



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

CERN - TS Department

EDMS Nr: 473740
Group reference: TS-SU

TS-Note-2004-029
5 May 2004

L'ALIGNEMENT DES ACCELERATEURS DU CERN: DANS QUEL CONTEXTE CONTRACTUEL ?

D. Missian, J.-P. Quesnel

Résumé

L'alignement des quelque 10'000 éléments répartis sur près de 60 km de lignes de faisceaux met en œuvre des techniques spécialement développées pour atteindre les précisions requises de positionnement dans des temps d'intervention les plus courts possibles. Pour palier l'accroissement considérable de travail lié à la construction du LHC, le groupe SU (« Métrologie des Grandes Dimensions ») a été poussé à négocier deux contrats de services, l'un pour assurer la métrologie interne des cryo-aimants, l'autre pour assurer les travaux de géométrie liés au positionnement. L'analyse du travail à réaliser et l'écriture des spécifications seront présentées, ainsi que les limites du système qui apparaissent après une année de fonctionnement des contrats.

**Presented at the TS Workshop
Archamps, France, May 4 – May 6, 2004**

1 INTRODUCTION

L'alignement des quelque 10'000 éléments répartis sur près de 60 km de lignes de faisceaux met en œuvre des techniques spécialement développées pour atteindre les précisions requises de positionnement dans des temps d'intervention les plus courts possibles. Pour palier l'accroissement considérable de travail lié à la construction du LHC, le groupe SU (« Métrologie des Grandes Dimensions ») a été poussé à négocier deux contrats de services, l'un pour assurer la métrologie interne des cryo-aimants, l'autre pour assurer les travaux de géométrie liés au positionnement de toutes les machines du CERN.

Une analyse détaillée des caractéristiques de ce travail très spécifique a conduit à une identification des tâches qu'il semblait possible de réaliser en obligation de résultat, ainsi qu'à une définition des conditions de réalisation. Pour les travaux du projet LHC, des spécifications techniques détaillées ainsi que des procédures concernant chaque travail, approuvées dans la baseline du projet, ont été jointes à l'appel d'offre.

Après une année de fonctionnement des contrats, un premier bilan montre les aspects tant positifs que négatifs du système.

2 L'ALIGNEMENT DES COMPOSANTS D'UN ACCÉLÉRATEUR

2.1 Définition des tâches

Le travail d'alignement d'un accélérateur de particules commence en fait bien avant que les premiers éléments arrivent dans le tunnel. Une des caractéristiques de notre travail est en effet de se situer dès le début du projet, pour aider les concepteurs à définir la géométrie des trajectoires et à les localiser par rapport à l'environnement et aux autres machines.

Vient ensuite la définition d'un réseau géodésique, le plus précis possible. Ce réseau est constitué d'un ensemble de points répartis sur l'ensemble du site concerné par le projet, facilement utilisables pour aider aux implantations. L'emplacement des points dépend de leur utilisation future et de la topographie du site. De la qualité de ce canevas dépendra directement la précision absolue finale de l'alignement. Le réseau géodésique du CERN s'étend sur le Pays de Gex jusqu'au Mont-Mourex, et à Crozet, et en Suisse jusqu'au Grand-Saconnex.

Pour tous les nouveaux ouvrages jusqu'au LEP, le groupe SU était alors impliqué dans la définition géométrique des points caractéristiques des constructions. Maintenant, le groupe SU a fourni aux bureaux d'études les algorithmes nécessaires au calcul des coordonnées des axes des ouvrages et points d'implantation. Cela permet de définir complètement les ouvrages par CAO, ce qui n'est pas sans inconvénients pour SU car, en tant que vérificateurs des coordonnées de définition, nous n'avons plus les hypothèses de départ.

Pour les ouvrages existants, le groupe est fortement mis à contribution pour fournir la position réelle des ouvrages (relevés tel que construits).

Dès la mise à disposition des ouvrages, la première activité consiste à transférer en souterrain la géométrie de surface issue du réseau géodésique, sur des points préalablement choisis dans le tunnel. Pour le LHC, quelques 800 points sont installés dans le sol du tunnel. Leur position a été déterminée à partir des quadrupôles du LEP, avant le démontage de ceux-ci, par un ensemble de mesures complexes. Pour une machine existante, ce réseau de référence est constitué par les mires des aimants eux-mêmes (cas du SPS), ou des piliers (cas du PS). Il est vérifié périodiquement. C'est à partir de ces points de référence que toutes les implantations, alignements ou contrôles d'ouvrages sont ensuite réalisés.

