

pont du storebaelt danemark

montage du tablier suspendu

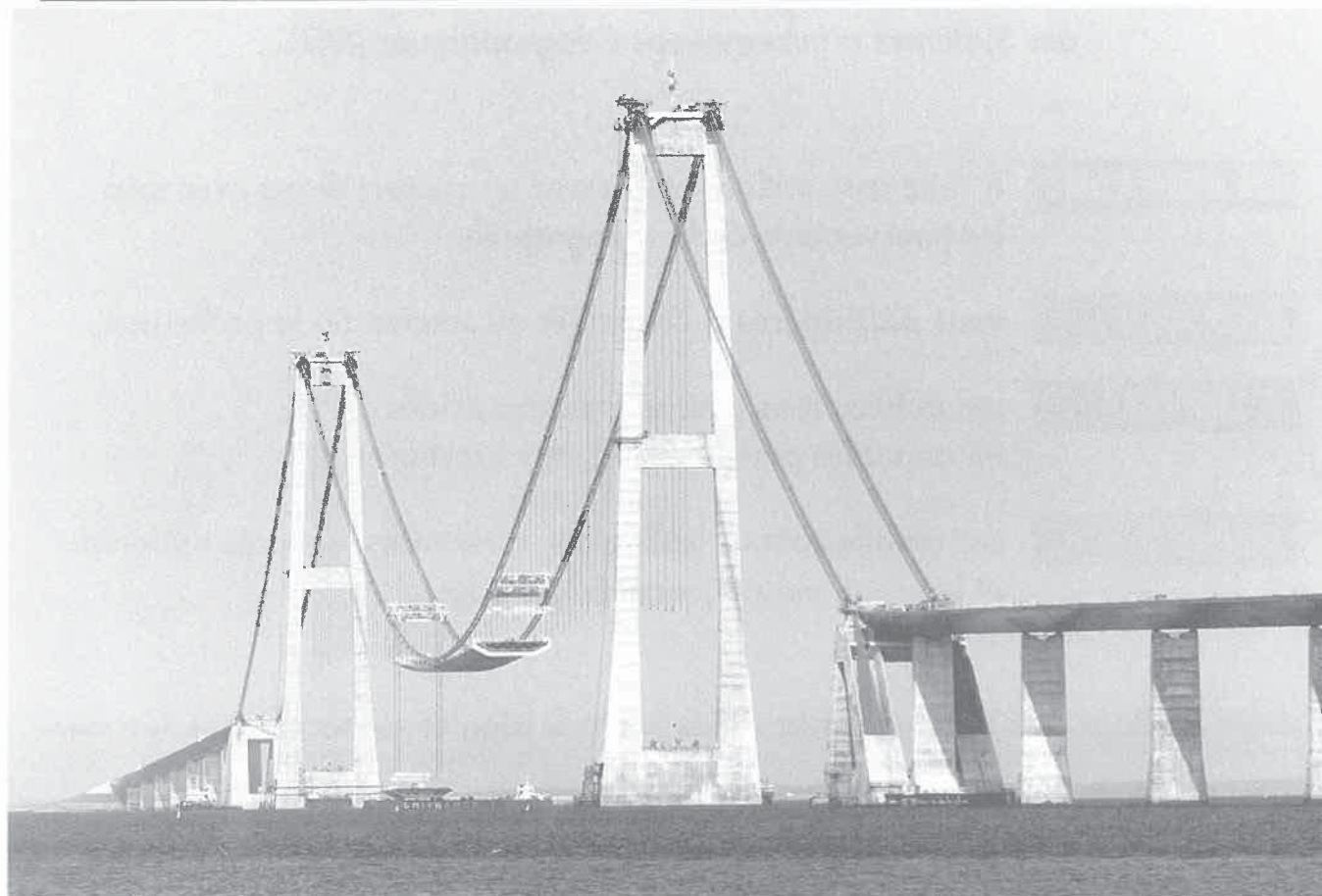
Nicolas Brisset (GE - responsable service topométrie - GEC - Alsthom)
Jean-Philippe Rodrigues (ing. ESGT - GEC - Alsthom)

