désenfumage, l'épuisement du tunnel et l'hébergement de locaux techniques.

La méthode qui va se développer et étudier dans le présent rapport, concerne l'excavation d'un rameau de secours qui va se réaliser dans l'ouvrage annexe 901P.

L'ouvrage annexe 901P, situé à Champigny sur Marne, aura la fonction d'accès secours avec une forme circulaire de 13,60 mètres de diamètre. Avec un total de quatre niveaux (hors le radier et la dalle de couverture), il aura une hauteur d'évacuation entre le niveau du tunnel fini et le terrain de 20,65 mètres.

L'ensembles des ouvrages annexes, sont constitués notamment de :

- Parois moulées périphériques.
- Voiles en béton armé, radier général en béton armé avec un béton de rechargement, une dalle de couverture et plusieurs planchers intermédiaires.
- Une gaine ascenseur pour les ouvrages dont la hauteur entre le niveau tunnel et le terrain naturel est supérieur à 30 mètres.
- Escaliers de 1,40m minimum de largeur libre qui vont servir d'issues de secours en cas d'évacuation des voyageurs, édicules de sortie et locaux techniques dans lesquels sont placés les équipements nécessaires à l'exploitation de la ligne.
- Une étanchéité positionné en sous face de radier, sur la dalle de couverture et extradossale totale dans les zones souterraines.

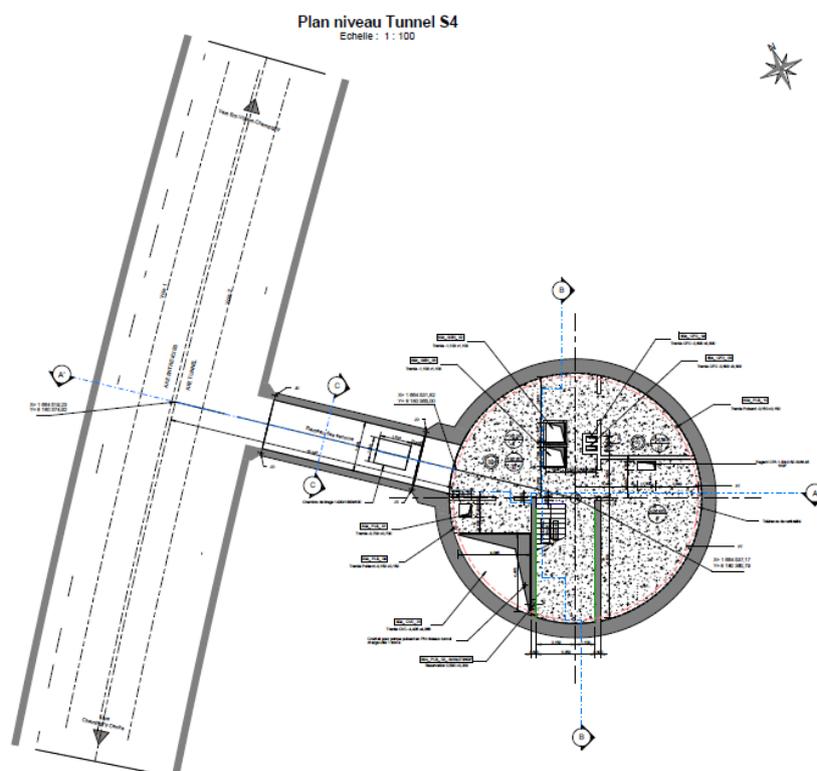


Figure 7. Vue en plan OA 901P Niveau tunnel

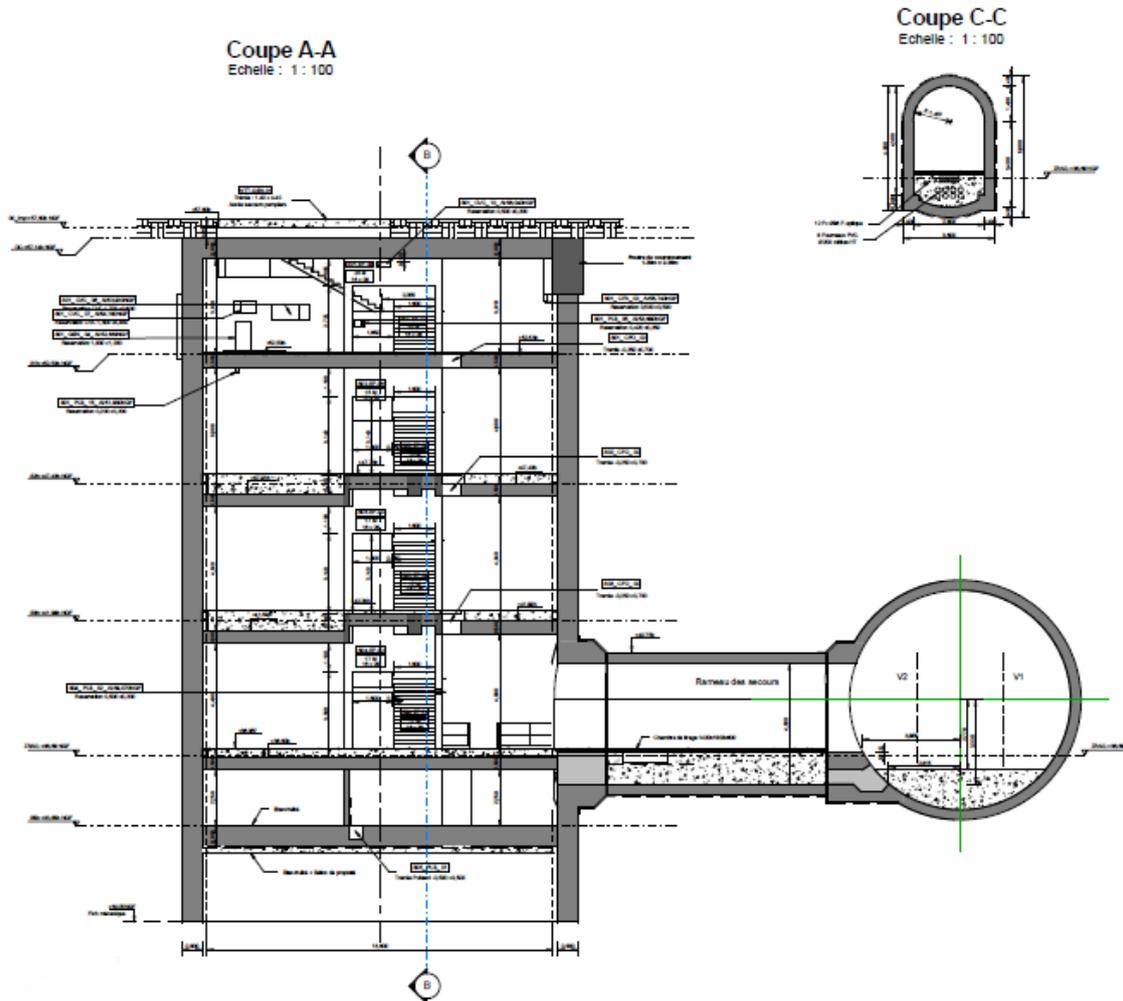


Figure 8. Coupe OA 901P

Le puits est lié au tunnel parmi d'un rameau qui normalement devrait être réalisé à travers de l'excavation traditionnelle. De la même manière, le traitement du terrain retenu dans la conception du projet était le Jet-Grouting, qui devrait être réalisé avant l'exécution de la paroi moulée.

Le traitement en Jet-Grouting est une technique d'amélioration des sols qui consiste à injecter un ou plusieurs jets de fluide à haute énergie cinétique dans le terrain afin de le déstructurer et le mélanger avec un coulis de ciment liquide pour former une colonne de « béton de sol ». Un des avantages de cette technique est qu'elle permet un traitement ciblé et sélectif de certaines couches de sol.

Les contraintes qui ont été trouvées pendant la réalisation des travaux, ont obligé à étudier et retenir des autres solutions pour la excavation du rameau.

Après l'analyse de l'entreprise chargée de réaliser les fondations et les travaux spéciaux dans l'ouvrage, il s'est avéré que la méthode constructive n'est pas adaptée à l'environnement dû aux contraintes existantes. Des discussions sur d'autres possibilités de traitement du terrain ou sur différents méthodes de réalisation du rameau en fonction du terrain ont eu lieu.

Finalement, la solution retenue a été la réalisation des travaux d'excavation du rameau de secours en Hyperbarie (méthode d'excavation sous pression). L'objectif de l'étude consiste à optimiser le scénario des travaux en considérant les risques existants et le planning global, spécialement de l'avancement du tunnelier.

La chambre à sable quant à elle, est réparée et confortée pour les phases de travaux précédentes à la construction du rameau.

Anglais

As previously described, Annex 901P consists of the construction of a well of 24.7 metres to the depth of excavation. It will be constructed using the moulded walls, and connected to the tunnel by a rescue branch excavated by the traditional method.

The branch will be realized in the Sand de Beauchamp in vault and pedestal, and in the Marls and Stones at the raider level.

Due to the nature of the ground, treatment by Jet-Grouting from the surface had to be carried out normally before the PM and the opening of the branch. The purpose of the treatment was to consolidate and seal the crossed branch in the Sands de Beauchamp between the well and the tunnel.

The major constraint of the site for the realization of the Jet-Grouting, was the presence of a DSEA network of stormwater. The work was interfaced with the sandbox and the DSEA By-Pass located above the treatment grounds. This work was classified, and automatic testing measures were put in place.

During the execution of the Jet-Grouting work, an alert was issued due to the exceedance of the DSEA sandbox slope warning threshold (2.82mm/m), in accordance with the risk management procedure. Following this overshoot, the group decided to stop the Jet-Grouting workshop.

After the analysis of the company responsible of the foundations and of the special work, it was found that the constructive method is not adapted to the environment due to existing constraints. Some discussions took place on other possibilities of field treatment or on different methods for constructing the branch according to the ground characteristics.

Finally, the chosen solution was the excavation of the reserve branch in hyperbaric (method of excavation under pressure). The objective of the study is to optimise the work scenario by considering the existing risks and the overall schedule, especially the progress of the tunnel boring machine.

The sandbox, on the other hand, is repaired and reinforced for the phases of work preceding the construction of the branch.

6.2. Objectifs visés

Le sujet de ce rapport est l'étude, le développement et l'établissement des méthodes de réalisation du rameau sur l'ouvrage concerné sous hyperbare, les interfaces avec le génie civil ou les travaux spéciaux ont été également étudiées. Les objectifs sont les suivants :

- Étudier les contraintes des différentes tâches par rapport à la technique de l'hyperbare.
- Établissement des plans méthodes de réalisation du rameau et l'adaptation des méthodes de réalisation du génie civil du puits.
- Rédiger les procédures d'exécution.

6.3. Plan d'action

Pour la réalisation du Travail Fin d'Études, j'ai suivi le planning général ci-dessous :

	Mars		Avril			Mai		Juin		Juillet	
Compréhension du cahier de charges (CCTP)											
Définition des méthodes constructives											
Planification des travaux et définition des ressources (matériel et personnel)											
Rédaction des procédures d'exécution et plans méthodes											
Rédaction de la mémoire TFE											

Figure 10. Planning de réalisation du Travail Fin d'Études

En premier lieu, l'objectif a été de bien comprendre le cahier des charges relatif à l'ouvrage concerné et aussi à la méthode d'excavation sous pression. Une récapitulation des informations et des retours d'expérience d'autres ouvrages réalisés par la méthode hyperbarie a été réalisé.

Après, le but a été l'intégration de la méthode d'excavation sous pression dans les méthodes de réalisation de l'ouvrage pour adapter le génie civil, planifier les travaux, définir les ressources et établir les plans méthodes.

La procédure d'exécution de la réalisation du rameau en hyperbare a été rédigée en intégrant tous les aspects relatives à la méthode d'excavation, les installations nécessaires et les procédures de sécurité à suivre pendant la réalisation des travaux.

7. SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

7.1. Données d'entrées

Les données d'entrée sont issues de la mission G3 réalisée sur les ouvrages. Le rameau à réaliser est en partie voûte et piédroits dans les Sables de Beauchamp, et en partie radier dans les marnes et caillasses (figure 12).

La perméabilité dans les marnes et caillasses présente une valeur importante pour la réalisation de l'excavation du rameau en méthode conventionnelle sous le niveau de la nappe.

7.1.1. Géologie

La géologie rencontrée est synthétisée dans le tableau ci-dessous :

	Valeur
TN au droit de l'accès	57.40 NGF
Fond de fouille de l'ouvrage	33.05 NGF

Tableau 1. Niveaux de référence de l'ouvrage

	Niveau SUP	Niveau INF
Remblais	57.40 NGF	54.19 NGF
Calcaire de Champigny	54.19 NGF	52.83 NGF
Sables verts	52.83 NGF	51.47 NGF
Calcaire de Saint Ouen	51.47 NGF	42.41 NGF
Sables de Beauchamp	42.41 NGF	36.54 NGF
Marnes et Caillasses	36.54 NGF	27.63 NGF
Calcaire Grossier	27.63 NGF	-

Tableau 2. Niveaux de référence de couches géologiques existantes

7.1.2. Hydrogéologie

L'hydrogéologie rencontrée est synthétisée dans les tableaux ci-dessous. La nappe prise en compte est celle du Calcaire de Saint-Ouen.

	Niveau d'eau, en NGF
Eaux exceptionnelles – EE	46.2 NGF
Eaux hautes prévisibles – EH	44.2 NGF
Eaux niveau permanent – EC	44.2 NGF
Eaux niveau le plus bas - EB	43.1 NGF

Tableau 3. Niveaux d'eau de référence de l'ouvrage

	Perméabilité, en m/s
Remblais	$3,1 \cdot 10^{-5}$
Calcaire de Champigny	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Sables verts	$8,3 \cdot 10^{-8}$
Calcaire de Saint Ouen	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Sables de Beauchamp	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Marnes et Caillasses	$4,0 \cdot 10^{-5}$

Calcaire Grossier	$1,0 \cdot 10^{-5}$
-------------------	---------------------

Tableau 4. Perméabilité des différentes couches géologiques existantes

En outre, des piézomètres ont été mis en place pour mesurer les niveaux des nappes existantes. Dans ce cas, j'ai pris comme niveau de référence de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen le niveau d'eau mesuré par le piézomètre correspondant. La courbe des mesures prises par rapport au temps est présentée ci-dessous :

Eaux niveau piézomètre	Niveau d'eau, en NGF 44.98 NGF
------------------------	-----------------------------------

Tableau 5. Niveaux d'eau piézomètre

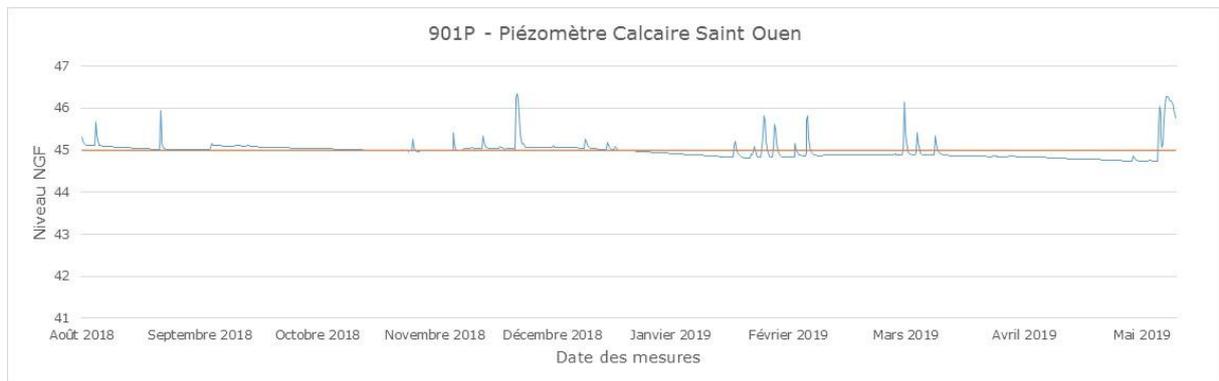


Figure 11. Mesures du piézomètre de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen – 901P

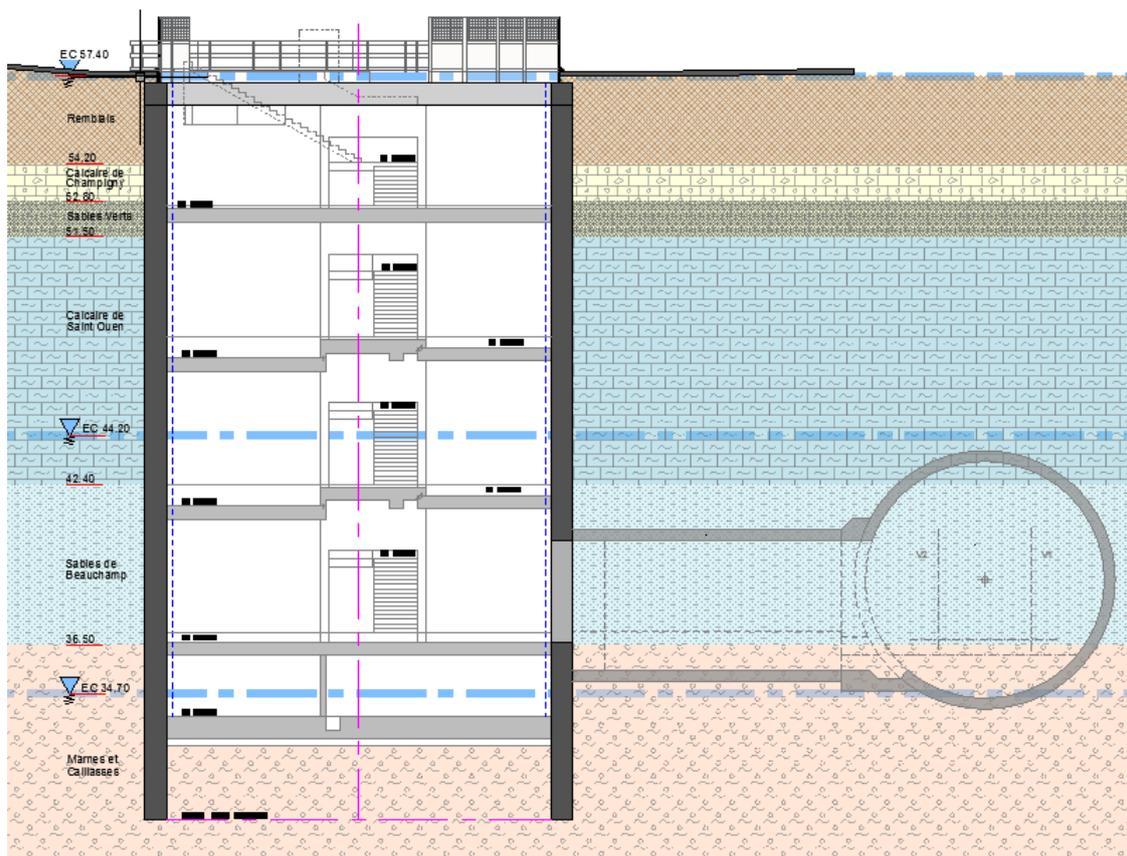


Figure 12. Géologie – Hydrogéologie issues de la mission G3

7.2. Géométrie du rameau

L'ouvrage est relié au tunnel à travers d'un rameau de secours d'une section d'excavation de 21 m² et 12 mètres de longueur.

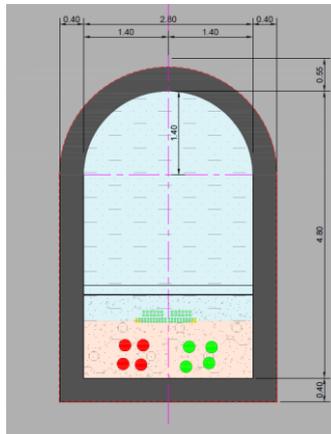


Figure 13. Rameau – coupe transversal en considérant l'adaptation du radier plat

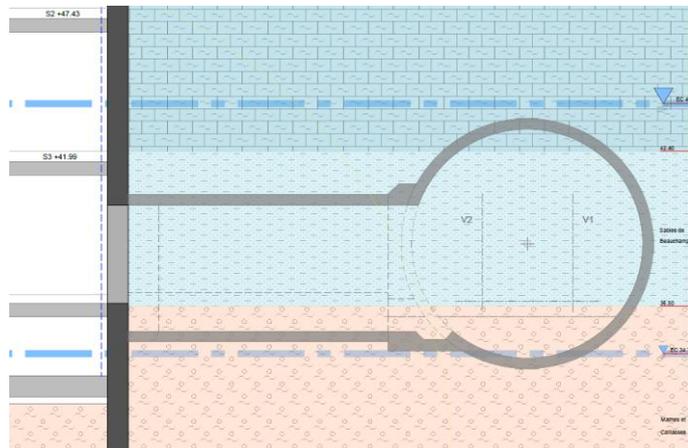


Figure 14. Rameau – coupe longitudinale

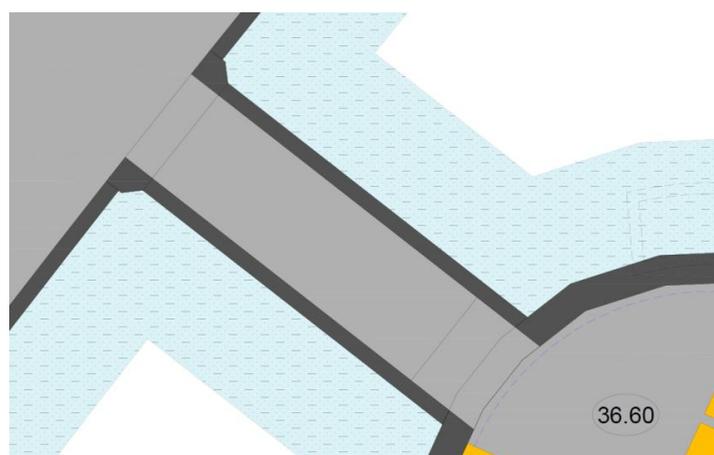


Figure 15. Rameau – vue en plan

La réalisation du rameau est conditionnée par l'avancement du tunnelier et la date du passage au droit de l'ouvrage 901P. L'utilisation de la méthode d'excavation sous pression oblige à réaliser l'excavation complète dans un même temps, donc l'excavation du rameau ne peut commencer qu'après le passage du tunnelier.

8. MÉTHODE ET HYPOTHÈSES

La méthode d'excavation sous air comprimé consiste à mettre sous pression la zone de travail de manière à empêcher les venues d'eau. Cette méthode est utilisée dans des terrains sous faible à moyenne hauteur d'eau.

La pression relative à appliquer est déterminée par la hauteur d'eau comprise entre :

- Le niveau des eaux de chantier pour la nappe considérée ;
- La hauteur médiane entre le radier et la voûte de l'ouvrage en cours d'excavation.

Le sable de Beauchamp, le terrain existant dans ce cas sur la partie supérieure du rameau (voûte et piédroits), est particulièrement réactif à la pression appliquée. L'application d'une pression excessive peut repousser la nappe, ce qui assèche le sable et conduit à son effondrement. A l'inverse, si la pression appliquée est insuffisante, il y aura des venues d'eau.

Pour le calcul de pression, on doit considérer la méthode qu'on va utiliser pour l'excavation du rameau. Dans ce cas, on a considéré que le rameau de secours est réalisé en section en front divisé (figure 16) ou selon le terrain rencontré en section complète.

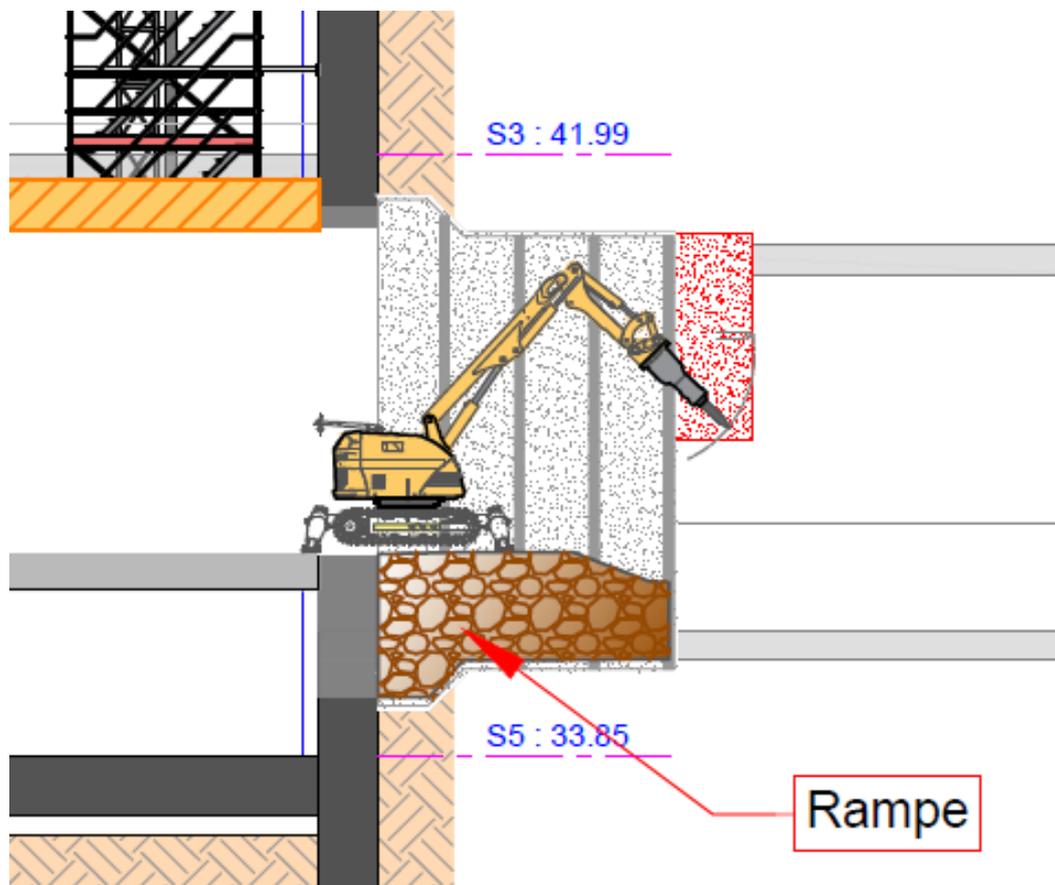


Figure 16. Excavation en section en front divisé

L'excavation et soutènement provisoire du rameau sous pression va être réalisé à la méthode conventionnelle : l'excavation du terrain par passes d'un mètre (en section front divisée ou complète en fonction du terrain rencontré), pose des cintres HEB180, blindage en bois entre les cintres et réalisation de béton projeté.

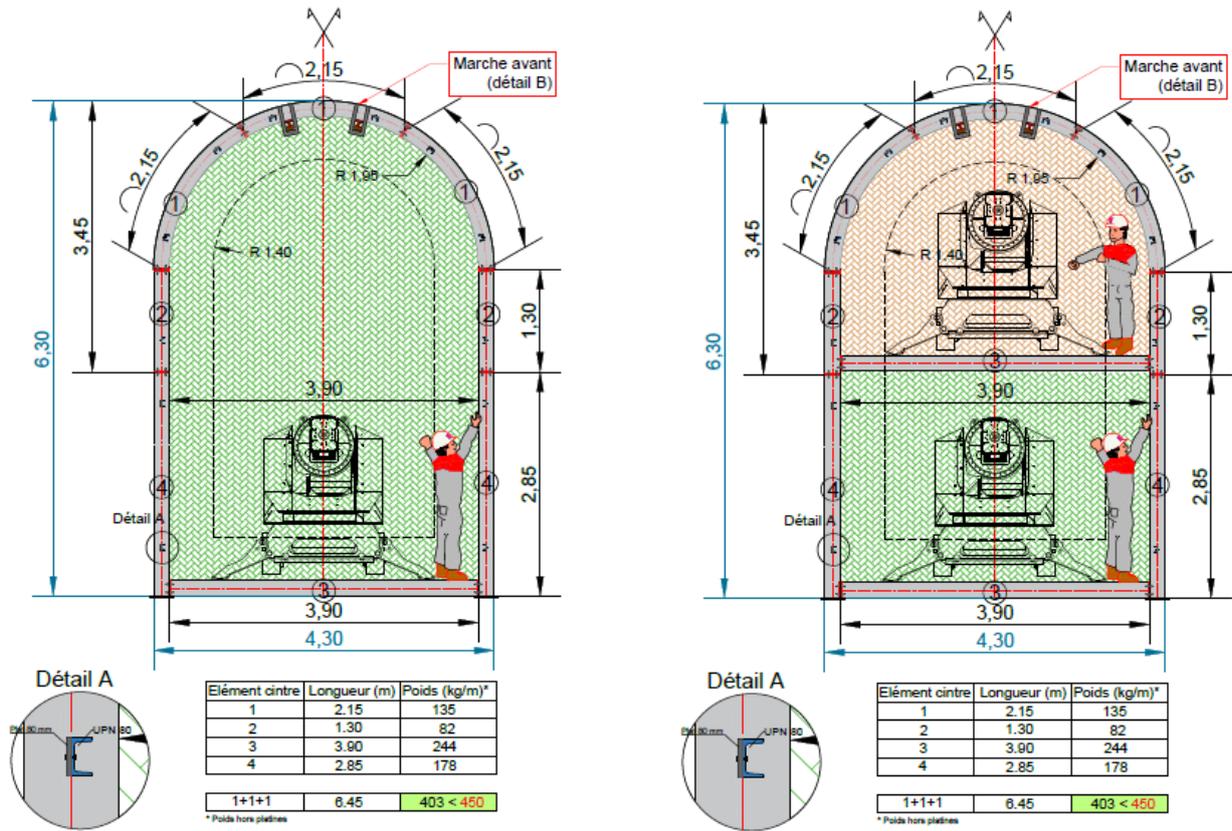


Figure 17. Découpage des cintres rameau de secours en section complète ou divisée

Après les travaux en hyperbare, le revêtement définitif sera mis en place : radier, piédroit et voûte.

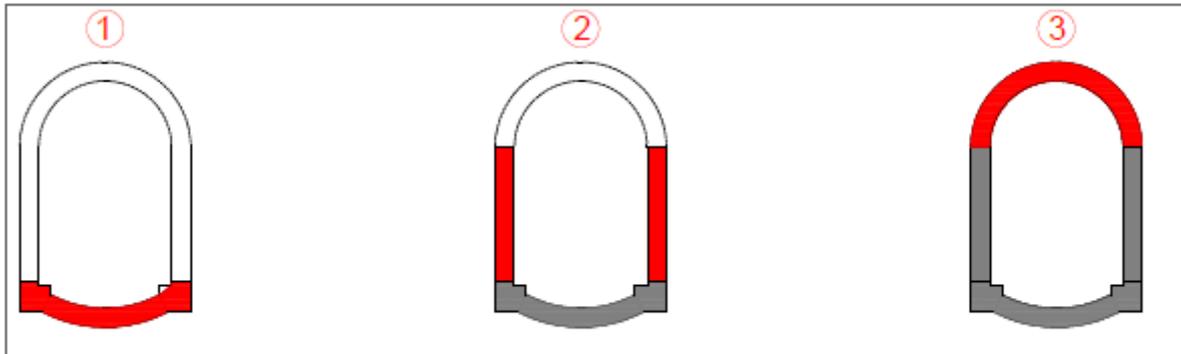


Figure 18. Revêtement définitif

Le schéma ci-dessous (figure 19) représente la pression à considérer pendant l'excavation de la voûte et celui du stross.

Le niveau des eaux de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen, a été extrait des mesures réelles des piézomètres mis en place, soit 44.98 NGF. Afin de se placer du côté de la sécurité, il a été choisi de travailler avec une pression relative de 1 bar, correspondant à la hauteur d'eau maximale du rameau de secours (9.83 m).