Les tracés d'implantation des éléments sont fondamentaux pour tous les intervenants dans le tunnel. Ils servent en effet aux câbleurs, tuyauteurs, installateurs. Aussi sont-ils réalisés avant toute intervention dans le tunnel. Cette étape permet aussi de compléter la connaissance géométrique du sol de l'ouvrage, par comparaison entre cotes théoriques et cotes relevées d'implantation.

En parallèle à ces travaux, le groupe SU est impliqué dans la préparation des aimants. Ainsi, il contribue aux méthodes de « fiducialisation ». On appelle fiducialisation d'un aimant l'opération qui consiste à équiper celui-ci de mires d'alignement et à déterminer leur position en trois dimensions par rapport à la trajectoire théorique du faisceau dans l'élément. Elles sont utilisées lors de l'alignement des aimants. Pour les aimants chauds, le groupe SU intervient en tant que conseil, définit la méthode si nécessaire, et le travail est normalement réalisé ensuite sous la responsabilité des groupes concernés. Il n'intervient que si des méthodes traditionnelles d'atelier ne peuvent être appliquées. Pour les cryo-aimants du LHC, le groupe SU est fortement impliqué : il réalise les mesures de rectitudes des dipôles, les mesures de fiducialisation, les contrôles de stabilité des masses froides dans leurs cryostats, les mesures de cartographie des extrémités des aimants qui permettront de s'assurer que deux aimants voisins pourront être connectés, ainsi que les mesures nécessaires au montage des BPM sur les SSS. A l'issue de ce travail, les positions théoriques de chaque mire (coordonnées X, Y et H) sont calculées en associant les données des trajectoires théoriques et les mesures de fiducialisation.

Les travaux préparatoires étant réalisés, l'installation proprement dite peut commencer. Chaque aimant est aligné individuellement depuis le réseau de référence. C'est ce que l'on appelle le 1^{er} alignement, ou le pré-alignement. L'opération consiste à déplacer l'aimant avec ses systèmes de réglage de telle sorte que chaque mire soit à sa position théorique dans l'espace à la fin du processus. La rotation transversale de l'aimant -appelée tilt- est généralement contrôlée par une jauge d'inclinaison. La précision de positionnement dans l'espace est de 0.2 mm (r.m.s.).

Lorsque les aimants sont tous alignés et qu'ils ont été interconnectés, l'alignement final commence. Cette opération, appelée aussi « lissage » consiste à effacer le plus possible les erreurs d'alignement relatives entre aimants d'une même zone. On mesure pour cela la position relative des aimants, en radial et en vertical, on calcule leur position, et on calcule dans une fenêtre glissante la plus longue possible (1 km en vertical) les écarts à la position théorique par rapport à un polynôme le plus tendu possible. Cette opération peut être assimilée à celle d'un menuisier utilisant une varlope pour dresser une pièce de bois. Les écarts importants donnent lieu à un réalignement, suivi d'un contrôle, et le processus est itératif. Pour le LHC, les aimants devront être au moins partiellement refroidis pour que cette opération puisse avoir lieu, de façon à intégrer les contraintes mécaniques dues au vide et au froid. La précision relative globale à la fin du processus doit être 0.15 mm (r.m.s) ou mieux en radial et en vertical. A la fin des opérations de lissage, les éléments intermédiaires peuvent devoir être réalignés, puis enfin la machine est considérée comme alignée.

Les travaux de maintenance sur les machines existantes se retrouvent en tout ou partie des tâches décrites brièvement ci-dessus. Sur les machines installées, le réseau géodésique souterrain de référence est généralement oublié, la vraie référence devenant la machine elle-même. C'est le cas du SPS, c'était le cas du LEP, ce sera celui du LHC. Pour les machines plus petites comme le PS, le réseau de base conserve toute son importance à cause des dimensions faibles et de la confusion entre précision absolue et précision relative.