Le point de vue du client par M. Francis Rouvillain

MSc Technical Adviser

COWI Consulting Engineers and Planners A/S. (COWI consulting est, avec d'autres partenaires, le concepteur du pont et fournit l'assistance technique au maître d'ouvrage pendant la construction)

Dans ses articles des numéros 66 et 71 de « XYZ », Nicolas Brisset vous a exposé très clairement les problèmes posés au service topométrie en charge de la géométrie des ouvrages en construction pour la traversée du Storebaelt au Danemark. Ces articles commentaient principalement les travaux relatifs aux travées d'approche et au tissage des câbles porteurs. Dans ce qui va suivre, ce sont les aspects topométriques particuliers en relation avec le montage du tablier suspendu qui seront abordés. Avant de lui céder la place, je voudrais revenir sur quelques réflexions importantes mentionnées dans le numéro 71 qui sont les conditions de travail, les contraintes sur la précision des mesures imposées par les spécifications et dépendantes de la nature de l'ouvrage, et, pour finir, les relations client-entrepreneur. En tant que représentant du client dans les services techniques, je voudrais y ajouter le point de vue de celui-ci qui est valable pour les trois articles en question.

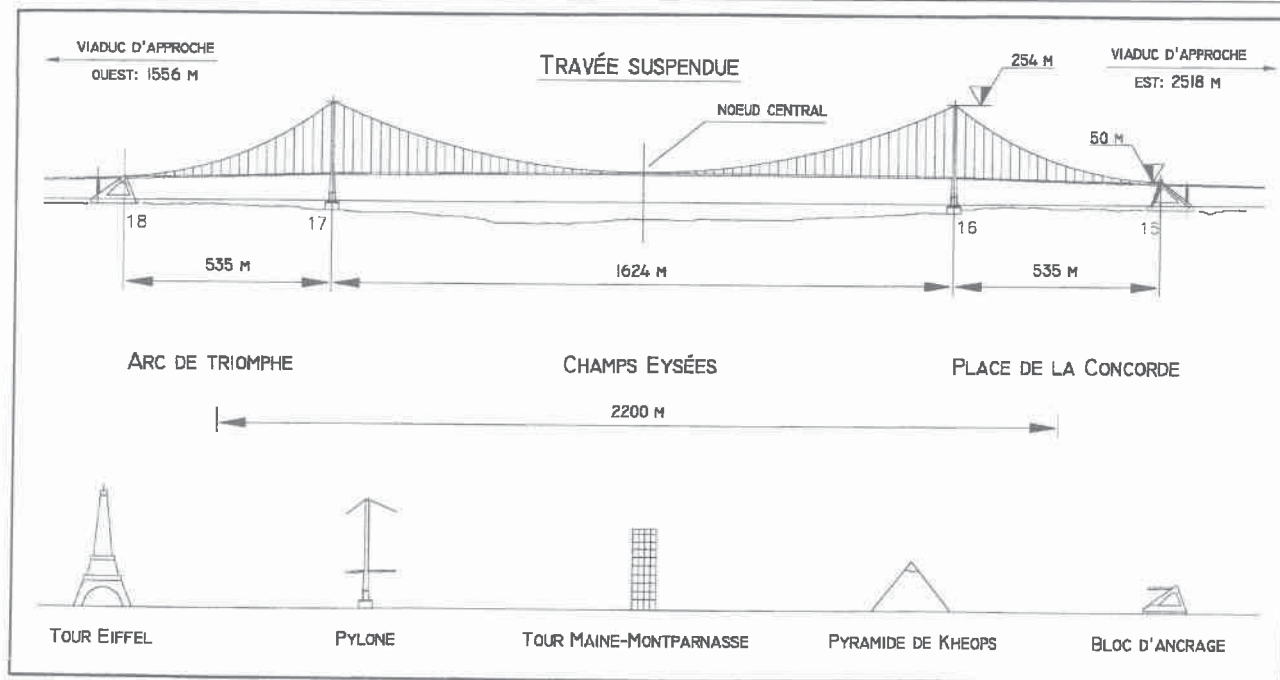


Un pont suspendu est un ouvrage très flexible et toujours « vivant » où toutes les variations des effets (vent, température, charges provisoires ou permanentes) entraînent parfois des changements importants dans la géométrie. Le but est, bien sûr, d'obtenir la configuration géométrique finale imposée par les spécifications. Pour cela, il faut faire en permanence un compte à rebours et prévoir les conséquences du point de vue géométrique de dispositions prises très longtemps à l'avance. Un oubli ou une erreur peut avoir des conséquences extrêmement graves. Il faut donc préparer la mission dans tous ses détails avec l'appui des responsables des autres activités majeures sur l'ouvrage (séquences de montage, distribution des charges, activités parallèles qui peuvent modifier la géométrie, etc.).