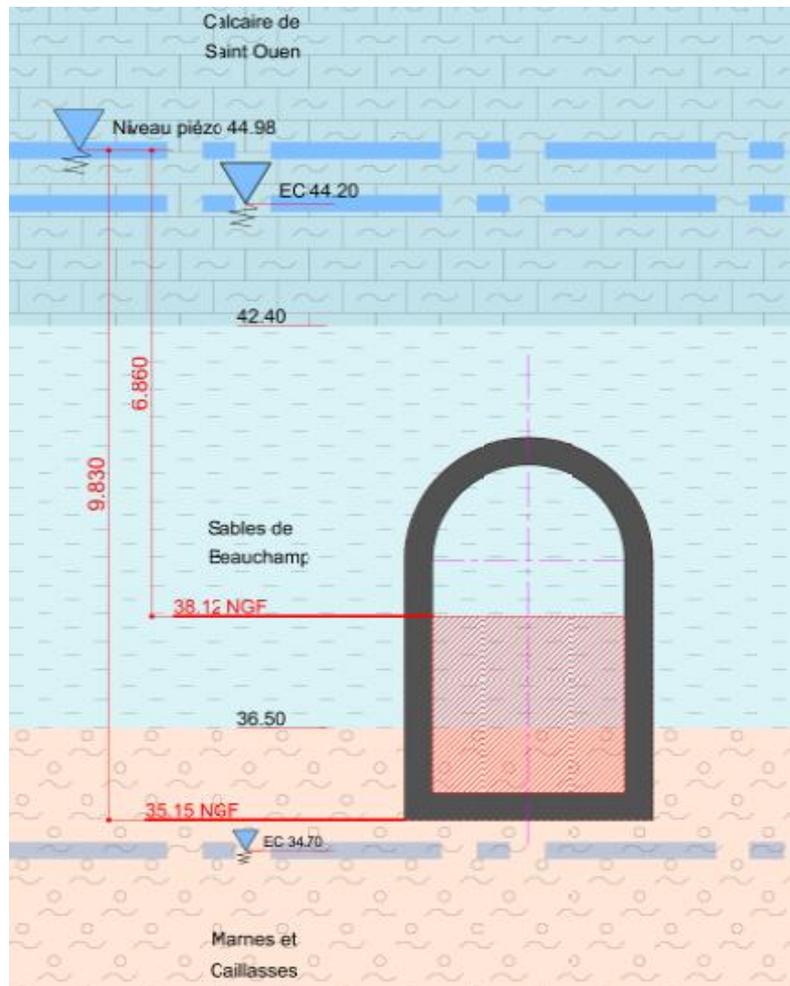


Figure 19. Hauteur d'eau à considérer pour le dimensionnement de l'hyperbarie

9. PHASAGE ET PLANNING DES TRAVAUX

Le phasage des travaux est conditionné par le passage du tunnelier, et le planning a été adapté en fonction de ces dates. Différentes optimisations ont été réalisées par rapport au planning initial où le génie civil de l'ouvrage devait se réaliser après le rameau, sauf la cage d'escaliers toute hauteur à l'aide de l'outil grim pant.

L'utilisation de l'outil grim pant a été une solution choisie globalement dans le projet pour l'optimisation de la structure verticale interne des différents puits. Dans ce cas finalement, la solution pour la réalisation du génie civil du puits a été adaptée en fonction du planning et du phasage.

Dans le planning synthétique ci-dessous (figure 20), les phases principales sont montrées afin d'avoir une conception générale des travaux à réaliser jusqu'à la réalisation du rameau.

	DEBUT	FIN	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV
Terrassement puits et cameaux	09/09/2019	23/10/2019															
Radier	24/10/2019	13/11/2019															
Génie Civil avant rameau	13/11/2019	17/03/2020															
Rameau en hyperbarie	27/02/2020	13/11/2020															
Passage TUN	28/05/2020	28/05/2020									X						
Possibilité raccordement	11/06/2020	11/06/2020										X					
Jalon ouverture rameau opérationnel "sortie de secours provisoire"	28/05/2020	23/09/2020															
RAMEAU	12/06/2020	22/09/2020															

Figure 20. Planning synthétique des travaux

Le phasage pour la réalisation du rameau en hyperbare est détaillé ci-dessous. Le planning associé avec le détail des dates et sous forme de Diagramme de Gantt est présenté en annexe (Annexe 4 Planning de réalisation des travaux).

9.1. Phases préliminaires à la réalisation du rameau (avant la mise en service du système hyperbare)

Le phasage des travaux à réaliser une fois la PM soit finie est détaillé ci-dessous. Ces phases seront réalisées sous conditions habituelles, à pression atmosphérique.

- Terrassement et réalisation du radier du puits.
- Réalisation des voiles et de la dalle S4 (dalle niveau tunnel, sur laquelle seront construits les sas).
- Réalisation des empreintes de l'ouverture dans la paroi moulée (rameau de secours).
- Réalisation des travaux de préparation pour l'excavation du rameau :
 - Réalisation des sondages.
 - Démolition de la PM sur environ 72cm de profondeur à pression atmosphérique.
Il faut laisser les derniers 8cm de béton en place afin de venir les démolir une fois le système hyperbare est mise en service. L'ouverture de la PM en sa totalité doit être réalisée en sécurité, avec les conditions établies pour l'excavation (sous pression).
- Construction des sas et installation du système hyperbare pour la réalisation du rameau sous air comprimé.
La géométrie de la dalle S3 a été adaptée (réalisation avec un seul niveau) afin d'optimiser et l'utiliser pour la construction des sas étanches.
- Réalisation des voiles et dalles des niveaux S2 et S1
- **Passage du tunnelier**
- Réalisation d'une auréole de traitement au tunnel d'1m au droit du rameau (figure 21).

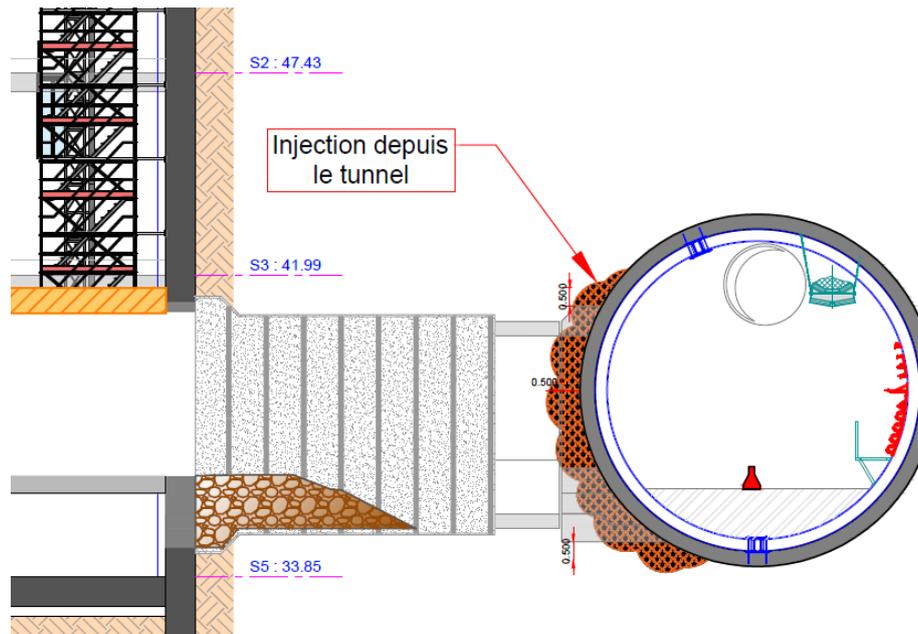


Figure 21. Réalisation d'une auréole de traitement d'1m au droit du rameau depuis le tunnel

9.2. Mise en service du système et début des travaux en hyperbarie

Une fois le système hyperbarie est mis en service, il faudra démolir la PM restante pour pouvoir réaliser l'excavation et mettre en place le soutènement en sécurité. Les travaux d'excavation et soutènement seront réalisés en 3 postes. Le phasage à suivre sera :

- Démolition de la PM restante (8cm).
La profondeur à démolir dans un deuxième temps correspond à l'enrobage (pas d'armatures) de la PM, afin de faciliter les travaux de démolition en hyperbare.
- Excavation et soutènement du rameau de secours.
La dalle S4 étant plus haute que le radier de l'excavation, une rampe d'accès en marin est réalisée à l'avancement des premiers terrassements.
- Reprise en béton projeté sur le linéaire du rameau si nécessaire.

9.3. Phases postérieures aux travaux en hyperbarie

Après l'excavation et la mise en place du soutènement réalisées avec la méthode sous pression, le reste des travaux vont se reprendre en conditions normales :

- Réalisation de l'étanchéité et du revêtement définitif.
- Démolition des voussoirs / Percement du tunnel.
- Démolition des SAS.
- Reprise du génie civil du puits restant.

10. CONCEPTION DES ÉQUIPEMENTS HYPERBARE

10.1. Installation Hyperbare

Le travail sous hyperbare impose la mise en place de sas étanches. L'installation se compose de :

- 1 chambre de travail, qui permettra l'accès au rameau en milieu confiné.
- 1 sas personnel, qui permettra l'accès du personnel à la chambre de travail et sera équipé de l'installation de décompression. Les paliers de décompressions à mettre en place sont fonction de la pression relative mise en place.
- 1 sas secours/matériel ; tout le matériel passera par ce sas pour entrer ou sortir de la zone de travail, en plus il sera utilisé à la place du sas personnel en cas de secours.

La construction du sas sera réalisée sur la dalle S4 (dalle niveau tunnel). Des optimisations et adaptations de la structure de génie civil de l'intérieur du puits seront proposées dans la méthode de réalisation pour l'installation du sas.

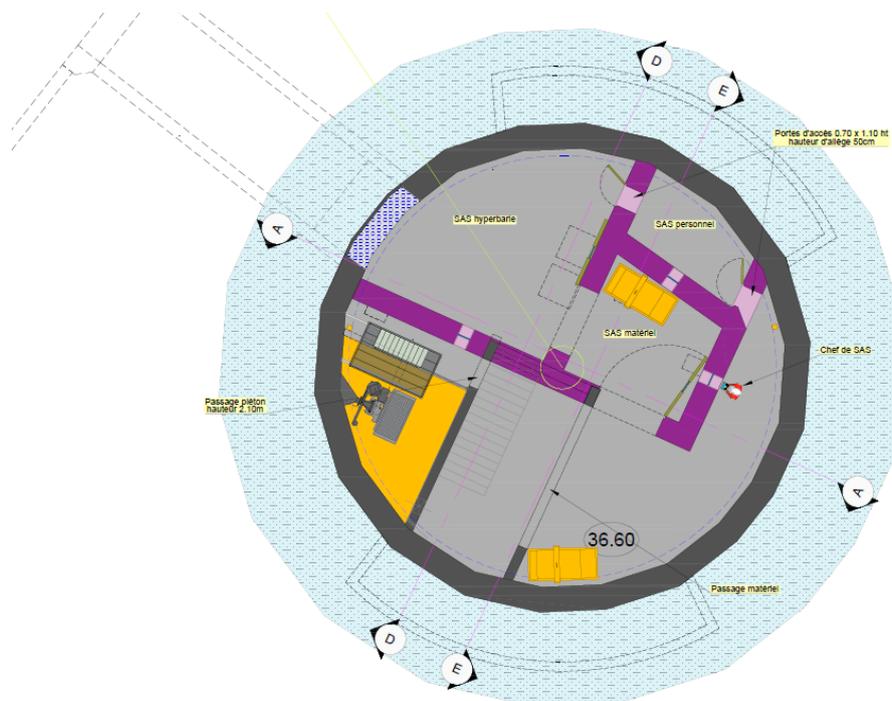


Figure 22. Schéma réalisation des sas hyperbare

10.1.1. Conception des portes des sas

Pour la réalisation de cette installation, 4 portes sont nécessaires (sas matériel et personnel distincts).

- 2 portes battantes pour le sas personnel de dimensions 0.70m x 1.10m.
- 2 portes battantes pour le matériel de dimensions 2.20m x 2.30m.

Les principales contraintes liées à ces portes sont :

- La tenue à la pression de 1bar,
- L'étanchéité,

- Permettre le passage des matériels à utiliser.

Pour la conception de ces portes, un coefficient de sécurité de 1.50 vis-à-vis de la pression a été retenu, soit une pression de 1.50bars. Ce coefficient s'ajoute aux coefficients de sécurité de construction normalement employés.

En plus, il faut aussi considérer les contraintes complémentaires :

- Avoir une fermeture à commande extérieure et intérieure. Avoir un sens d'ouverture des portes assurant le placage des joints.
- Avoir un hublot de contrôle pour le personnel.
- Être facilement manœuvrable, en moyenne 30 à 40 manœuvres par jour.

10.2. Conception des SAS

Les principales contraintes pour la conception des sas sont les suivantes :

- Production d'air respirable
- Production d'air en quantité suffisante pour le travail dans le rameau
- Pression relative nécessaire jusqu'à un maximum de 1bar
- Fonctionnement sans interruption 24h/24h avec équipements en secours

10.3. Détermination du débit d'air à produire

Pour la production d'air respirable, le choix s'est porté sur des machines de production d'air exemptes d'huile, dû à la présence de personnel dans le rameau respirant en permanence l'air comprimé.

Le débit à produire doit satisfaire aux critères ci-dessous :

- Renouvellement d'air dans la chambre de travail et le rameau pour 7 personnes
- Pertes d'air dans le terrain
- Mise en pression rapide du sas personnel

10.3.1. Renouvellement d'air

Les prescriptions préconisent un renouvellement d'air de 25l/s par personne, soit **630m³/h**.

10.3.2. Pertes d'air

Afin d'équilibrer les pressions, le calcul de perte d'air repose sur l'estimation des perméabilités des terrains.

J'ai considéré une perméabilité des marnes et caillasses de 4×10^{-5} m/s, ce qui donne un débit de fuite de 142 m³/h. En appliquant le coefficient de sécurité de 1.5, j'ai une perte d'air de **213 m³/h**.

La méthodologie de calcul des pertes d'air est détaillée en annexe 1 : Calcul des pertes d'air dans le terrain).

10.3.3. Mise en pression du sas personnel

Le volume du sas personnel est de 51m³ à une pression atmosphérique (L=4m ; l=1.80m ; H=4.35m).

La pression absolue est définie selon la suivante formule :

Pression absolue = Pression atmosphérique + Pression relative

Pression absolue = 1.0 bar + 1 bar = 2 bars

Le volume d'air existant dans le sas personnel, à une pression absolue de 2 bars est égal à :

$$51 \times 2 = 102 \text{ m}^3$$

Il faut donc apporter la différence de volume d'air : $102 - 51 = 102 \text{ m}^3$ à 1bar. Ainsi, pour remplir le sas personnel en 3 minutes le débit nécessaire sera :

$$102 / 3 \times 60 = 1020 \text{ m}^3/\text{h}$$

Débit total à produire

Donc, en considérant les fuites dans le terrain, le débit total à produire est de :

$$Q_t = Q_{sas} + Q_{fuites} = 1020 \text{ m}^3/\text{h} + 213 \text{ m}^3/\text{h} = \underline{\underline{1233 \text{ m}^3/\text{h}}}$$

10.4. Système de production d'air

10.4.1. Installation des équipements

Les équipements nécessaires pour réaliser ces travaux en hyperbare sont installés en surface (une emprise équivalente à 5 conteneurs sera nécessaire).

Les conduites d'air sont donc installées depuis la surface jusqu'aux sas. Ces conduites sont doublées par mesures de sécurité pour assurer le maintien de la pression.

10.4.2. Compresseurs

Compte tenu du débit à produire et de la pression de service, le choix s'est porté sur 2 compresseurs électriques à vitesse variable, réglable de 0.5 à 3 bars associés à un aéroréfrigérant.

Un compresseur principal est utilisé en fonctionnement courant, le second est réservé en secours en cas de panne du premier.



Figure 23. Compresseur électrique à vitesse variable

10.4.3. Cuve tampon

Une cuve tampon de 5m³ permet d'assurer la continuité d'arrivée en air en cas de panne de compresseur ou de l'alimentation électrique.

10.5. Gestion de la pression d'air

La régulation de la pression se fait dans les zones suivantes :

- La chambre de travail et le rameau
- Le sas personnel et matériel

10.5.1. Régulation de l'air dans la chambre de travail et le rameau

Les principales contraintes sont les suivantes :

- Pression relative réglable de 0.9 et 1.5 bars en fonction de la tenue du terrain et des arrivées d'eau.
- Stabilité de la pression compte tenu de la présence de personnes en zone de travail afin d'éviter tous problèmes ORL.
- Nécessité de maintenir la pression en toutes circonstances.
- Enregistrement des paramètres en continu.

Compte tenu de la faible pression en sortie des compresseurs, et du renouvellement d'air à assurer en galerie ; la régulation (par rapport à la consigne) de la pression est effectuée en réglant le débit d'échappement d'air galerie/extérieur par une vanne asservie à la pression d'air en galerie.

La vanne de régulation doit répondre aux contraintes suivantes :

- Etre capable d'échapper le débit du compresseur tout en maintenant la pression de consigne (et néanmoins conserver une bonne précision avec un débit d'échappement faible).
- Se fermer automatiquement et rapidement en cas de coupure de l'alimentation électrique (pour éviter que la pression en galerie ne chute).
- Avoir une motorisation compatible avec la régulation attendue.

La vanne considérée pour la réalisation de ces travaux est une vanne de type SAMSON équipée de :

- Capteur pression dans la zone de travail.
- Régulateur : c'est un régulateur de commande. On y affiche la pression souhaitée (consigne). Il reçoit par l'intermédiaire du capteur de pression, dans la zone de travail, la pression effective. En fonction de ces deux données, le régulateur envoie en permanence des ordres au positionneur électro-pneumatique pour maintenir la pression de consigne dans la zone de travail.
- Positionneur électro-pneumatique : donne les ordres de positionnement de la vanne, il convertit les ordres électroniques en commande pneumatique pour le servomoteur.
- Servomoteur pneumatique : c'est la commande mécanique d'ouverture et de fermeture de la vanne. Il reçoit ses informations du positionneur électro-pneumatique.



Figure 24. Vanne type Samson

10.5.2. Régulation de l'air dans le sas personnel et matériel

Le système de régulation des sas est assuré par une vanne de type SAMSON ayant les mêmes fonctions que celle en zone de travail. Cette vanne est asservie par un capteur de pression et d'une valeur de consigne programmée variable (entre 0 et 1.5 bar).

Ce système de régulation est installé dans chacun des 3 sas.

Le système de régulation des sas doit permettre une décompression précise en adéquation avec la table de décompression (Tableau 6).

10.6. Système de commande et de surveillance

10.6.1. Principe de fonctionnement et commandes

Le système hyperbare est composé de :

- 2 compresseurs d'air avec pour chacun d'eux :
 - Des échangeurs air/eau pour le refroidissement de l'air, et 2 conduites indépendantes jusqu'à l'intérieur de la galerie.
 - Des tés et by-pass permettant de secourir n'importe quel élément défectueux.
- Un système de mise en pression de chacun des sas avec :
 - Vannes de commande depuis l'extérieur ou depuis le sas,
 - Manomètres de pression des compresseurs,
 - Silencieux en sortie de conduite dans le sas.
- Des systèmes de régulation des sas avec :
 - Vannes de commande depuis l'extérieur ou depuis le sas,
 - Silencieux en sortie de conduite à l'extérieur.
- Une vanne de ventilation commandée depuis l'extérieur et un silencieux en sortie de conduite à l'extérieur.

Cet équipement est utilisé lors de la réalisation du béton projeté. En cas de besoin, il permet d'échapper un grand débit d'air chargé en poussière (sans passer par la vanne de régulation Samson) en vue d'améliorer la ventilation de la galerie.

Lors de l'ouverture et de l'utilisation de cette vanne, on contrôle qu'un débit subsiste dans la vanne de régulation Samson. Cela signifie que la régulation de pression est toujours réalisée (vanne de ventilation pas trop ouverte).

- Une vanne de régulation Samson, et un silencieux en sortie de conduite à l'extérieur. Un débitmètre permet de s'assurer que le débit d'échappement est au moins égal au renouvellement de l'air imposé par la présence du personnel en galerie.
- 2 soupapes de surpression de sûreté pour la zone de travail et 1 par sas.
- Des manomètres situés à l'extérieur, dans les sas et la zone de travail.

10.6.2. Contraintes liées à ce matériel

Les contraintes concernant le matériel sont :

- Matériel spécifique pour résister à la pression.
- Tous flexibles, vannes et conduites d'amené d'air respirable sont du type alimentaire.
- Les manomètres dans la zone de travail ne doivent pas ressentir la pression "ambiante". Ils doivent être enfermés dans un boîtier qui résiste à la pression et avoir une prise de pression étanche.
- Les sorties des conduites d'air (remplissage ou vidange) doivent être munies de silencieux.

Pour éviter le risque de surpression, la zone de travail et les sas doivent avoir des clapets de sécurité calibrés et éprouvés.

10.6.3. Postes de commande à l'intérieur des sas

Les postes de commande situés à l'intérieur des sas permettent de surveiller la pression et d'agir en cas de besoin.

10.6.4. Groupe électrogène de secours

L'alimentation en énergie électrique des équipements nécessaires à la mise en pression de la zone de travail est réalisée par le tarif vert. Un groupe électrogène présent sur chantier sera utilisé en cas de secours.

Le démarrage du groupe et l'inversion de source sont automatiques dès qu'un défaut dans le courant, fourni par le réseau électrique, est détecté.

10.6.5. Compresseur d'air et refroidisseur en secours

Le compresseur n°1 est utilisé en permanence.

Le compresseur n°2 est mis en marche dans les cas suivants :

- Arrêt ou défaut du compresseur N°1
- Défaut de pression en zone de travail
- Mise en marche volontaire par l'opérateur

Pour chacun des équipements, il existe un commutateur de marche forcée permettant de tester les équipements de secours.

10.6.6. Enregistreur de pression

Un enregistreur de pression est installé dans le coffret de régulation de la vanne Samson. Tous les enregistrements des pressions en zone de travail et des sas sont horodatés, puis transférés quotidiennement vers un PC.

Les mesures sont réalisées par des capteurs 0 à 2 bars / 4-20mA indépendants.

10.6.7. Diffuseur d'alarme

Un avertisseur automatique permet d'informer le personnel d'astreinte de tout défaut sur l'installation.

10.6.8. Détecteur de gaz

L'installation est équipée d'un analyseur permettant de surveiller les taux de CO, CO₂ mais aussi SO₄. En effet, les sables de Cuise peuvent contenir de la matière organique.

Le chef de sas veille à bien analyser les zones où le personnel est présent.

Un piquage est mis en place en amont de la galerie afin de pouvoir réaliser ponctuellement des mesures de l'air injecté en galerie.

10.7. Sécurisation des installations

Afin d'assurer la sécurité du personnel dans la chambre et en galerie, toute l'installation est doublée. En plus, des caméras de surveillance seront mises en place dans chaque sas et dans la chambre de travail. Cette disposition permet :

- Le secours en cas de panne des équipements
- La maintenance du matériel.

L'alimentation électrique est également doublée :

- Alimentation normale à partir de l'installation électrique du puits

Alimentation secourue à partir d'un groupe électrogène installé au plus proche de l'armoire de commande des équipements (démarrage automatique du groupe électrogène et inverseur de source automatique).

11. ORGANISATION DES TRAVAUX

11.1. Détermination de la durée du poste de travail

11.1.1. Décompression et durée du poste

Au vu de la pression attendue, nous retenons la table de décompression pour des pressions comprises entre 0.9 et 1.05 bar. Cette table provient du journal officiel : « Travaux en milieu hyperbare – mesures particulières de prévention ».

Elle fixe la durée maximale d'exposition par jour et par personne, et les paliers de décompression à respecter après chaque intervention hyperbare.

Pour une pression comprise entre 0.9 et 1.05 bar, le travail sera limité à 5h30h. C'est-à-dire, une durée d'intervention final de 5h43, y compris les temps de décompression.

Il existe 2 méthodes permettant la décompression du personnel :

- Une décompression par air (usuelle)
- Une décompression par oxygène (plus rapide)

Nous retenons donc une décompression par air.

Ci-dessous la table de décompression employée.

TABLE AIR / MENTION D / STANDARD			PRESSION de 0.90 à 1, 05 bar	
DUREE DE TRAVAIL	DECOMPRESSION AU 1 ^{er} PALIER	AIR 0, 3 bar	DUREE DE DECOMPRESSION	DUREE DE L'INTERVENTION
0 à 3h30	4 min	0	4 min	3h34
4h00	3 min	5 min	8 min	4h08
4h30	3 min	5 min	8 min	4h38
5h00	3 min	10 min	13 min	5h13
5h30	3 min	10 min	13 min	5h43

Tableau 6. Table de décompression – entre 0.9 et 1.05 bar

Une attention particulière doit être apportée au phénomène de combustion en milieu hyperbare, est notamment en présence d'O₂ :

- Présence de sources d'activation du feu (briquet, allumettes...) interdite.
- Interdiction d'utiliser le chalumeau oxyacétylénique (ou au propane) en atmosphère pressurisée.
- Interdiction d'utiliser l'oxy-arc et la lance thermique oxygène. Seule l'utilisation du système air-air est autorisée.
- Installation dotée d'équipements de secours.
- Avant décompression, nettoyage des résidus de graisse (corps et vêtement).

11.1.2. Procédure de décompression

La procédure de décompression à 1 bar à l'air est la suivante :

Étape	Action dans le sas personnel	Pression relative dans le sas personnel (bar)	Temps de décompression
1.	Entrée du personnel dans le sas	1 bar	-
2.	Décompression à l'air	1 bar > 0,3 bar	3 min
3.	Décompression à l'air	0,3 bar	10 min
4.	Sortie du personnel	Pression atmosphérique	-

Tableau 7. Procédure de décompression à l'air

11.1.3. Temps de repos

Un repos de 12h minimum devra être respecté entre chaque poste de travail.

11.2. Formation « Hyperbare » et encadrement spécifique

11.2.1. Certificats spécifiques

Les hyperbaristes devront être titulaires du :

- Certificat d'Aptitude à l'Hyperbarie Mention D (travailleurs en air comprimé de l'industrie), Sous - classe 1 (pression inférieure à 1,2 bar).
- Certificat de visite médicale du travail établi spécifiquement pour des personnes soumises au risque particulier que constitue le risque hyperbare.

11.2.2. Rôle du chef de sas

Le chef de sas est le surveillant des interventions hyperbares. Il a un profil ingénieur / conducteur travaux. Il est désigné pour surveiller et conduire les interventions hyperbares en cours et ne peut exercer d'autres activités jusqu'au retour des hyperbaristes à la pression atmosphérique. Il travaille en poste. Il doit avoir reçu une formation spécifique pour la conduite d'intervention sous hyperbare.

Le chef de sas détient l'autorité sur toute personne se trouvant en situation hyperbare quel que soit le niveau hiérarchique de cette personne.

11.2.3. Rôle du chef d'opération hyperbare

Un chef d'opération hyperbare devra être désigné pour diriger les interventions hyperbares en cours. Il sera chargé de vérifier les conditions d'intervention et donner son accord pour le début de l'opération. Il devra être disponible immédiatement en cas d'urgence pour prendre en charge cette situation.

Cette personne doit être sur le chantier pendant les interventions hyperbares. 2 personnes doivent se relayer pour être présents pendant les 3 postes.

11.2.4. Rôle du référent hyperbare

Un référent « hyperbare » propre à chaque entreprise du groupement est nommé. Il doit se tenir informé des travaux envisagés et être mobilisé pour la rédaction des procédures, PPSPS et manuel de sécurité hyperbare spécifique à l'affaire si nécessaire.

11.3. Documents opérationnels associés

11.3.1. Fiche de renseignement aux secours

C'est un document rédigé à l'occasion d'une situation de secours et qui indique le nom des victimes et des personnes présentes, la description de l'accident ou des symptômes, et le traitement/protocole réalisé. Un modèle de ces feuilles est fourni en annexe 8.

11.3.2. Fiche de sécurité hyperbare

Document rédigé à l'occasion de chaque intervention et qui indique :

- Le nom des personnes impliquées aux fonctions clés,
- Les renseignements sur le lieu, la date et les horaires d'intervention,
- Le type de travail effectué,
- Les caractéristiques du profil de décompression suivi,
- La table de décompression correspondant à la pression et à la procédure de décompression retenue (air ou oxygène).

Chaque feuille est signée par le Chef de SAS.

Il est souhaitable d'archiver les feuilles de sécurité hyperbare pendant 10 ans. Un modèle de ces feuilles est fourni en annexe 9.

11.3.3. Check-list matériel

Cette check-list est remplie par le chef de sas avant chaque opération hyperbare pour vérifier le bon fonctionnement du matériel hyperbare. Un modèle de ces feuilles est fourni en annexe 10.

12. MÉTHODES DE RÉALISATION DES TRAVAUX

Une fois détaillé le phasage à suivre pour la réalisation des travaux et les installations nécessaires pour l'alimentation d'air, il faut décrire les différents méthodes spécifiques pour la réalisation des différentes tâches.

De la même manière, dans ce paragraphe, je vais expliquer et développer les différentes adaptations à mettre en place pour l'optimisation de la méthode, et de l'interface avec la phase génie civil.

12.1. Adaptation de la géométrie du rameau

La géométrie initiale du rameau prévoyait un radier contre voûté, qui n'était pas optimal du point de vue structurel, et une poutre de renfort coté PM. Une adaptation de la géométrie a été proposée afin d'optimiser l'exécution des travaux de réalisation du rameau.

L'optimisation proposée passe par les points suivants, qui sont développés ci-dessous :

- La réalisation d'une voûte non armée, afin d'optimiser la réalisation du rameau (la non mise en place d'armature sur la voûte permet d'optimiser la durée d'exécution et réduire les risques). Les calculs correspondants ont été faits pour vérifier la réalisation de la voûte en béton non armé.
- La non nécessité de réaliser la poutre renfort prévue coté PM
- La réalisation d'un radier plat

Non nécessité de réaliser la poutre renfort prévue coté PM

Dans la conception de l'ouvrage, une poutre était prévue à la jonction PM/rameau. Celle-ci ayant une fonction de reprendre les efforts de la paroi moulée induits par l'ouverture de la même. Une coupe représentant cette poutre au droit de l'ouverture du rameau est présentée ci-dessous.

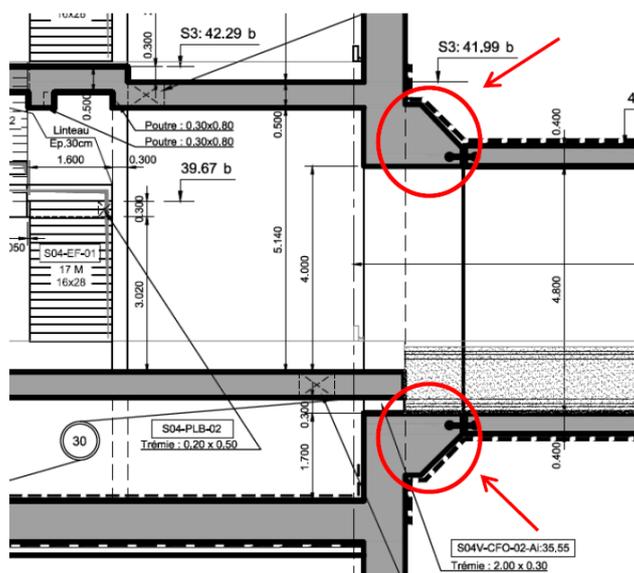


Figure 25. Coupe au droit de l'ouverture du rameau

Le panneau concerné par l'ouverture du rameau est le panneau P4, d'une longueur de 6.33m, visible sur le plan de panneautage ci-dessous.

L'ouverture du rameau à une longueur de 4 mètres à l'axe du panneau P4. Ce qui signifie que le panneau P4 est continu sur toute sa hauteur sur les deux côtés de l'ouverture sur une largeur de 1.15m de part et d'autre.

