

# **CERN Projet HILUMI (HAUTE LUMINOSITE) LHC POINT 1 : un montage contractuel innovant**

## ***CERN HILUMI (High Luminosity) LHC Project at Point 1 : an innovative construction contract***

Vincent MEYER, *Setec tpi, Paris, France*

Bénédicte MADINIER, *Terrasol, Lyon, France*

Helena KANAKARI, *Setec Ch, Genève, Suisse*

### **Résumé**

Le projet de Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité vise à pousser les performances du LHC à leur maximum pour augmenter le potentiel de découvertes après 2025. Sur l'un des deux principaux sites (Point 1), les travaux de génie civil ont été attribués en 2018 pour un montant de 60 millions d'euros. Le projet comprend la réalisation d'infrastructures souterraines (puits, caverne, tunnel / galeries) et de surface. Ce contrat a été mis au point sur la base des conditions de contrat « FIDIC Red Book » (Edition 1999)<sup>1</sup>, avec des développements spécifiques (mécanisme d'ajustement des délais d'exécution, plan de management des risques et bordereau des prix « risques », contractualisation des paramètres géotechniques via un « Geotechnical Baseline Report »).

Ce contrat constitue donc une sorte de prototype du tout nouvellement paru « FIDIC Emerald Book<sup>2</sup> ».

L'article propose un retour d'expérience du maître d'œuvre (« Engineer » selon terminologie FIDIC), sur les sujets suivants :

- Les études d'exécution dans un contexte international. Dans les conditions « FIDIC Rouge » retenues (études d'exécution par le maître d'œuvre), le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont mis en œuvre différents mécanismes permettant la reprise des études par l'Entreprise. La clause de « Value Engineering » a été largement mise en œuvre par l'Entreprise.
- Les possibilités d'optimisation des ouvrages en cours de travaux pour ce genre de chantier.
- Les ressources nécessaires en matière de gestion contractuelle pour accompagner et maîtriser les mécanismes précités.

### **Abstract**

The High Luminosity LHC (HL-LHC) is an upgrade of the Large Hadron Collider to achieve larger instantaneous luminosities than the LHC nominal value. On one of the two main sites of the project, civil engineering works were awarded in 2018 for a total of €60 million, and are ongoing since then. The project includes underground and surface structures. The Construction contract has been prepared on the basis of the FIDIC Red Book terms (Ed. 1999), with some specific features (time adjustment mechanism, risk management plan, risk BoQ, GBR – Geotechnical Baseline Report). This Contract is a kind of prototype of the newly published FIDIC Emerald Book.

This article provides some lessons learned of the Engineer regarding:

- Construction design best practices in an international context. Within the FIDIC Red Book framework, the Employer and the Engineer implemented various mechanisms in order to allow the Contractor to re-address some parts of the design. Several cases of Value-Engineering were proposed and implemented by the Contractor.
- Optimisation of underground structures during the execution of the works.
- Resources of the Engineer which are needed to properly manage the contractual mechanisms mentioned above.

# **CERN Projet HILUMI (HAUTE LUMINOSITE) LHC POINT 1 : un montage contractuel innovant**

## ***CERN HILUMI (High Luminosity) LHC Project at Point 1 : an innovative construction contract***

Vincent MEYER, *Setec tpi, Paris, France*

Bénédicte MADINIER, *Terrasol, Lyon, France*

Helena KANAKARI, *Setec Ch, Genève, Suisse*

### **1 Introduction**

Le projet de Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité vise à pousser les performances du LHC à leur maximum pour augmenter le potentiel de découvertes après 2025. Des ingénieries et entreprises de Suisse, France, Italie, Autriche, Allemagne, et Royaume-Uni sont intervenues ou interviennent avec la communauté des Ingénieurs de toutes nationalités du CERN, pour écrire ce nouveau chapitre.

Sur l'un des deux principaux sites (Point 1), les travaux de génie civil ont été attribués en 2018 pour un montant d'environ 60 millions d'euros. Le projet comprend la réalisation d'infrastructures souterraines (dont puits, caverne, tunnel / galeries) et de surface. Ce contrat a été mis au point par le CERN et le groupement d'ingénierie sur la base des conditions générales « FIDIC Red Book » (Edition 1999), avec des développements spécifiques :

- Un mécanisme d'ajustement des délais d'exécution, similaire à celui de la norme Suisse SIA 118/198<sup>3</sup>.
- Des aménagements inspirés du fascicule 69 du CCTG<sup>4</sup>, notamment plan de management des risques et bordereau des prix « risques ».
- La contractualisation des paramètres géotechniques (Geotechnical Baseline Report), en rapport avec les deux points précédents.

Ce contrat constitue donc d'une certaine manière (ou pour partie au moins) une sorte de prototype du nouvellement paru « FIDIC Emerald Book » (2019).

L'exécution de ce Contrat constitue un cadre efficace et adapté pour le CERN, qui se doit de faire participer aussi largement que possible les 23 états membres aux procédures d'appel d'offre (règles d'achat CERN).

L'objet de cet article est de mettre en exergue :

- La difficulté connue, dans un contexte international, à s'adapter à des approches nationales différentes, en matière d'études d'exécution notamment. Dans les conditions « FIDIC Rouge » retenues (Etudes d'exécution par le maître d'œuvre), le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre ont mis en œuvre différents mécanismes alternatifs permettant la reprise des études par l'Entreprise. La clause de « Value Engineering » a été largement mise en œuvre, à l'initiative de l'Entreprise.
- Les possibilités d'optimisation des ouvrages en cours de travaux pour ce genre de chantier.
- Les ressources nécessaires au niveau de la maîtrise d'œuvre travaux, pour la gestion d'un tel contrat, avec une composante gestion de projet et gestion contractuelle forte (bien plus que dans un schéma habituel « Maîtrise d'Ouvrage Publique » à la française). Cela implique notamment de mettre en place un outil de suivi et pilotage des coûts performant et dynamique, pour accompagner et maîtriser les mécanismes précités.



Ce programme ambitieux comprend de nombreuses composantes très techniques avec des équipements « sur mesure » destinés à l'augmentation de performance de l'accélérateur LHC.