Une deuxième condition est d'être en mesure de réaliser les relevés avec la qualité et la précision requises pour obtenir le résultat global escompté sur l'ouvrage final. Cela demande beaucoup de préparation (procédures), des équipements adéquats et surtout un personnel qualifié qui sait ce qu'il doit faire et qui le fait.

Un troisième aspect est la confiance du client vis-à-vis de l'entrepreneur. C'est un point extrêmement important. L'équipe topométrique obtient cette confiance en présentant des méthodes et des résultats qui démontrent les qualités professionnelles de l'équipe. Elle entretient cette confiance en maintenant une attitude positive pour résoudre les problèmes imprévus qui ne manquent pas dans ce genre de travaux. Entre autres, il est essentiel de ne pas « sauter la haie là où elle est la plus basse ». Autrement dit, il ne faut pas contourner les difficultés. Le client fait lui aussi des mesures de contrôle, non pas pour trouver des erreurs systématiquement, mais pour confirmer que la confiance placée chez l'entrepreneur est bien placée. Ce qui a été le cas jusqu'à présent.

Le montage du tablier du pont suspendu entraîne des déformations importantes des câbles (près de 18 mètres), des mouvements des têtes des pylônes (près de 2,30 mètres) et des selles de répartitions. Au départ, le tablier prend une configuration tout à fait à l'opposé de sa configuration finale. Des travaux de montage (montage des suspentes) progressent en même temps que le hissage des sections. Il faut penser à tout et longtemps à l'avance. Cet article va vous expliquer comment ces problèmes ont été résolus.



Nous avons détaillé, dans les précédents numéros, les activités topométriques liées au montage du pont Est sur le Storebælt. Si les articles passés traitaient de l'assemblage des viaducs d'approche et des câbles principaux de l'ouvrage, ces quelques lignes s'efforceront de vous présenter la troisième et dernière grande partie des travaux : le montage du tablier suspendu et les activités associées du service topométrie.

Le pont suspendu du Storebælt s'étend sur 2 700 mètres et permet une hauteur navigable en son point central de 65 mètres afin de garantir le passage du trafic de fort tonnage sur ces eaux empruntées par de nombreux convois internationaux.

La travée suspendue a été divisée en 57 voussoirs métalliques préfabriqués d'une longueur courante de 48 mètres et d'un poids de quelque 600 tonnes chacun.

L'activité de Gec Alsthom consiste au transport des voussoirs sur site depuis le Nord du Danemark, à leur levage, leur positionnement et réglage puis à leur soudage.

En situation finale d'assemblage, chaque élément est supporté par 4 couples de suspentes verticales solidaires des câbles principaux de l'ouvrage. La longueur de ces suspentes peut être ajustée en leur point d'accrochage avec l'extrados (partie supérieure du tablier) afin de permettre un fin réglage et respecter ainsi la géométrie finale, notamment du profil en long. Une fois les 57 éléments soudés, la travée du pont constituera une poutre suspendue continue de 4 mètres de haut et de près de 3 km de long. Les joints d'expansion permettant les dilatations thermiques et les mouvements dynamiques de la structure se situent au niveau des blocs d'ancrage des câbles. Ceci nécessite la mise en place d'appareils d'appui à

chaque extrémité dont les caractéristiques doivent permettre une translation longitudinale effective de l'ensemble de plus ou moins un mètre. Les mouvements transversaux de cette gigantesque poutre sont quant à eux réduits aux pylônes à l'aide d'appuis latéraux restreignant l'action d'un vent intensif. Ainsi, la structure de l'ensemble de l'ouvrage est conçue pour résister à un vent de 72 m/s, c'est-à-dire à deux fois plus qu'un simple ouragan !