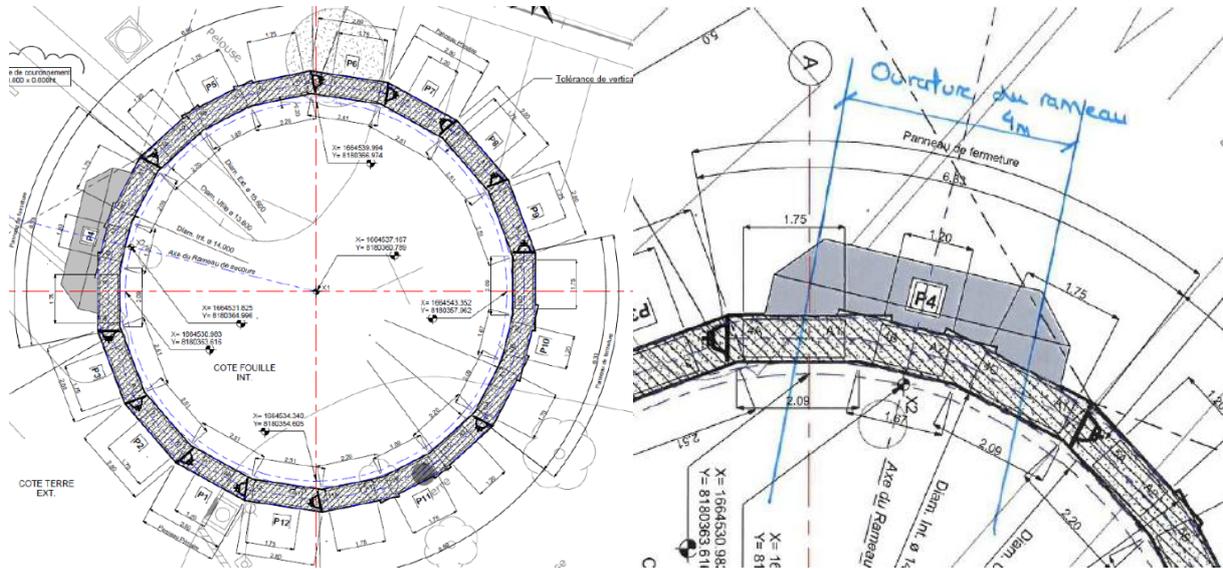


Figure 26. Panneautage / Longueur ouverture PM

Lors de l'ouverture du rameau, une voûte de décharge se crée au-dessus de l'ouverture dans le panneau de PM. Un modèle bielle-tirant se met en place de part et d'autre de cette coûte de décharge. Les bielles de compression entraînent une poussée horizontale vers les panneaux de PM adjacents. Cet effort horizontal est repris par la rigidité cylindrique du puits ainsi que par un tirant (linteau) qui sera dimensionné pour l'intégrer à la paroi moulée au droit de l'ouverture du rameau. Un calcul a été réalisé pour dimensionner les sections d'acier nécessaires à ajouter au ferrailage de la paroi moulée.

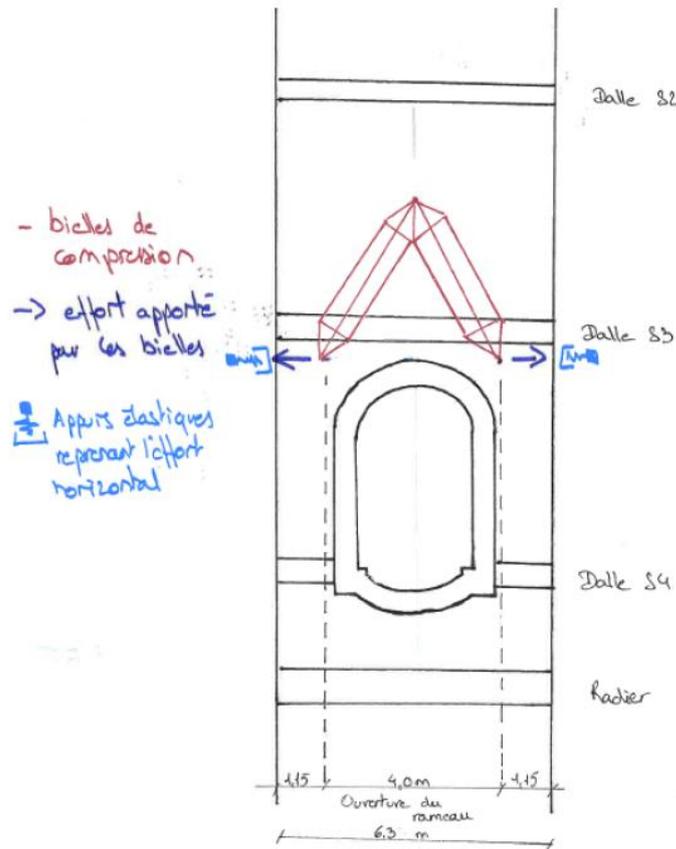


Figure 27. Modèle bielle-tirant

Zone	Section nécessaire	Section possible	Emplacement
Armatures principales horizontales	21,84 cm ² - reliant les 3 cages du panneau P4 entre elles	2 HA25 + 2x2 HA20 (22,39 cm ²)	Répartis sur 77 cm de hauteur depuis l'ouverture du rameau
Armatures secondaires horizontales	5,75 cm ² /m reliant les 3 cages du panneau P4 entre elles	2 HA14/m e=50 cm (6,16 cm ² /m)	Répartis entre 77 cm au dessus l'ouverture du rameau et 5,15 m.
Armatures transversales	5,75+5,76=11,51cm ² /m	2 HA20/m e=50 cm (12,57 cm ² /m)	Sur une hauteur de 5,15 m et sur toute la largeur du panneau P4.

Figure 28. Bilan des sections d'aciers nécessaires à ajouter au ferrailage de la PM

Donc, la poutre prévue à la jonction PM/rameau n'a pas de rôle structurel dans l'ouverture de la paroi moulée et peut être supprimée.

Réalisation d'un radier plat

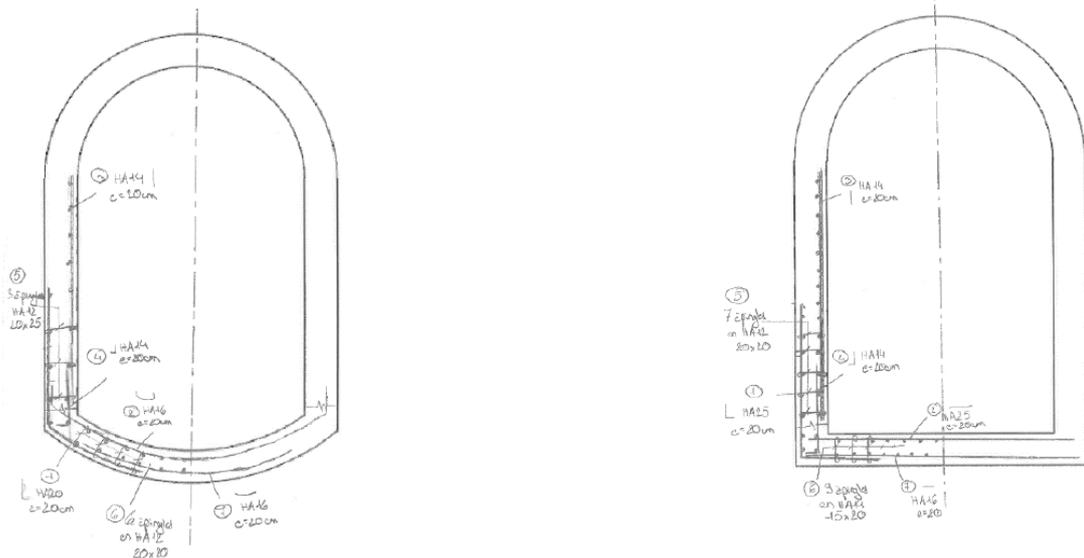
La proposition était d'optimiser la géométrie du radier en passant par un radier plat à la place d'un radier en contre voûte. Cette modification a des avantages structurels et permet une diminution des risques.

Avantages structurels

- La forme en contre voute est non adaptée à la mise en œuvre d'un profilé HEB en radier, ni à la mise en place d'un ferrailage simple dans le radier définitif.
- La liaison droite + courbe (existante dans la géométrie marché) ne permet pas d'équilibrer les efforts.

Une note de comparaison du ferrailage entre les deux options (géométrie marché et géométrie optimisée) a été établie. Avec la géométrie optimisée un ferrailage optimal en équerres placées à la jonction radier/piédroit a été proposé.

La comparaison du principe de ferrailage est illustrée ci-dessous.



Principe de ferrailage – Géométrie marché

Principe de ferrailage – Géométrie optimisée

Figure 29. Comparaison du principe de ferrailage géométrie marché – géométrie optimisée

Réduction du risque

a. Phase excavation : la durée de l'exécution de la tâche « marinage » est sécurisée grâce à un travail effectué sur une surface horizontale

b. Phase de soutènement provisoire : la durée de la mise en œuvre du béton de propreté est sécurisée.

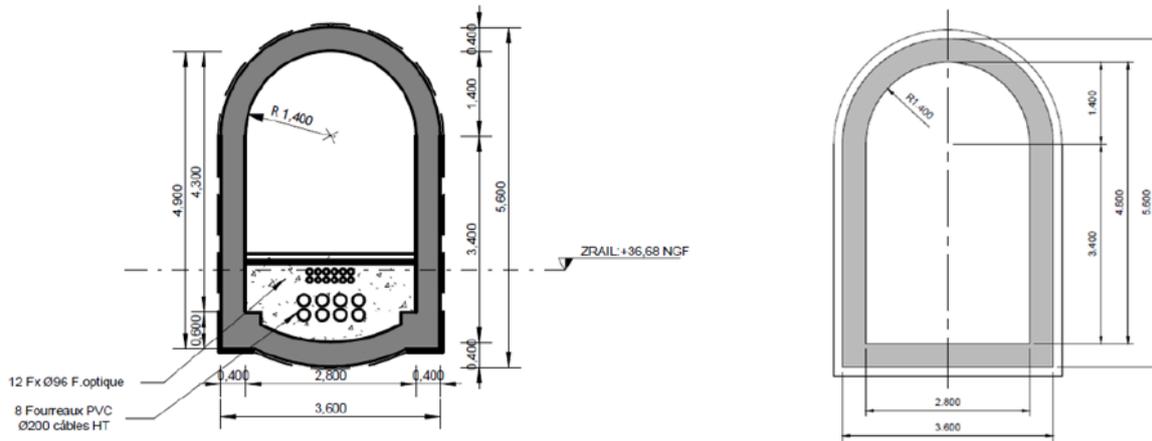
Mesure corrective associée : capacité à mettre en œuvre rapidement un radier provisoire pour sécuriser au plus tôt le fond de fouille et ainsi stabiliser les terrains en présence.

c. Phase de coffrage du radier

- Réduction du nombre de phases associées et ainsi sécuriser la durée de réalisation
- Permet une meilleure ergonomie qui va dans le sens de la sécurité

d. Phase de réalisation revêtement définitif

- Déplacement aisé du coffrage (sur rail ou sur roues) et ainsi sécuriser la durée de réalisation
- Coffrage et décoffrage aisés facilitant l'intégration de l'assistance de vérins hydrauliques (dans le sens de la sécurité)
- Suppression du ferrailage en voûte et ainsi sécurisé la durée de réalisation



Extrait du plan marché OS n°97

Section du rameau proposée – 0901 P

Figure 30. Comparaison géométrie marché – géométrie optimisée

Donc, la réalisation d'un radier plat permet aussi une optimisation du point de planning car la durée de réalisation est sécurisée dans toutes les phases.

12.2. Adaptation dalle S3

Dans la conception de l'ouvrage, la dalle S3 présente trois niveaux différents (hors le rechargement, qui sera réalisé dans un deuxième temps). Ci-dessous la vue en plan et la coupe A-A qui concernent la dalle S3.

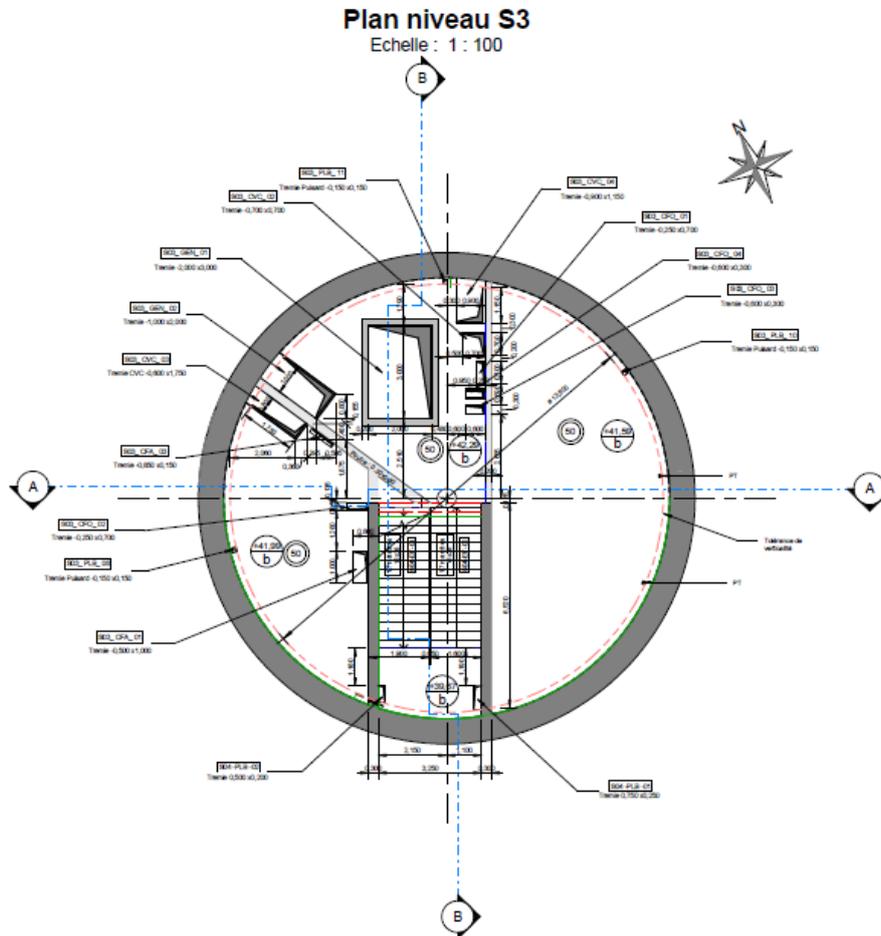


Figure 31. Vue en plan Dalle S3

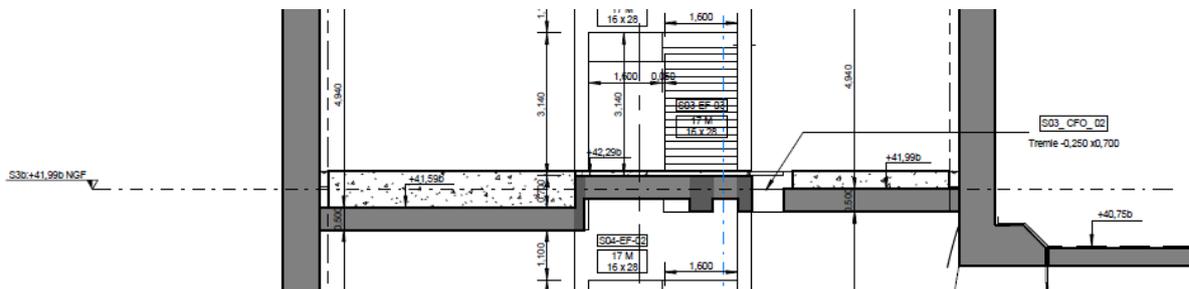


Figure 32. Dalle S3 Coupe A-A

Afin d'optimiser les travaux de génie civil, j'ai proposé la possibilité de réaliser la dalle S3 en un seul niveau NGF. Le but est d'utiliser la dalle S3 pour la construction des sas (dalle de couverture des sas), et aussi de rester en définitif pour éviter de refaire la dalle. La réalisation de la dalle S3 sur un même niveau permet d'optimiser le planning et aussi la partie économique.

Premièrement, c'est nécessaire de réaliser une vérification de l'épaisseur pour reprendre les efforts auxquels la dalle sera soumise pendant la phase de réalisation des travaux sous pression.

De la même façon, il faut que la dalle proposé à un seul niveau puisse reprendre les efforts en phase définitif, surtout par rapport à l'ancrage à la PM déjà réalisée.

L'optimisation de la dalle S3 en un seul niveau est présentée ci-dessous avec la comparaison de la structure du marché.

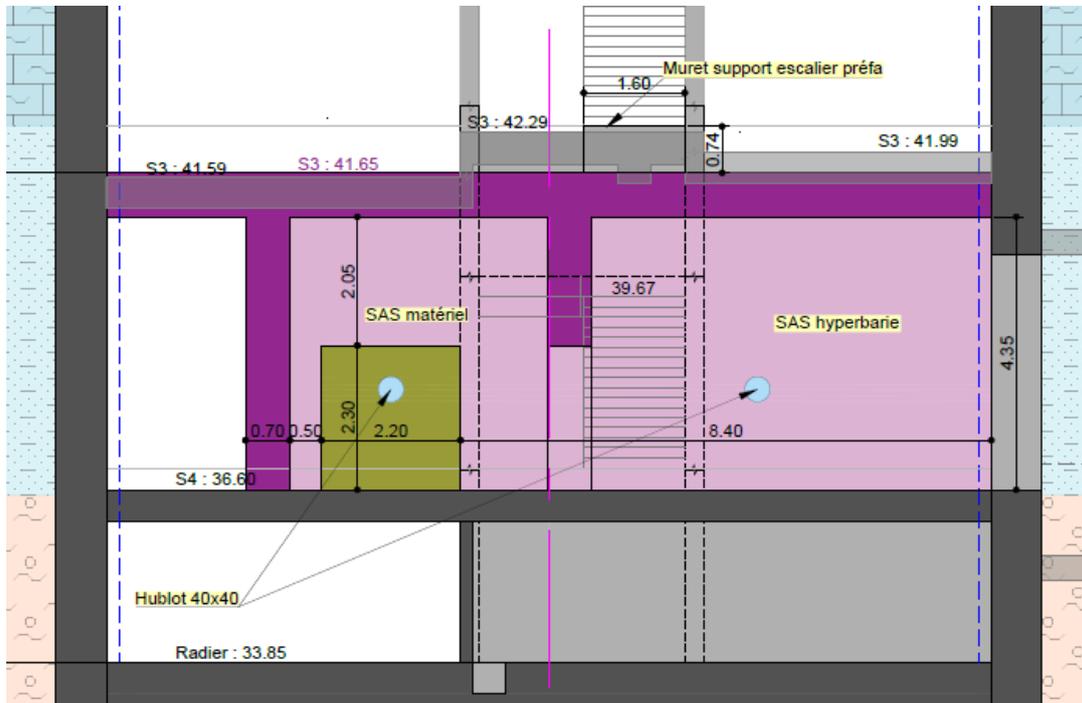


Figure 33. Proposition d'optimisation de la dalle S3 en un seul niveau

Dans le paragraphe suivant est expliqué le dimensionnement de la structure des sas, avec les dimensions finalement adoptées.

12.3. Dimensionnement de la structure des SAS

Le dimensionnement de la structure des SAS comprend différents éléments à calculer ou vérifier :

Dalle S4

L'épaisseur retenue pour la dalle S4 après la prise en compte des charges d'exploitation qui vont exister pendant la phase d'excavation sous pression et en phase définitif est égal à l'épaisseur déjà prévu dans le marché, 50cm.

Les charges d'exploitation considérées dans la chambre de travail pour les travaux d'excavation du rameau en hyperbare sont les suivants :

- Robot/engin de déconstruction
- Chargeur
- 5 opérateurs
- Robot béton projeté

En plus, dans le sas secours/matériel il faut considérer le stockage ; et un charriot élévateur à l'extérieur des sas.

Néanmoins, pendant la phase des travaux en hyperbare il faudra mettre en place un appui ponctuel provisoire sous la dalle S4 à l'angle des voiles du sas secours/matériel. Cet appui est calculé pour reprendre les efforts pendant toute la phase des travaux jusqu'à la démolition des voiles des sas.

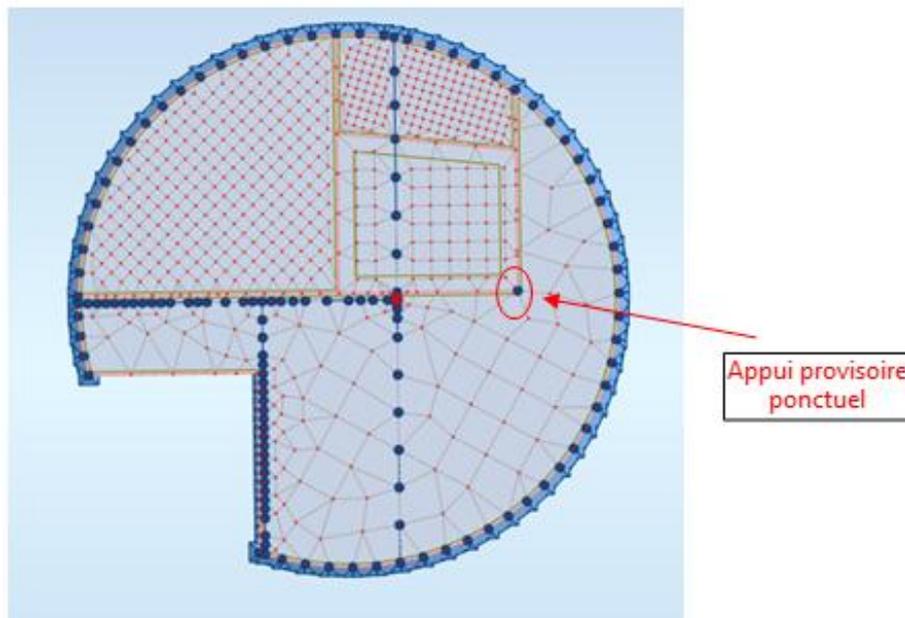


Figure 34. Schéma des éléments pris en compte pour le dimensionnement de la dalle S4

Voiles des sas

En fonction de la pression prise en compte pour l'excavation en hyperbare, et les efforts sur les voiles, une épaisseur de 60cm a été dimensionnée pour la réalisation des différents voiles.

Par rapport au phasage de réalisation, les voiles des sas seront réalisées en une seule fois avec les poteaux de la cage d'escaliers. La réalisation dans un premier temps des poteaux de la cage

d'escaliers n'est pas possible car la réduite section ne permet pas d'assurer la continuité de l'armature, et en plus, la porte du sas secours/matériel risque d'avoir besoin d'inserts dans les voiles.

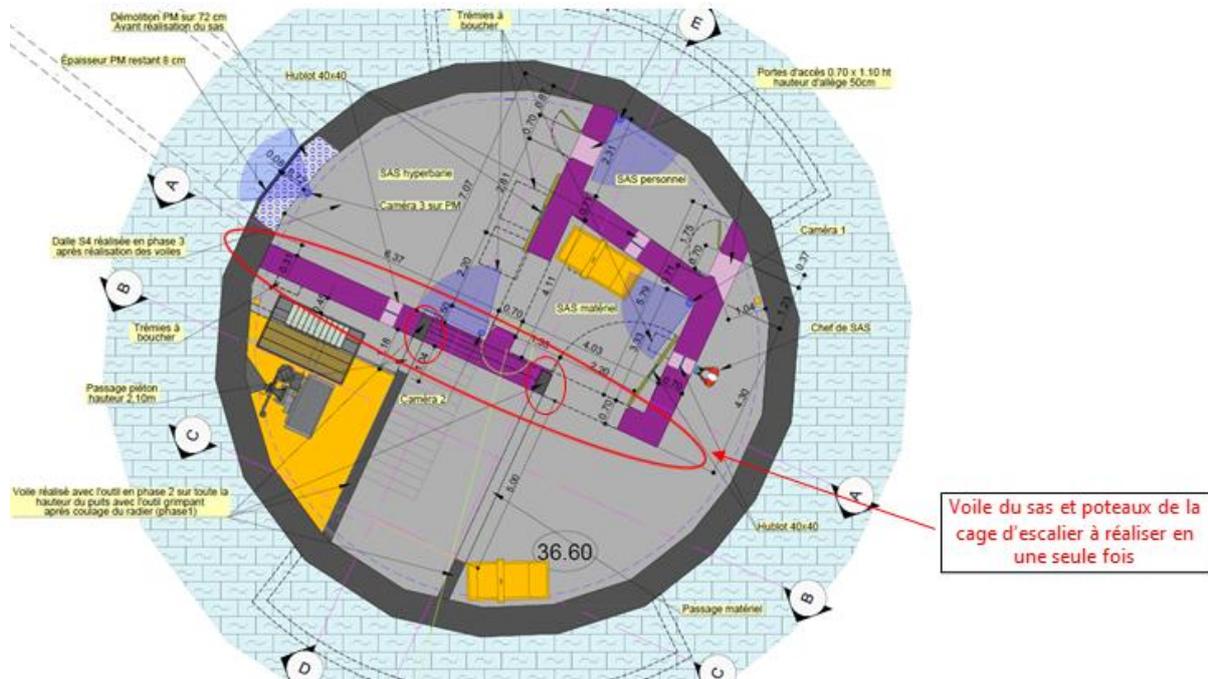


Figure 35. Schéma des éléments pour la réalisation des voiles des SAS

Dalle S3

La dalle S3 sera réalisée en un seul niveau aligné à la cote inférieure des niveaux initiaux de la dalle, et l'épaisseur sera 50cm comme prévu dans le marché.

Finalement, le dimensionnement des sas en fonction des calculs et vérifications réalisés est présenté ci-dessous.

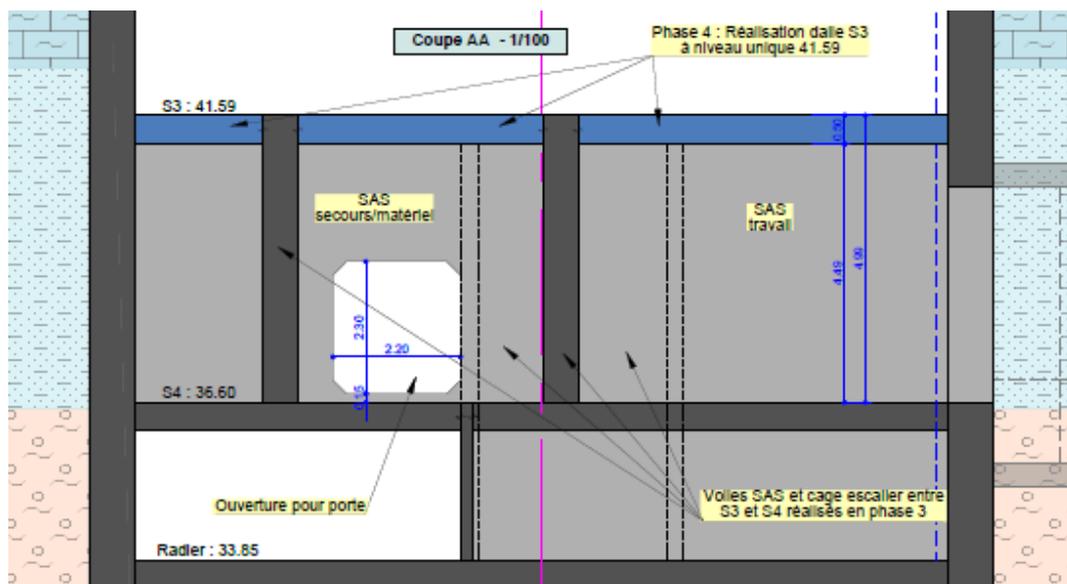


Figure 36. Coupe AA - Dalle S3 (épaisseur 50cm) en un seul niveau

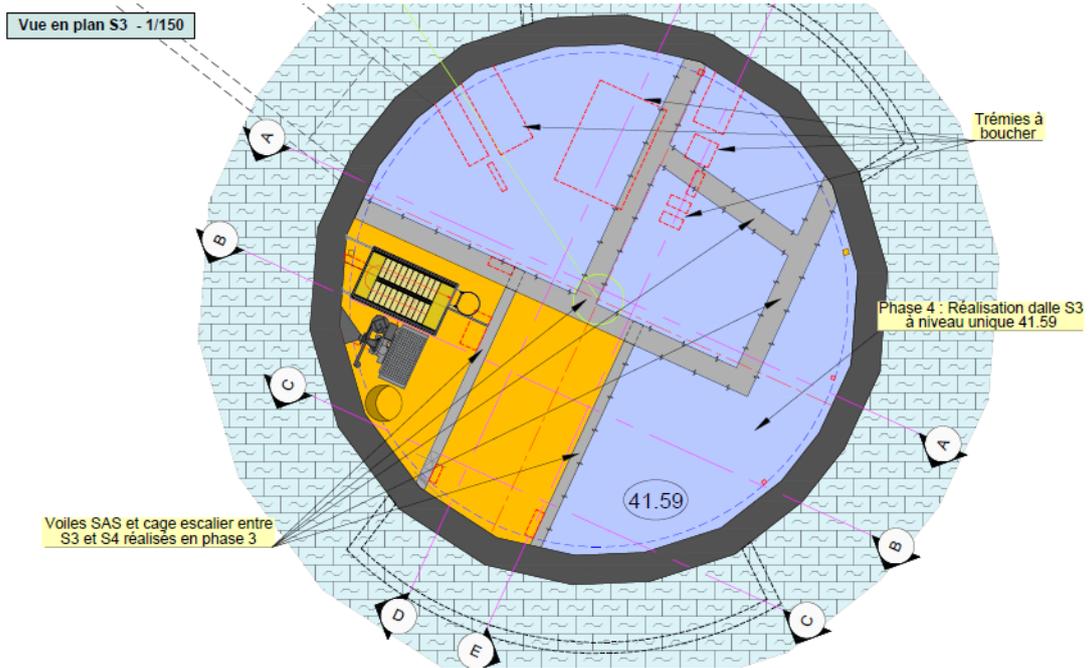


Figure 37. Vue en plan - Dalle S3 (épaisseur 50cm) en un seul niveau

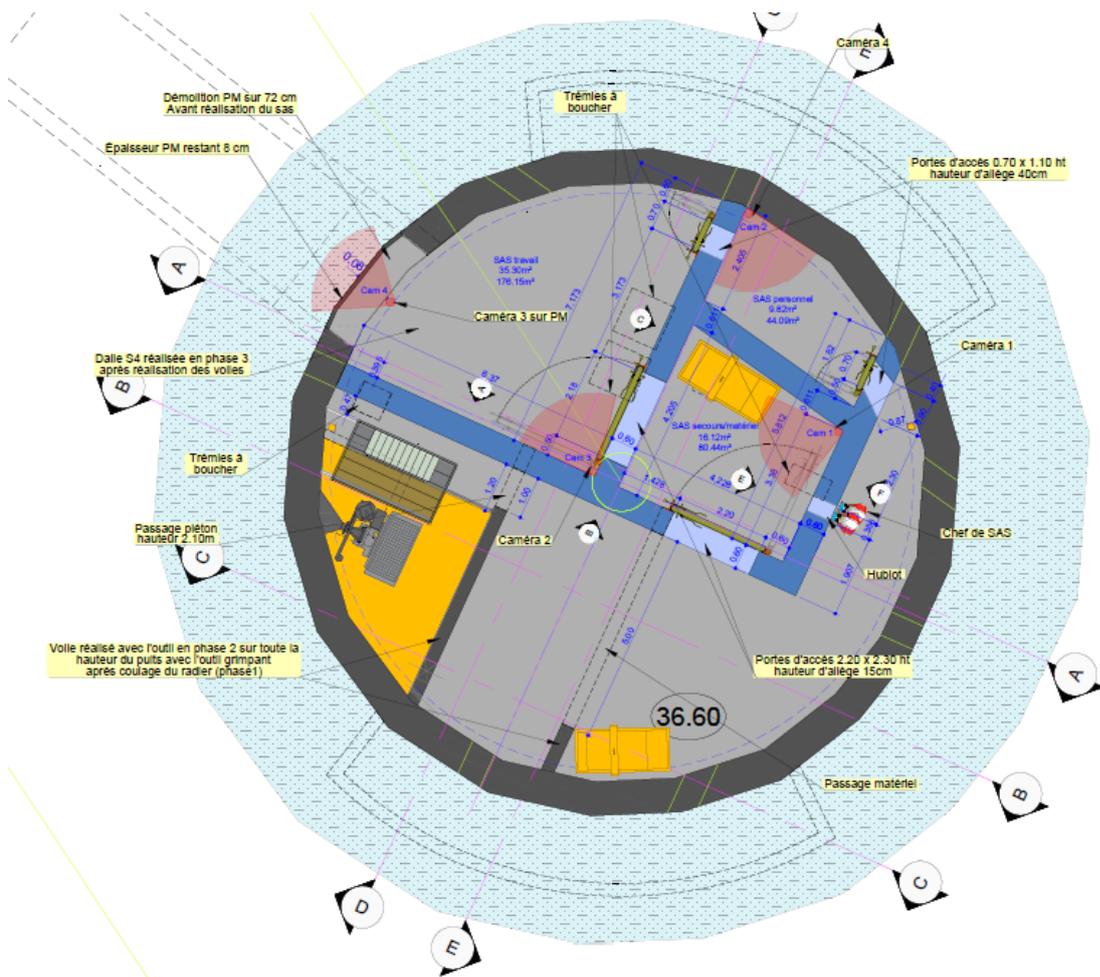


Figure 38. Vue en plan – Voile des sas (épaisseur 60cm)

12.4. Adaptation du phasage génie civil

La réalisation du génie civil du puits est conditionné par les travaux d'excavation du rameau en hyperbare.