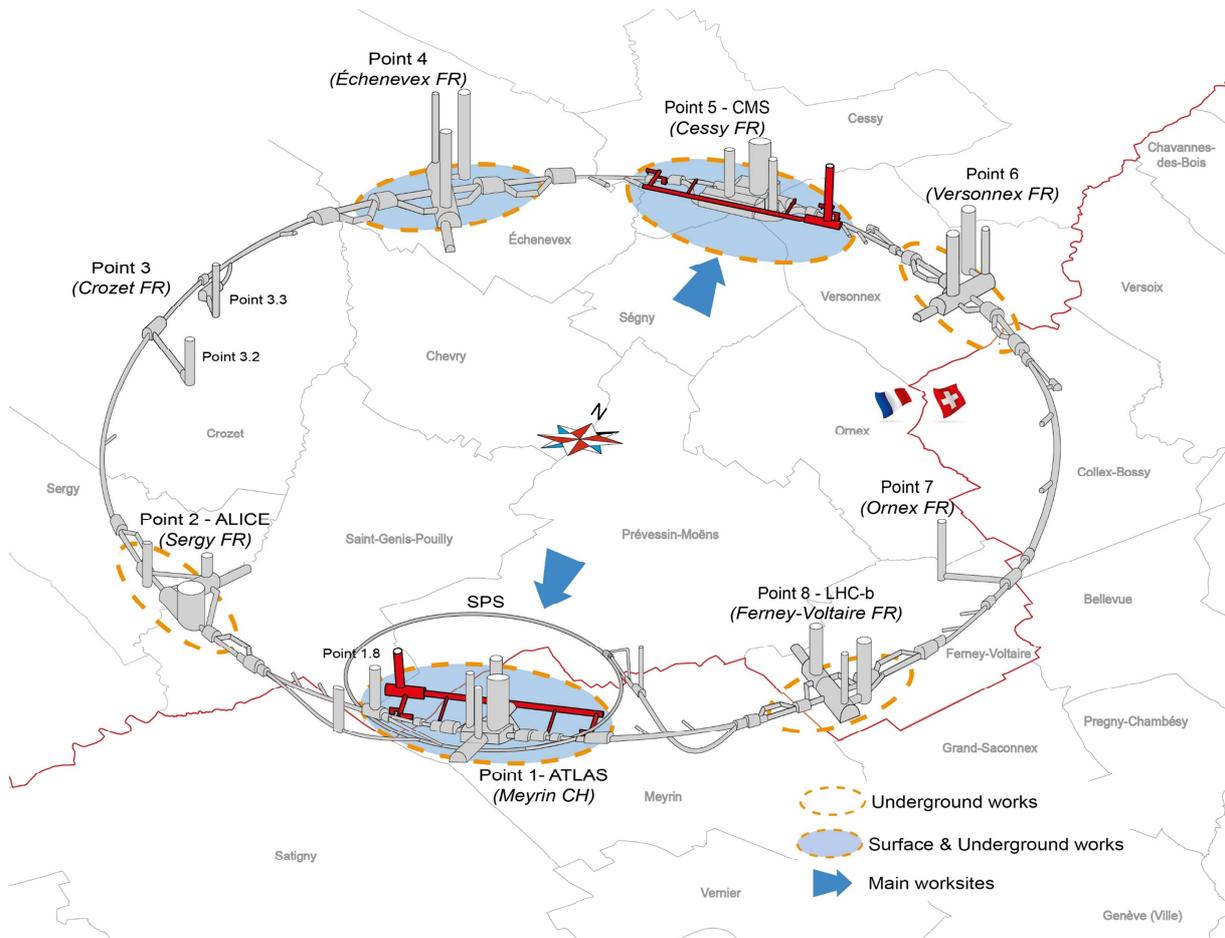


Figure 2. Les principaux sites de travaux du Projet HiLumi LHC (© CERN)

### 2.3 Spécificités du projet

Le CERN est un environnement atypique pour les ingénieries et entreprises chargées de ces travaux souterrains. Les principales parties prenantes du projet sont des physiciens chargés de travaux de recherche, et les nouvelles infrastructures de génie civil doivent être conçues pour accueillir des équipements hautement sophistiqués, et faits sur mesure.

Compte-tenu des contraintes de programmation du projet, la conception des ouvrages souterrains devait être menée à bien alors que les équipements du nouvel accélérateur n'étaient que partiellement définis ou en cours de prototypage.

En comparaison avec des infrastructures routières, ferroviaires ou hydrauliques, les ouvrages souterrains de génie civil ne représentent ici qu'une part relativement faible de l'investissement global, mais néanmoins essentielle du point de vue du bon déroulement du projet (respect des délais et du budget, évitement des impacts sur les structures souterraines existantes).

Ainsi, le lot génie civil dont il est question ici (« *Work Package 17 – Infrastructure, Logistics & Civil Engineering* »), pour les 2 sites de travaux réunis (P1 et P5), représente un budget total de l'ordre de 150 millions d'euros, pour un total de 17 Work Packages, et près d'un milliard d'euros. Le CERN assure la gestion globale du projet et l'intégration des différents lots. Ce pilotage comprend notamment :

- la consolidation de l'ensemble des éléments du projet dans l'environnement CATIA géré par le CERN, depuis la phase des études amont jusqu'à la mise en service, et au-delà en phase exploitation-maintenance,
- la mise en œuvre d'un puissant outil de contrôle du projet (project control / EVM – *Earned Value Management*).

## 2.4 Présentation des travaux de génie civil au Point 1 (ATLAS)

Les travaux de génie civil sur les deux principaux sites (Point 1 et Point 5) ont démarré en avril 2018 et doivent s'achever mi 2022.

Ceux du Point 1 (ATLAS), situés côté Suisse à Meyrin, comprennent la création d'infrastructures souterraines additionnelles significatives réalisées dans le bassin de Genève (puits, caverne, tunnels / galeries, d'une longueur totale d'environ 550 m), et 5 bâtiments industriels en surface.

La figure 3 représente les infrastructures existantes en grisé, et les nouvelles infrastructures en bleu.

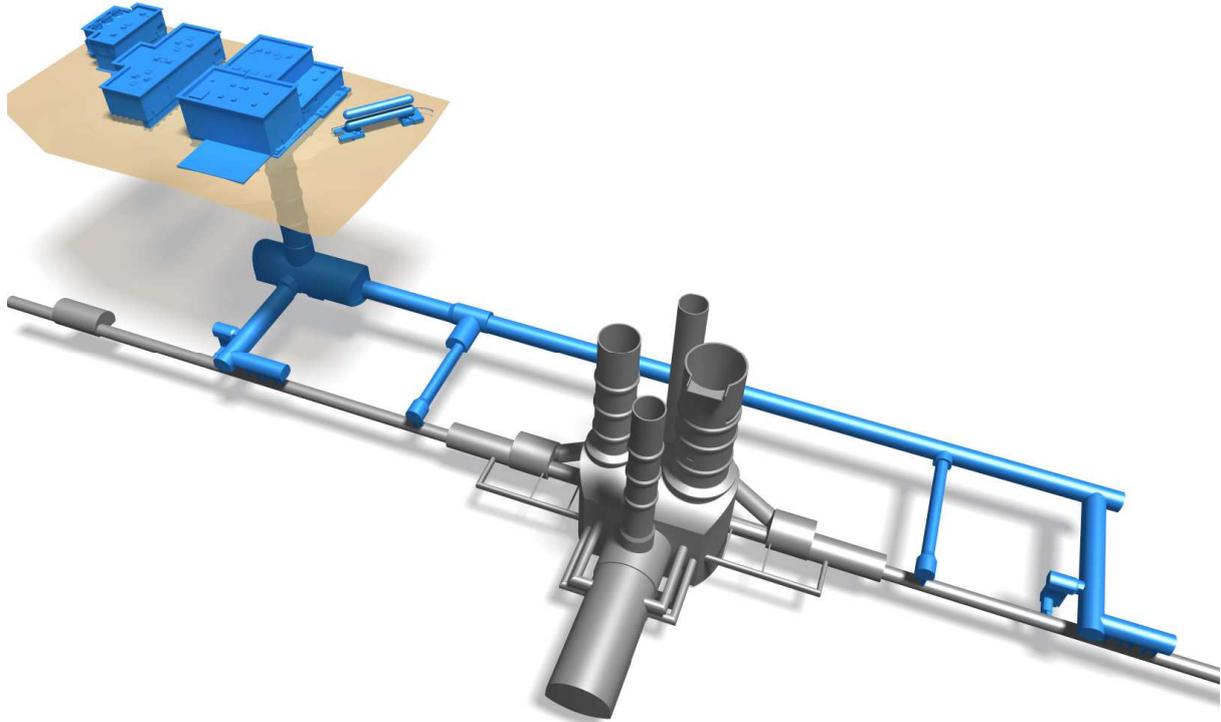


Figure 3. HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) – Vue générale des ouvrages (© CERN)

Les travaux souterrains sont réalisés en méthode traditionnelle dans la molasse, à proximité immédiate de la caverne d'un des deux principaux détecteurs du LHC (« ATLAS »), et du tunnel existant LHC. Ces nouvelles infrastructures doivent se connecter au tunnel LHC.



Figure 4. HiLumi LHC Point 1 (ATLAS) – Vue aérienne du Site (© CERN)

## 2.5 Structures en souterrain

Les nouvelles structures en souterrain comprennent :

- Un puits de diamètre intérieur 10 m environ, et de 60 m de profondeur.
- La caverne, sous l'axe du puits, de 18 m de diamètre, 14 m de hauteur, et 45 à 50 m de longueur. Elle accueillera entre autres les équipements cryogéniques, répartis sur le radier de la caverne et des niveaux intermédiaires en charpente métallique.
- Galerie des convertisseurs : la galerie (ou tunnel principal) est d'un diamètre de 6 m environ et 300 m de longueur. Elle accueillera les convertisseurs de puissance alimentant les aimants supraconducteurs de l'accélérateur.
- Galeries de service et d'évacuation : 4 galeries perpendiculaires au tunnel principal, de 3 à 6 m de diamètre, et 50 m de longueur chacune, permettent les raccordements au tunnel LHC existant. Elles assurent la distribution électrique et cryogénique de l'accélérateur dans sa configuration future. En outre les deux galeries à chaque extrémité des nouveaux ouvrages se connectent verticalement au LHC, via des escaliers, pour constituer des ouvrages d'évacuation et de secours.
- 12 puits verticaux de faible diamètre (« cores », 1 m de diamètre intérieur, hauteur 7 m) viendront compléter ces ouvrages, pour assurer les raccordements de réseaux et d'équipements entre les extrémités des 4 galeries et le tunnel LHC.