Pour procéder au levage des sections, 4 grues portiques ont été installées directement sur les câbles principaux. Chaque grue pèse 210 tonnes (équipement compris) et l'ensemble a été étudié pour être totalement autonome. Leurs déplacements sur les câbles sont assurés par un système hydraulique leur permettant de se mouvoir de la même façon qu'une chenille. La différence est que ce genre d'insecte se déplace à une vitesse de 6 mètres par heure et atteindra tout près du sommet du pylône, son altitude record de 250 mètres sur un câble incliné à 27 degrés.

Le levage de chaque voussoir nécessite la mobilisation de deux grues. L'élément est hissé depuis sa position sur une barge en mer, posé sur ses suspentes permanentes, puis solidarisé temporairement par un jeu de connexions au précédent voussoir déjà en place. Ces connexions atténuent tout comportement dynamique instable de la structure dans une phase de montage provisoire délicate où chaque nouveau levage modifie les caractéristiques géométriques donc mécaniques de l'ensemble.

C'est dans une deuxième phase que se déroule le soudage des éléments entre eux, lorsque 75 % des voussoirs de la travée centrale sont montés. En effet, sur la travée principale, les éléments sont levés depuis le nœud central jusqu'aux pylônes. Cette séquence a pour conséquence de déformer le câble principal. Ainsi, après la seule installation du premier voussoir et des 4 grues, l'altitude du point milieu du câble a littéralement chuté de 12 mètres « cassant » la chaînette du câble (lui procurant une forme de V). Ce n'est qu'après le montage de 21 éléments que la répartition des charges sur les câbles permet à ceux-ci de retrouver une géométrie assez proche de celle finale. Le soudage des voussoirs proches du nœud central peut alors commencer.

Toutes les opérations précédentes nécessitent la collaboration de techniciens issus de différents corps de métiers complémentaires, le géomètre y trouvant évidemment une place de choix. Sur un tel projet, « l'homme de la mesure » ne déroge pas à l'habituelle règle : effectuer le premier relais sur site. Ce qui implique une réelle préparation au travail à effectuer même si, sur l'ouvrage que l'on a surnommé le pont des records, les tâches du service topométrie sont pleines de rebondissements en tout genre. Il faut pouvoir y répondre rapidement et parfois savoir les anticiper en élaborant plusieurs véritables « plans d'action ». Le souci du contrôle est omnipré-

sent et le recouplement des mesures, un garde-fou supplémentaire. Finalement, la synthèse de l'ensemble des impératifs nécessite l'organisation des mesures suivantes que nous pouvons détailler suivant trois points intimement liés :

- le contrôle géométrique des voussoirs sur site de stockage/préparation des éléments ;
- les opérations topométriques à réaliser pendant le montage ;
- les opérations topométriques après montage.

Contrôles géométriques sur site de stockage/préparation des éléments

Les voussoirs sont préfabriqués sur deux sites différents : Sines (Portugal) et Taranto (Italie). Une fois achevés, les éléments du pont transitent par voie maritime jusqu'à Aalborg (Nord du Danemark) se situant à 300 km du site de construction. Ils sont finalement préparés pour leur montage ultérieur puis stockés provisoirement. C'est à ce stade que commence notre travail.



La première activité consiste à mesurer la longueur de chaque voussoir. Sur l'ensemble des 57 éléments, 4 sur-longueurs ont été prévues permettant l'ajustement futur des portées respectives de la travée centrale (1624 m) et des travées latérales (535 m chacune). Un contrôle sur site des voussoirs déjà soudés comparé au cumul des mesures individuelles permet le respect des exigences contractuelles très strictes. La tolérance n'est que de ± 50 mm sur les 2 700 mètres de longueur totale. Elle est réduite à ± 20 mm sur le positionnement des appareils d'appui aux pylônes et aux blocs d'ancrage. L'analyse d'erreurs, afin d'apprécier la qualité des mesures effectuées, prend ici tout son sens.