S'ajoutent à toutes ces tâches des activités bien spéciales, à réaliser sur des éléments qui requièrent des précisions d'alignement très importantes ou qui sont situés dans des endroits spécifiques. Les LSS du LHC sont remplies de tels éléments qui « sortent de l'ordinaire ». Au PS, à cause de leur disparité, tous les éléments autres que les unités magnétiques de l'anneau peuvent être considérés comme des éléments spéciaux. Pour ces éléments, le groupe applique les techniques non standard qui conviennent le mieux. Il est amené pour le CLIC, pour les aimants low-beta du LHC, à étudier des techniques d'alignement qui lui permettent d'obtenir des précisions de l'ordre du 1 µm dans certains cas [1].

2.2 Caractéristiques des activités

2.2.1 Dimension et diversité des installations

Il y a environ 60 km de lignes de faisceaux au CERN, et quelque 60'000 points dont il faut maintenir un positionnement correct. S'il existe depuis quelques années déjà une tentative de standardisation des procédures d'alignement, il existera toujours de nombreux éléments, dans les anciennes machines, pour lesquels ces méthodes standard ne peuvent s'appliquer, et pour lesquels chaque intervention est

un cas spécial. Chaque type d'élément est associé à un ou plusieurs types de système de réglage ou de mire d'alignement différent. A titre d'exemple, il y a environ 100 gabarits d'alignement différent pour le SPS. Une bonne moitié des machines existantes souffre de ce problème. De plus, les nombreuses modifications de configuration des machines rendent rapidement les éventuelles procédures d'alignement obsolètes.

Cependant, un certain nombre de tâches sont très répétitives. Dans une machine comme le SPS, par exemple, le lissage vertical ou radial des quadrupôles est réalisé par un type de mesure qui se répète sur les quelques 7 km de l'anneau, à l'exception des sections droites longues. De même, l'opération de marquage au sol des éléments dans le tunnel du LHC a été une tâche ô combien répétitive.

2.2.2 *Précision*

On parle couramment de précisions l'ordre de 0.1 mm (r.m.s.), pour nos alignements. C'est la précision que des spécialistes en métrologie obtiennent normalement dans un local climatisé sur une longueur de quelques mètres. Nous obtenons une telle précision sur des distances de 150 m dans des conditions de chantier. Nous sommes parfois amenés à traquer les quelques microns sur de telles distances, pour les zones d'insertion low-beta par exemple. Les cryoaimants du LHC, qui mesurent 17 m de longueur, sont mesurés à quelques 0.01 mm près.

Certes, certaines opérations, comme les tracés par exemple, nécessitent une précision moindre, de l'ordre de 1 ou 2 mm, mais un certain nombre des mesures réalisées à ce moment servent aussi à déceler des déformations ou des anomalies éventuelles des réseaux de références et doivent donc quand même être aussi particulièrement soignées.

2.2.3 *Les précautions à prendre pour les mesures*

Pour atteindre les précisions recherchées, une attention toute particulière doit être apportée au contexte dans lequel sont réalisées les mesures. Celles-ci sont en effet extrêmement dépendantes des conditions météorologiques qui affectent l'indice de l'air, par exemple. Chaque détail compte. Les variations de l'atmosphère, les sources de chaleur parasites, les champs magnétiques très faibles, les effets de bord, sont autant de sources d'erreurs car ils influencent aussi bien les mesures que les instruments et les objets à mesurer eux-mêmes. Dans les travaux classiques de la topographie où même de la topométrie fine, ces éléments peuvent souvent être négligés et leur influence est moindre, eu égard aux précisions recherchées.

Pour garantir la qualité des visées, les mesures doivent toujours être redondantes et on essaye d'utiliser des méthodes sensibles à des phénomènes différents pour tenter de mettre en évidence les erreurs parasites. C'est pourquoi nous recherchons toujours les meilleures combinaisons de mesures.

2.2.4 *Une instrumentation spéciale*

Au début du CERN, les techniques métrologiques étaient basées sur les principes des mesures d'atelier et sur l'optique. La mesure d'une base géodésique au ruban d'invar était très longue et demandait beaucoup de personnel. Très vite est apparue la nécessité de développer une instrumentation adaptée aux besoins du CERN, précise et rapide d'emploi. C'est ainsi que naquirent le DISTINVAR, appareil de mesures de distances, encore aujourd'hui le seul instrument capable de mesurer une distance de 50 m à 0.02 mm près, et les techniques d'alignement au fil tendu, utilisées pour tous les alignements dans les machines. Il est apparu aussi nécessaire d'établir un standard pour la définition des points et le centrage des instruments et des mires sur ces points.