## 2.6 Travaux de surface

Les 5 nouveaux bâtiments de surface sont des ouvrages industriels constitués de structures principales en béton (pour trois d'entre eux) et en charpente métallique (pour les deux autres). Ils sont interconnectés par des galeries, et complétés de dalles extérieures pour accueillir les réservoirs d'hélium et d'azote, et des aménagements de surface associés (voiries, réseaux divers).

Les bâtiments ont pour fonction : bâtiment en tête de puits, pour l'accès aux ouvrages et la manutention lourde, bâtiment ventilation associé aux ouvrages souterrains créés, bâtiment électrique, bâtiment des tours de refroidissement, et bâtiment accueillant les compresseurs associés au circuit cryogénique.

Les matériaux d'excavation pouvant être réemployés en remblai sont utilisés pour réaliser la plateforme associée aux bâtiments et aux aménagements de surface.

### **3 Structuration de la composante Génie Civil du Projet, Montage contractuel**

#### **3.1 Deux projets de génie civil en parallèle**

Les travaux de génie civil des deux principaux sites (Point 1 en Suisse, Point 5 en France) sont quasiment identiques, mais le CERN a opté pour la conduite de deux projets distincts, compte-tenu des spécificités nationales (réglementaires notamment). Cette approche correspond également aux règles d'achat du CERN, en tant qu'organisation intergouvernementale. Pour ces raisons, le CERN a passé des contrats d'ingénierie (maîtrise d'œuvre études et travaux) et de construction propres à chacun des deux sites Point 1 (ATLAS) et Point 5 (CMS).

La langue utilisée pour les contrats d'ingénierie et de construction est l'anglais, pour faciliter l'accès aux entreprises des différents états membres. Le français est la langue utilisée spécifiquement pour les questions liées à la coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (règles calquées sur la réglementation française et la réglementation du canton de Genève), et pour les procédures liées au permis de construire délivré dans le canton de Genève (Point 1).

#### **3.2 Contraintes du planning**

Le planning est dicté par les cycles d'exploitation du LHC, marqué par des arrêts techniques longs (LS – « Long Shutdown »), ponctuant des périodes d'expérimentation de plusieurs années.

Le démarrage des études de génie civil du HL-LHC fut confirmé à l'automne 2015, avec comme objectif un début des travaux en 2018. Les principaux travaux d'excavation devaient être réalisés durant la période d'arrêt 2019-2020 (LS2), en vue de préserver le LHC en exploitation des effets des vibrations.

Les galeries d'évacuation créées devaient par ailleurs se raccorder au tunnel existant du LHC avant sa remise en service début 2021, et même avant que la phase de refroidissement préalable ne soit engagée. Les derniers raccordements par puits de petit diamètre au LHC (« cores ») ne seront quant à eux finalisés que lors du prochain arrêt (LS3), en 2024. C'est également lors de cet arrêt que les nouveaux équipements du HL-LHC seront installés.

L'accélérateur dans sa configuration améliorée « HL-LHC » génèrera donc ses premières collisions de particules en 2026.

La figure 5 résume le planning des travaux de génie civil sur la période 2018-2022.

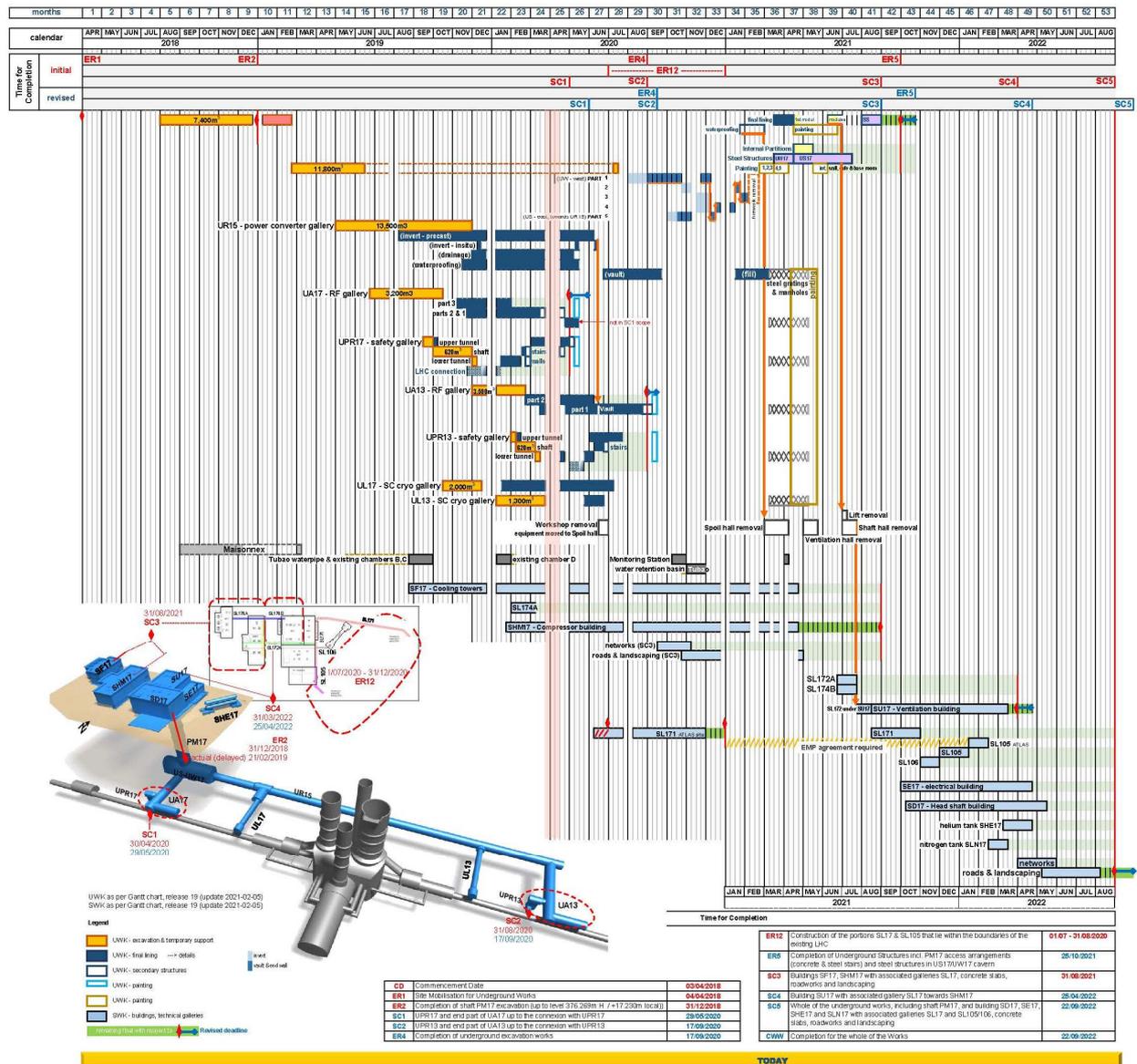


Figure. 5 Planning général des travaux de génie civil

### 3.3 Contrat d'ingénierie pour le Point 1

Le contrat d'ingénierie prend en compte le retour d'expérience du CERN sur le précédent projet LHC (achevé en 2005). Il couvre les phases études et travaux, et a été rédigé de manière à être compatible avec le rôle du maître d'œuvre (« Engineer ») supervisant un contrat de Construction FIDIC Red Book.