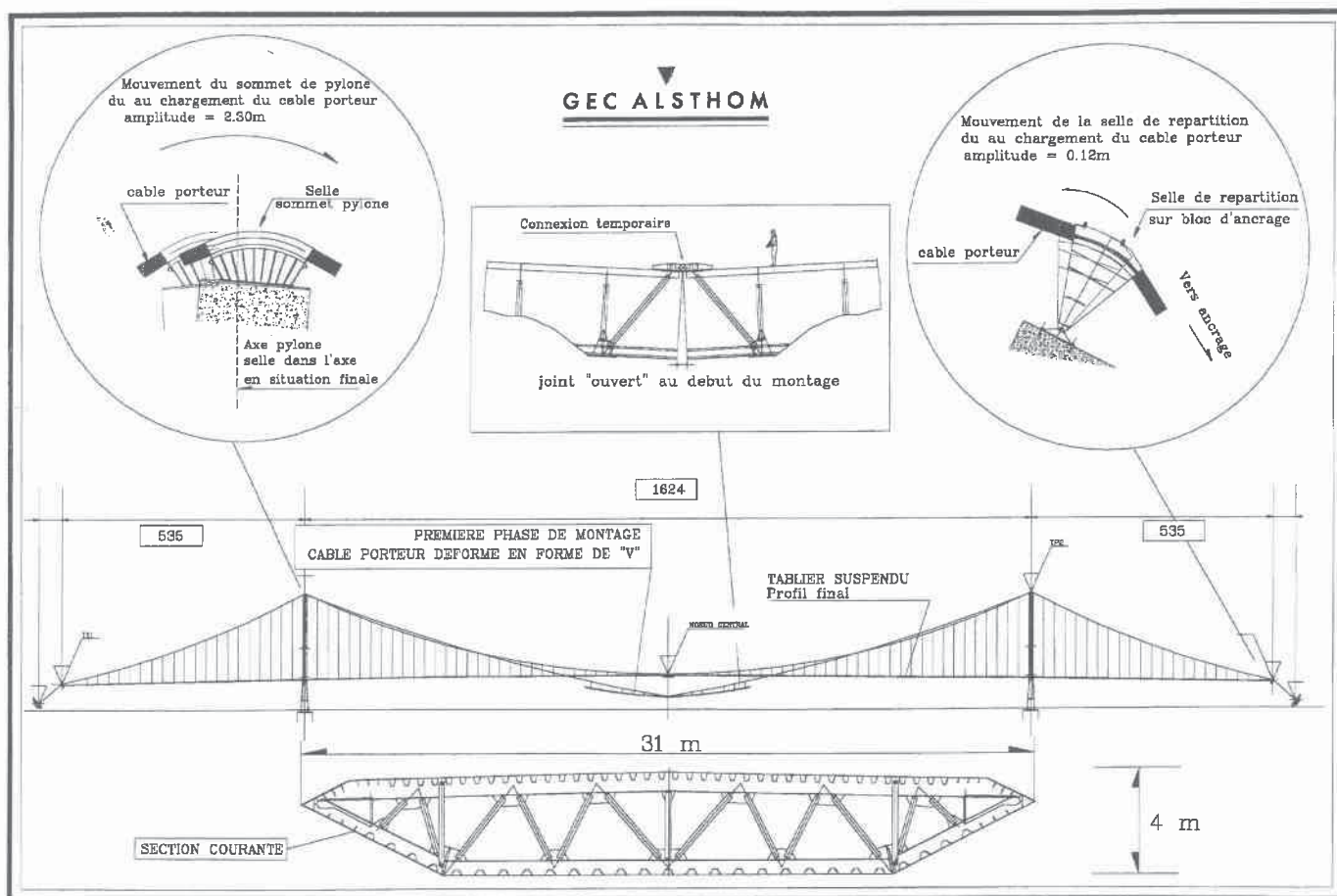
Un contrôle géométrique de la préfabrication des voussoirs est aussi réalisé (alignements, flèche, torsion en position de stockage, etc.). Notamment, une « cartographie » des déformations entre voussoirs au niveau des joints à souder in situ est dressée. Les résultats permettent de s'assurer que les éléments respectent les tolérances fixées par le contrat. Celles-ci, outre la garantie de qualité qu'elles apportent, restreignent, si elles sont respectées, les risques potentiels de problèmes techniques ultérieurs.