Le phasage des travaux initialement prévu était la réalisation de presque la totalité du génie civil du puits avant la réalisation du rameau, en réalisant postérieurement les compléments des dalles, la pose des escaliers préfabriqués et la dalle de couverture.

D'un point de vue planning, le phasage évolue en fonction des contraintes qui apparaissent sur chantier. Dans ce cas, le retard suite à la réalisation des travaux de Jet Grouting et le dépassement des seuils de pilotage dans la chambre à sable, ont provoqué un changement du phasage des travaux.

L'ouverture du rameau coté tunnel est une tâche prioritaire. L'itinéraire du tunnelier est conditionné par une distance maximale de 2000 mètres entre sorties, imposée par les équipes pompiers pour la réalisation d'une intervention en cas d'accident ou incendie.

La distance existante entre les gares de Bry-Villiers-Champigny et Champigny Centre dépasse les 2000 mètres, donc l'ouverture du rameau de secours d'un des deux ouvrages annexes (901P ou 902P) est dans le chemin critique pour ne pas bloquer l'avancement du tunnelier.

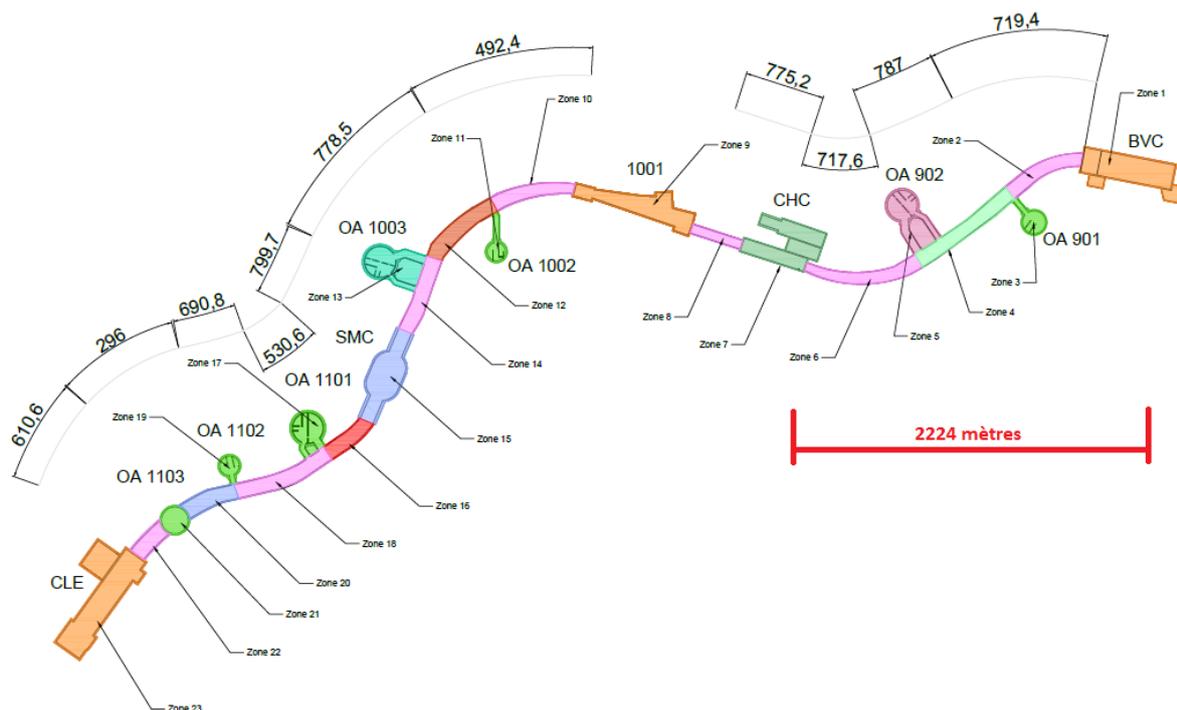


Figure 39. Synoptique du tunnelier T2B / Distance BVC – CHC

En considérant la reprise des travaux après l'arrêt du chantier pendant les travaux de Jet Grouting, un nouveau planning a été établi. Le phasage à suivre est développé ci-dessous :

- Paroi au coulis et PM
- Poutre de couronnement
- Terrassement du puits et des carreaux
- Radier

- Génie civil avant la réalisation du rameau : la structure de génie civil de l'ouvrage sera réalisée avec la méthode traditionnelle (réalisation des voiles et dalle) dans tous les niveaux avant la réalisation du rameau.
L'utilisation de l'outil grim pant n'est pas valable pour cet ouvrage, la construction des sas et les modifications nécessaires (réservations pour permettre le passage des engins et personnes) obligent à changer la méthode de réalisation des voiles de la cage d'escaliers.
La construction de la structure des sas fait partie du phasage de réalisation du génie civil.
- Rameau de secours sous pression (construction des sas et réalisation des travaux d'excavation et revêtement)
- Finition du génie civil du puits

La réalisation du génie civil avant le rameau dépend du dimensionnement des sas.

Dans un premier moment, l'idée était de réaliser la cage d'escalier toute hauteur à l'aide du coffrage grim pant, mais considérant l'interface existant avec la construction des voiles et la dalle de couverture des sas il y a eu la nécessité d'étudier et établir des modifications.

L'adaptation proposée est la réalisation du génie civil en coffrage traditionnel. Le but est d'avoir la possibilité de mettre en place les adaptations nécessaires pour la construction des sas.

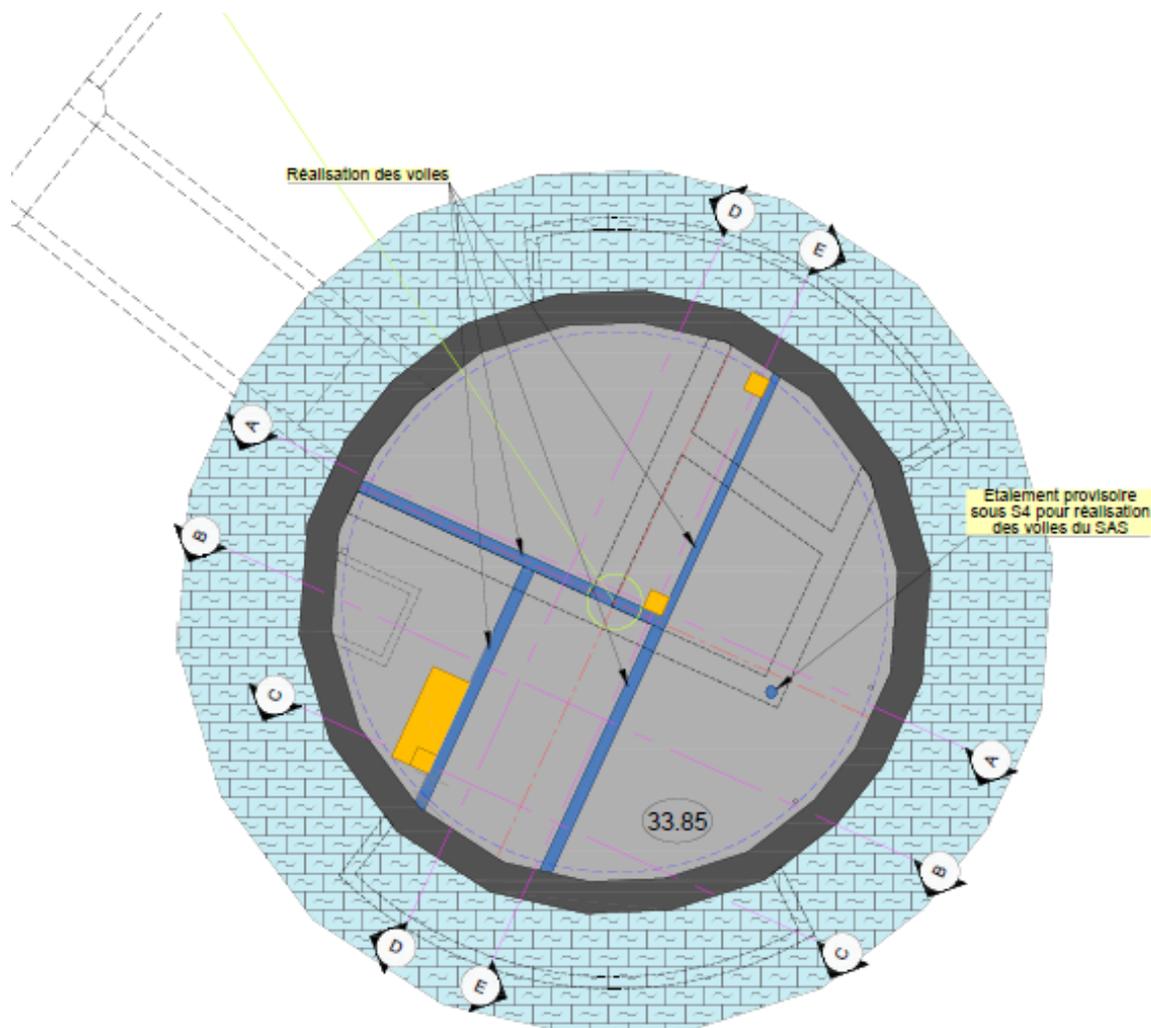


Figure 40. Réalisation des voiles entre le radier et la dalle S4

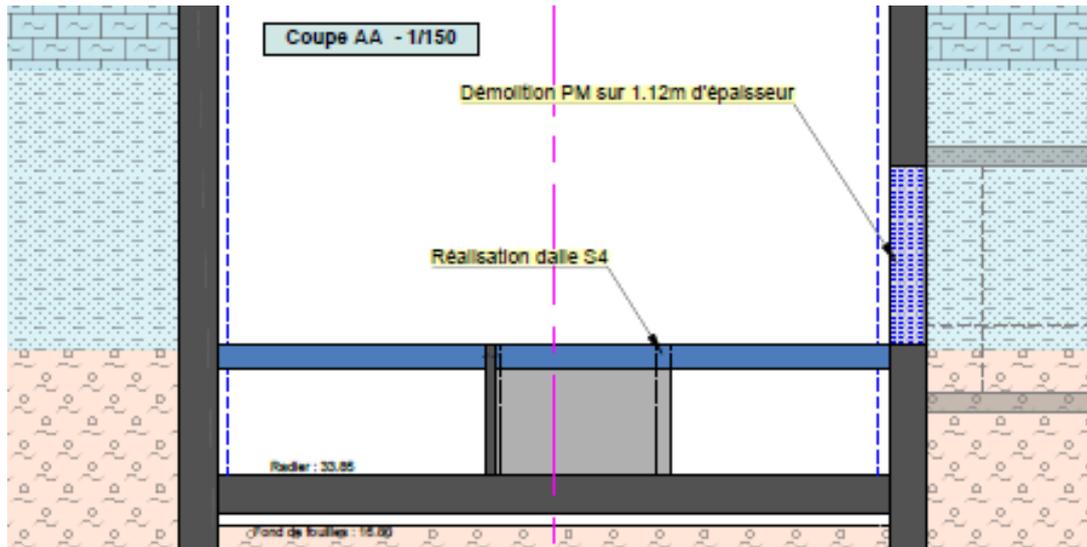


Figure 41. Réalisation de la dalle S4 et démolition de la première partie de la PM

Après, il faut considérer des ouvertures dans la cage d'escaliers au niveau de la dalle S4 afin que les personnes et le matériel puissent accéder aux sas. Tout le matériel nécessaire pour la réalisation du rameau sera descendu par la cage d'escaliers. Les dimensions de la réservation qui permet le passage du matériel de la cage d'escaliers aux sas, sont établies en fonction des caractéristiques du matériel nécessaire (gabarit, rayon de giration, dimensions).

La cage d'escaliers entre le niveau de la dalle S4 et S3 va se réaliser au même que la construction des sas (voiles et dalle de couverture, qui sera la dalle S3 définitif).

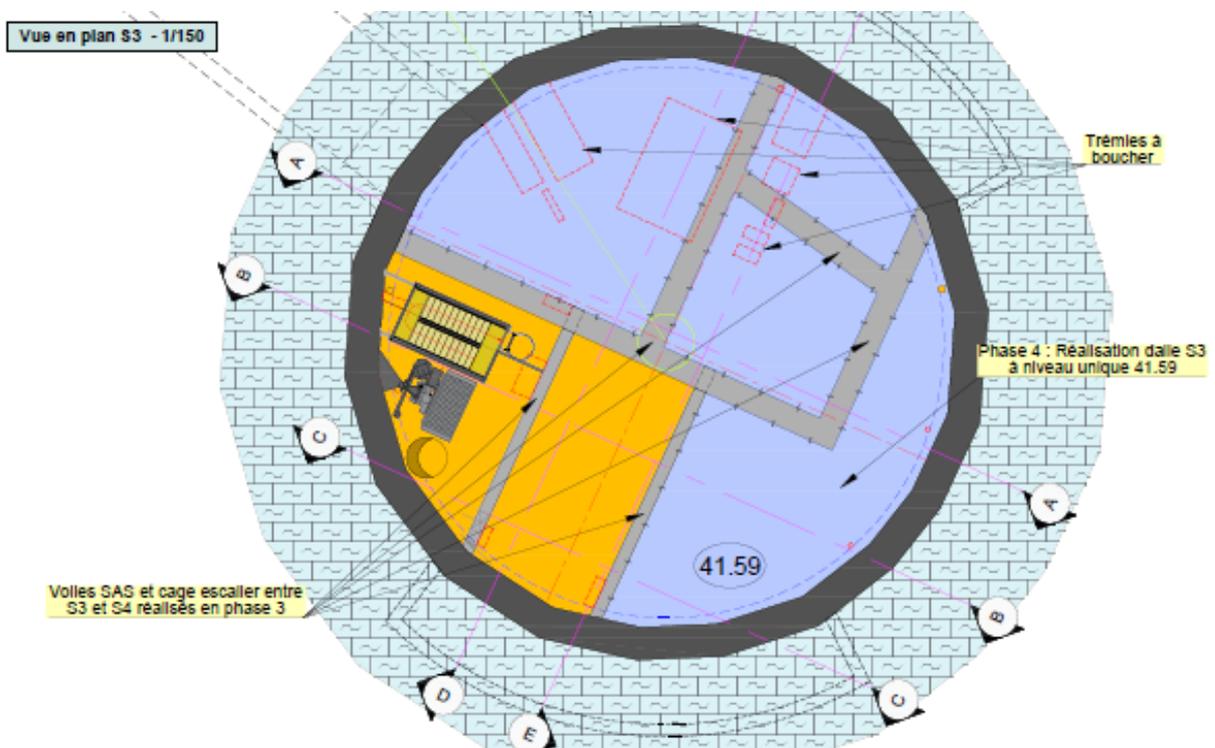


Figure 42. Construction des sas

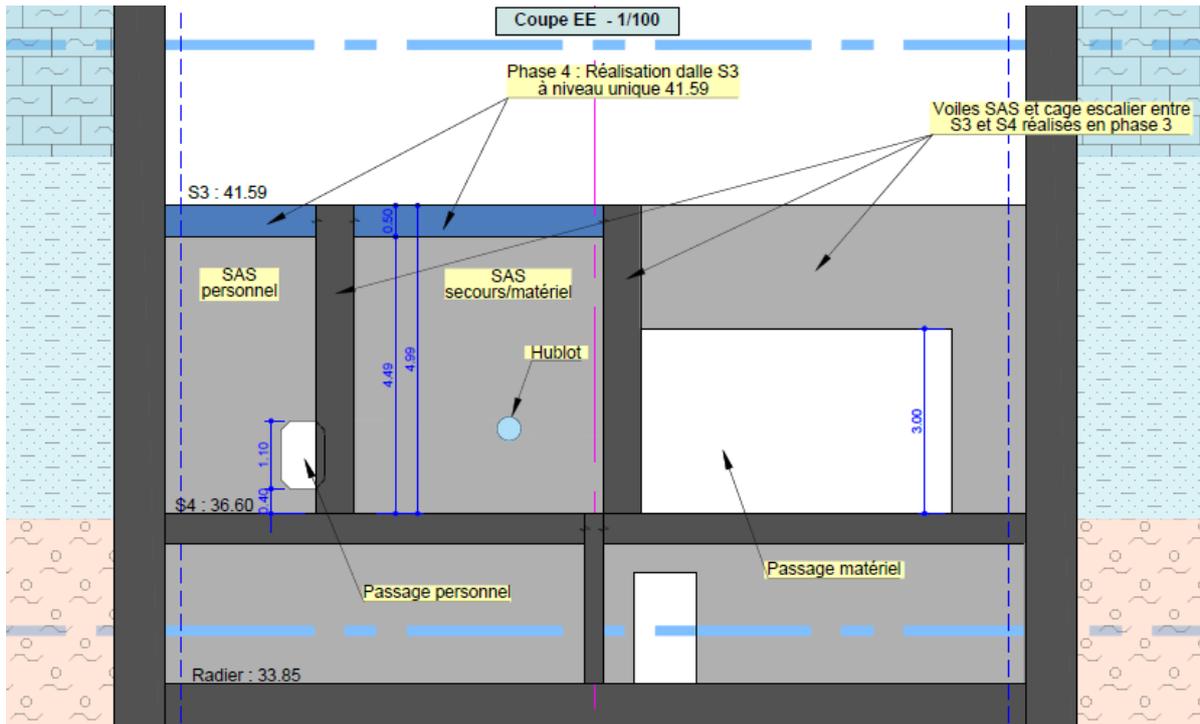


Figure 43. Coupe EE – Ouverture cages d’escaliers pour accès matériel

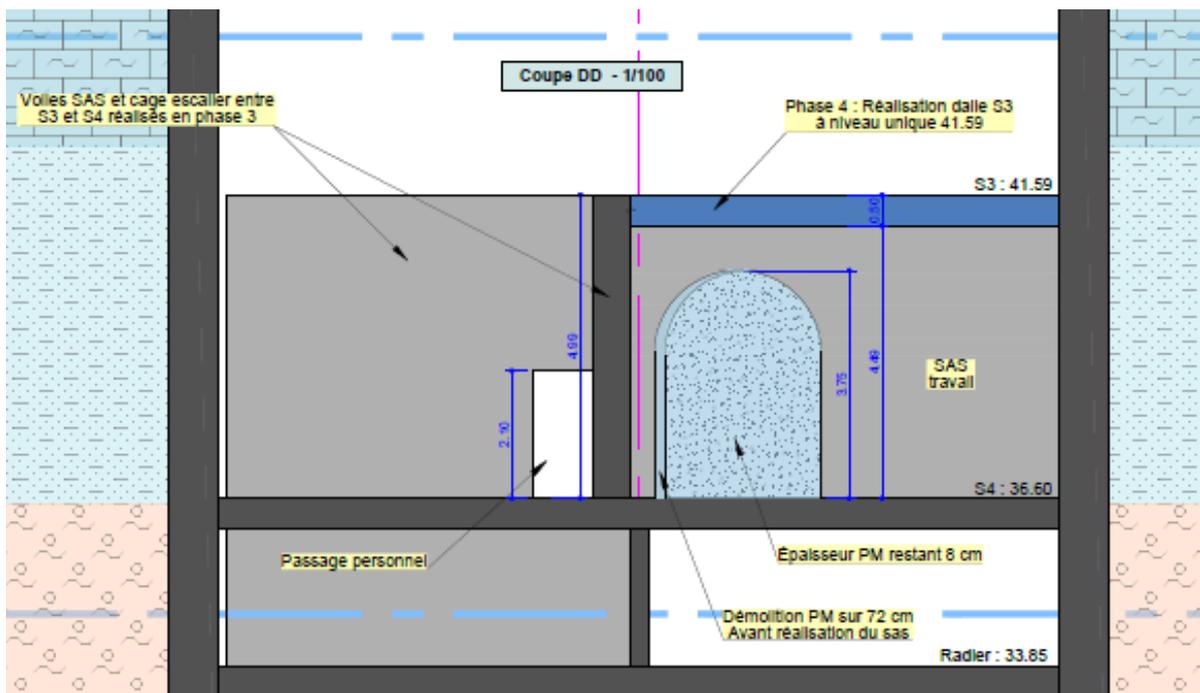


Figure 44. Coupe DD – Ouverture cages d’escaliers pour accès personnel

Le début des travaux d’excavation du rameau dépend du passage du tunnelier. Donc, après la construction des sas, les niveaux S2 et S1 du génie civil vont être réalisés afin d’optimiser le phasage et le planning.

12.5. Installation schéma d'air hyperbare

La réalisation des travaux sous pression a besoin de l'installation d'un schéma de canalisations et vannes qui permettent d'alimenter les sas d'air, ainsi que travailler avec la sécurité nécessaire.

Premièrement, c'est nécessaire de connaître la conception du schéma pneumatique à mettre en place. Le retour d'expérience de l'installation mise en place pour la réalisation d'une galerie sous hyperbare sur la ligne 14 de métro, et les connaissances techniques de l'équipe mécanique de l'ouvrage T2B ont permis d'établir le schéma.

Le schéma pneumatique de l'installation d'air et la nomenclature des différents éléments sont présentés en annexe (Annexe 7). Un manuel d'utilisation de l'installation a été établi à l'aide des installations mis en place dans l'ouvrage de la ligne 14 afin de présenter les règles à suivre pour la mise en pression des sas (Annexe 8).

Premièrement, il faut considérer que les compresseurs et les cuves à air seront installés en surface, et deux canalisations descendront dans le puits pour permettre l'alimentation d'air des sas.

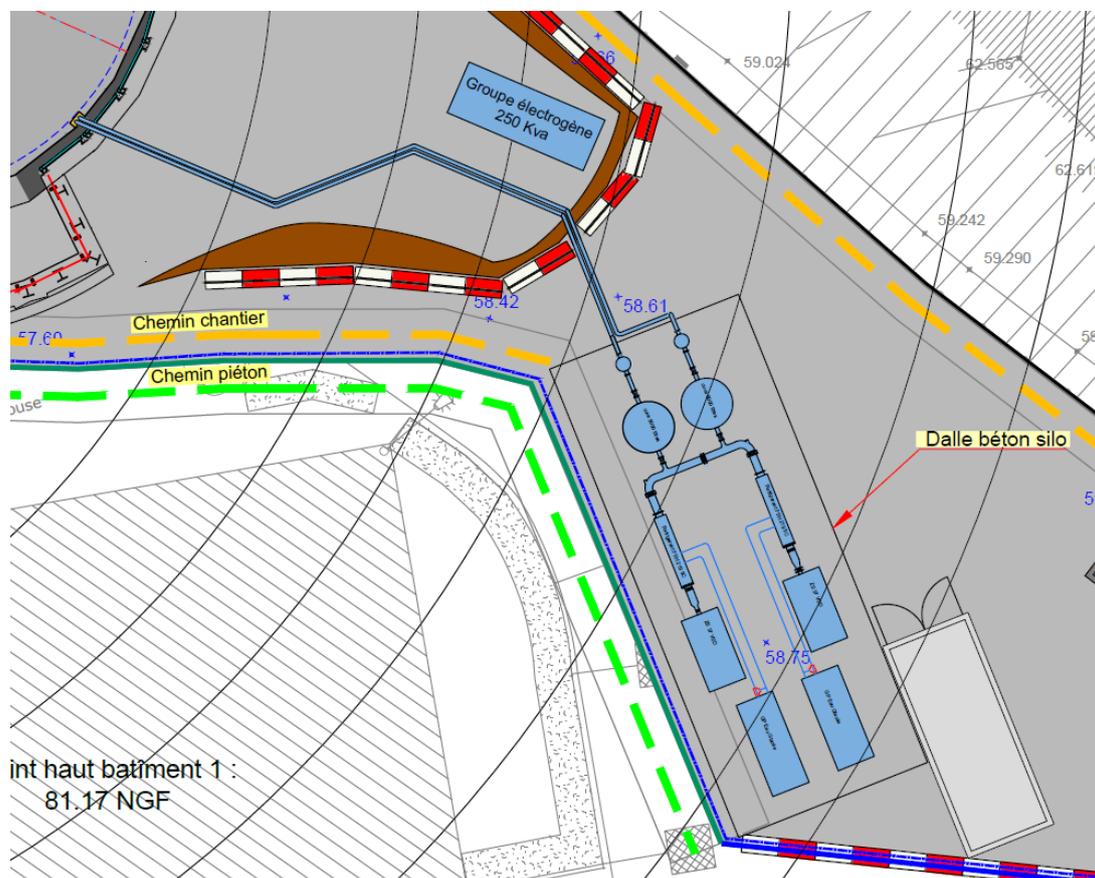


Figure 45. Vue en plan de l'installation hyperbare en surface

D'un autre côté, l'objectif est d'établir la position des réservations pour les canalisations sur les voiles du sas. Les dimensions assez réduites des sas, le numéro de canalisations et réservations à mettre en place et les contraintes existantes pour l'installation, demandent la réalisation d'un plan méthodes spécifique pour l'installation du schéma pneumatique.

Le plan d'installation du schéma d'air hyperbare a été réalisé à l'aide du projeteur méthodes, en représentant les différentes canalisations, vannes, filtres... nécessaires pour mettre en pression les sas d'une façon sécuritaire.

Les principales contraintes et considérations prises en compte ont été les suivantes :

- L'installation des compresseurs est réalisée en surface, et l'installation de la valve de régulation Samson sera réalisée sur la dalle S3 afin de libérer au maximum l'espace sur la dalle S4 où tous les travaux vont se réaliser. Un accès depuis les escaliers provisoires sera mis en place.
- Mettre en place toutes les vannes à hauteur d'homme, du côté intérieur et extérieur des sas. Dans le sas personnel, les réservations doivent se réaliser au-dessus de la porte d'accès dû à l'impossibilité de créer les réservations sur les côtés de la porte pour faire passer les canalisations. Ce fait oblige à allonger les canalisations afin de pouvoir descendre les vannes à la hauteur nécessaire pour être accessible (environ 1.20mètres pour le chef de sas).
- Les canalisations et vannes à l'intérieur du sas secours/matériel sont positionnées sur le voile qui est juste derrière la porte du sas quand elle est ouverte. Il faut souligner qu'elles ne sont pas positionnées sur le voile qui sépare les deux sas car cette zone est destinée au marinage. Pour éviter l'endommagement des canalisations à l'ouverture de la porte du sas secours/matériel, une protection sera mise en place.
- Les canalisations nécessaires à l'installation hyperbare seront descendues dans le puits du côté le plus proche aux compresseurs.
Par contre, la canalisation d'eau descend à côté des escaliers provisoires avec les descenderies nécessaires pour les travaux. L'alimentation d'eau dans les sas exige que la canalisation passe au-dessus la dalle S3, donc elle sera protégée et signalisée pour éviter son endommagement et permettre les travaux en sécurité sur la dalle S3.

Le plan méthodes établi est présenté dans l'annexe 6 ; les différentes coupes et vues en plan ci-dessous représentent la distribution de quelques réservations nécessaires pour l'installation de l'hyperbare.