Les études conduites par le groupement ORIGIN (setec tpi / CSD Ingénieurs SA / ROCKSOIL S.p.A) démarrèrent en juin 2016, et le Dossier de Consultation des Entreprises fut livré en juillet 2017, avec comme objectif un démarrage des travaux en avril 2018, objectif effectivement atteint. Cet objectif était particulièrement ambitieux compte-tenu de la complexité du projet, des nombreuses interfaces à gérer par le CERN, du caractère multi-national et multi-culturel du projet, et de la spécificité des règles d'achat du CERN. Une des conditions nécessaires pour la tenue de cet objectif aura été la mobilisation par le CERN de chefs de projet dédiés et expérimentés, permettant des décisions rapides dans la relation maître d'ouvrage – maître d'œuvre.

### 3.4 Mise au point collaborative du projet de Contrat de Construction

Les deux procédures d'appel d'offres relatives aux Points 1 et 5 furent menées de front ; les deux contrats ne pouvaient être attribués au même concurrent.

Le contrat de construction est basé sur le contrat type FIDIC Red Book (Edition 1999), avec des spécificités apportées par le CERN en vue d'adapter le contrat à son statut d'organisation intergouvernementale. Celles-ci furent mises au point avec l'assistance d'un cabinet d'avocats anglais et ORIGIN en tant que maître d'œuvre.

Il s'agit donc d'un contrat au bordereau et au quantitatif, pour des ouvrages dont la conception est faite par le maître d'œuvre (Engineer) pour le compte du maître d'ouvrage.

Ce modèle fut retenu pour permettre une certaine latitude au CERN, qui prévoyait d'opérer des modifications de la conception en cours de travaux, vis-à-vis de l'intégration des équipements notamment.

La mise en parallèle de la conception des deux projets Point 1 et Point 5, confiés à deux groupements d'ingénierie distincts et chacun multi-national (respectivement français-suisse-italien et italien-français-suisse), aura été une configuration favorable à l'émulation, aux échanges, et à la recherche des solutions optimales entre le CERN et ses deux ingénieries. Le retour d'expérience travaux permet de confirmer les avantages (ou désavantages) respectifs des différentes solutions, notamment en termes de facilité d'adaptation des soutènements aux conditions géologiques et géotechniques rencontrées.

Concrètement, au moment de démarrer la production des deux dossiers de consultation des entreprises des deux projets (Point 1 et Point 5), le CERN organisa un « *Workshop* » d'une journée, associant les personnes concernées du CERN, des deux groupements d'ingénierie, un Expert du domaine (« *subject matter Expert* »), et un avocat anglais spécialisé en droit des contrats.

Les axes de réflexion fixés par le Chef du Projet du CERN pour ce workshop étaient notamment :

- l'enjeu de gestion des interfaces entre « *work packages* » (lots techniques du Projet), pour les raisons déjà évoquées plus haut,
- la nécessité de pouvoir prendre en compte, en cours d'exécution des travaux de génie civil, des demandes de modifications liées à l'intégration des équipements.

Il était par ailleurs déjà clarifié à ce stade que le CERN voulait développer les deux contrats de construction sur la base du FIDIC Red Book Edition 1999, avec certaines modifications prenant en compte le statut du CERN en tant qu'Organisation intergouvernementale.

Ce workshop fut l'occasion pour chacun des groupements de proposer un référentiel et de présenter son retour d'expérience associé. Ce fut également l'occasion de passer en revue les sujets suivants (exposé non limitatif ; voir les références détaillées complètes en fin du présent document) :

- Les termes spécifiques du FIDIC Red Book (Ed. 1999) jugés de première importance pour la procédure considérée, notamment : la Sous-Clause 4.12 *Unforeseeable Physical Conditions*, les Sous-Clauses de *Variation* (Modifications initiées par le maître d'œuvre) et de *Value Engineering* (Variantes d'optimisation, initiées par l'Entreprise).
- La structuration du dossier de consultation et du futur contrat de construction. Cette question fit l'objet de discussions assez longues, dans la mesure où les deux groupements d'Ingénierie se trouvaient hors de leur « zone de confort » avec ce contrat « hybride » ou « sur mesure » du Client, et sans précédent récent au CERN depuis la construction du LHC.
- Le contenu et la portée contractuelle du GBR (*Geotechnical Baseline Report*), avec notamment une discussion sur l'analogie entre GBR et Cahiers B et C selon les recommandations de l'AFTES<sup>5</sup>.
- La gestion contractuelle des risques, notamment risques sur les ouvrages existants du LHC (en rapport avec les vibrations induites par l'excavation, et compte-tenu du raccordement de nouvelles galeries sur le tunnel existant du LHC), et risques liés à la présence d'hydrocarbures naturels dans le massif encaissant.
- Les mécanismes d'ajustement des délais d'exécution, notamment sur la base de la norme Suisse SIA 118/198 (voir références à la fin du document).
- La structuration des prix unitaires, et l'utilisation d'une méthode reconnue de métrage avec règles associées (CESMM4<sup>6</sup>).
- Le Fascicule 69 du CCTG (2012) et le guide d'application associé du CETU (2013) (voir références complètes à la fin du document).
- Les recommandations pertinentes de l'AFTES.

Une des originalités de ce Contrat de Construction ainsi mis au point par le CERN et ORIGIN tient à son mécanisme d'ajustement des délais, mécanisme non prévu dans le contrat FIDIC Red Book standard. Ce mécanisme s'inspire largement de la norme Suisse SIA 118/198, mise en œuvre sur les tunnels Alpains. Il s'appuie sur une décomposition analytique du chemin critique des ouvrages souterrains linéaires, pour permettre d'ajuster le délai contractuel d'exécution, en fonction d'un certain nombre de paramètres définis au Contrat, incluant notamment :

- les sections type d'excavation et de soutènement,
- les données et aléas (ou risques identifiés) géologiques et géotechniques (« known-unknown ») : hors-profils d'origine géologique, arrivées d'eau, gaz, etc ...

Associé à ce dispositif le contrat comprend un "*Geotechnical Baseline Report (GBR)*" qui définit les intervalles de variation prévisibles des paramètres géotechniques déterminants. Pour les variations à l'intérieur de ces intervalles le mécanisme précité s'applique, en dehors de ceux-ci les risques relèvent de la clause d'évènements imprévisibles du contrat FIDIC (« *Unforeseeable Physical Conditions* »).

La mise au point du contrat de construction aura donc été une occasion unique pour le CERN et les ingénieries parties prenantes de formaliser un "état de l'art" sur ces sujets (gestion des risques en souterrains et des incidences coûts et délais), prenant largement en compte les textes et retours d'expérience français (fascicule 69) et suisses notamment.

## 4 Retour d'expérience contractuel

### 4.1 Gestion du Contrat FIDIC

Le Contrat FIDIC tel que mis au point pour le projet se caractérise notamment par des exigences temporelles quant à :

- la gestion des modifications (« Variations »), qui doivent être régularisées et instruites « a priori » (en termes de coûts et de délais notamment),
- l'annonce par l'Entreprise des sujets potentiels de réclamations, qui doivent faire l'objet d'une « Notice » émise formellement dans un délai maximal de 28 jours sous peine de forclusion (« *The notice shall be given as soon as practicable, and not later than 28 days after the Contractor became aware, or should have become aware, of the event or circumstance.* »)

Cette dernière exigence est parfois considérée comme génératrice d'un nombre important de correspondances délicates, mais prend tout son sens dans un contexte multi-national. Ce dispositif a été correctement appliqué sur le projet (après une période de « rodage »).