On trouve maintenant une bonne part de notre instrumentation dans le commerce. Ainsi, les modèles les plus précis des théodolites, distancemètres et niveaux optiques, qui sont des instruments classiques de la profession, sont couramment utilisés. Il faut cependant noter que la précision des théodolites et niveaux n'a pratiquement pas été améliorée depuis 30 ans, seul un confort d'utilisation et une fiabilité, liés à des fonctionnalités d'automatisme de mesures ayant été introduits.

Aussi, le groupe SU apporte-t-il un très grand soin à la connaissance de la précision réelle de chaque instrument qu'il acquiert. Dans certains cas, les instruments les plus précis sont triés chez le constructeur. Ils sont aussi parfois modifiés par nos soins, pour garantir des centrages forcés précis,

par exemple. Chaque instrument est testé et régulièrement étalonné. Le groupe possède aussi certains instruments qui sont très peu courants dans les entreprises. Le MEKOMETRE, instrument de mesures de distances n'est aujourd'hui plus fabriqué mais reste l'instrument de mesures de distances jusqu'à 1 km le plus précis. Nous l'utilisons intensivement pour mesurer les réseaux géodésiques de référence. Le gyroscope GYROMAT est le seul gyrothéodolite capable de donner des précisions d'orientation de 10 cc (r.m.s.). Les services de génie civil du CERN ont eu beaucoup de peine à trouver une entreprise capable de mesurer les orientations nécessaires lors du percement des tunnels d'injection TI2 et TI8. Le réseau géodésique souterrain de référence du LHC est contrôlé régulièrement avec cet instrument.

Pour vérifier ses instruments, le groupe SU dispose d'une base d'étalonnage interférométrique. Il est possible d'y étalonner tous les instruments de mesures de distances, les mires de nivellement, les barres de mise à l'échelle pour les mesures photogrammétriques, les systèmes de mesures d'écart à un alignement. Pour cette dernière application, elle est unique en Europe.

2.2.5 *Un travail d'analyse permanent*

Une des caractéristiques principales de notre travail est que ses résultats sont invisibles à l'oeil. En effet, quelle est la différence apparente entre un aimant aligné ou non aligné, entre des points mesurés ou non ? Il n'y en a pas. Aussi, notre travail ne sera-t-il jugé que par le faisceau et par la qualité de l'orbite, tout à la fin du projet. Il n'y a aucune fourniture de matériel dans notre travail, qui ne nécessite que matière grise et main d'oeuvre.

Il est en conséquence fondamental de vérifier, contrôler, et analyser les mesures et leurs paramètres à chaque phase du travail à réaliser. Ce travail consiste à rechercher et mettre en évidence les moindres erreurs de mesures, systématiques ou aléatoires. Etant donné les précisions recherchées, même de très petites erreurs peuvent avoir une influence importante sur le résultat final d'une opération. Ainsi, une erreur systématique de 0.1 mm sur les mesures de distances réalisées entre 2 puits peut, accumulée, modifier la position radiale de la figure de 15 mm. Nous vivons là dans un monde où $1 + 1$ n'est pas égal à 2. Aucun point n'est fixe, les incertitudes de mesures sont omniprésentes. Si les fautes doivent être corrigées, les erreurs, elles, sont inévitables et parfois beaucoup plus difficiles à détecter.

Le choix des hypothèses de calcul est aussi fondamental. C'est toujours un compromis entre le résultat d'une compensation des mesures idéale, et l'obligation de respecter les contraintes de la géométrie globale du site, que sont par exemple l'homogénéité des figures, les liens entre les machines ou parties de machines que l'on ne veut pas affecter. Certaines considérations peuvent paraître bien éloignées des mesures. C'est le cas pour les lissages des machines, qui se discutent avec les physiciens, par exemple.