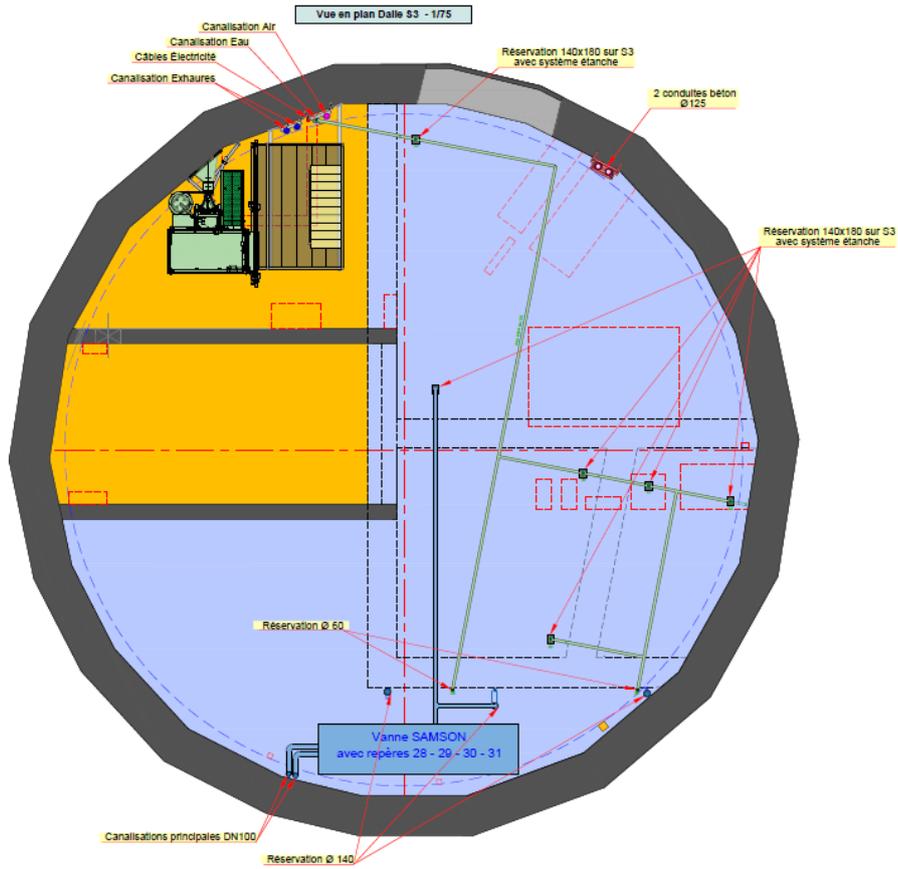


Figure 46. Vue en plan dalle S3

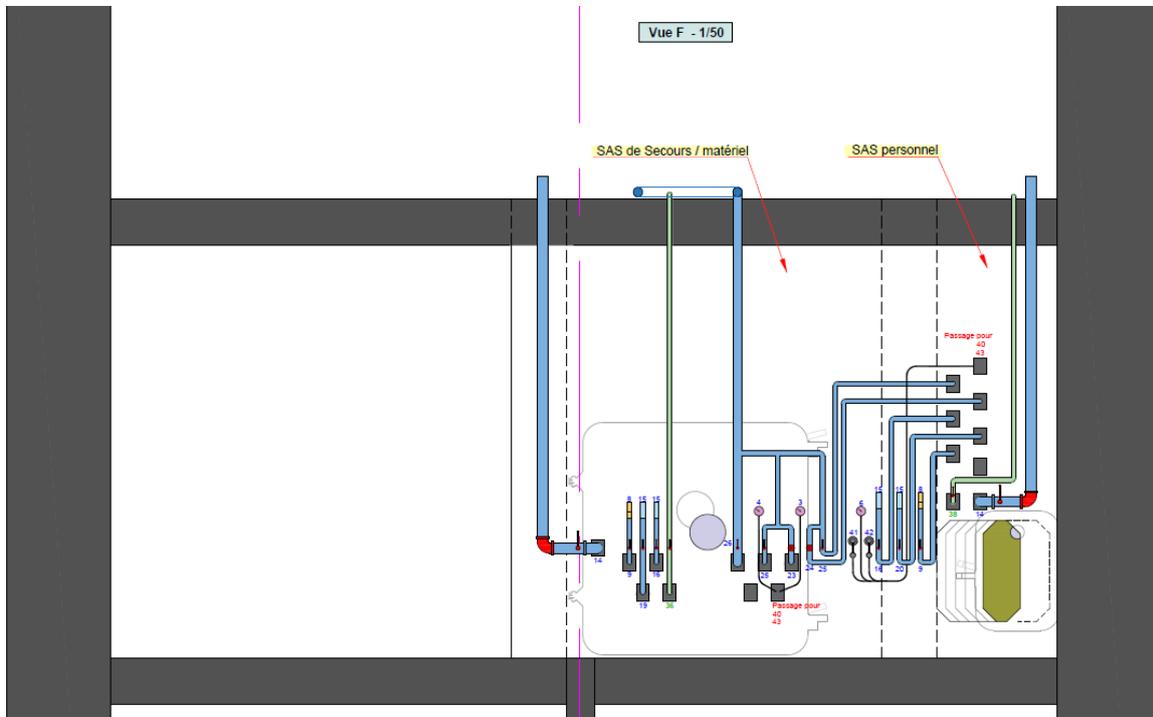


Figure 47. Vue F installation hyperbare (extérieur) – Chef de sas

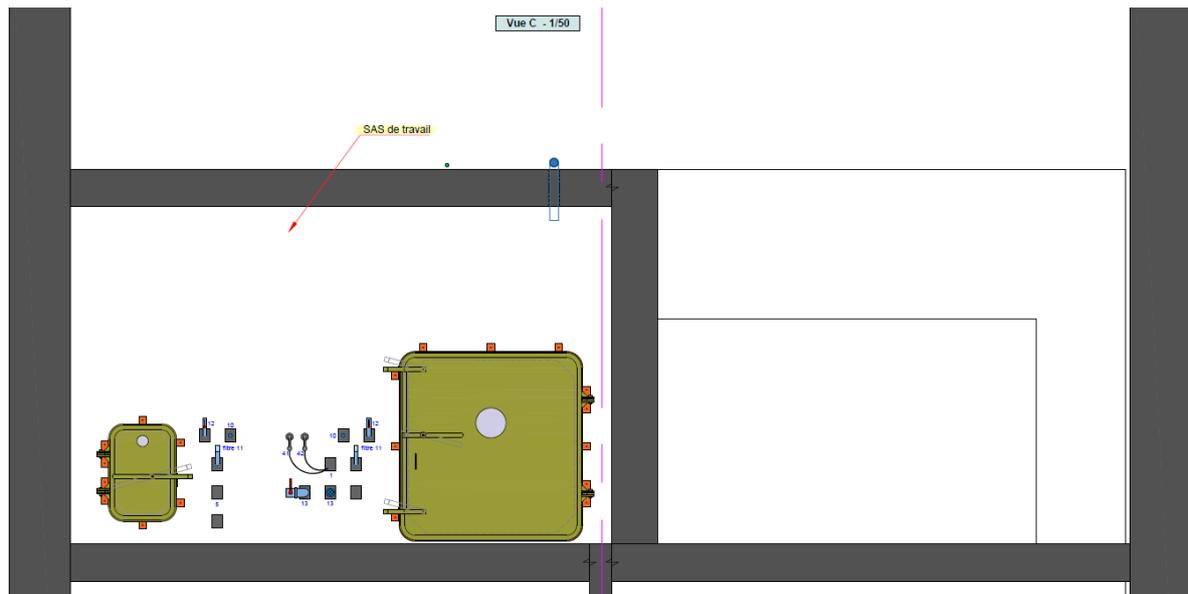


Figure 48. Vue C – Chambre de travail

Le travail avec le service matériel m'a permis de mieux comprendre les installations nécessaires pour l'hyperbare. L'expérience de cet équipe dans les installations de l'hyperbare de la ligne 14 de métro, a permis d'avoir des retours d'expérience pour améliorer et optimiser la conception de l'installation.

La consigne la plus importante à considérer par rapport à l'installation de l'hyperbare est de ne pas avoir aucune vanne dans la chambre de travail pour les canalisations qui alimentent directement l'air. Donc la canalisation qui alimente la chambre de travail depuis la vanne Samson doit entrer directement par mesures de sécurité.

12.6. Protection acoustique des compresseurs en surface

Les dimensions très réduites du puits ne permettent pas de mettre en place les compresseurs au niveau de la dalle S4, donc l'installation va être réalisée en surface. Il sera donc nécessaire de mettre en place un système pour atténuer le bruit généré par les compresseurs, qui vont fonctionner en continu les 24 heures de la journée pendant 5 jours par semaine.

Dans un premier temps, trois solutions ont été considérées pour atténuer le bruit des compresseurs :

- Réalisation d'un capotage acoustique : constitué de panneaux acoustique métalliques (parement en tôle d'acier pleine côté extérieur, isolant type laine de roche 70kg/m³ d'épaisseur 50mm et parement en tôle d'acier perforée côté source de bruit), en plus une sur-toiture en bar-acier assurera l'étanchéité à l'eau.

Après la demande d'un devis, un coût de 45k€ est estimé pour cette solution.

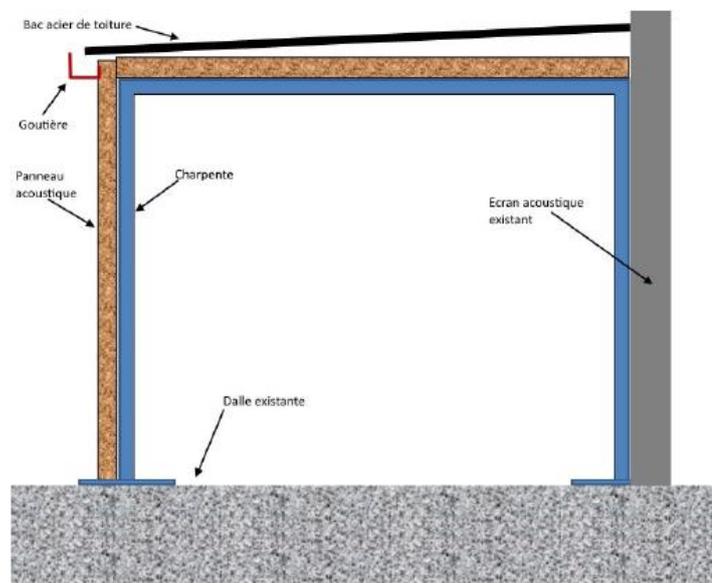


Figure 49. Schéma de principe du capot acoustique



Figure 50. Exemple de réalisation de capot acoustique

- Mise en place d'un container pour isoler les compresseurs à l'intérieur.
- Récupérer une cabane acoustique utilisée sur l'installation hyperbare de la ligne 14 et l'adapter aux dimensions nécessaires.

Finalement, la solution choisie a été la récupération et adaptation de la cabane acoustique présente dans le parc matériel de l'entreprise.

13. ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le choix de la solution de réalisation de l’excavation du rameau en hyperbare est le résultat de l’analyse des différents scénarios, du point de vue économique et du planning des travaux.

Après le dépassement des seuils de déplacement pendant les travaux de Jet-Grouting, l’objectif était de définir une solution pour réconforter la chambre à sable DSEA et réaliser les travaux d’exécution de la PAC, la PM et l’excavation du rameau en sécurité en respectant le délai imposé par le passage du tunnelier.

Différents scénarios ont été développés en fonction des contraintes existantes : chambre à sable DSEA, la réalisation du Jet-Grouting, PAC et PM, les auscultations et le tunnel.

Après les résultats de l’analyse économique des différentes solutions, la solution la plus économique et qui permet de mieux optimiser et adapter toutes les contraintes existantes autour de l’ouvrage est la réalisation d’une réparation et confortement de la chambre à sables pour continuer les travaux de la PAC, la PM et le rameau en hyperbare.

Cette solution permet d’optimiser l’immobilisation de l’atelier de parois moulée pour minimiser les coûts, et du point de vue planning permet de réaliser le rameau sans immobiliser le tunnelier. De la même façon, le délai final des travaux prend comme hypothèse la réalisation du génie civil du puits avant la réalisation du rameau.

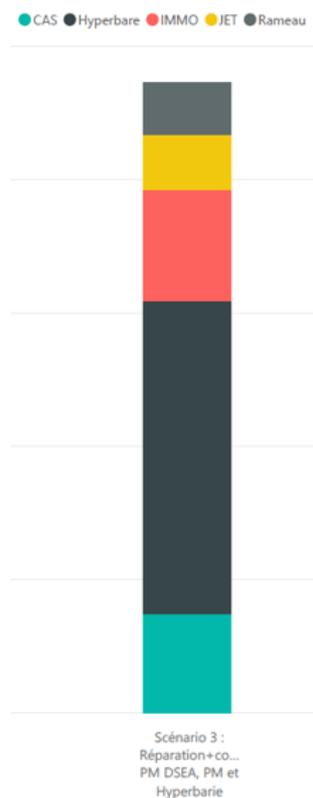


Figure 51. Représentation du % de coût de différents éléments dans le scénario choisi

La réalisation du rameau en hyperbare comprend des différents aspects à considérer pour faire une analyse économique complète :

- Encadrement. La réalisation de cette méthode pour l’excavation du rameau comprend des études et méthodes supplémentaires au marché initial.

- Formation. Une formation spécifique est obligatoire pour toutes les personnes qui vont intervenir pendant les travaux d’excavation du rameau : l’encadrement, la main d’œuvre ou les personnes des services transverses, comme les topographes ou le service des auscultations.
- Installation hyperbare. La construction de la structure des sas étanches pour permettre la réalisation des travaux sous pression, et l’installation d’alimentation d’air font partie des travaux supplémentaires.
- Main d’œuvre pour l’installation de l’hyperbare (électriciens et mécaniciens)
- Matériel pour la réalisation de l’excavation et soutènement du rameau. L’excavation et le soutènement de la totalité des rameaux de la ligne est traité d’une manière global afin d’optimiser les ressources à mettre en place. Donc, le choix du matériel a été conditionné par la réalisation du rameau en hyperbare dans cet ouvrage, et les contraintes qui se rajoutent (dimensions à respecter pour l’accès et le travail dans les sas).
- Main d’œuvre pour la réalisation des travaux de production : construction de la structure du sas et réalisation du rameau. Pendant la phase d’excavation réalisée sous pression, les travaux vont se réaliser en 3 postes (24 heures sur 5j/7j). Les travaux de construction de la structure des sas et la réalisation du revêtement du rameau vont être réalisés par une équipe de génie civil. De la même manière, pour les travaux d’excavation du rameau une équipe mineure sera nécessaire. La main d’œuvre de spécialité mineur est plus difficile à trouver aujourd’hui, et dans ce cas, il faut ajouter la contrainte de réalisation des travaux sous pression. Les travaux en hyperbare requièrent une spéciale attention, et il faut suivre toutes les consignes de sécurité pendant la journée de travail et aussi dans les heures repos.
- Fourniture
- Consommables

De la même façon, les travaux de traitement du terrain depuis le tunnel et le sciage des parois moulées vont être sous-traités.

Le graphique ci-dessous (figure 52) montre le pourcentage que chaque élément représente sur le total.

Les données économiques sont confidentielles à l’entreprise, elles sont montrées en pourcentage pour permettre d’avoir une idée plus clair de la répartition des coûts en fonction des différents éléments.

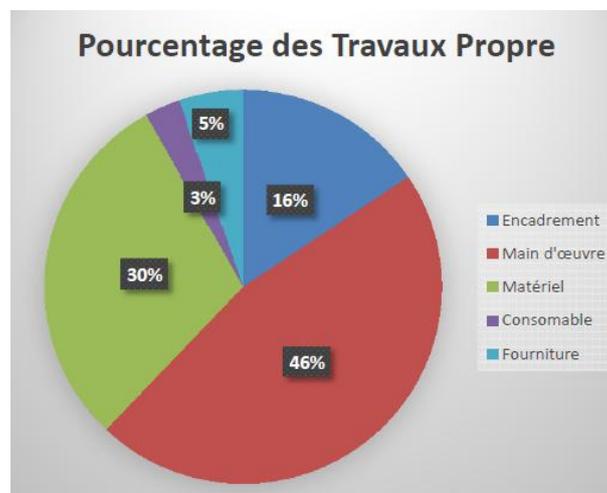


Figure 52. Pourcentage du coût des travaux pour la réalisation du rameau en hyperbare

La réalisation des travaux supplémentaires non prévus initialement dans le marché permet d'avoir une augmentation des chiffres d'affaires de l'entreprise.

14. CONCLUSION

Français

Ce travail de fin d'études s'est déroulé sur un chantier de la ligne 15 Sud Lot T2B au sein de l'entreprise Razel-Bec. Son objectif est d'établir les méthodes de réalisation du rameau sous hyperbare, et l'interface avec le génie civil. Ce travail a été mené en différentes étapes.

Premièrement, j'ai étudié en détail la problématique et les contraintes existantes sur l'ouvrage qui ont permis de déterminer la solution d'excavation du rameau sous pression, méthode qui permet de creuser dans des terrains qui risquent d'avoir des venues d'eau. La méthode hyperbare est une technique très spécifique pour laquelle il est nécessaire de considérer beaucoup de contraintes. Le retour d'expérience d'autres ouvrages réalisés sous pression m'ont permis également d'approfondir le sujet et d'établir les méthodes de réalisation en faisant les adaptations et optimisations nécessaires.

Dans un deuxième temps, j'ai défini la structure et les installations nécessaires pour mettre en pression les sas étanches. D'un point de vue sécurité, la réalisation de la méthode hyperbare nécessite une considération spécifique vis-à-vis du personnel qui va travailler sous pression, avec la mise en place des procédures de compression et décompression en fonction de la pression nécessaire pour permettre l'excavation d'une manière sécuritaire. L'établissement des différentes responsabilités du personnel pendant la réalisation des travaux, et la réalisation des documents et formations nécessaires a été défini.

Ensuite, le phasage du puits a été étudié pour organiser la réalisation du rameau en hyperbare. Le phasage et le planning de réalisation des travaux ont été adaptés en fonction du passage du tunnelier. Une adaptation du génie civil intérieur du puits a été nécessaire afin d'optimiser d'un point de vue planning et économique les travaux. L'introduction des installations pour l'alimentation d'air dans les plans de construction de la structure a été une tâche très intéressante pour comprendre le fonctionnement de cette méthode.

Une étude financière a été faite afin de pouvoir connaître l'aspect économique de cette solution. Le choix de cette solution a été réalisé en fonction des contraintes existantes en considérant tous les travaux à réaliser et le scénario qui mieux s'adapte d'un point de vue planning et économique.

La réalisation de ce stage fin d'études a été une expérience très intéressante et enrichissante du point de vue professionnel et aussi personnel. L'opportunité de faire partie d'un des projets du Grand Paris m'a permis de mieux connaître et comprendre les travaux souterrains, et notamment de connaître une technique très spécifique pour la réalisation des travaux souterrains conventionnels, et acquérir des compétences très enrichissantes.

La complexité et les contraintes liées à la méthode d'excavation sous pression en font une technique uniquement considérée dans des cas très spécifiques. Cependant, il m'a permis de considérer d'une manière globale beaucoup d'aspects différents comme les méthodes de réalisation des travaux, les installations ou la sécurité en milieu hyperbare.

Enfin ce stage m'a particulièrement sensibilisée à l'importance de la préparation du chantier avec la définition préalable des méthodes de réalisation et l'étude de tous les détails qui permettront une parfaite réussite en phase travaux.

Anglais

The completion of my last year internship at a construction site of line 15 South Lot T2B within the company Razel-Bec was a very interesting and enriching experience from a professional and also from a personal point of view. The opportunity to be part of one of the projects of Grand Paris has allowed me to get to better know and understand the underground works.

The objective of this Final Year Project is to establish the methods of realization of the branch under hyperbaric, and the interface with civil engineering.

First, I have studied in detail the problem and the existing constraints on the structure which made it possible to determine the solution of excavation of the branch with the hyperbaric. This method of excavation under pressure gives the possibility to dig in sites where there might be water flows.

The hyperbaric method is a very specific technique for which it is necessary to consider many constraints. So I took the time to study the various elements necessary for the realization of the twig under pressure and all the installations to be put in place. The feedback from other works carried out under pressure, also allowed know more things about the subject and to be able to establish the methods of realization by making the necessary adaptations and optimizations.

Secondly, I have established the structure and the facilities to pressure the airlocks. From a safety point of view, the implementation of the hyperbaric method needs to consider many aspects in relation to the workers who will work under pressure. It is very important to establish proper compression and decompression procedures based on the pressure required to allow excavation in a safe manner. The establishment of the different responsibilities of the staff during the execution of the works, and the realization of the necessary documents and trainings has been defined in this project.

Then, the different phases of the well has been studied to introduce the realization of the branch in hyperbaric. This method of excavation under pressure requires a very specific installation, therefore an adaptation of the structure of the wells inside has been necessary in order to optimize the work from a planning and economic point of view. The introduction of air supply facilities in the structure's plans has been a very interesting task for understanding the operation of this method.

The phasing and planning of the works have been adapted according to the passage of the tunnel boring machine. The study of the method of making the branch allowed me to learn the different solutions depending on the terrain. The excavation of the branch is carried out in divided front section or solid section depending on the ground encountered in the first passes. The temporary support, also carried out under pressure, is the placing of the HEB hangers each pass of one meter, wood shielding between the hangers and projected concrete. Finally, the final coating will be made at atmospheric pressure.

A financial study has been made to determinate the economic aspect of this solution.

Finally, the realization of this Final year project allowed me to know a very specific technique for the realization of conventional underground works, and to acquire very enriching skills.

The complexity and constraints of the pressure excavation method can only be used in very specific cases. However, it is a very interesting subject to study because it allows you to consider in a global way many different aspects, such as the methods of carrying out the different works, the installations or the safety in hyperbaric environment. At the end of my internship, I can confirm the importance of

carrying out the methods of realization in advance, with the study of all the details, to succeed during the completion works.

15. LISTE DE FIGURES

Figure 1. Chiffres clés de l'entreprise en 2017 et localisations.	11
Figure 2. Schéma du futur projet du Grand Paris Express	13
Figure 3. Stations desservies Ligne 15 Grand Paris Express	13
Figure 4. Ligne 15 Sud	14
Figure 5. Synoptique des tunneliers pour le lot T2B.....	15
Figure 6. Organisation du projet.....	16
Figure 7. Vue en plan OA 901P Niveau tunnel	17
Figure 8. Coupe OA 901P	18
Figure 9. Plan d'Installation de Chantier : Chambre à sable (rouge) – Zone traitée Jet-Grouting (orange).....	19
Figure 10. Planning de réalisation du Travail Fin d'Études	21
Figure 11. Mesures du piézomètre de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen – 901P	23
Figure 12. Géologie – Hydrogéologie issues de la mission G3	23
Figure 13. Rameau – coupe transversal en considérant l'adaptation du radier plat.....	24
Figure 14. Rameau – coupe longitudinale.....	24
Figure 15. Rameau – vue en plan	24
Figure 16. Excavation en section en front divisé.....	25
Figure 17. Découpage des cintres rameau de secours en section complète ou divisée.....	26
Figure 18. Revêtement définitif.....	26
Figure 19. Hauteur d'eau à considérer pour le dimensionnement de l'hyperbarie	27
Figure 20. Planning synthétique des travaux	28
Figure 21. Réalisation d'une auréole de traitement d'1m au droit du rameau depuis le tunnel.....	29
Figure 22. Schéma réalisation des sas hyperbare.....	30
Figure 23. Compresseur électrique à vitesse variable	32
Figure 24. Vanne type Samson	34
Figure 25. Coupe au droit de l'ouverture du rameau	40
Figure 26. Panneautage / Longueur ouverture PM	41
Figure 27. Modèle bielle-tirant.....	42
Figure 28. Bilan des sections d'aciers nécessaires à ajouter au ferrailage de la PM	42
Figure 29. Comparaison du principe de ferrailage géométrie marché – géométrie optimisée	43
Figure 30. Comparaison géométrie marché – géométrie optimisée.....	44
Figure 31. Vue en plan Dalle S3	45
Figure 32. Dalle S3 Coupe A-A	45
Figure 33. Proposition d'optimisation de la dalle S3 en un seul niveau	46
Figure 34. Schéma des éléments pris en compte pour le dimensionnement de la dalle S4	47
Figure 35. Schéma des éléments pour la réalisation des voiles des SAS	48
Figure 36. Coupe AA - Dalle S3 (épaisseur 50cm) en un seul niveau.....	48
Figure 37. Vue en plan - Dalle S3 (épaisseur 50cm) en un seul niveau	49
Figure 38. Vue en plan – Voile des sas (épaisseur 60cm).....	49
Figure 39. Synoptique du tunnelier T2B / Distance BVC – CHC.....	50
Figure 40. Réalisation des voiles entre le radier et la dalle S4.....	51
Figure 41. Réalisation de la dalle S4 et démolition de la première partie de la PM	52
Figure 42. Construction des sas	52

Figure 43. Coupe EE – Ouverture cages d’escaliers pour accès matériel	53
Figure 44. Coupe DD – Ouverture cages d’escaliers pour accès personnel	53
Figure 45. Vue en plan de l’installation hyperbare en surface	54
Figure 46. Vue en plan dalle S3.....	56
Figure 47. Vue F installation hyperbare (extérieur) – Chef de sas	56
Figure 48. Vue C – Chambre de travail.....	57
Figure 49. Schéma de principe du capot acoustique.....	58
Figure 50. Exemple de réalisation de capot acoustique.....	58
Figure 51. Représentation du % de coût de différents éléments dans le scénario choisi.....	59
Figure 52. Pourcentage du coût des travaux pour la réalisation du rameau en hyperbare.....	60

16. LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1. Niveaux de référence de l’ouvrage.....	22
Tableau 2. Niveaux de référence de couches géologiques existantes	22
Tableau 3. Niveaux d’eau de référence de l’ouvrage	22
Tableau 4. Perméabilité des différentes couches géologiques existantes	23
Tableau 5. Niveaux d’eau piézomètre	23
Tableau 6. Table de décompression – entre 0.9 et 1.05 bar.....	37
Tableau 7. Procédure de décompression à l’air	38

17. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Cahier des clauses techniques particulières pour la Ligne 15. Livret 0.
- [2] Cahier des clauses techniques particulières pour la Ligne 15. Livret 6a : Creusement en méthode conventionnelle.
- [3] Journal officiel : « Travaux en milieu hyperbare – mesures particulières de prévention »
- [4] Razel-Bec (2019). <http://www.razel-bec.com/>
- [5] Manuel de Procédure et de Sécurité Hyperbare
- [6] Mémoire technique ouvrages souterrains conventionnels, méthodologie de réalisation – Ligne 15 Lot T2B

ANNEXES

ANNEXE 1 : CALCUL DES PERTES D'AIR DANS LE TERRAIN

Objet et périmètre d'application

L'objet de cet annexe est de calculer la fuite d'air dans deux profils géologiques différentes, le sable de Beauchamp et les marnes et caillasses.

La méthodologie de calcul repose sur l'estimation de la perméabilité intrinsèque au gaz pour l'équilibre de pression hydrostatique.

Cette étude s'inscrit dans le cadre la méthode hyperbare prévue au niveau du rameau d'accès de l'ouvrage annexe 901P.

Hypothèses

Le calcul de la perméabilité intrinsèque au gaz est basé sur les hypothèses suivantes :

- Je considère une pression d'air de 1 bar.
- Je suppose que l'air comprimé se substitue à la pression hydrostatique pour assurer le soutien du front de taille et ainsi refouler l'eau qui sature initialement le sol.
- La pression d'air équilibre la pression hydrostatique en bas de galerie.
- Je me place dans l'hypothèse où la loi de Darcy est applicable aux écoulements gazeux.
- Le profil géologique adopté pour les constantes de calculs est celui des marnes et caillasses car elle possède la perméabilité la plus préjudiciable.

Pour estimer cette fuite d'air, il est indispensable de convertir la perméabilité à l'eau des marnes et caillasses en une perméabilité intrinsèque à l'air. Nous avons :

Couche géologique	Cote Niv SUP	Cote NivINF	Perméabilité (m/s)
Marnes et caillasses	36.54 NGF	27.63 NGF	4.00 E-5

Résultats des calculs

Méthodologie de calcul

La loi de Darcy appliquée aux écoulements gazeux nous donne la relation suivante pour le calcul de la perméabilité spécifique au gaz :

$$K_g = \frac{Q_m \times L}{S \times \Delta P} \text{ en } m^3 \cdot s \cdot kg^{-1}$$

L'objectif est de déterminer Q_m , le débit volumique à la pression moyenne P_m .

Pour cela, nous utiliserons la relation suivante (qui traduit la correspondance entre les perméabilités eau/air) :

$$K_w = K_g \times g \times \frac{\mu_g}{\nu_w}$$

Où :

μ_g est la viscosité dynamique du gaz = $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ (pour l'air sec)

ν_w est la viscosité cinématique de l'eau = $\frac{\mu_w}{\rho_w} = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

AN :

$$K_g = \frac{K_w}{\frac{\mu_g}{\nu_w} \times g} = \frac{4.0 \times 10^{-5}}{\frac{1.8 \times 10^{-5}}{1.007 \times 10^{-6}} * 9.81} = 2.281 \times 10^{-7} m^3 \cdot s \cdot kg^{-1}$$

Pression d'équilibre moyenne P_m

La pression d'équilibre moyenne P_m qu'il faudrait ramener dans le sas pour équilibrer la pression hydrostatique en pied de galerie vaut :

$$P_m = P_{hyperbare} + P_{hydrostatique} = P_{atm} + \rho_w \times z$$

On a :

$$P_{atmosphérique} = P_a = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$$

$$\rho_w = 10 \text{ kN} \cdot m^{-3}$$

On a z qui est la hauteur de la nappe par rapport au pied de la galerie : $z = 9.83 \text{ m}$

AN :

$$P_m = 100 + 10 \times 9.83 = 198.3 \text{ kPa}$$

Par conséquent, en prenant la loi de Darcy :

$$K_g = \frac{Q_m \times L}{S \times \Delta P} \Leftrightarrow Q_m = \frac{K_g \times S \times \Delta P}{L}$$

On a :

$$S = 21 \text{ m}^2$$

$$L = 12 \text{ m}$$

$$\Delta P = 98.3 \text{ kPa}$$

$$K_g = 2.281 \times 10^{-7} m^3 \cdot s \cdot kg^{-1}$$

AN :

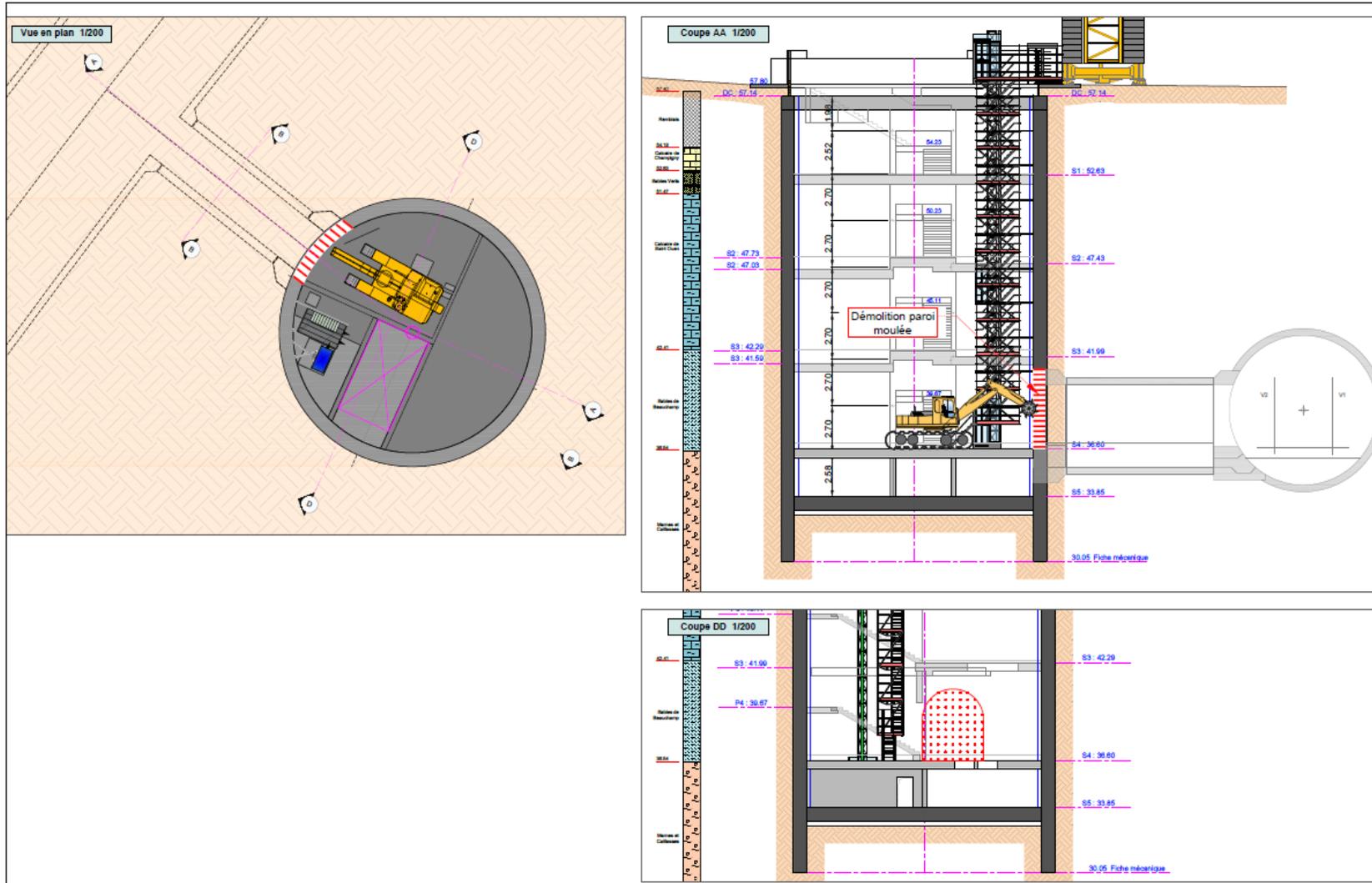
$$Q_m = \frac{2.281 \times 10^{-7} \times 21 \times 98.3 \times 10^3}{12} = 0.0392 \text{ m}^3 \cdot s^{-1} = 142 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$$

En appliquant un coefficient de sécurité de 1.5, nous obtenons ainsi un débit de fuite d'air de :