En termes de moyens, la gestion du Contrat FIDIC par le maître d'œuvre (Engineer) nécessite la mise en place de ressources spécifiques au sein de l'équipe en phase travaux :

- Une fonction de « *Contract Management* » (Management du Contrat de Construction), disposant de l'expérience de tels Contrats. Dans le cas présent ce rôle était assuré principalement par le Chef de projet, disposant d'une expérience antérieure en Contrat FIDIC, et d'une Certification de Management de Projet du PMI<sup>®7</sup>, avec l'appui d'un juriste compétent (avocat).
- Une fonction de « *Quantity Surveyor* » (traduction littérale « métreur », mais qui recouvre aussi la compétence et la responsabilité consistant à correctement rattacher les quantités au bordereau des prix). Cette fonction fait l'objet, dans les pays anglo-saxons, de certifications professionnelles spécifiques (par exemple *Royal Institution of Chartered Surveyors* au Royaume-Uni).

En matière de retour d'expérience il y a lieu de souligner l'importance de l'aspect « *Contract Management* » dans un tel contexte, a fortiori pendant la période COVID-19. En complément de la bonne mise en œuvre des principaux processus contractuels, pouvoir disposer de la compétence juridique spécialisée ad hoc, sans délai, est une condition nécessaire pour le maître d'œuvre, sans quoi sa responsabilité risque d'être engagée.

En rapport avec ce retour d'expérience, il est intéressant de noter la parution récente d'une nouvelle édition des contrats FIDIC (2017), avec des évolutions et améliorations qui vont dans le sens des

principes fondamentaux promus par la FIDIC de partage équilibré des risques. Ces évolutions incluent par exemple :

- des clauses plus détaillées concernant les “*notices*” et autres communications,
- un traitement équilibré des réclamations (*claims*) du maître d’ouvrage (*Employer*) et de l’Entreprise (*Contractor*), et distinctement de la gestion des différends (*disputes*),
- des mécanismes de prévention des différends (*dispute avoidance*), avec notamment la constitution, avant le début d’exécution du Contrat de Construction, d’un comité ad hoc (*DAAB – Dispute Avoidance/Adjudication Board*).

#### 4.2 Mécanisme d’ajustement des délais d’exécution

Comme indiqué plus haut le mécanisme d’ajustement des délais d’exécution mis en œuvre est principalement inspiré de la norme Suisse SIA 118/198 (référence complète en fin de document). Le principe est de faire varier les délais d’exécution selon des paramètres définis au Contrat. Pour cela l’Entreprise fournit dans son offre ses cadences d’avancements, et autres durées jugées pertinentes du point de vue de la gestion des délais. Celles-ci comprennent :

- les cadences d’exécution en fonction des différentes sections d’excavation et de soutènement prévues,
- les cadences ou durées caractéristiques d’autres activités ou difficultés préalablement identifiées (incluant les « *known unknown* »), par exemple les arrêts pour reconnaissances géotechniques, les difficultés liées à différents niveaux d’arrivée d’eau, etc ...

Dans le cas présent, le dispositif est défini pour les travaux d’excavation et de soutènement uniquement, des 3 principaux ouvrages souterrains (puits, caverne, tunnel principal de 300 m). Le suivi est réalisé dans un tableur (feuille Excel).

Pour plus de détails sur ce type de dispositif on peut désormais se reporter au nouveau FIDIC « *Emerald Book* » (2019), qui, outre les clauses contractuelles spécifiques, inclut des exemples de formulaires associés (voir référence en fin de document, « *Example forms of Schedule of Baselines, Completion Schedule, Schedule of Contractor’s Key Equipment* »).

Ce dispositif a fonctionné correctement, mais présente un intérêt limité pour les ouvrages courts, ou dont l’excavation n’est pas strictement linéaire (galeries courtes et avec intersections multiples, caverne).

En effet, comme cela apparaît sur la figure 3 ci-avant, deux galeries sont excavées depuis la caverne, et 3 autres galeries perpendiculaires le sont depuis la galerie ou tunnel principal.

Dans ce contexte, les méthodes et choix de l’Entreprise ont conduit à une modification des chemins critiques associés aux différents délais d’exécution, notamment :

- le démarrage des galeries depuis la caverne fut avancé par l’Entreprise, avant l’excavation complète de la caverne (« *fast-tracking* » ou « *mise en parallèle* »),
- le phasage de réalisation du revêtement définitif des galeries fut largement modifié par rapport au planning initial (sans que cela n’impacte la tenue des délais partiels définis au Contrat).

Dans ces conditions, le mécanisme tel que défini initialement au contrat fut en partie impacté, en raison de modifications substantielles des chemins critiques du planning.

Le retour d’expérience du maître d’œuvre est que pour un projet avec des ouvrages relativement courts et des modifications probables des chemins critiques, le dispositif en question (ajustement des délais d’exécution) doit être bien réfléchi pour ne pas être mis en défaut. Une gestion rigoureuse du planning de l’Entreprise (« *Programme* » au sens du Contrat FIDIC), sous forme de diagramme de Gantt (logiciel Primavera ou équivalent) et planning chemin de fer (« *Time Location diagram* ») est nécessaire dans tous les cas.

Une autre façon de procéder consisterait à intégrer la gestion du mécanisme d’ajustement des délais dans le diagramme de Gantt. Cela nécessiterait bien sûr de disposer d’une ressource suffisante en professionnels de la planification, côté maître d’œuvre et côté Entreprise.

### 4.3 Geotechnical Baseline Report (GBR)

La mise au point du GBR a été assez longue, avec parfois des divergences de vue sur son contenu.

Au final, le GBR a uniquement une fonction de partage contractuel des risques (*risk allocation* ou *risk sharing*) entre les Parties (*Employer, Contractor*), pour les risques relatifs aux conditions souterraines (*subsurface physical conditions*). En conséquence il ne doit pas laisser de malentendu possible entre des éléments qui y figureraient pour information (à exclure du GBR, ou au moins à isoler dans une section clairement identifiée comme telle), mais qui pourraient être compris autrement.

De plus, les aléas souterrains qui ne seraient pas identifiés et alloués sur la base de critères objectifs dans le GBR « tombent » dans les risques du maître d'ouvrage (*Employer*). Il est donc indispensable de disposer du niveau d'expertise suffisant pour la rédaction du GBR, pour ne pas mettre à risque le maître d'ouvrage, qui serait alors lui-même en mesure de se retourner contre son maître d'œuvre. L'expertise dont on parle ici n'est pas que technique, mais doit être intégrée, technique et contractuelle.

La mise en œuvre des clauses contractuelles associées au GBR s'est traduite par un relevé systématique de chaque front par le maître d'œuvre, et par l'émission d'un rapport spécifique à chaque fois (UER - *Underground Excavation Record*), devant être signé par l'Entreprise (ou commenté par elle le cas échéant), pour valoir document contradictoire.

Le retour d'expérience est que le mécanisme contractuel en question a bien fonctionné. Certaines sections du GBR auraient néanmoins pu faire l'objet d'un travail plus précis sur la prise en compte des variations de lithologie sur les fronts d'excavation (fronts « mixtes »), variations qui conditionnaient la stabilité du front d'une part (et donc le soutènement), et la vitesse d'excavation d'autre part.

Le rôle du maître d'œuvre dans ce mécanisme lié au GBR est défini dans le nouveau FIDIC « Emerald Book » (2019) à l'article « 3.2.2 Engineer's Specific Duties and Authority for excavation and Lining Works ».

Avant de finaliser un tel projet de Contrat il est nécessaire d'organiser un contrôle externe par un expert disposant d'une vision globale technique et contractuelle, pour notamment « tester » les clauses spécifiques correspondantes (celles du GBR notamment), et s'assurer qu'elles ne produiront pas des effets non prévus.

### 4.4 Modifications en cours d'exécution | Clauses de « Variation » et « Value Engineering »

L'objectif du CERN était de disposer d'études finalisées et suffisamment abouties « Pour Construction » au démarrage du Contrat, ou au moins à l'issue de la période de préparation des travaux.

Avec une signature du Contrat début avril 2018, et un démarrage effectif des travaux d'excavation début août 2019, l'Entreprise disposait d'une période de préparation suffisante, mais souhaita revoir certains éléments des études d'exécution au fur et à mesure que les travaux progressaient (séquence puits => caverne => galeries).