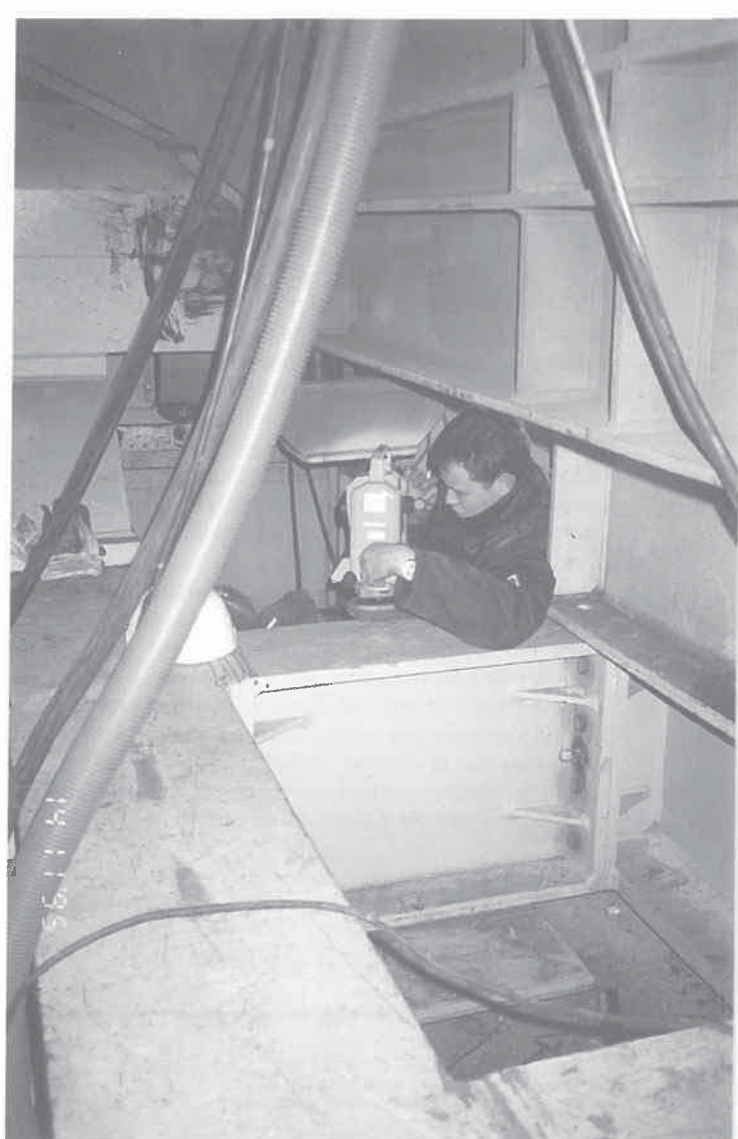
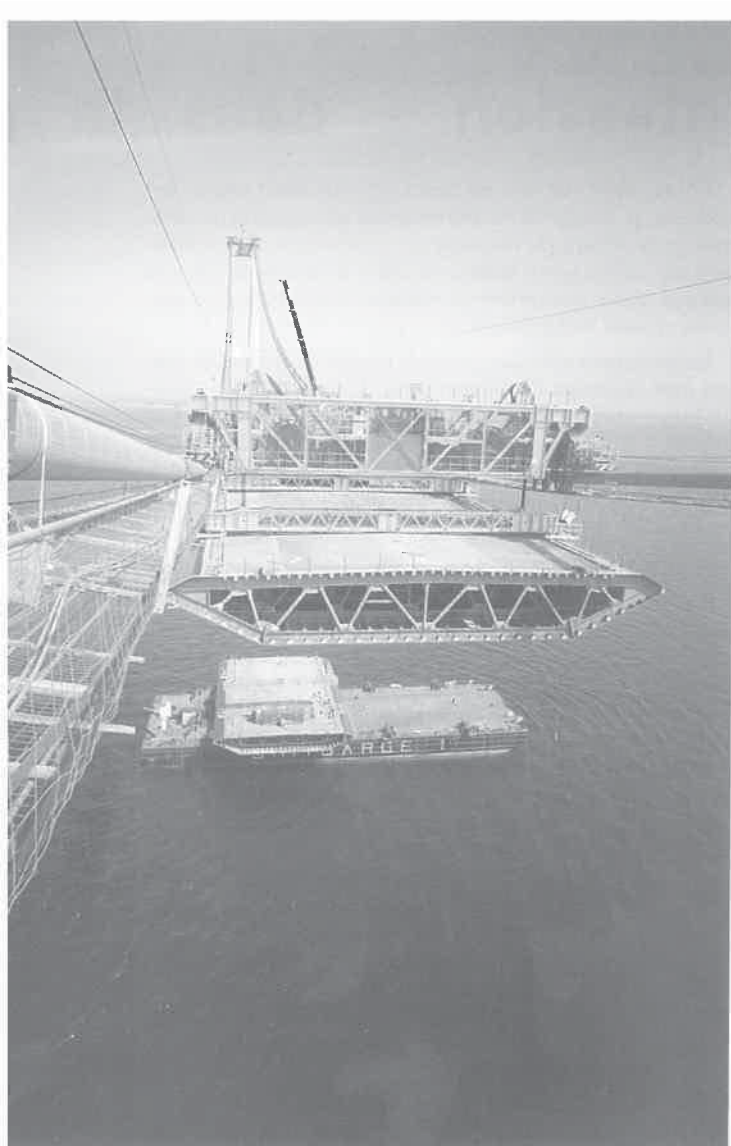
Enfin, c'est sur site de stockage que sont réglés les appareils de levage et qu'est installée une plaque de référence permettant de recevoir un clinomètre. Cet instrument est utilisé, entre autres, pendant le levage de chaque voussoir pour permettre le réglage horizontal des éléments durant l'opération.