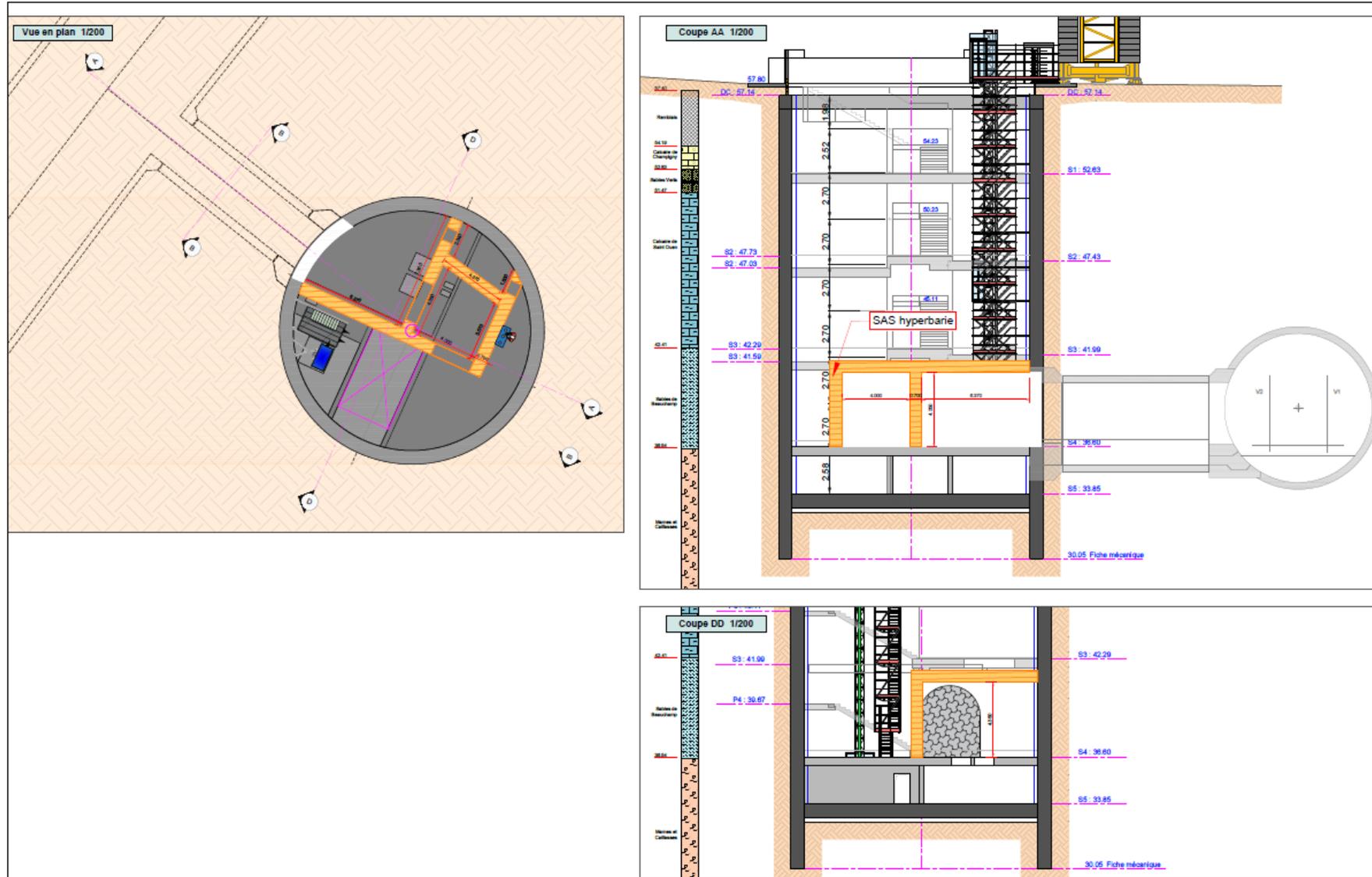
$$142 \times 1.5 = 213 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$$

ANNEXE 2 : PLAN MÉTHODE EXCAVATION DU RAMEAU

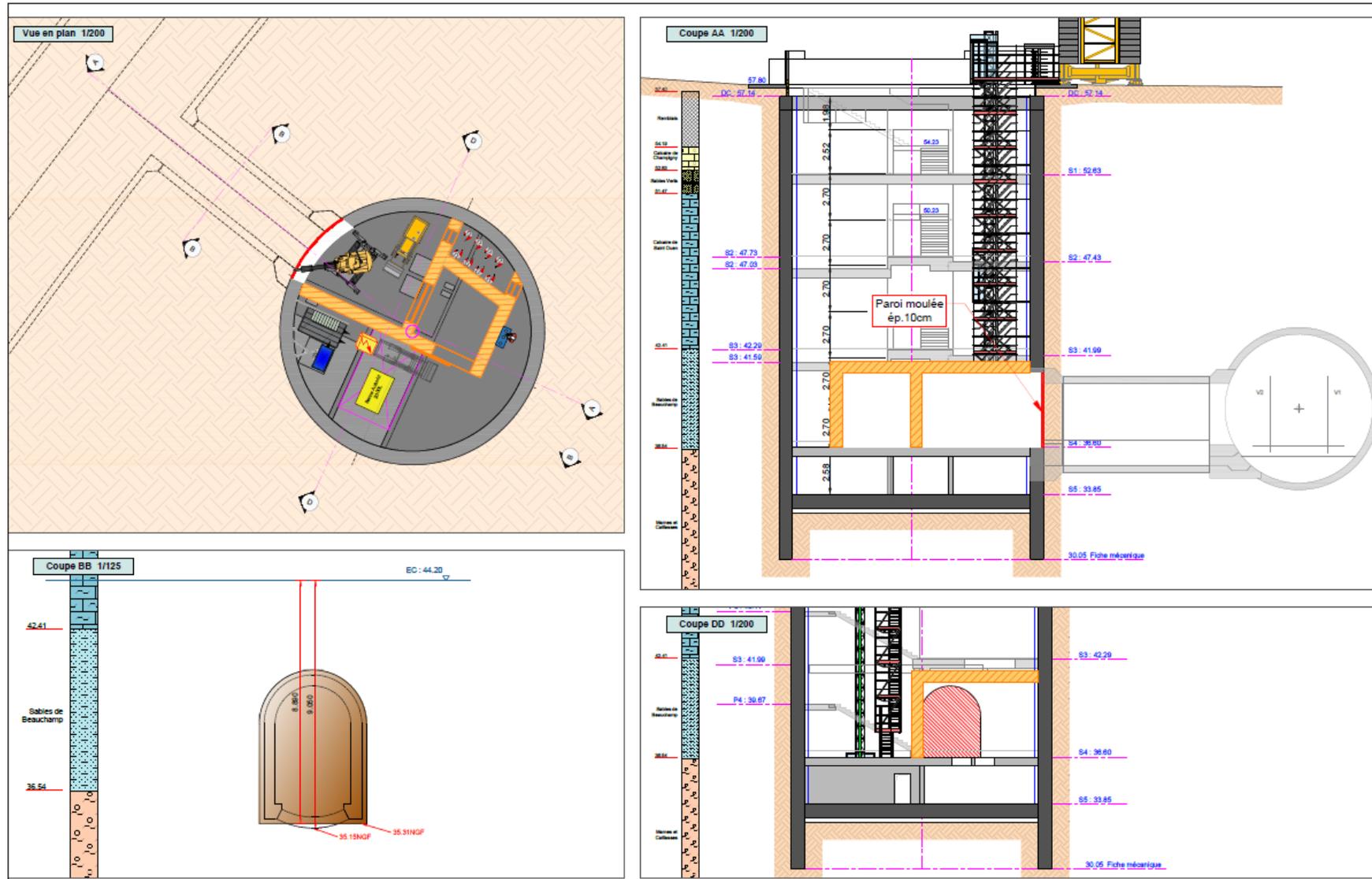
Réalisation de l'ouverture partielle de la PM avant la construction des SAS



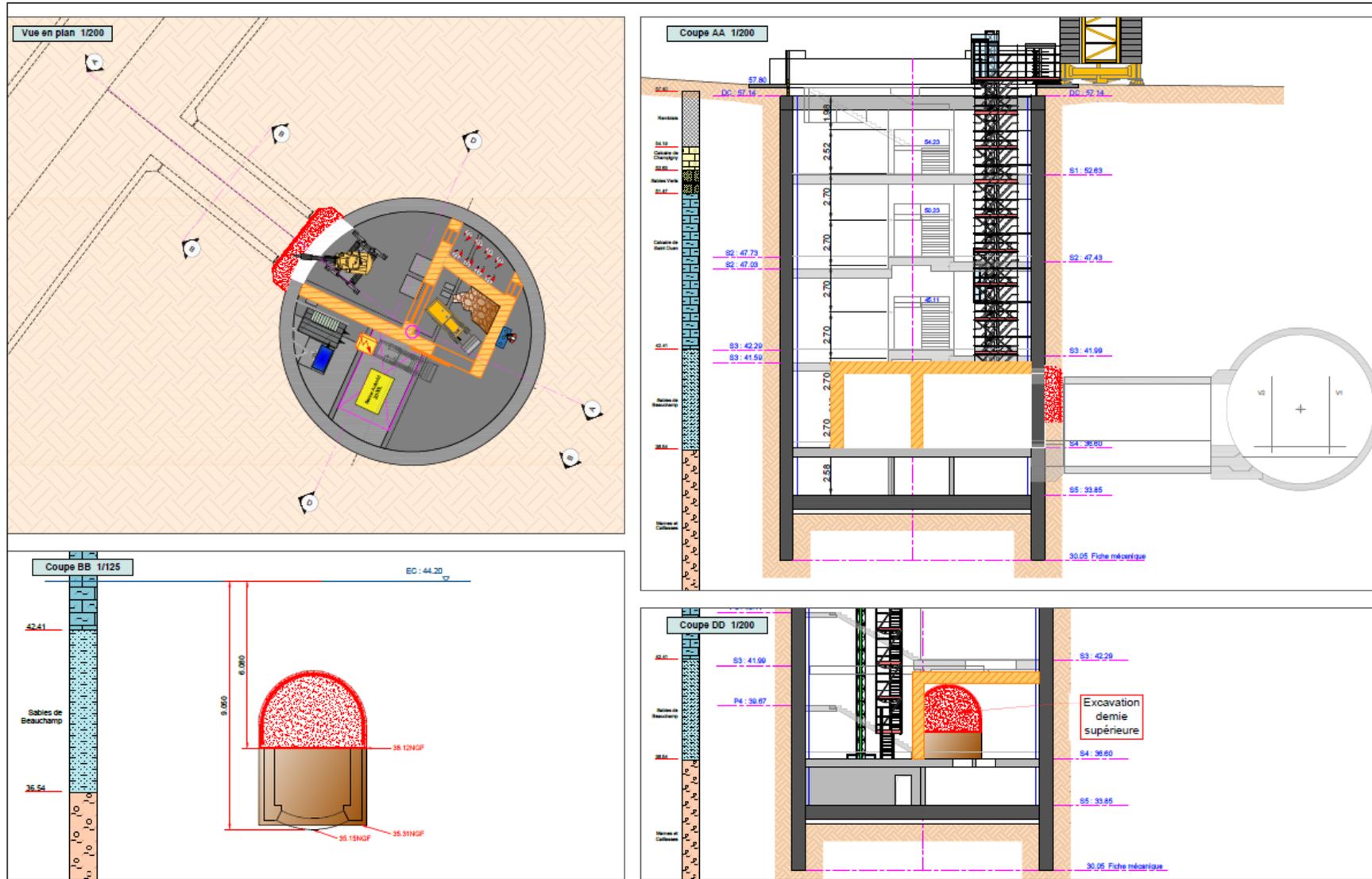
Construction de la structure des SAS



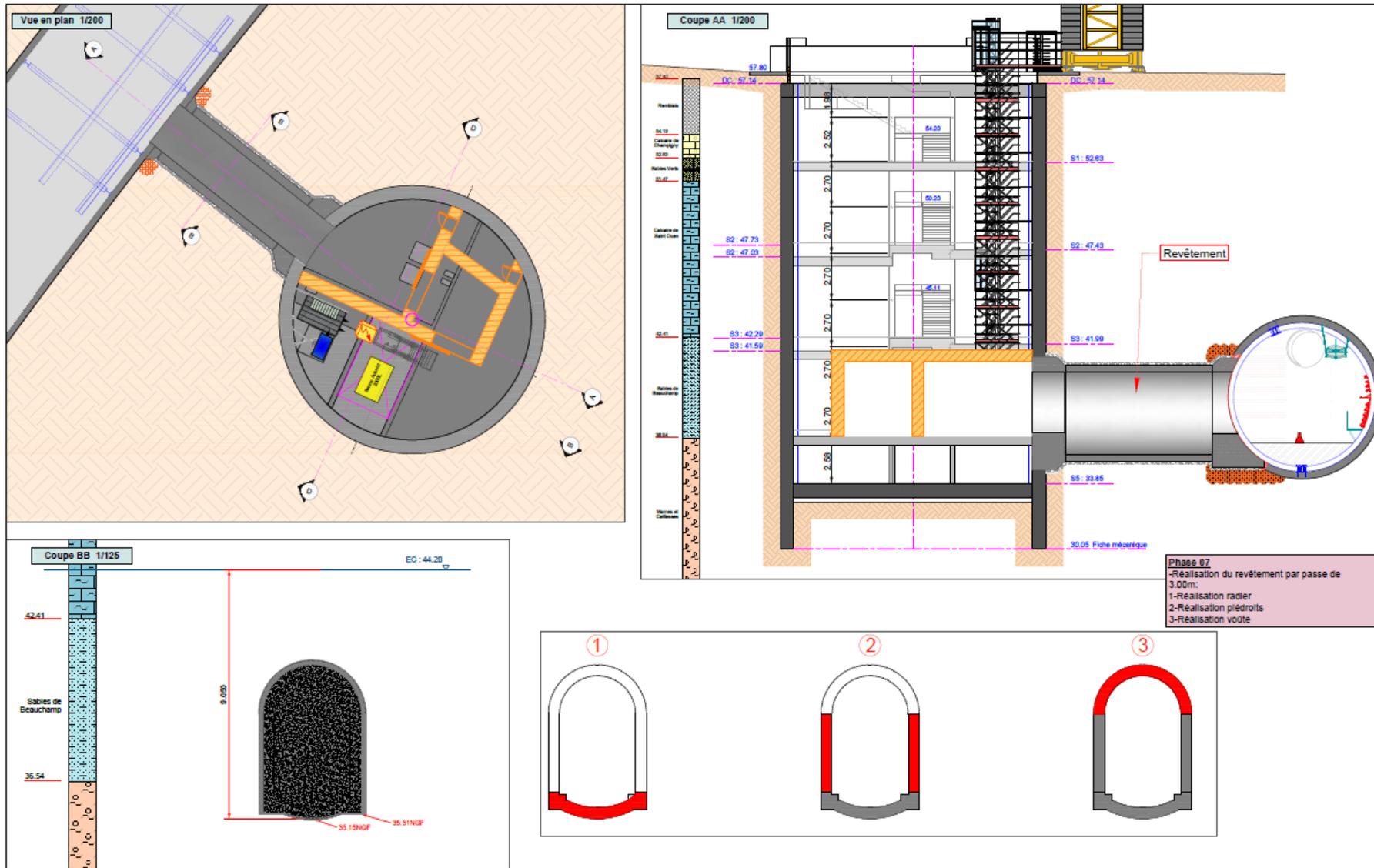
Début des travaux en hyperbare : démolition de la PM restante



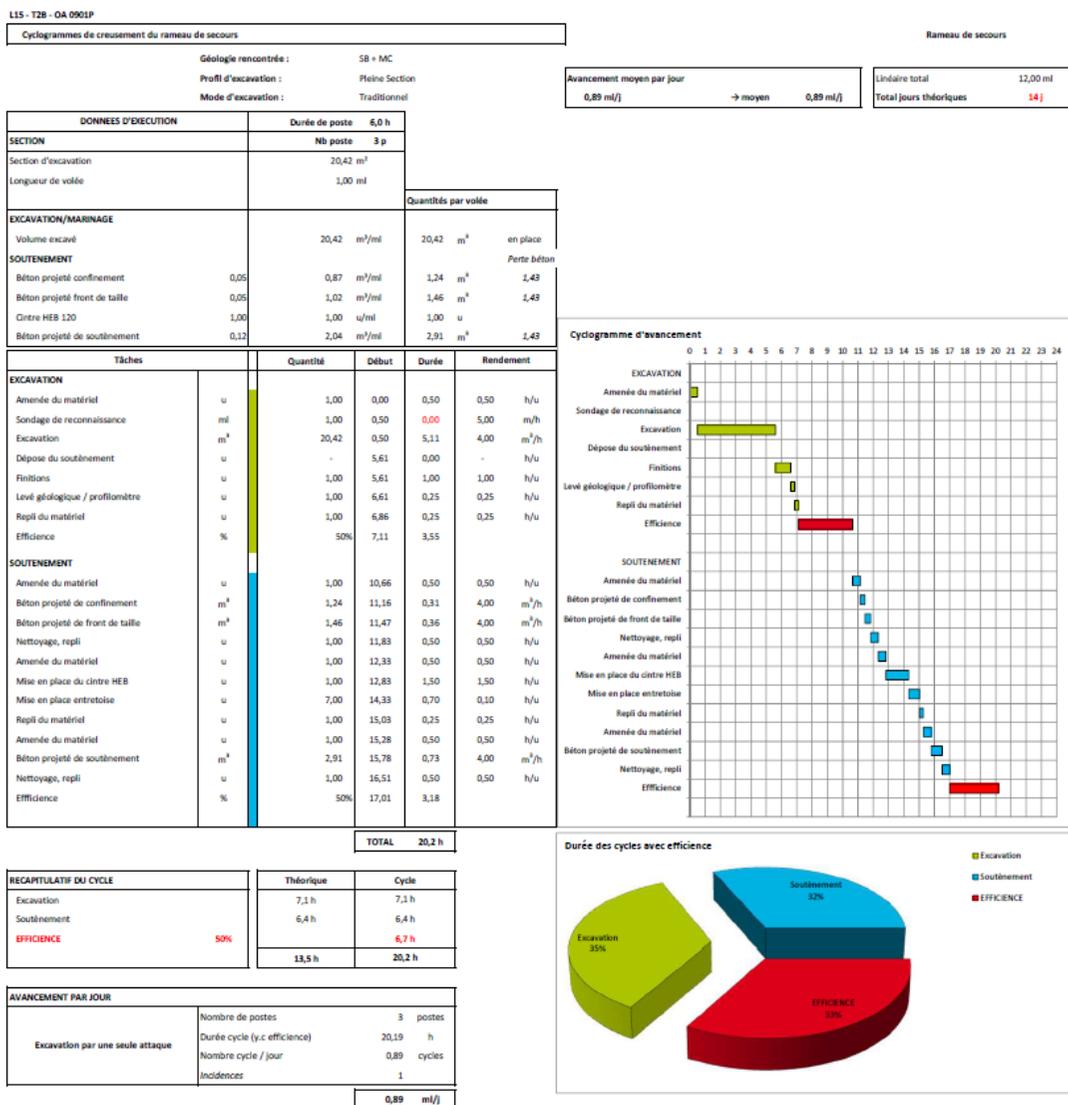
Excavation du premier passe en section front divisée ; réalisation du soutènement provisoire : pose des cintres, blindage bois entre les cintres et béton projeté

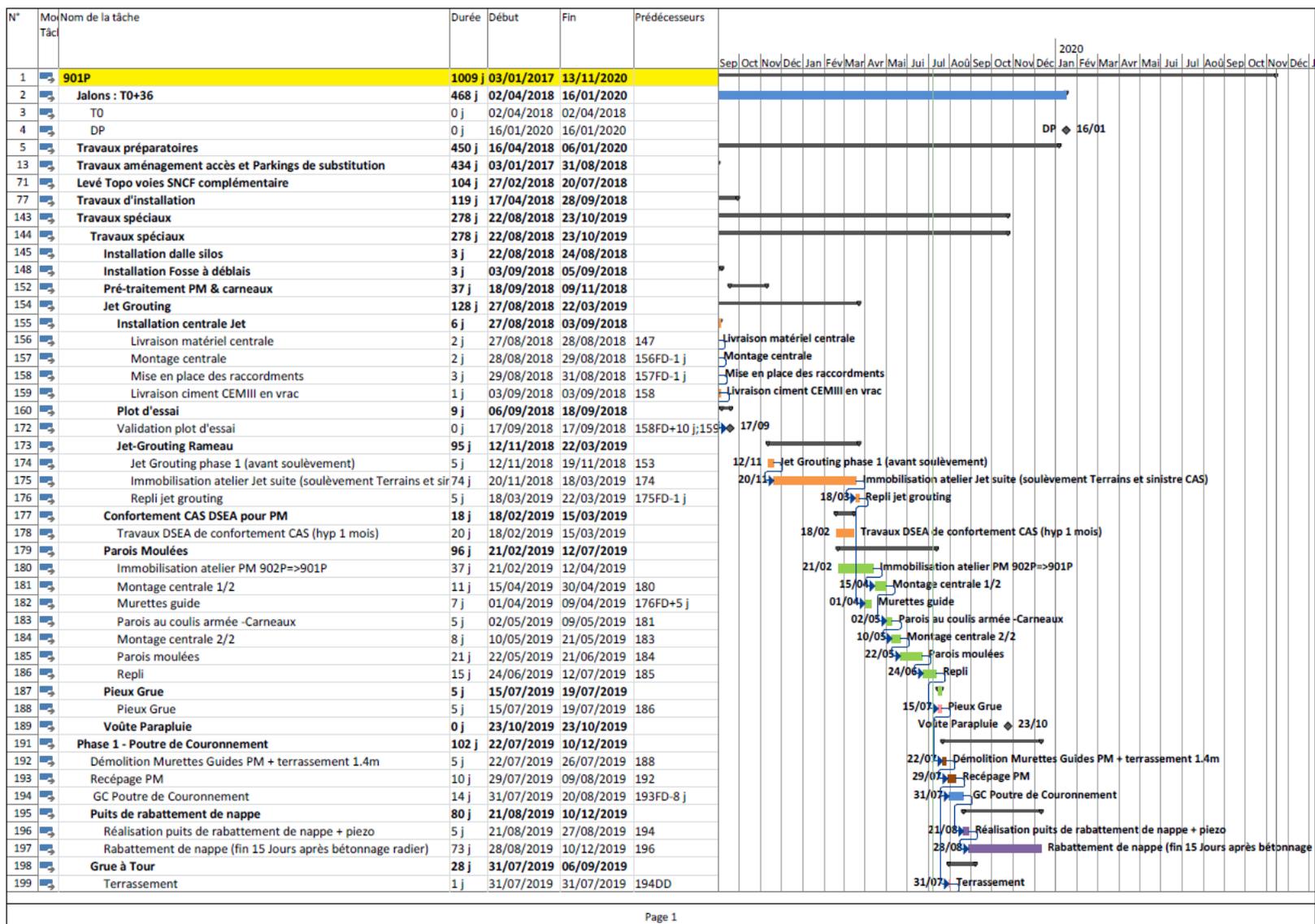


Réalisation du revêtement définitif après l'arrêt du système hyperbare (avec l'adaptation du radier plat)



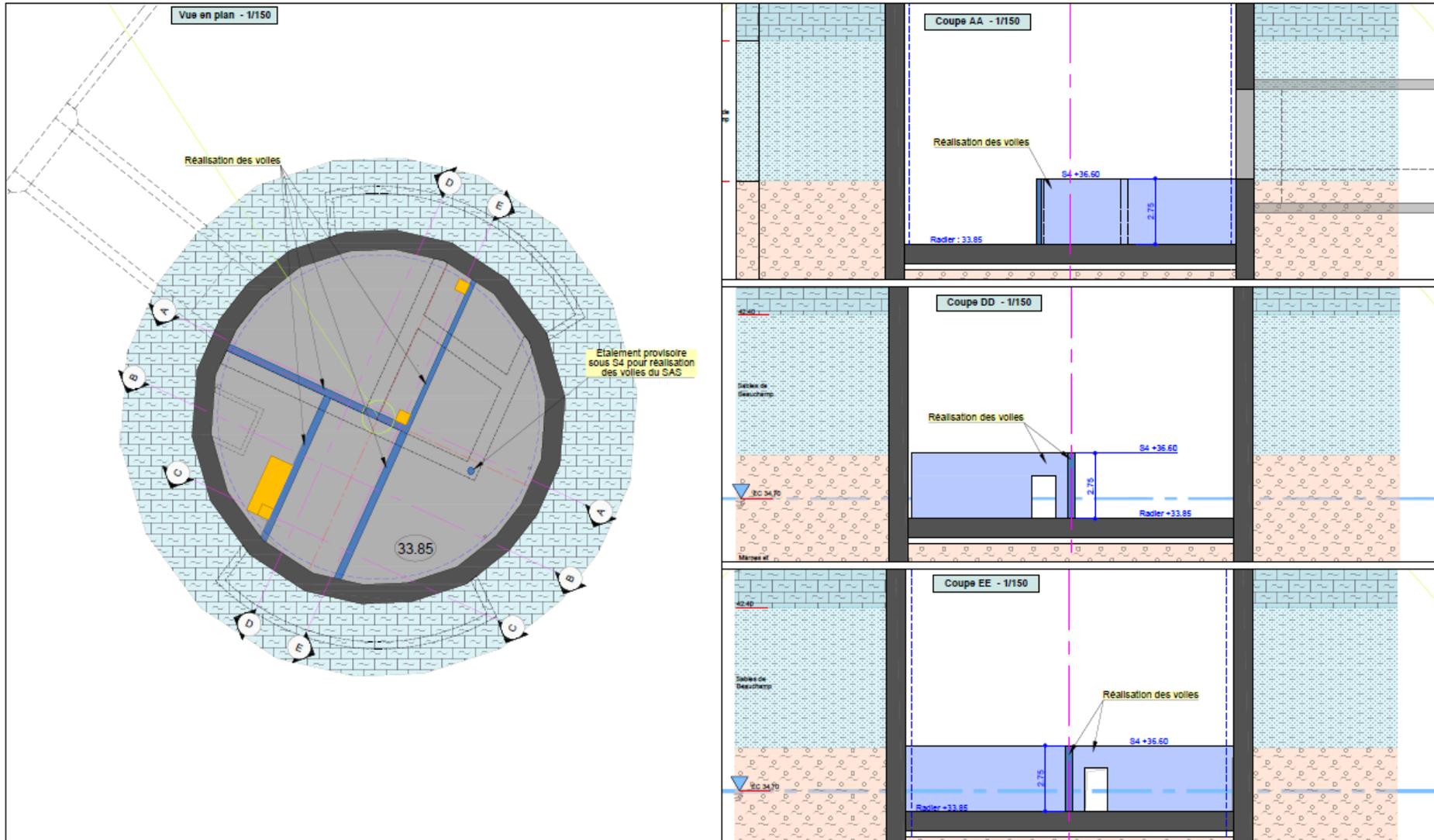
ANNEXE 3 : CYCLOGRAMME DE CREUSEMENT DU RAMEAU SECOURS