Concrètement l'Entreprise proposa ces changements par rapport aux plans du maître d'œuvre pour :

- le soutènement du puits (boulons remplacés par des cintres réticulés),
- le soutènement de toute les galeries (cintres lourds IPN remplacés par des cintres réticulés),
- la contre-voûte des galeries : contre-voûte préfabriquée en béton renforcé de fibres métalliques pour la galerie principale, béton renforcé de fibres métalliques coulé en place pour les autres galeries,
- diverses autres propositions, incluant des solutions préfabriquées et des modifications de phasage de construction notamment.

Conformément aux termes du Contrat FIDIC, l'accord sur une solution de « Value Engineering » de l'Entreprise implique que celle-ci en assure la conception (justifications et plans), et que les éléments en question soient soumis à la revue du maître d'œuvre (revenant de fait à un VISA). Cette Clause prévoit aussi que l'Entreprise prend l'entière responsabilité de l'ouvrage ainsi modifié (*"the Contractor shall be responsible for this part and it shall, when the Works are completed, be fit for such purposes for which the part is intended as are specified in the Contract"*).

Par ailleurs des modifications furent demandées par le CERN via le maître d'œuvre, en cours de travaux, qui furent formalisées conformément à la Clause de Variation du Contrat FIDIC.

Le retour d'expérience concernant l'utilisation de la Clause de Value Engineering est globalement positif. Bien qu'assez exigeant en matière de gestion contractuelle, ce processus aura permis de comparer précisément chaque proposition de l'Entreprise par rapport à la Conception de référence (de niveau exécution) du maître d'œuvre, permettant ainsi une évaluation et une validation fiable de l'intérêt de chaque proposition.

Les économies générées sont présentées au chapitre suivant. Les initiatives de l'Entreprise ont également permis de créer une dynamique collaborative et positive entre le maître d'œuvre et l'Entreprise, plutôt qu'orientée réclamation par rapport aux études du maître d'œuvre.

## 5 Gestion financière et indicateurs de performance

### 5.1 Structuration financière du Contrat

Le Bordereau des Prix / Détail Estimatif ("*Bill of Quantities*" ou *BoQ*) du Contrat de construction est structuré conformément au document « CESMM4 » (*Civil Engineering Standard Method of Measurement*).

Ce document CESMM4 fut retenu à la demande du CERN, de manière à fixer une structure des prix unitaires (organisation, codification, « granularité ») commune et objective, qui devait s'appliquer aux deux Contrats de construction quasi-identiques du Point 1 et du Point 5.

Ce document définit également des règles de base pour la réalisation des métrés, servant ainsi de filet de sécurité en cas de carence, incohérence, ou confusion possible par rapport aux termes spécifiques du BoQ (BPU).

Le retour d'expérience là encore est positif, dans un contexte multi-national. En effet les pratiques nationales peuvent largement différer quant à la structuration et au niveau de détail des prix unitaires (les nomenclatures de prix en Suisse par exemple étant réputées beaucoup plus détaillées qu'en France).

Le temps de prise en main d'une telle méthode, sans pratique antérieure, ne doit pas être sous-estimé. Pour des travaux souterrains, caractérisés par des postes d'installations importants, il convient également de bien étudier les postes intitulés « *Method-Related Charges* », correspondant à des postes liées aux méthodes d'exécution de l'Entreprise, dont le coût n'est pas proportionnel aux quantités réalisées. Ces postes doivent être correctement organisés selon qu'ils sont dépendants ou non de la durée d'utilisation / d'exécution (*Time-Related* ou *Fixed*). Tout défaut dans cette organisation risque de compliquer la gestion des modifications (*Variations*) et/ou des réclamations de l'Entreprise (*Claims*).

### 5.2 Suivi Contractuel de l'Impact Financier, Indicateurs de Performance

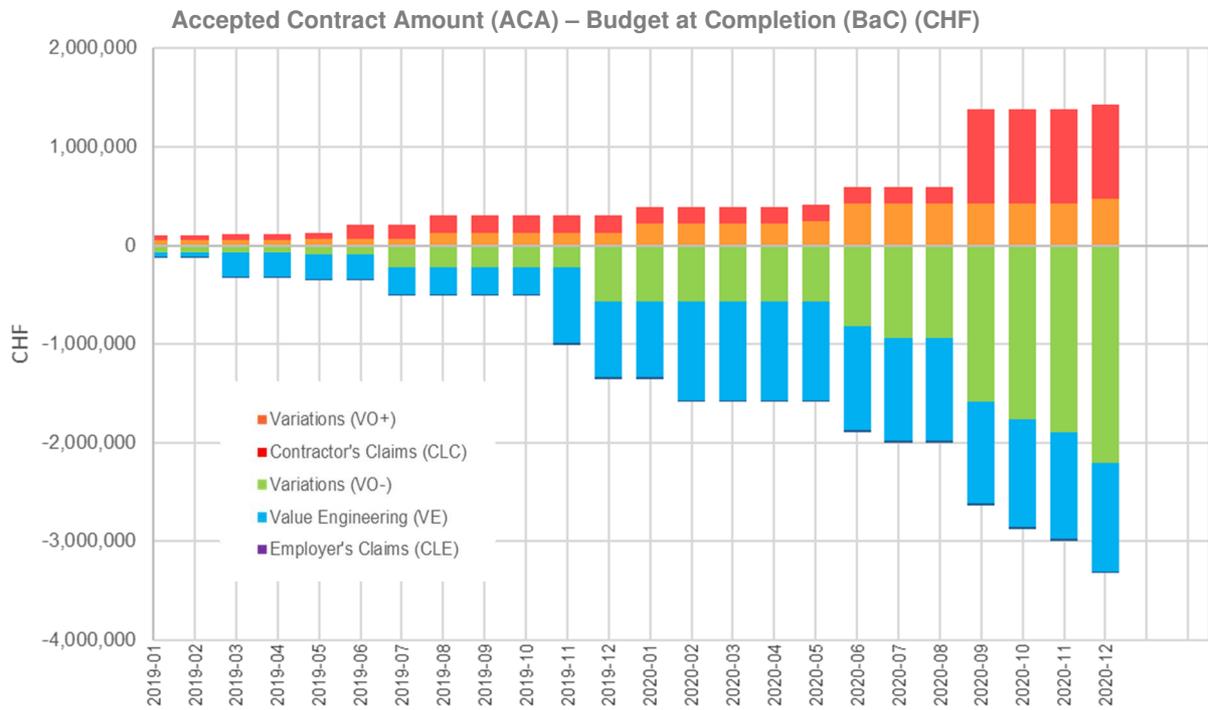
Le maître d'œuvre a mis en place, dans le cadre de la gestion du Contrat de construction, un suivi rigoureux et précis des coûts (voir référence AFTES à la fin du document<sup>8</sup>).

Cela se traduit notamment par la définition et le maintien tout au long du Contrat de référence objectives des éléments suivants :

- **Cost Baseline 1 – Accepted Contract Amount** : correspond au montant du Contrat de construction (DE ou BoQ), soit dans le cas présent, en termes de quantités, aux avants-métrés réalisés par le maître d'œuvre sur la base des études équivalentes à un niveau « PRO » (études « Phase 2 » selon le contrat liant le Consultant au CERN).
- **Cost Baseline 2 – Construction Design** : détail du montant recalculé du Contrat de construction, correspondant, en termes de quantités, aux avants-métrés réalisés par le maître d'œuvre sur la base de ses études d'exécution (études « Phase 3 » selon le contrat liant le maître d'œuvre ou *Consultant* au CERN). Comme indiqué ci-avant, ces études d'exécution ont souvent été reprises par l'Entreprise pour mieux prendre en compte ses méthodes d'exécution. Cette référence de coût sert notamment pour évaluer le bénéfice apporté par les propositions de « *Value Engineering* » de l'Entreprise.
- **Cost Baseline 3 – Budget at Completion** : en cours d'exécution du Contrat (et conformément aux exigences temporelles du Contrat FIDIC) le *Budget At Completion* ou *Budget à terminaison* est tenu à jour chaque mois, en intégrant les impacts de toutes les modifications formellement

agréées entre le maître d'ouvrage et l'Entreprise, ou à défaut d'accord « déterminées » par le maître d'œuvre (effet des *Variations, Value Engineering, Claims*).