2.3 **Les entreprises**

Les travaux qui viennent d'être décrits ne sont bien sûr réalisés nulle part ailleurs en dehors des autres laboratoires de physique des particules que sont DESY, FERMILAB ou le SLAC par exemple. Pourtant, les caractéristiques énoncées ci-dessus sont applicables dans les contrôles des barrages hydroélectriques, des grandes antennes, l'aéronautique. S'il existe quelques cabinets de géomètres ou firmes qui exercent dans le monde des mesures industrielles, l'ampleur des travaux qu'ils réalisent est bien moindre, les précisions rapportées aux dimensions ne sont pas comparables, et seule une petite partie du personnel de ces firmes est affectée aux mesures métrologiques. Le marché est très limité dans ce domaine.

3 **QUE PEUT-ON CONFIER A UNE ENTREPRISE ?**

Il est donc évident qu'il est fort hasardeux de confier l'alignement des machines du CERN à une entreprise, celle-ci ne pouvant avoir aucune expérience globale dans ce genre d'activité. Nous l'avons fait, nécessairement, depuis le SPS, par des contrats de prestation de service tels que définis et administrés précédemment. Néanmoins, dans le cadre nouveau de l'obligation de résultat et des contrats orientés « objet », une solution se devait d'être trouvée.

Une analyse détaillée des travaux à réaliser, associée aux risques encourus pour le CERN et le projet, a permis de dégager un certain nombre de tâches élémentaires qu'il était possible de confier en obligation de résultat à une entreprise. Pour cela, chaque tâche devait être définissable selon les critères suivants, nécessaires à sa spécification :

- Elle est quantifiable.
- Elle est définie dans le temps, et localisée.
- Elle est exécutée dans un environnement bien défini, selon des conditions de travail bien définies.
- La qualité du travail réalisé peut être vérifiée sans ambiguïté par l'entreprise, indépendamment des hypothèses de calcul choisies.
- Enfin le travail doit être suffisamment répétitif pour justifier une formation par le CERN.

Les travaux d'analyse, ainsi que les choix des hypothèses des calculs, sont toujours réalisés par le CERN.

Un ensemble de tâches élémentaires a donc été identifié, et, pour les raisons citées précédemment, il a été convenu que tout le matériel à utiliser serait fourni par le CERN.

Pour le LHC, les tâches retenues sont les suivantes :

- La mesure des réseaux de référence ;
- Les marquages au sol ;
- L'alignement des vérins supports des cryo-aimants dans les arcs ;
- Le contrôle de la position des jumpers de la QRL ;
- Le premier alignement des aimants dans les arcs et les lignes de transfert TI2 et TI8 ;
- Le lissage des aimants (alignement final) ;
- Les opérations réalisées au laser tracker, pour les fiducialisations, mesures de cartographie des extrémité des cryo-aimants et d'assemblage des BPM sur les SSS.

Les travaux d'alignement dans les LSS, de même que dans toutes les zones de raccordement entre machines sont exclus de l'obligation de résultat. Pour le complexe SPS, seul le lissage des quadrupôles de la machine a pu être défini comme tel, les autres travaux étant beaucoup trop disparates. Pour le complexe PS, aucune tâche n'a pu être définie.

Chaque tâche fait l'objet d'une spécification du type « ES » tel que définie dans le PAQ du LHC, approuvée et appartenant à la baseline du projet dans le cas du LHC. Ces documents ont été préparés par l'ensemble des personnes du groupe, en fonction de leurs connaissances dans chaque domaine, et de leur tâche future et probable de superviseur. On trouve systématiquement dans ces documents une description de ce qui doit être réalisé, une description des éléments liés aux objets à aligner – s'il y a lieu – servant à réaliser le travail, un descriptif des données théoriques nécessaires, un descriptif des conditions dans lesquelles doit être réalisé le travail, les précisions à obtenir, le partage des responsabilités entre l'entreprise et le CERN. En plus une procédure a été rédigée par tâche. Ces documents sont aussi intégrés dans la baseline dans le cas du LHC. Chaque procédure définit les qualifications professionnelles requises, le matériel nécessaire mis à disposition par le CERN, la méthode à utiliser, les contrôles à réaliser par l'entreprise, les contrôles à réaliser par le CERN, et les critères d'acceptation du travail.

Le CERN intervient très fréquemment dans le processus de contrôle des mesures, à cause des analyses fines qui ne peuvent être confiées à l'entreprise, pour des raisons évidentes. La figure 1 montre les opérations unitaires réalisées pour le réaligement des quadrupôles de la machine SPS. On voit ainsi la très forte interaction entre l'entreprise et le CERN.