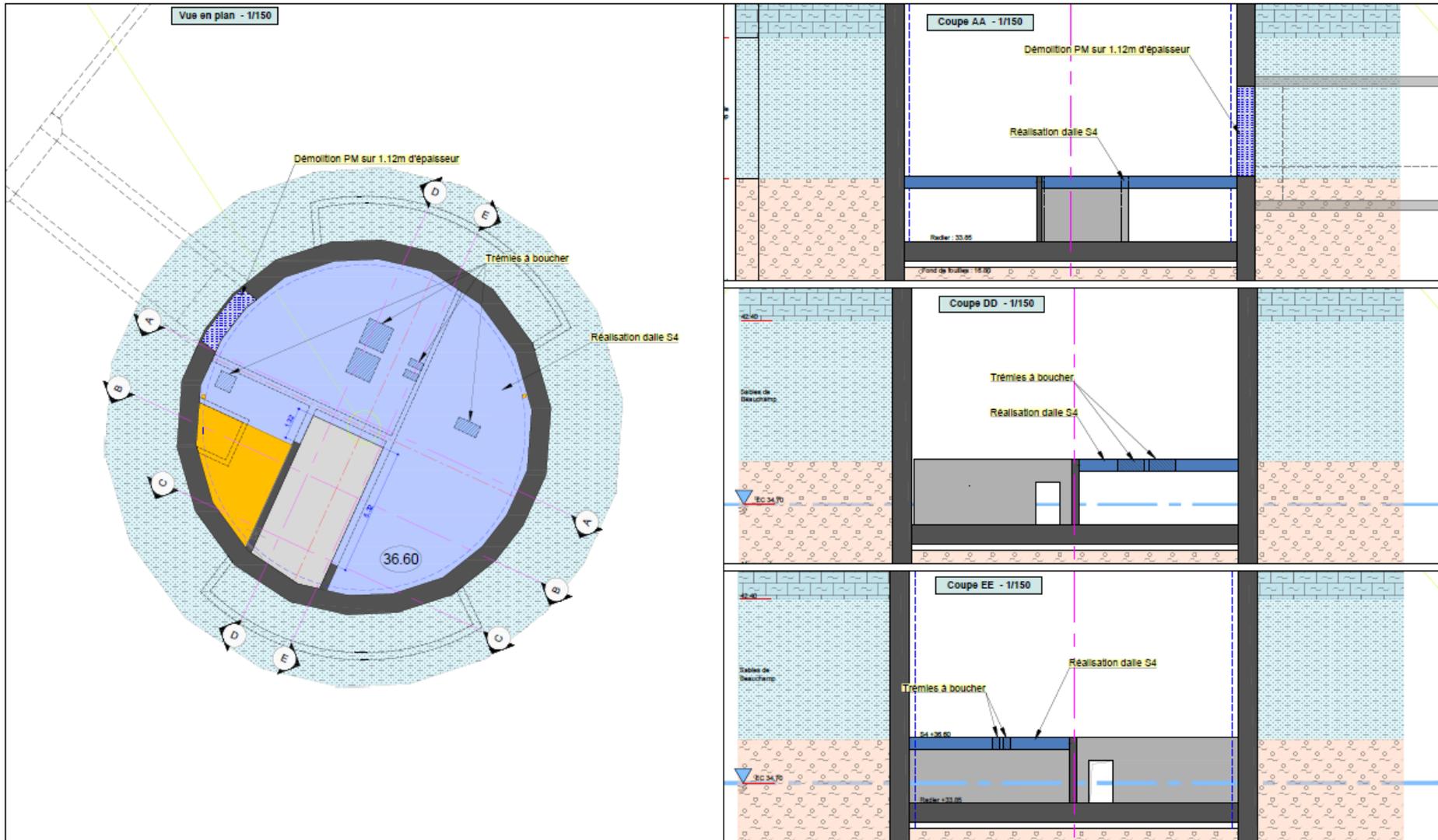


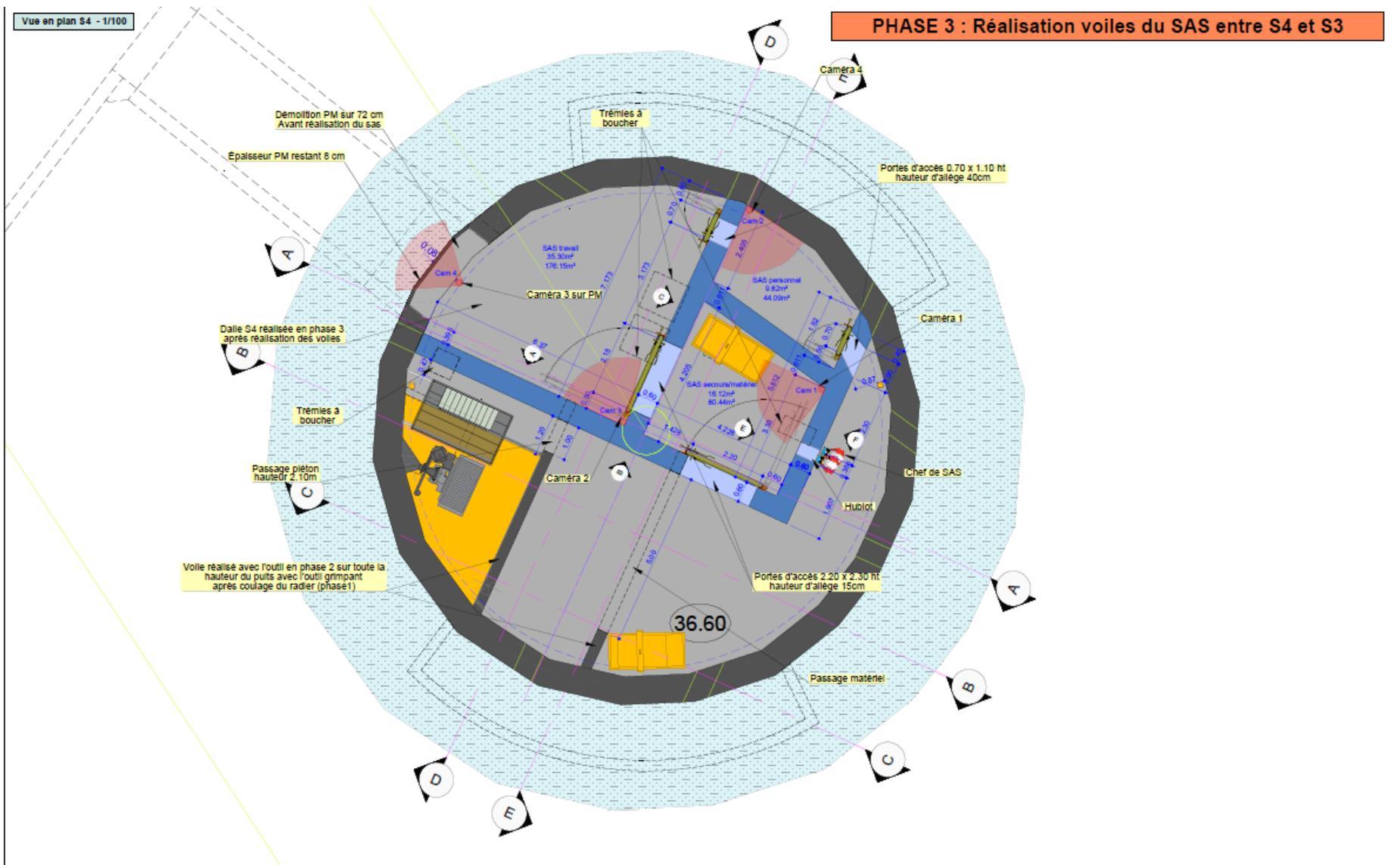
ANNEXE 5 : PLAN MÉTHODE ADAPTATION GC / CONSTRUCTION DES SAS

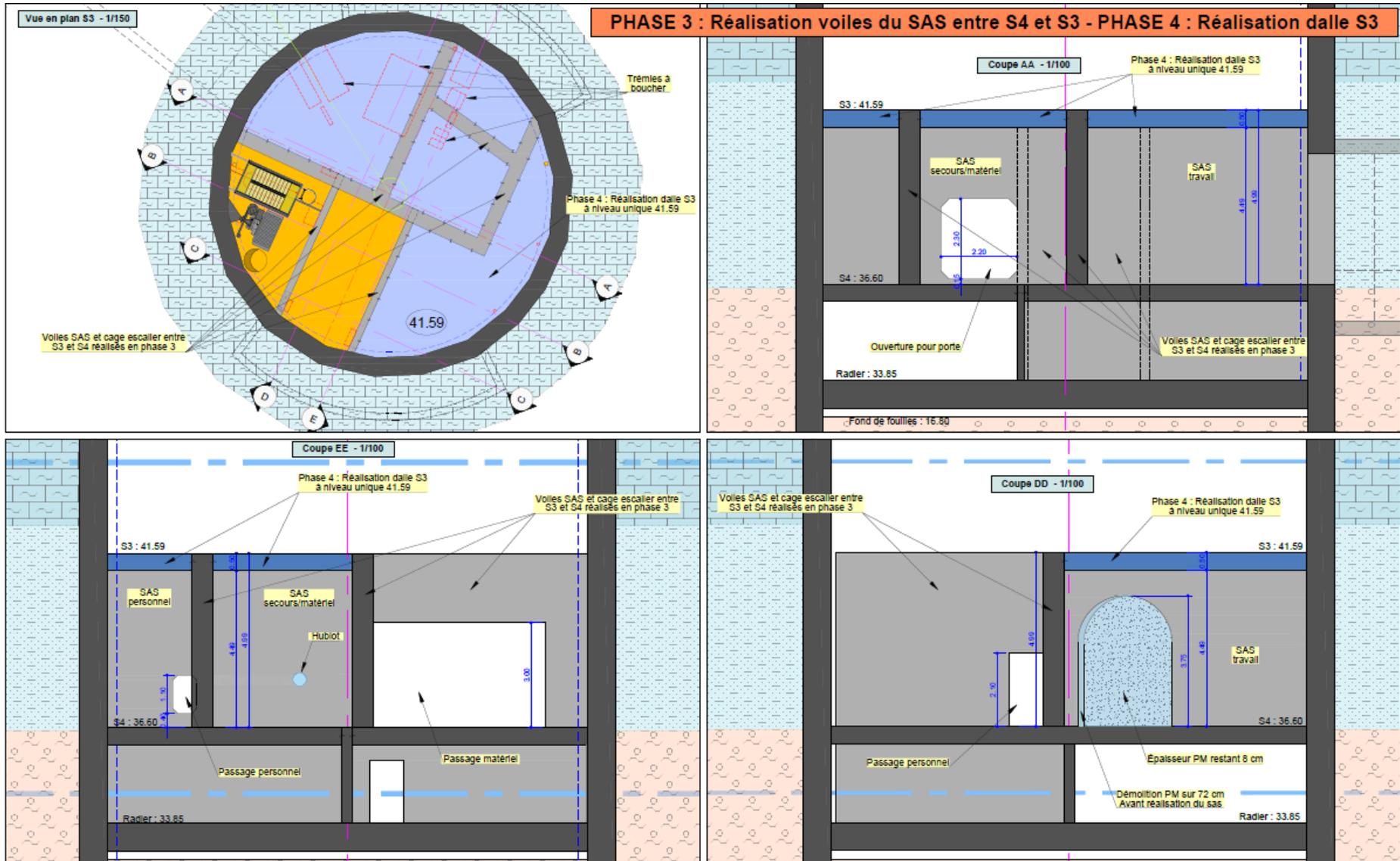
PHASE 1 : Réalisation des voiles entre radier et dalle S4



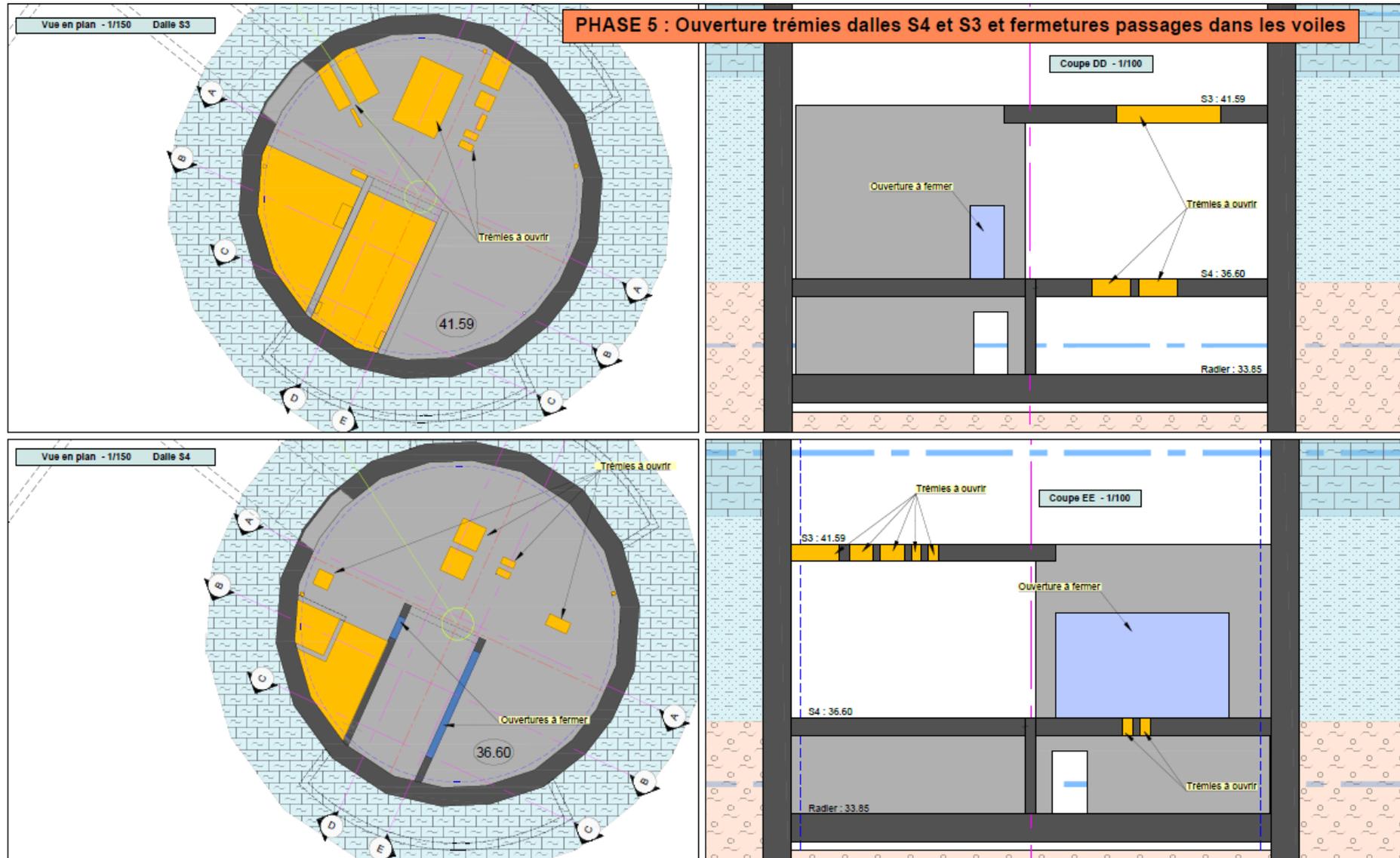
PHASE 2 : Réalisation dalle S4





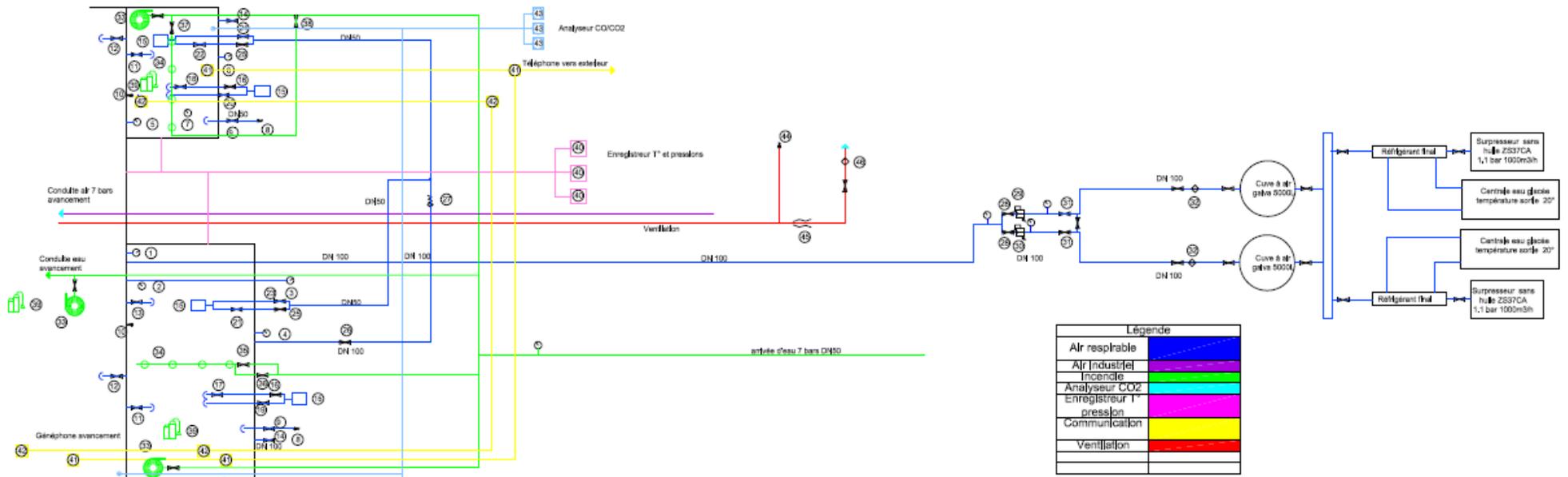


Phase à réaliser après la fin de réalisation du rameau et démolition des voiles des sas



ANNEXE 6 : INSTALLATION AIR HYPERBARE

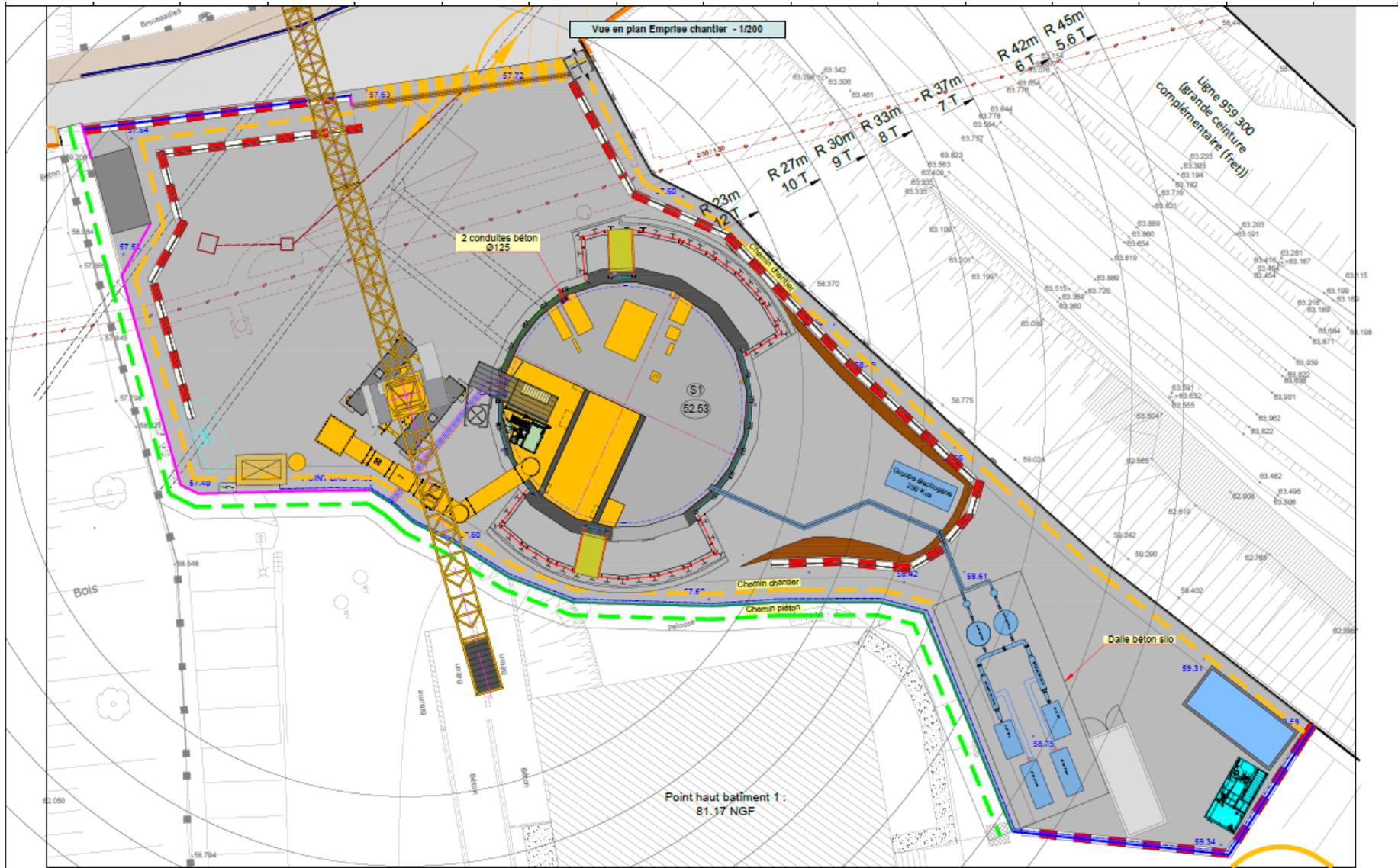
Schéma installation air hyperbare

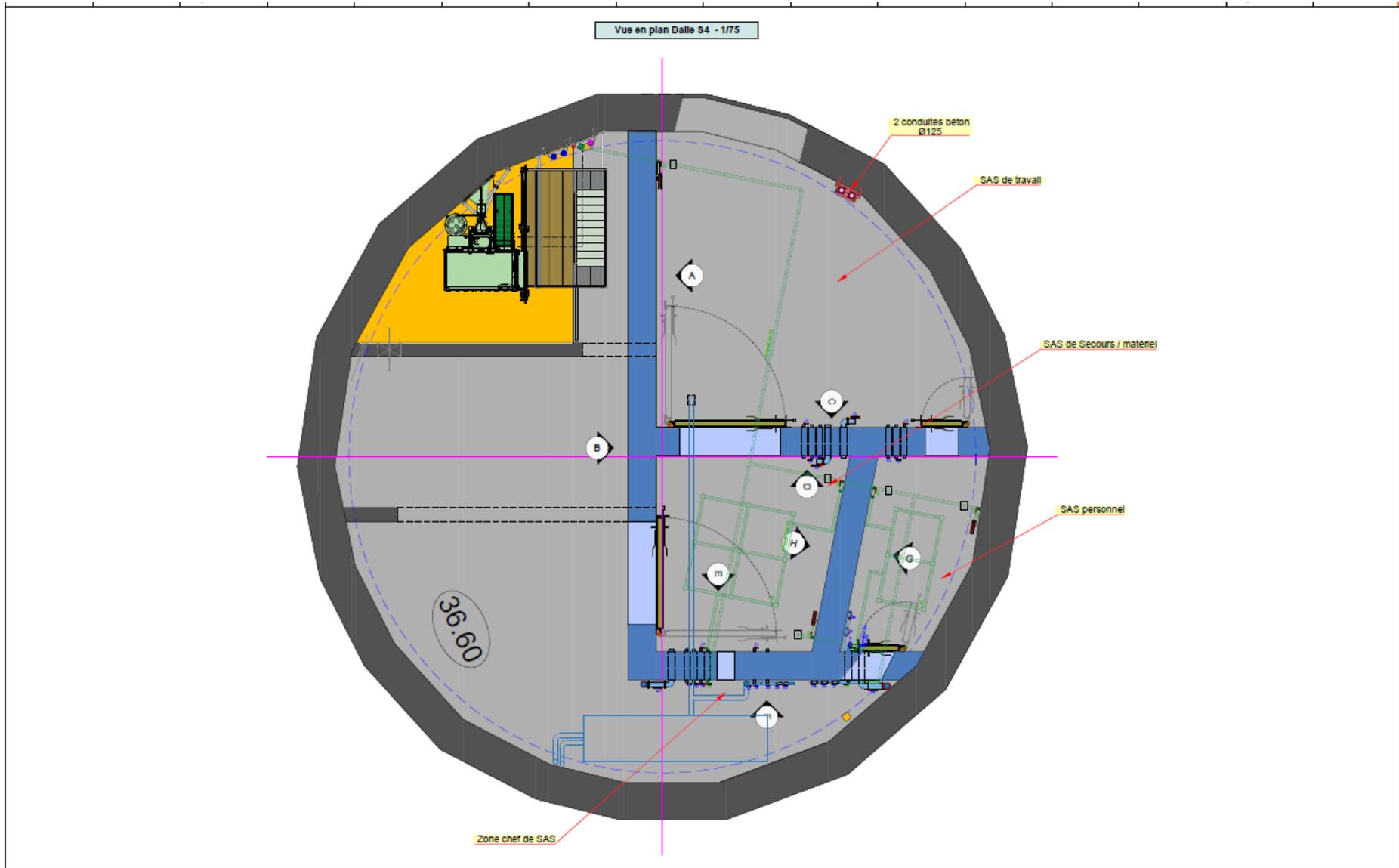


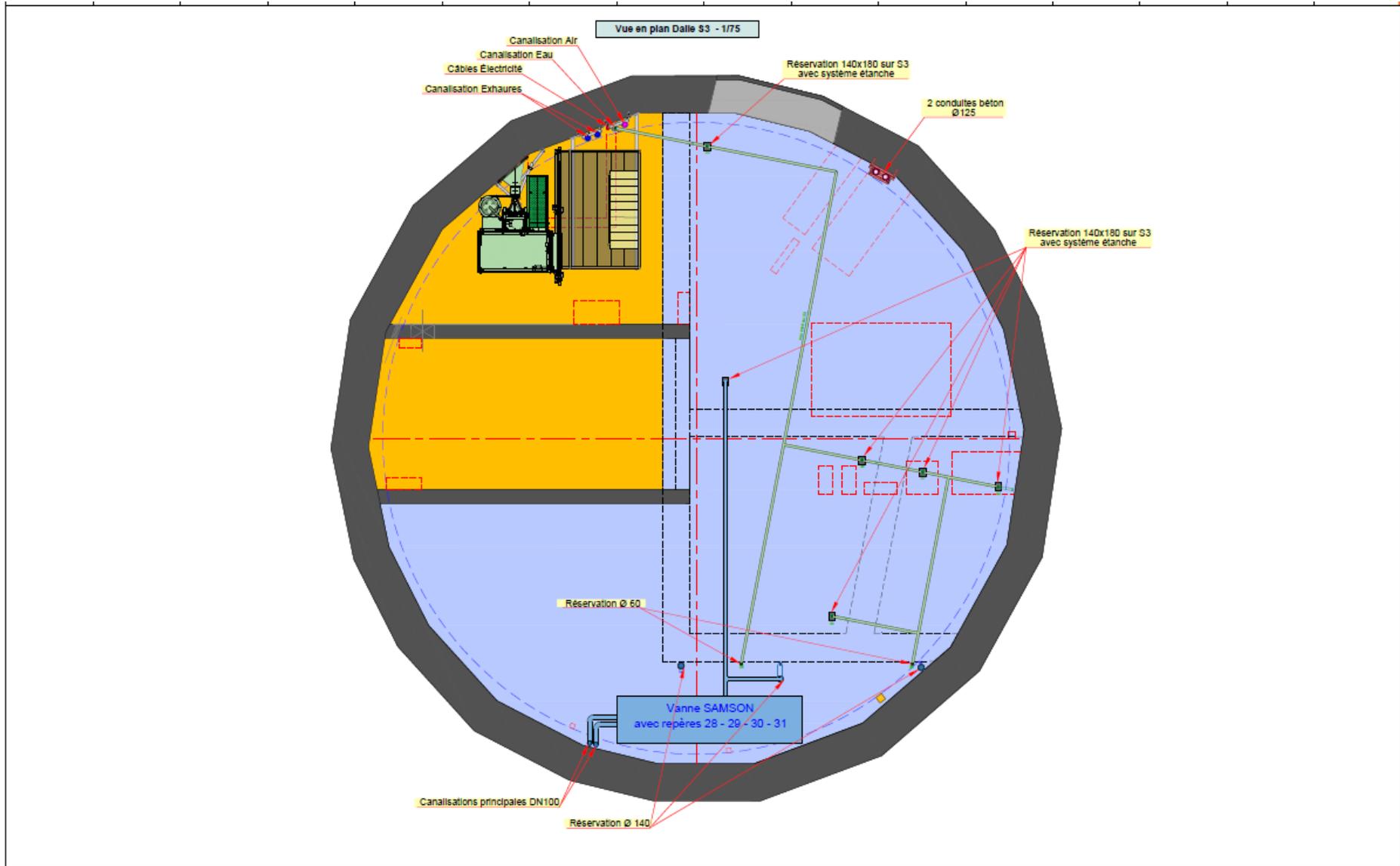
Nomenclature installation air hyperbare

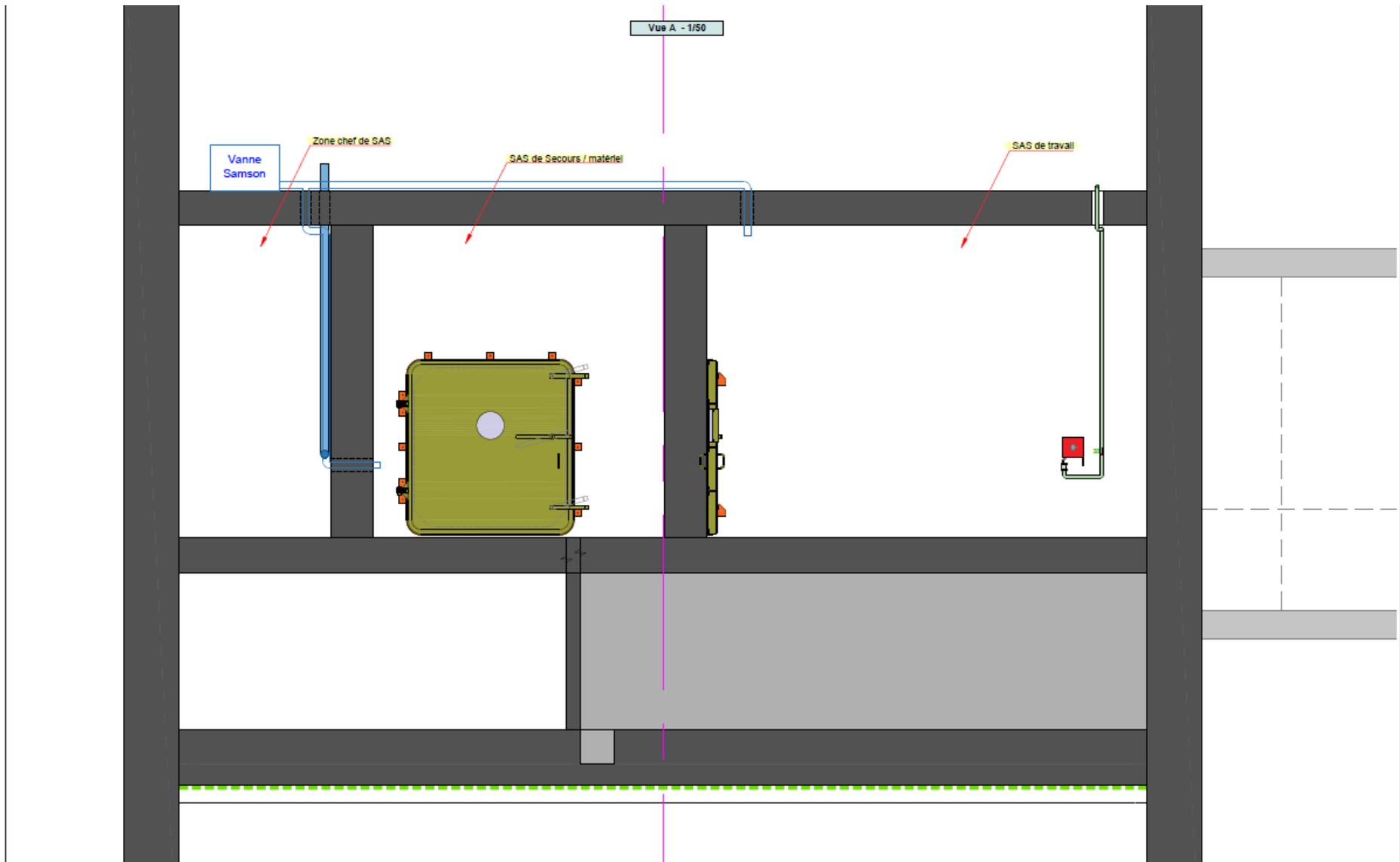
Repère	Désignation	Fonction
1	Manomètre	Pression chambre travail lecture sas matériel
2	Manomètre	Pression sas matériel lecture sas matériel
3	Manomètre	Pression chambre travail lecture chef de sas
4	Manomètre	Pression sas matériel lecture chef de sas
5	Manomètre	Pression chambre travail lecture sas personnel
6	Manomètre	Pression sas personnel lecture chef de sas
7	Manomètre	Pression sas personnel lecture sas personnel
8	Soupape de sécurité	Soupape décharge tarée 1 bar
9	Vanne 2"	Plombée ouverte
10	Clapet de surpression	Clapet d'équilibrage sas - chambre de travail
11	Vanne 2"	Vanne d'équilibrage sas - chambre de travail depuis le sas
12	Vanne 2"	Vanne d'équilibrage sas-chambre de travail depuis la galerie
13	Vanne	Vanne de gonflage rapide du sas matériel par la chambre de travail
14	Vanne	Vanne d'urgence pour décompresser en 1 minute
15	Silencieux	Silencieux
16	Vanne 2"	Décompression prise en main chef de sas plombée ouverte
17	Vanne 2" robinet	Décompression intérieur sas matériel
18	Vanne 2" robinet	Décompression intérieur sas personnel
19	Vanne 2" robinet	Décompression extérieur sas matériel
20	Vanne 2" robinet	Décompression extérieur sas personnel
21	Vanne 2" robinet	Compression intérieur sas matériel
22	Vanne 2" robinet	Compression intérieur sas personnel
23	Vanne 2" robinet	Compression extérieur sas matériel
24	Vanne 2" robinet	Compression extérieur sas personnel
25	Vanne 2"	Compression prise en main chef de sas plombée ouverte
26	Vanne	Vanne compression rapide sas matériel contrôle chef de sas
27	Clapet anti retour	Clapet anti retour
28	Vanne 2"	By-pass vanne Samson
29	régulateur type Samson	Régulateur type Samson
30	Limiteur de pression	Limiteur de pression secours réglé à 0,9 bar
31	Vanne 2"	By-pass limiteur de pression à 0,9 bar
32	Filtres	Filtre à charbon actif
33	Lance incendie	Lance incendie
34	Buses incendie	Buses incendie
35	Vanne buse incendie	Sas matériel commande par sas matériel
36	Vanne buse incendie	Sas matériel commande chef de sas
37	Vanne buse incendie	Sas personnel commande par sas personnel
38	Vanne buse incendie	Sas personnel commande par chef de sas
39	Extincteur	Extincteur hyperbare
40	Enregistreur	Capteur pression température avec enregistrement paramètre
41	Téléphone	Ligne vers extérieur
42	Généphone	Communication entre toutes les sas et chef de sas
43	Analyseur	Analyseur CO-CO2
44	Clapet de sécurité	Clapet de sécurité 1,2 bar
45	Débitmètre	Mesure du débit en sortie de ventilation
46	Filtre	Air en sortie de ventilation
		Filtres aspiration
		Pressurisation tunnel
		Ventilation
		Exhaure
		Exhaure
		Air comprimé 7 bars
		Nettoyage
		Eau industrielle