La principale difficulté est que toutes ces activités doivent être réalisées en gradient thermique stable, c'est-à-dire que la différence de température entre l'extrados et l'intrados des voussoirs doit être inférieure à 3°C . Cet écart peut atteindre 40°C par une belle journée d'été, agréable saison synonyme de quelques belles nuits de travail pour les géomètres !

Opérations topométriques réalisées pendant le montage

Durant l'assemblage et le soudage progressif des voussoirs, le service topométrie a pour mission de s'assurer que la géométrie de l'ouvrage suit l'évolution prévue. L'avantage d'effectuer des mesures sur le site de stockage est d'obtenir un état 0 de chaque élément. Les informations de cette situation initiale sont complémentaires (malgré une certaine redondance parfois) des mesures effectuées pendant le montage qui mettent en évidence la géométrie d'ensemble de l'ouvrage plutôt qu'une géométrie locale des voussoirs.





Les opérations topométriques à réaliser pendant le montage et le soudage des éléments sont donc les suivantes.

- Contrôle régulier de l'altitude du nœud central sur les câbles principaux dont les variations peuvent atteindre une amplitude de 15 mètres suivant la répartition des charges sur les câbles principaux.
- Contrôle de l'alignement général et local des sections afin de s'assurer que la connexion temporaire puis le soudage des voussoirs entre eux respectent l'alignement théorique de l'ensemble du tablier.
- Contrôle du profil en long du tablier. Ce point clé nécessite la mise en œuvre de deux procédés de mesures. Le premier est le suivi systématique de l'évolution des pentes individuelles de chaque voussoir réalisé à partir d'observations données par un clinomètre dont la précision est de ± 0.01 degré (suivant les deux axes XY). Le second effectué à 4 différentes étapes du montage permet une détermination d'ensemble du profil en long utilisant les méthodes topométriques dites classiques et l'utilisation du GPS en mode cinématique. Une attention particulière est portée localement sur le profil en long au droit des pylônes. En effet, les voussoirs situés aux pylônes ne disposent pas de suspentes d'appui, seul le soudage aux deux éléments adjacents « les sustentent », ce qui nécessite une mise en œuvre spéciale. La géométrie induite des phases de montage est très particulière et demande un contrôle régulier.
- Réglages des appareils d'appui temporaires et définitifs des voussoirs de chaque extrémité. Les appareils d'appui définitifs de ces voussoirs, au nombre de deux

par élément, sont caractérisés par une possibilité de translation de ± 1 mètre. La tolérance en parallélisme de ± 0.5 mm/m (c'est-à-dire ± 1 mm sur toute la longueur du dispositif) s'avère très contraignante vu les conditions de travail (accès, obstacles, etc.), un chantier, même très organisé, ne ressemblant bien évidemment pas à un laboratoire de métrologie.