4 ASPECTS LIÉS À LA QUALITÉ

4.1 Equipement

Etant donné que le CERN confie à l'entreprise les équipements nécessaires à la réalisation des travaux une procédure de prêt, associée à une procédure de vérification contrôle des équipements, a été mise sur pied. Cette procédure est étendue à la réception des équipements neufs, à leur suivi et entretien.

4.2 Données

Toutes les données nécessaires aux travaux d'alignement sont gérées dans la base de données SURVEY du groupe SU. Cette base de données, qui a été mise en place dès 1985, rassemble les données géométriques de toutes les machines du CERN : les définitions des orbites théoriques dans le système de coordonnées générales du CERN, les coordonnées théoriques des mires d'alignement, toutes les mesures métrologiques ou géodésiques réalisées, et les résultats des mesures, à savoir les coordonnées réelles des points de référence, et les positions réelles des éléments eux mêmes. Un véritable historique des travaux réalisé est à disposition pour permettre les analyses de stabilités de sols, les analyses d'orbites des faisceaux, etc.

Dans ce contexte, l'entreprise a accès à cette base de données. C'est là qu'elle trouve toutes les données nécessaires à son travail, et qu'elle décharge tous les fichiers de mesures prises sur le terrain. Le groupe SU analyse les données à partir de SURVEY, et y charge aussi les résultats de ses calculs.

Les mesures et résultats des travaux de préparation des cryo-aimants sont enregistrés dans MTF. Certaines mesures et opérations sont systématiquement vérifiées par le groupe SU.

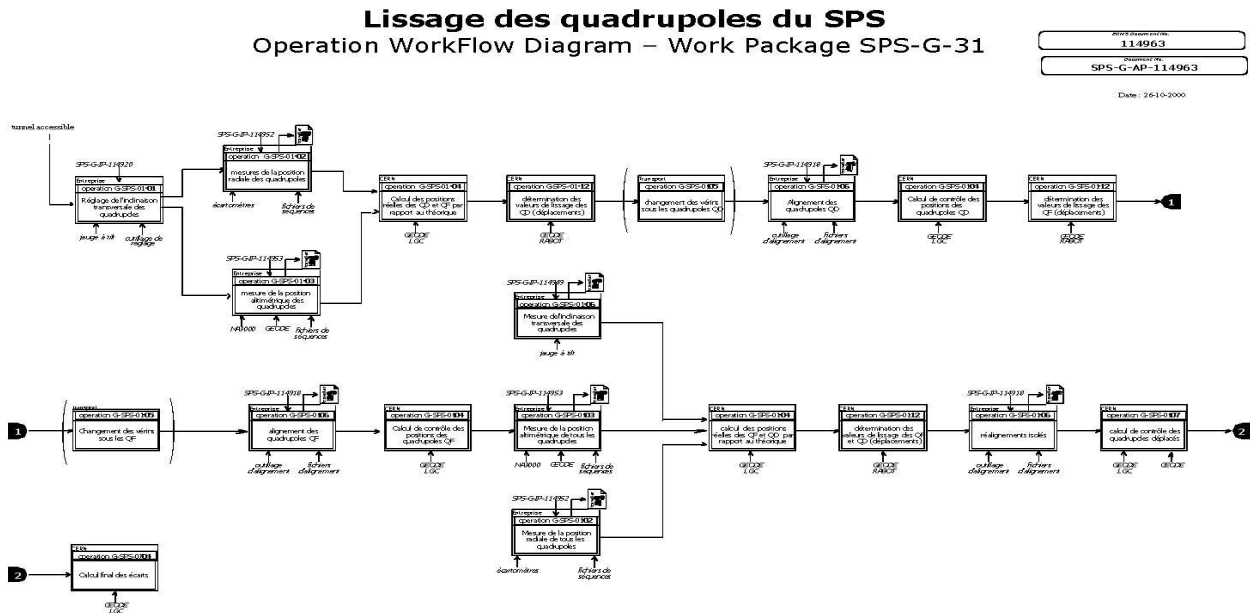


Figure 1: Lissage des quadrupôles du SPS

5 APRES UN AN DE FONCTIONNEMENT

5.1 Les travaux réalisés

Un contrat a été passé avec le groupement GEOTOP-HALLER-HYPARC pour réaliser les travaux d'alignement il y a un an. Ce groupement étant celui qui avait le contrat de service précédent avec le groupe SU, aucune formation spécifique n'a eu à être dispensée, et le personnel est déjà très au courant de toutes les techniques, logiciels, lieux, etc.