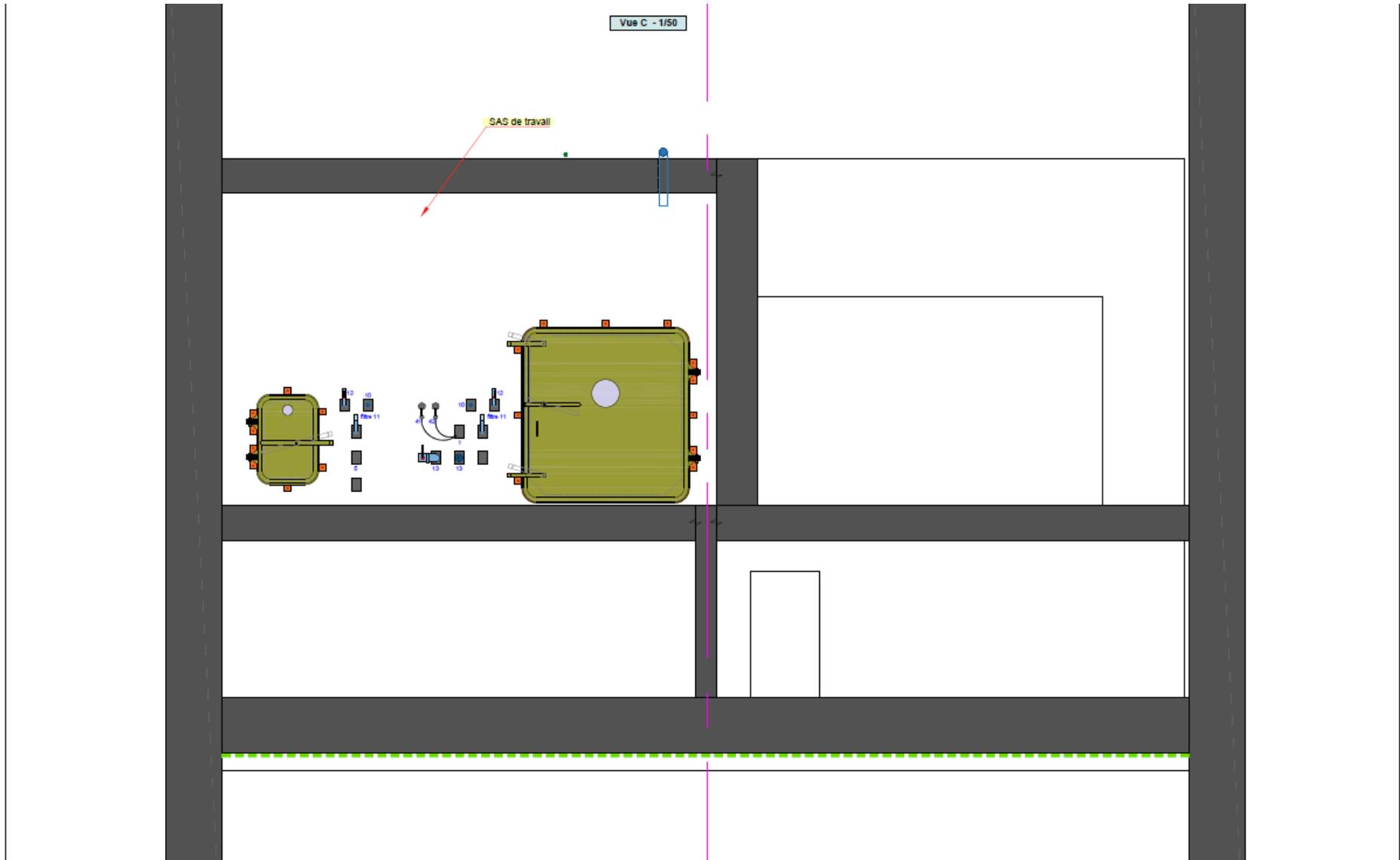
Plans installation air hyperbare

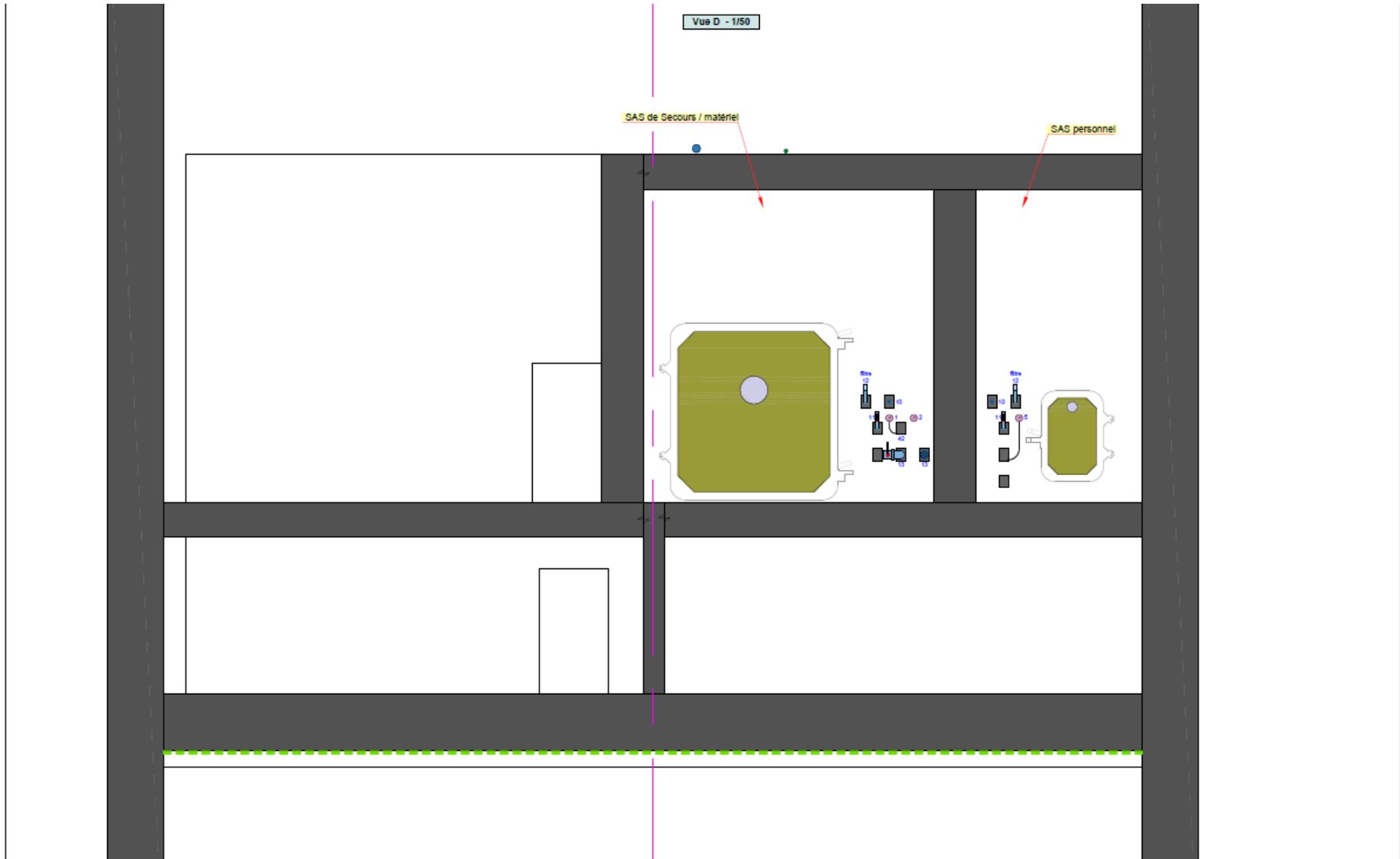


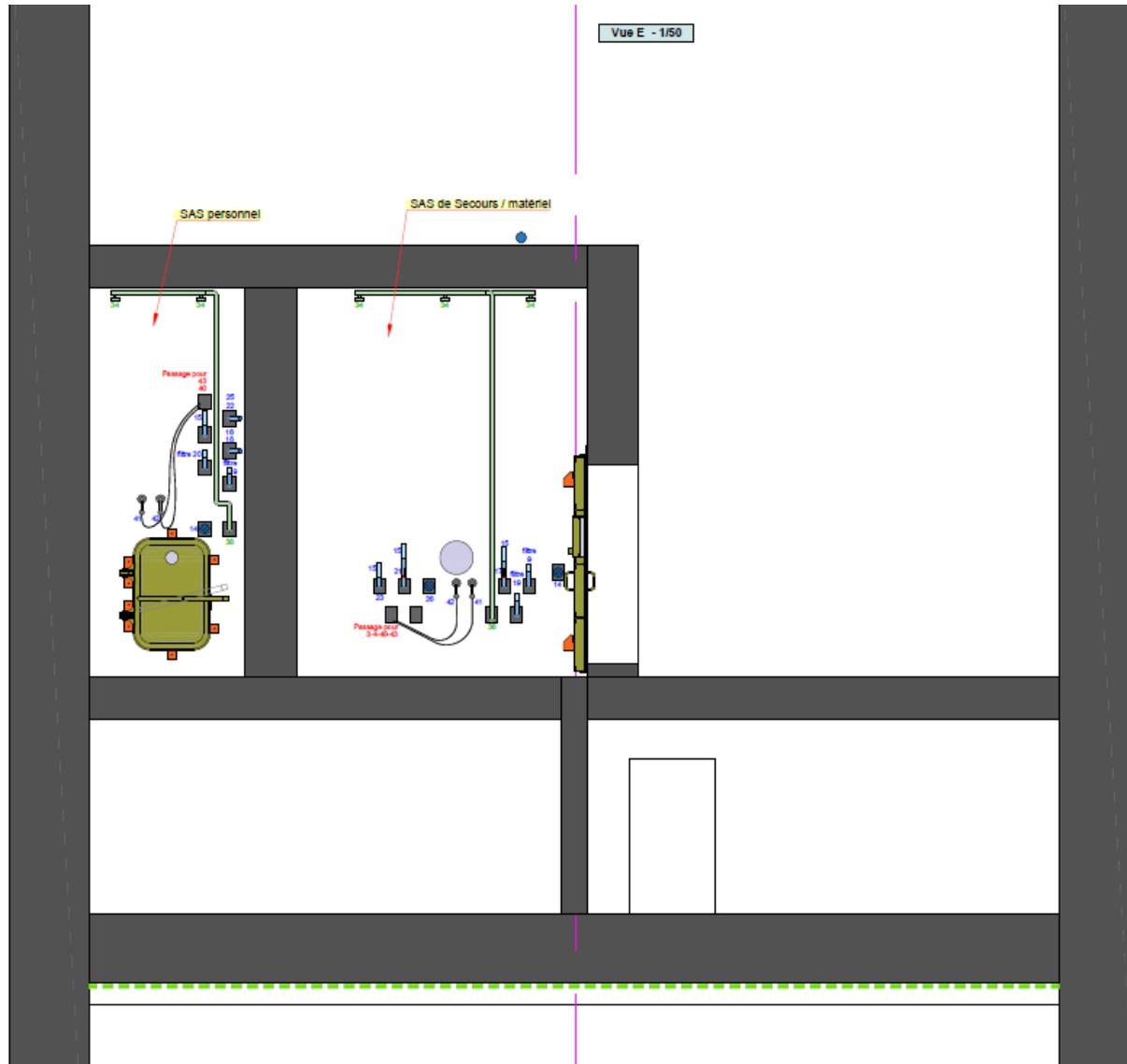


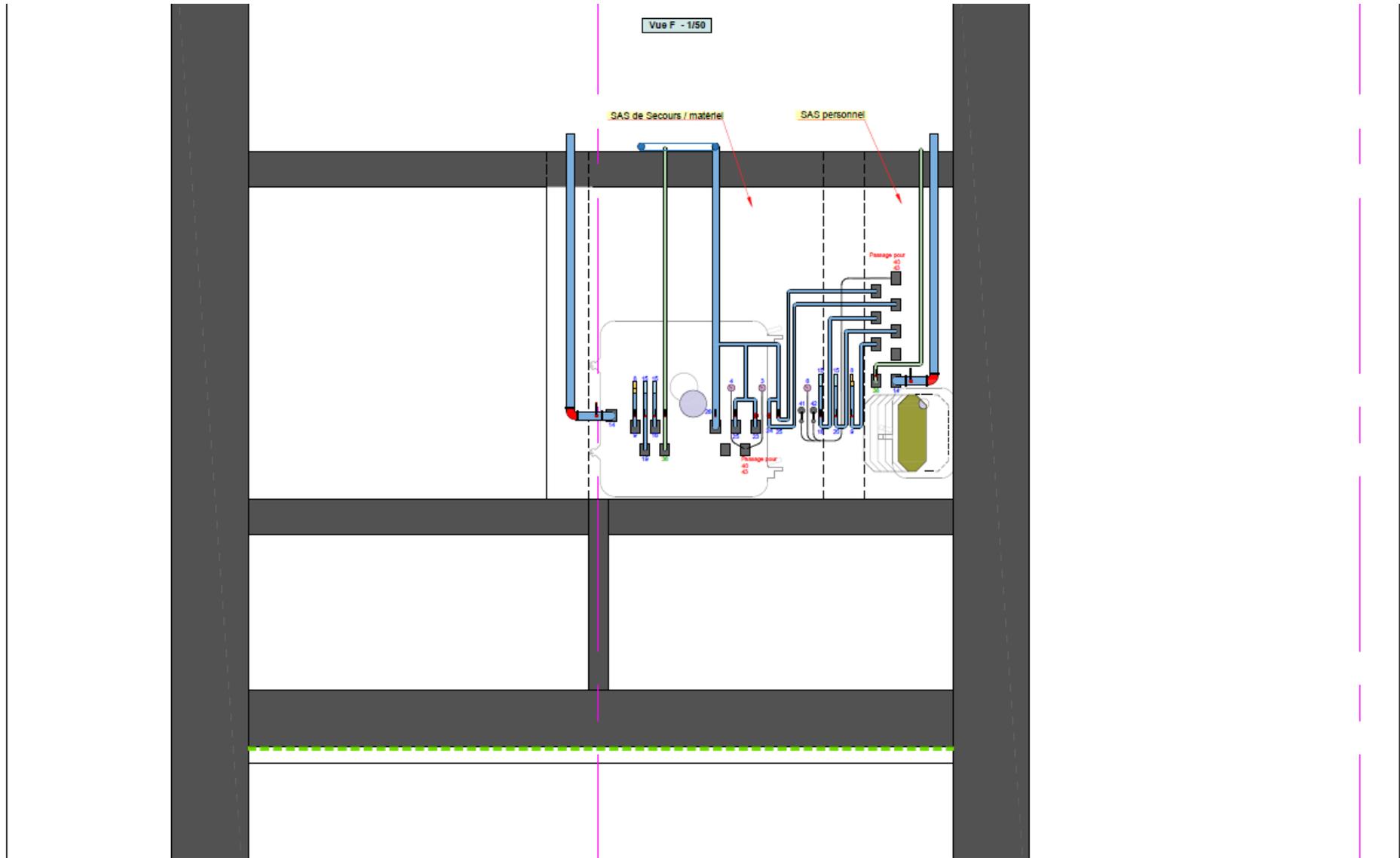


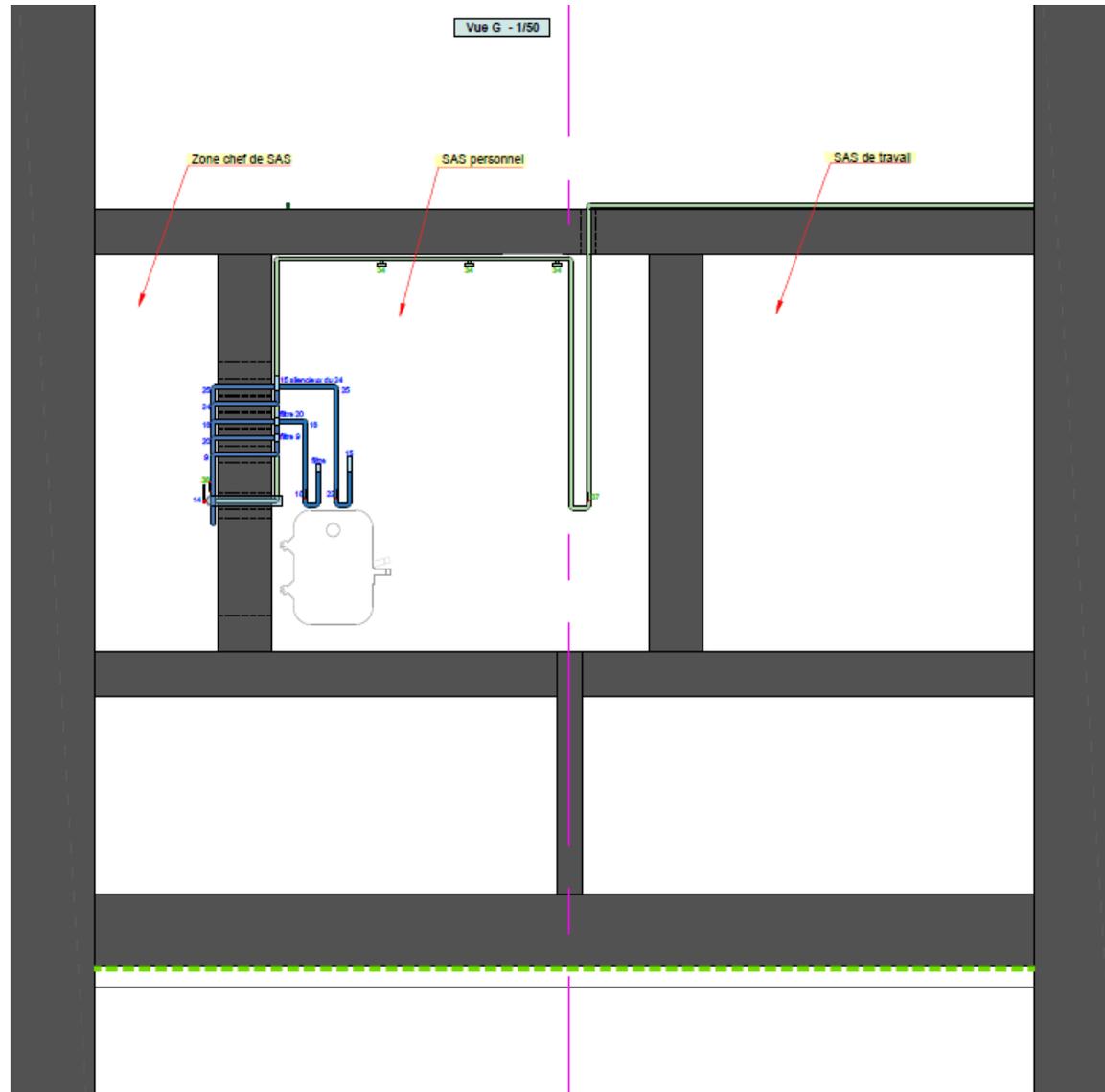


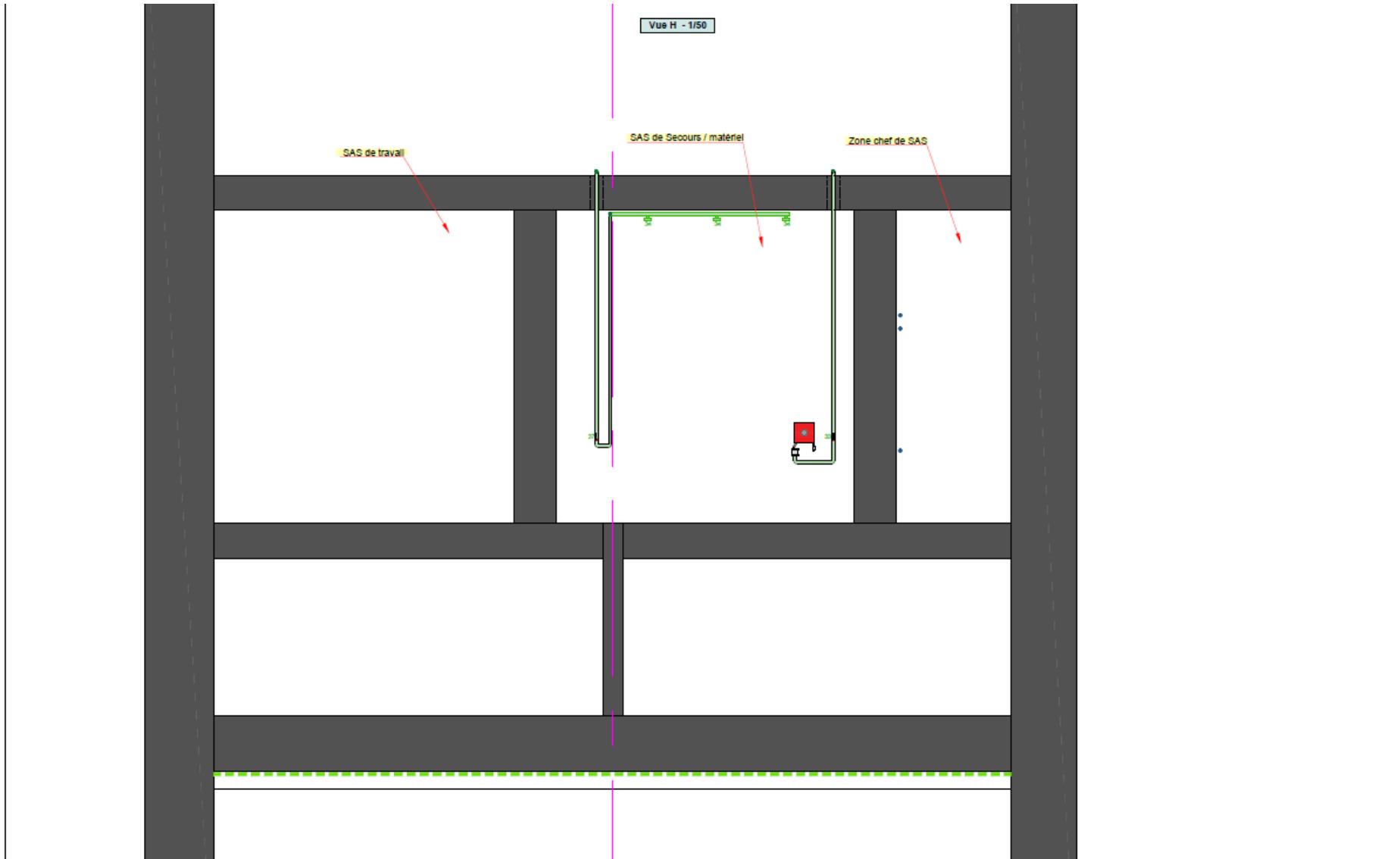












ANNEXE 7 : EXEMPLE MANUEL D'UTILISATION DES SAS HYPERBARE

**Un manuel est à développer pour l'ouvrage 901P une fois l'installation hyperbare soit mise en place*

Compression sas Personnel :

Le gonflage du sas doit être effectué par les tubistes à leurs rythmes Par la vanne à robinet N°18.



Le gonflage peut aussi être effectué par le chef de sas vanne N° 19 le chef de main peut à tout moment prendre la main sur le gonflage en fermant la vanne N° 42.



Control de la pression dans le sas par le manomètre N° 11 et la pression du front manomètre N°5.



Afin de faciliter la fin de compression et l'ouverture de la porte de sas vers le front ouvrir doucement la vanne N° 30 pour équilibrer les pressions.



Ne pas oublier de refermer les vannes quand la porte est ouverte

Décompression sas personnel :

Vérifier la propreté des joints de porte avant fermeture un tubiste donne la consigne au chef de sas qu'il peut commencer la décompression à l'aide de la vanne N°36.



La vanne N° 35 sert uniquement à la décompression d'urgence en l'absence du chef de sas elle ne doit jamais être utilisée en temps normal.

Le chef de sas reste maître de cette vanne en condamnant la vanne N° 7.



Incendie :

En cas d'incendie deux possibilités ouverture de la vanne N°28 par le chef de sas les buses de pulvérisations sont alors alimentées en eau.



Ouverture de la vanne N° 27 par les tubistes à l'intérieur du sas personnel.



Compression sas secours/matériel :

Le gonflage du sas s'effectue par la vanne N° 17.



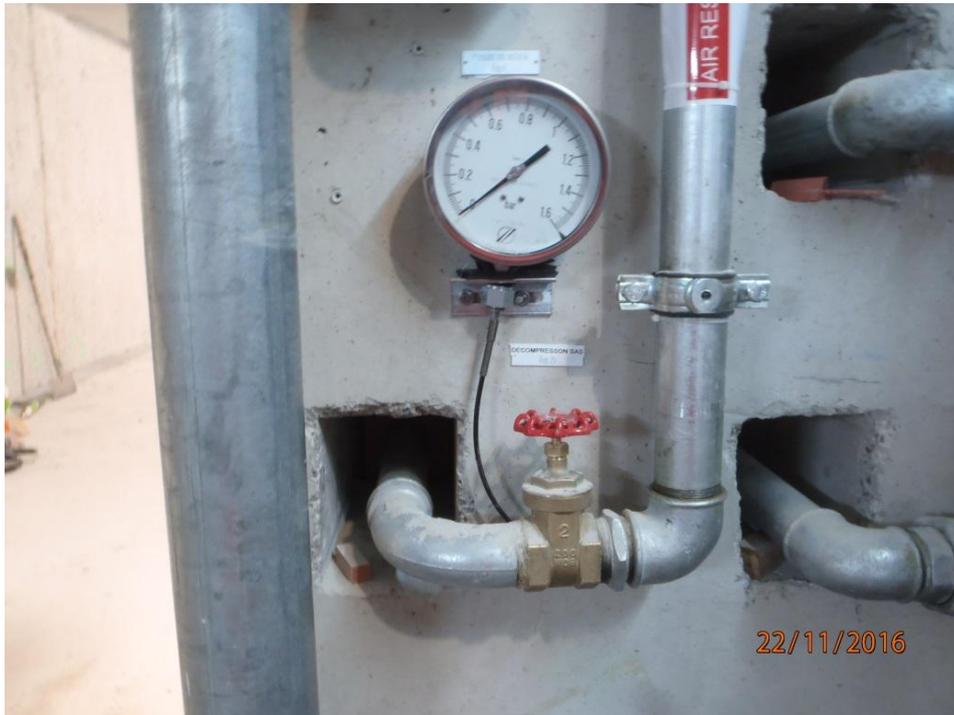
Pour le transfert matériel **UNIQUEMENT** dès que le sas commence à être en pression le tubiste qui se trouve dans la chambre de travail ouvre la vanne N°43 sur ordre du chef de sas pour accélérer la mise en pression.



Ne pas oublier de refermer les vannes quand la porte est ouverte

Décompression sas secours/matériel :

Le chef de sas commence la vidange en ouvrant la vanne N° 25.



Dès que la décompression est commencée, il ouvre la vanne de vidange rapide N° 44.



Utilisation du sas matériel en sas secours personnel :

Le gonflage du sas par les tubistes s'effectue par la vanne N°16.



Le chef de sas reste maître de cette vanne en condamnant la vanne N° 41.



Pour accélérer la montée en pression et équilibrer le sas secours et la chambre de travail les tubistes utilisent la vanne N°45.



Le sas secours/matériel ne doit être utilisé par le personnel qu'en cas d'urgence.

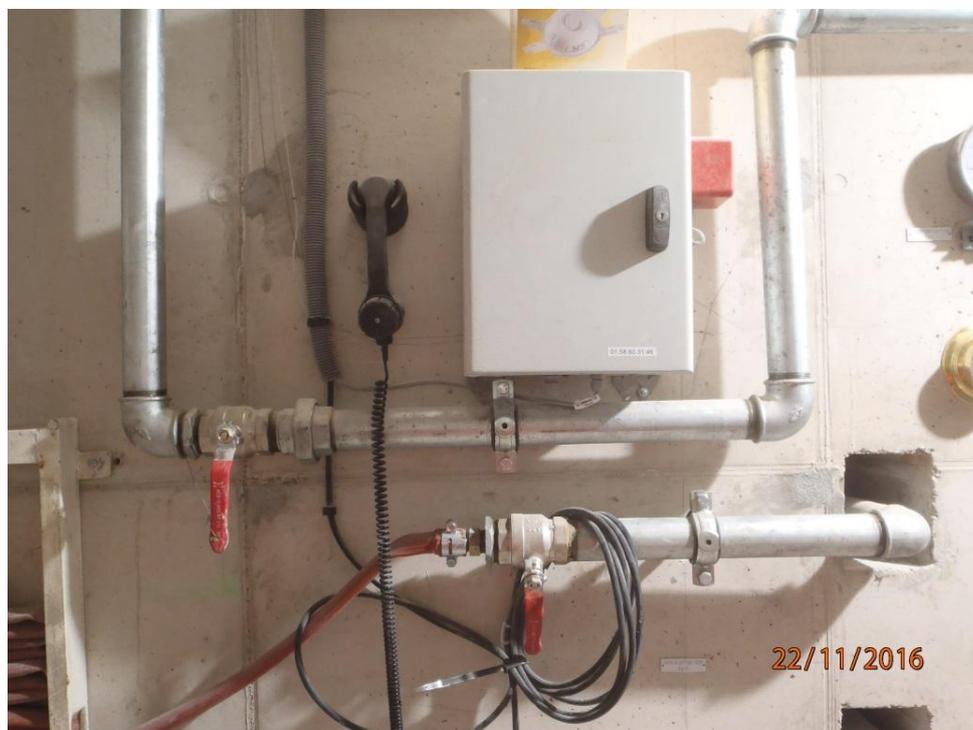
La décompression s'effectue comme pour le matériel en respectant les vitesses de décompression.

Incendie :

En cas d'incendie deux possibilités ouverture de la vanne N°26 par le chef de sas les buses de pulvérisations sont alors alimentées en eau.



Ouverture de la vanne N° 25 par les tubistes à l'intérieur du sas secours.



ANNEXE 8 : FICHE DE RENSEIGNEMENT AUX SECOURS (EXEMPLE)

FICHE DE RAPPORT D'ACCIDENT

 		Maître d'Ouvrage : SGP Maître d'œuvre : SYSTRA	
À compléter : En cas d'accident ou de symptôme de décompression Par : Le Chef d'Opération Hyperbare	Chef de SAS :	Chef d'opération hyperbare :	Date et heure :
Numéro de téléphone du médecin hyperbare :			
Personnel impliqué			
Nom des victimes :			
Nom du chef d'équipe pour cette intervention :			
Autres personnes présentes :			
Symptômes / Description accident			
Heure de l'accident :			
Description e l'accident / des symptômes :			
Description traitement			
Recompression ? Y /N			
Pression de recompression (bar) :			
Traitement / Description du protocole réalisé :			
Commentaires :		Signature chef du caisson thérapeutique :	

ANNEXE 9 : FICHE D'INTERVENTION HYPERBARE (EXEMPLE)

FEUILLE D'INTERVENTION HYPERBARE

DECOMPRESSION A L'AIR

PRESSION 0,9 à 1,05 bar

 		Maître d'Ouvrage : SGP Maître d'œuvre : SYSTRA	
CHANTIER :		DATE : / /	
LES PERSONNES	CHEF OPERATION HYPERBARE :		
	CHEF DE SAS (Nom, signature) :		
	TUBISTES - - - -	SUCCESSIVE Oui/Non	MAJORATION (b-a)
	TUBISTE SECOURS		
OBJECTIF INTERVENTION			

RELEVÉ DU DÉROULEMENT DE L'INTERVENTION

PRESSION (bar) :		DURÉE (b-a) :			DURÉE RETENUE :		
ACTION	DÉBUT h et min	FIN h et min	DURÉE min	TAUX CO ₂	DÉBIT VENTILATION	TAUX OXYGÈNE	
COMPRESSION	a						
DECOMPRESSION VERS 1 ^{er} PALIER	b						
DURÉE TRAVAIL (b-a) :							
PALIER A	0,3 b						
HEURE DE SORTIE DU SAS (c) :			DURÉE TOTALE INTERVENTION (c-a) :				

TABLE AIR / MENTION D STANDARD					PRESSION 0.9 à 1.05 bar		
Durée travail	Décompression au 1 ^{er} palier	AIR 1,2bar	AIR 0,9bar	AIR 0,6 bar	AIR 0,3 bar	Durée décompression	Durée intervention
0 à 3h30	4 min				-	4 min	3h34
4h00	3 min				5 min	8 min	4h08
4h30	3 min				5 min	8 min	4h38
5h00	3 min				10 min	13 min	5h13
5h30	3 min				10 min	13 min	5h43

ANNEXE 10 : CHECK LIST MATÉRIEL

FICHE DE RAPPORT D'ACCIDENT

 		Maître d'Ouvrage : SGP Maître d'œuvre : SYSTRA	
À compléter : En cas d'accident ou de symptôme de décompression Par : Le Chef d'Opération Hyperbare	Chef de SAS :	Chef d'opération hyperbare :	Date et heure :

Numéro de téléphone du médecin hyperbare :

Personnel impliqué
Nom des victimes :
Nom du chef d'équipe pour cette intervention :
Autres personnes présentes :
Symptômes / Description accident
Heure de l'accident :
Description e l'accident / des symptômes :
Description traitement

Recompression ? Y/N

Pression de recompression (bar) :

Traitement / Description du protocole réalisé :

Commentaires :

Signature chef du caisson thérapeutique :