- Contrôle de la longueur après soudage et détermination des sur-longueurs de coupe sur les dernières sections montées.
- Contrôle hebdomadaire de la position des sommets des pylônes. Celle-ci varie de $\pm 2,3$ mètres suivant l'évolution du montage des voussoirs. Le changement des câbles principaux sur la travée centrale implique un déplacement des sommets des pylônes vers le nœud central (vers l'intérieur) alors qu'un chargement sur les travées latérales implique un déplacement vers les blocs d'ancrage (vers l'extérieur). En phase finale, les pylônes seront bien entendu verticaux.
- Auscultation mensuelle des pylônes (à leur base) et des blocs d'ancrage qui permet, entre autres, de déceler une tendance de déplacement planimétrique et altimétrique pour chaque structure. Pour l'anecdote, le bureau d'étude estime à 50 mm le déplacement planimétrique des blocs d'ancrage vers le nœud central dû au chargement des câbles porteurs par les voussoirs du tablier suspendu (rappelons que les caractéristiques de chaque bloc d'ancrage sont les suivantes : base de 120 mètres de long sur 50 mètres de large, 70 mètres de haut et quelque 150 000 tonnes d'acier et de béton).

- Réglage des joints d'expansion aux deux extrémités du tablier, dispositifs qui peuvent s'allonger et se rétracter de 1 mètre.

Opérations topométriques après montage

Ce n'est qu'une fois le montage terminé qu'une série de mesures qualifiant les activités de Gec Alsthom en définissant la géométrie finale locale et générale de l'ouvrage « tel-que-construit » est effectuée. Cette activité consiste à remesurer points par points, dans le détail, la position de l'ouvrage et sa configuration pour les comparer aux exigences contractuelles. Ces mesures, associées à d'autres informations (soudage, peinture, etc.), permettent, via la rédaction d'un rapport détaillé, d'officialiser la remise de l'ouvrage au client et figureront dans le dossier d'ouvrage. Enfin, elles définissent un état de référence que le gestionnaire d'ouvrage exploitera pour le suivi de celui-ci. Les géomètres qui nous relayeront pour l'auscultation sauront apprécier..., espérons-le !

Deux mois et demi auront suffi pour monter le tablier sur la portée principale, reliant les deux pylônes. Après avoir surmonté les difficultés qui surgissent naturellement au début d'une activité totalement nouvelle, le montage s'effectue sur un rythme soutenu afin de profiter de l'été danois... Cette année encore, cette saison sera très laborieuse.

Pour faire face à la demande de mesures pendant les trois années de chantier, l'équipe topométrique a été constituée en moyenne de 5 personnes (7 pendant l'été 1996) de trois nationalités différentes. Que de sueur (malgré le froid) et que de nuits blanches (malgré l'hiver avec ses 18 heures de nuit et 6 heures de jour souvent gâchées par le brouillard) auront été nécessaires à l'accomplissement du bel ouvrage, à la réalisation d'un Ouvrage d'Art exceptionnel et extrêmement valorisant. Quel homme de chantier n'a-t-il pas eu la petite fierté bien humaine de se dire à la fin d'un tel édifice « j'y étais, c'est un peu grâce à moi ».

Sur ce projet, ce sentiment de fierté est décuplé par la taille du pont lui-même. Toutes les équipes composées de gens ordinaires ont réalisé un travail extraordinaire. Les moins jeunes en sortiront avec quelques cheveux en moins, les nouveaux auront goûté au stress mais tous ne sauront oublier cette expérience fabuleuse et le souvenir original d'aller au travail en bateau.

Enfin, les ponts relient et rapprochent les hommes, on n'en construira donc jamais assez de quelque matériau que ce soit.