L'évolution du « BAC » est figurée ci-dessous :



**Figure. 6 Evolution du Budget à terminaison en cours d'exécution**

## Suivi des "Value Engineering" (VE)

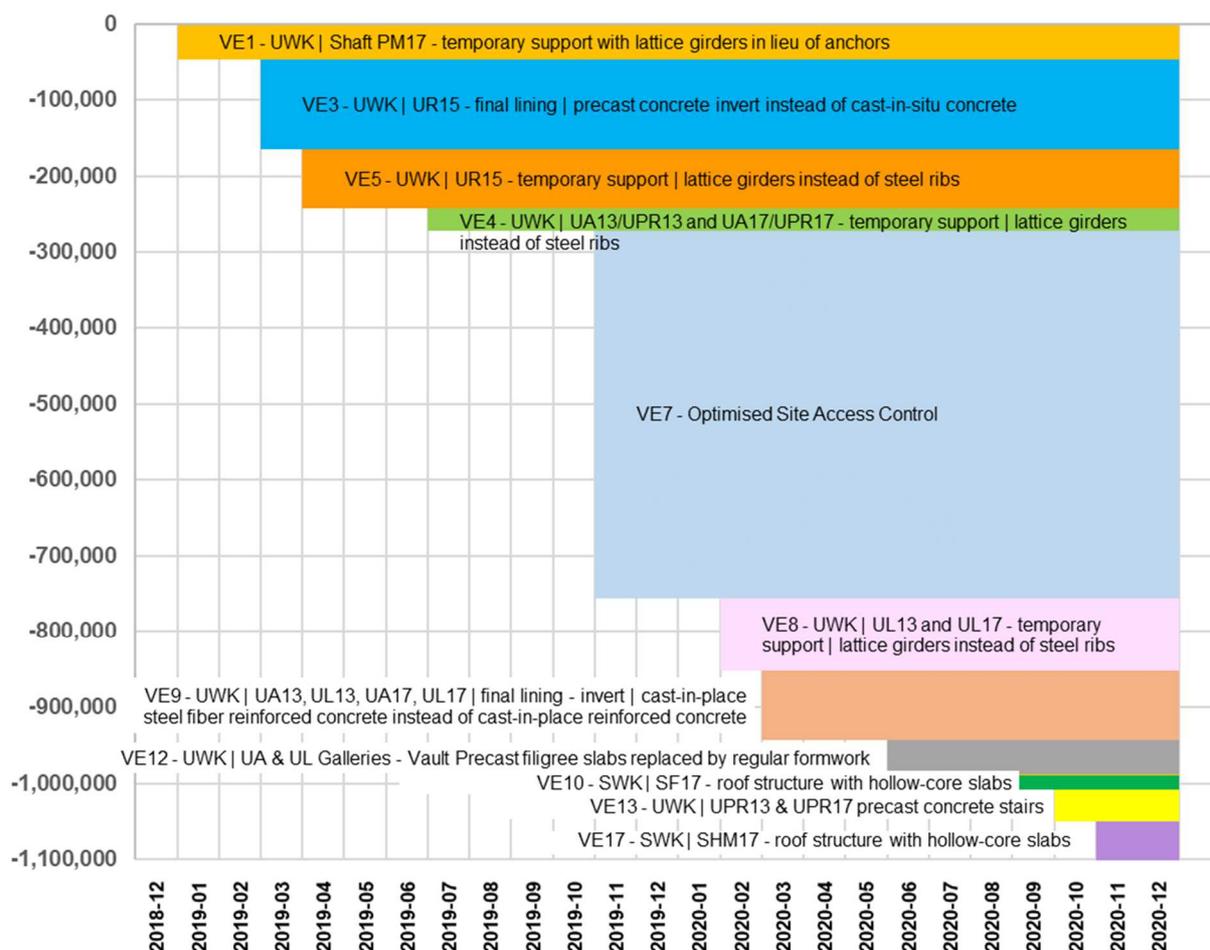


Figure. 7 Value Engineering

### ▪ EAC (Estimate at Completion, coût estimé à terminaison)

En complément du Budget à terminaison (qui ne peut être « mouvementé » que par un acte formel signé du maître d'ouvrage), le fichier financier du maître d'œuvre comprend une projection à terminaison (EAC) « dynamique », qui est mise à jour chaque mois, sur la base de toute information disponible concernant les quantités prévues à terminaison.

En fonction des quantités effectivement mesurées chaque mois et des montants en résultant (AC – Actual cost), la simplification suivante est alors appliquée pour générer un indice de performance des coûts (CPI – Cost Performance Index) pour les postes commencés, mais non achevés :

$$\text{Avancement (PR)} = \frac{(AC)}{(EAC)} = \frac{(EV)}{(ACA)} \quad \{1a\}$$

$$\text{soit, } (EV) = \frac{(AC)}{(EAC)} \times (ACA) \quad \{1b\}$$

L'indice de performance des coûts est présenté ci-dessous (situation intermédiaire en cours de travaux). Il donne une lecture directe des postes qui ont pu être moins consommateurs de quantités que prévu (cas favorable où CPI >1) :

BoQ item description		Cost Performance Index	Progress
		[CPI]	[AC]/[EaC] [EV]/[ACA]
<b>TOTAL</b>		<b>1.04</b>	<b>64%</b>
<b>[C] - WORKS (BoQ items) completed</b>		<b>1.12</b>	<b>99.9%</b>
<b>[F] - WORKS (BoQ items) w/ reliable EaC forecast</b>		<b>0.98</b>	<b>70.7%</b>
<b>[C] + [F]</b>		<b>1.03</b>	<b>81.4%</b>
<b>COMMON ITEMS</b>		<b>0.98</b>	<b>66.4%</b>
<b>UNDERGROUND STRUCTURES</b>		<b>1.10</b>	<b>72.4%</b>
Site Installations & Equipment		<b>0.98</b>	<b>72.6%</b>
PM17	excavation & temporary support	<b>0.98</b>	100.0% [C]
	final lining	-	0.0%
	steel staircase	-	0.0%
	concrete staircase	-	0.0%
US-UW17	excavation & temporary support	<b>1.70</b>	93.4%
	final lining	<b>1.41</b>	67.4%
	steel staircase	-	0.0%
UR15	excavation & temporary support	<b>1.14</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.22</b>	85.5%
UA13	excavation & temporary support	<b>1.16</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.29</b>	91.4%
UPR13	excavation & temporary support	<b>1.05</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.05</b>	87.6%
UL13	excavation & temporary support	<b>1.29</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.17</b>	89.6%
UL17	excavation & temporary support	<b>1.22</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.31</b>	91.4%
UA17	excavation & temporary support	<b>1.11</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.33</b>	94.8%
UPR17	excavation & temporary support	<b>1.06</b>	100.0% [C]
	final lining	<b>1.29</b>	109.8%
<b>SURFACE STRUCTURES</b>		<b>0.99</b>	<b>47.9%</b>
General Items		<b>1.04</b>	<b>63.6%</b>
Top Soil & Earthworks		<b>0.75</b>	<b>81.9%</b>
Roads & Networks		<b>0.94</b>	<b>50.4%</b>
SD17	civil works	<b>1.06</b>	1.5%
	architectural works	-	0.0%
SE17	civil works	-	0.0%
	architectural works	-	0.0%
SU17	civil works	-	0.0%
	architectural works	-	0.0%
SHM17	civil works	<b>1.23</b>	98.9%
	architectural works	<b>1.02</b>	48.9%
SF17	civil works	<b>1.15</b>	95.4%
	architectural works	<b>0.77</b>	60.7%
SHE17	civil works	-	0.0%
	architectural works	-	0.0%
SL	civil works	<b>1.33</b>	43.2%
	architectural works	<b>1.33</b>	43.2%

Figure. 8 CPI – Indice de Performance des Coûts (aperçu simplifié)

## 6 Synthèse du Retour d'expérience

Une synthèse du retour d'expérience est présentée ci-après :