Les travaux réalisés sous ce nouveau contrat ont été jusqu'à maintenant principalement des travaux préparatoires aux installations, les tracés au sol, et ce genre de travail ne présente guère de problème. Les mesures complémentaires des réseaux géodésiques ont aussi été réalisées avec efficacité. L'alignement des aimants de la ligne TI8 a commencé.

Pour les travaux de fiducialisation, un contrat a été attribué en novembre 2003 au groupement SETIS, plus spécialisé dans les travaux de métrologie à courte distance, et en particulier familier avec l'utilisation des laser trackers. Les aimants à mesurer commencent seulement maintenant à être produits à la cadence prévue, et seulement pour un certain type d'activité.

5.2 Bilan

Globalement, nous sommes étroitement dépendants des autres chantiers et de leur organisation. Les délais contractuels de commande de 1 mois, sauf pour les travaux conséquents de préparation comme les marquages au sol, ne peuvent être respectés, et les retards du projet génèrent de facto une réduction des volumes de travail qui se traduit par un manque à gagner pour les entreprises.

En ce qui concerne l'alignement des aimants, les travaux réalisés en ce début de contrat étaient donc principalement des travaux préparatoires, qui dépendent très peu des autres corps de métier. Aucune non conformité n'a été notifiée sur ces travaux qui précèdent les alignements. Les travaux doivent cependant être préparés minutieusement par le CERN avant leur réalisation. La planification des interventions, la préparation des moyens de transport dans le tunnel, les aspects sécurité, la préparation des équipements de mesures, des logiciels de terrain, des outils de gestion des données, et enfin des données théoriques réclament un soin tout particulier et conditionnent le succès du travail. La surveillance des chantiers n'a pas posé de problème particulier, l'entreprise étant quasiment seule dans le tunnel.

L'alignement des composants de la ligne TI8 a commencé depuis janvier. Le travail est maintenant étroitement dépendant des équipes de transport, de pose des supports, du vide, des responsables des aimants, de la mise ou non à disposition des informations théoriques nécessaires. Nous subissons pleinement tous les problèmes rencontrés à l'installation (pieds d'aimants mal centrés, mires mal posées sur les aimants, cadences de pose non conformes aux prévisions, chantiers déplacés, plans faux...etc). Chaque problème, chaque détail, peut devenir très facilement une source de conflit car il y a en permanence des modifications par rapport aux conditions initiales. Le seul intérêt d'un tarif forfaitaire est alors d'obliger l'entreprise à respecter ses cadences estimées au départ. C'est certainement inutile pour une entreprise honnête, c'est risqué pour le CERN étant donné qu'aucune entreprise ayant déjà travaillé pour le CERN n'a jamais eu à réaliser ce type de travail, en ignore toutes ses caractéristiques, et peut être tentée de se rattraper à tout moment.

Cela oblige aussi à un suivi très rapproché des travaux réalisés. En plus des personnes chargées des analyses et du contrôle qualité, une personne est ainsi occupée à temps plein pour suivre les travaux du TI8, résoudre les problèmes, contacter les responsables des autres corps de métiers. Ce travail était auparavant réalisé directement par les personnes elles-mêmes qui alignaient les aimants.

Le partage nécessaire des tâches est aussi frustrant pour les personnes responsables de l'entreprise qui, il faut l'admettre, connaissent bien leur travail depuis 7 ans que nous travaillons ensemble. Le travail de calcul gagnerait à être réalisé conjointement avec l'entreprise. Ces personnes connaissent en effet mieux que quiconque dans quelles conditions ont été réalisées les mesures sur le terrain, ce qui est une grande aide au calcul. Dans ce système, chacun a un peu l'impression d'être le larbin de l'autre. L'entreprise considère qu'elle fait le « sale » travail de terrain, avec ses nuisances – travail dans l'obscurité, la poussière, le bruit, etc. et que le CERN conserve le travail valorisant de

calcul, d'analyse, d'organisation. Les responsables CERN considèrent parfois qu'ils sont au service de l'entreprise, pour leur garantir leurs conditions matérielles de travail. Mais la mise en concurrence des entreprises ne permettait pas, bien évidemment, de mettre un autre système sur pied.