**Tableau 1. Synthèse du retour d'expérience | Aspects gestion contractuelle**

Sujet	Ressources nécessaires côté maîtrise d'œuvre	Niveau d'impact sur les objectifs du Projet	Synthèse Rex & Améliorations possibles
<b>Gestion de projet</b>	Chef de projet disposant d'une certification « <i>Project Management Professional</i> » du PMI ou équivalente	++	Gestion contractuelle en mode « <i>FIDIC</i> » et gestion de projet sont intimement liées. Pour parler un langage commun (MOA-MOE notamment)
<b>Gestion du Contrat FIDIC</b>	Contract Manager (temps plein ou temps partiel), ou Chef de projet avec appui « juridique »	+	Les processus du Contrat FIDIC sont assez clairs et efficaces (« dynamiques »), et une fois en place ne nécessitent pas de sensibilité juridique particulière. Un support juridique mobilisable sans délai est néanmoins nécessaire pour les situations exceptionnelles, et pour les réclamations / « <i>determinations</i> » délicates
<b>Plan de Management des Risques</b>	Support méthodologique spécialisé au démarrage	+/-	Bilan un peu mitigé sur ce projet. A bien fonctionné en phase de conception, pour alimenter le BPU Risques. La méthodologie définie au Contrat de construction a été mise en œuvre, mais sans s'imposer de manière effective et concrète, sur ce projet de taille « moyenne ». Bien réfléchir à l'articulation contractuelle.
<b>Mécanisme d'ajustement des délais d'exécution</b>	Aucune ressource particulière	+/-	Dans le cas présent, avec des ouvrages non continus et relativement courts, des délais partiels, et des chemins critiques susceptibles de changer en cours de projet, le mécanisme est jugé d'un intérêt limité et doit être bien réfléchi pour ne pas être pris en défaut.
<b>Planning Entreprise (« Programme »)</b>	Support métier d'un planificateur	++	Pour ce type de projet une gestion rigoureuse du planning de l'Entreprise (« Programme » au sens du Contrat FIDIC), sous forme de diagramme de Gantt (logiciel Primavera ou équivalent) et planning chemin de fer (« Time Location diagram ») s'impose.

**Tableau 2. Synthèse du retour d'expérience | Aspects gestion des coûts (Cost Control)**

Sujet	Ressources nécessaires côté maîtrise d'œuvre	Niveau d'impact sur les objectifs du Projet	Synthèse Rex & Améliorations possibles
<b>BPU Risques</b>	« <i>Quantity Surveyor</i> »	++	La constitution d'un BPU « risques » est bien sûr un élément fort dans la maîtrise du projet pour les travaux en souterrain. Le règlement de la consultation et la stratégie associée est déterminante de ce point de vue. Dans le cas présent, les règles d'achat du CERN ne permettaient pas de mettre en œuvre des critères de notation technique et financière, ce qui a conduit à la « neutralisation » de certains prix unitaires pour risques.
<b>Règles générales de métrage</b> (« <i>Method of Measurement</i> »)	Formation au référentiel considéré avant la préparation du dossier de consultation	+	Usage recommandé dans un tel contexte multi-national. Le référentiel utilisé sur le projet pour les travaux souterrains (CESMM4) présente l'intérêt de fournir une structure prédéfinie pour les prix unitaires, et un « filet de secours » en cas de carence du Bordereau des prix. Il permet aussi, dans un contexte international, d'objectiver la « granularité » des prix unitaires, qui est très variable d'un pays à l'autre.
<b>Contrôle des coûts</b> (« <i>Cost Control</i> »)	Formation « <i>Project control</i> », « <i>EVM – Earned Value Management</i> »	++	Indicateurs de suivi des coûts (AC, BAC, EAC) mis en œuvre et très valorisant dans la relation maître d'ouvrage – maître d'œuvre. La fonction « <i>project control</i> » en général a représenté un équivalent temps plein dans le cadre du présent projet (côté maître d'œuvre).
<b>Optimisation du soutènement en cours de chantier</b>	Support technique (« <i>Site Engineer</i> ») en phase travaux, pour mener à bien les possibilités d'optimisation	++	Dans le cas présent les possibilités d'optimisation du soutènement étaient très significatives compte-tenu des bonnes conditions rencontrées. Sur des ouvrages courts et avec un planning contraint, il est nécessaire de bien identifier a priori les modalités d'adaptation du soutènement, notamment sous l'angle de la gestion des approvisionnements d'éléments de soutènements (cintres), pour ne pas « manquer » ces optimisations. La clause de Value-Engineering a été assez efficace. Elle pourrait être complétée par un mécanisme incitatif intéressant l'Entreprise à l'optimisation des quantités mises en œuvre.
<b>Optimisation des structures en cours de chantier</b>	Support technique (« <i>Site Engineer</i> ») en phase travaux, et capacité d'études (« <i>re-design</i> ») pour mener à bien les optimisations (« <i>back-analysis</i> »)	++	Les optimisations ont également porté sur le revêtement définitif, en fonction des résultats d'instrumentation. Des économies très substantielles de structure ont été réalisées, au prix d'une forte « mise en pression » du maître d'œuvre (équilibre à trouver entre valeur prévue des optimisations et risque contractuel si la modification retarde l'Entreprise). Réfléchir à un mécanisme incitatif intéressant l'Entreprise à l'optimisation des quantités mises en œuvre.

## 7 Conclusion

Le retour d'expérience présenté ci-avant confirme bien entendu l'importance des choix à faire par les maîtres d'ouvrages quant à la forme des Contrats de construction dans un contexte international / multinational.

Le facteur « culturel » entre maître d'ouvrage, maître d'œuvre et Entreprises de différentes nationalités constitue un défi qu'il ne faut pas négliger, tout particulièrement pour le maître d'œuvre en phase travaux.

La réflexion amont, entre le maître d'ouvrage et son ou ses maîtres d'œuvre, revêt donc un caractère essentiel, qui doit intervenir au moment opportun dans le déroulé du projet.

Par rapport à des projets « nationaux » français, cette expérience permet de mettre en exergue l'intérêt du Contrat FIDIC. Les adaptations apportées par le CERN et le maître d'œuvre au Contrat type « Red Book », et l'exécution de ce Contrat, sont globalement cohérentes avec les orientations du nouveau FIDIC « Emerald Book » paru en 2019 (« *Conditions of Contract for Underground Works designed by the Contractor according to the reference design by the Employer and the Geotechnical Baseline Report* »).

## 8 Références

---

<sup>1</sup> FIDIC (International Federation of Consulting Engineers) Red Book, Edition 1999. *Construction Contract 1st Ed. Conditions of Contract for Construction. For Building and Engineering Works designed by the Employer. General conditions*. A noter qu'une nouvelle Edition (2017) est parue depuis.

<sup>2</sup> FIDIC (International Federation of Consulting Engineers) "Emerald Book", *Conditions of Contract for Underground Works [Conditions of Contract for Underground Works designed by the Contractor according to the reference design by the Employer and the Geotechnical Baseline Report]*

<sup>3</sup> SIA 118/198:2007 (Norme suisse SN 507 198) (version disponible en anglais) *Civil Engineering | General conditions for Underground Construction*

<sup>4</sup> Fascicule 69 du CCTG (*Travaux en souterrain*), document annexé à l'arrêté du 30 mai 2012. Voir aussi CETU – *Guide d'application du Fascicule 69 du CCTG Travaux en souterrain*. Document d'information du CETU, déc. 2013

<sup>5</sup> Recommandations AFTES :

- GT32R2A1, 2012, *Characterisation of geological, hydrogeological and geotechnical uncertainties and risks*
- GT32R3F2, 2020, *Prise en compte des risques techniques dans les projets d'ouvrages souterrains en vue de la consultation des entreprises*

<sup>6</sup> CESMM4, ICE (Institution of Civil Engineers), *Civil Engineering Standard Method of Measurement*, Fourth edition, 2012

<sup>7</sup> PMI® (Project Management Institute), *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*, Sixth Edition (2017)

<sup>8</sup> Recommendation AFTES, GT25RA1, 2016, *Cost control and forms of contract*