Le fait que les techniciens CERN ne participent pratiquement plus aux mesures est un inconvénient majeur du système. A terme, si nous ne préservons pas certains travaux pour eux, ils perdront leur technicité, leur sens de la mesure, et seront incapables de spécifier un travail ou l'enseigner à une nouvelle entreprise éventuelle. Ce sera alors, malgré de bonnes connaissances théoriques sur le sujet, un très grand retour en arrière, associé à des résultats nuls.

Le contrat pour les mesures au laser tracker des cryo-aimants, souffre du manque d'aimants à mesurer, et du trop petit volume de travail. Cette activité est très fortement incluse dans un processus de fabrication qui se veut à flux tendus, avec néanmoins de nombreux changements de programmes au jour le jour et imprévisibles, des travaux imprévus complémentaires qu'il faut réaliser, des décalages horaires dans les mises à disposition des aimants, etc. Tous ces aspects, auxquels il convient d'ajouter de fréquentes perturbations des mesures par des phénomènes externes (transport ROCLA à proximité d'un chantier de mesures en cours par exemple), rendent le suivi très lourd et le contexte conflictuel.

Indépendamment des aspects contractuels, un point très positif du système est par contre le fait d'avoir dû écrire tous les documents nécessaires à l'appel d'offre. Chaque travail a été analysé, les conditions de réalisations sont connues et acceptées par tous les acteurs de l'installation de la machine, ce qui est absolument nécessaire pour une bonne coordination des activités. Chacun a pu apporter ses connaissances et son expertise dans la rédaction de ces documents, contribuant par là même à la création indirecte d'une documentation, d'un mode d'emploi, qui pourrait s'intituler « Aligner un nouvel accélérateur de particules : la recette ». Certes, des modifications seront apportées, et le modèle rédigé ne peut être qu'une base de départ. Il regroupe cependant beaucoup de l'expérience acquise au fil des nombreuses années grâce à une pratique permanente dans ce domaine, et constitue à ce titre un précieux élément pour la transmission des connaissances.

6 CONCLUSION

Il est légitime de se poser la question de l'intérêt d'avoir confié les travaux liés à l'alignement des accélérateurs des particules du CERN à des entreprises, et ce n'est pas par plaisir que le groupe SU l'a partiellement fait.

Afin de ne pas perdre le bénéfice de 40 ans d'expérience dans notre domaine, la mise en compétition d'entreprises pour un travail à réaliser en obligation de résultat et pour lequel elles n'ont pas d'expérience réelle, a conduit à spécifier au-delà de ce qu'il conviendrait normalement de faire, Aucune initiative n'est alors laissée à l'entreprise, qui se trouve de fait rangée au niveau exécutant. Ceci peut conduire à une frustration légitime, alors qu'une des grandes difficultés pour réaliser le projet sera de maintenir le moral des troupes tout au long des 27 km du LHC.

Le suivi et contrôle des travaux, la gestion des contrats, génèrent un surcroît global important du travail à accomplir qui doit aussi être considéré en terme de coûts, rendant alors le bénéfice de la méthode aléatoire.

De plus, il est impératif que le personnel du groupe conserve sa technicité, ne serait-ce que pour rester capable de spécifier les travaux et transmettre les techniques de mesures. Pour ce faire, il est indispensable qu'il continue à réaliser lui-même des mesures sur le terrain et ne se limite pas à la préparation des équipements, au suivi, à l'analyse ni au calcul.

Notre activité nous conduit à fournir une prestation essentiellement intellectuelle, et les spécifications initiales évolueront inévitablement pour s'adapter en permanence aux réalités des chantiers d'installation. L'obligation de résultat n'est alors peut-être pas le moyen le plus simple et le plus économique pour obtenir le bon résultat.

Pour la construction du LHC, il nous faudra nous accommoder du système mis en place. Les travaux de maintenance qui suivront, en dehors des grands travaux de lissage des machines,

augmenteront inévitablement la part réalisée en dépenses contrôlées, à moins que d'autres solutions plus adaptées ne soient trouvées.

7 REFERENCES

- [1] Micrometric alignment metrology: means, developments and applications. H. Mainaud TS-Note-2004-038