

PISTE COMBINÉE DE BOBSLEIGH ET DE LUGE DE LA PLAGNE

MÉTROLOGIE TEMPS RÉEL ... APPLIQUÉE AU GÉNIE CIVIL

Par M. Chazalet - Electricité de France

Résumé

La piste combinée de Bobsleigh et de Luge de La Plagne, par sa géométrie évolutive, et par les précisions millimétriques requises au contrat, a nécessité la mise en œuvre d'un système de mesures 3 D, fonctionnant en mode « Temps réel », utilisé généralement dans des environnements industriels.

D'une longueur totale de 1 830 mètres, la piste se compose d'une coque mince de quinze centimètres d'épaisseur, supportée par des micros-pieux, et contenant un système de réfrigération interne.

L'article montre l'apport des moyens et méthodes topographiques, dans une réalisation complexe, tant au niveau de l'étude de l'ouvrage qu'au niveau de sa réalisation dont le principe s'est articulé autour du potentiel d'un système de mesures qui allie précision et mode « Temps réel ».

Abstract

Both the bobsleigh and luge run in La Plagne, by its progressive geometry and the millimetric accuracy required in technic specifications needed a measurement system 3 D with functions in « real time », usually used in industrial environments.

With a total length of 1 830 meters, the run is composed of a thin shell of fifteen centimeters carried by micro-piles and involves a system of inside refrigeration.

The article shows the interest of topographic methods and means in a complex achievement both in the conception and the realisation whose principle is articulated on a measurement system which allies accuracy and « Real time ».



Photo 1. Vue générale de la piste.

I - DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

1.1 Caractéristiques du tracé

La piste de La Plagne prévue pour le déroulement des épreuves de bobsleigh et de luge autorise aussi des entraînements par une mise en glace partielle de la coque dans sa partie inférieure.

La piste principale, d'une longueur totale de 1 830 mètres présente un tracé sinueux de 19 virages, comprenant une clothoïde en entrée, un raccordement circulaire et une clothoïde en sortie.

Elle est conçue pour recevoir des épreuves de Bob aux caractéristiques suivantes :
Longueur : 1 500 mètres, Dénivelée : 124 mètres,
Pente moyenne : 83 %, Pente maximum : 14 %, Nombre de virages : 19.

A cette piste principale, viennent se raccorder des départs intermédiaires destinés :

- Aux épreuves de luge hommes :
Longueur : 1 250 mètres, Dénivelée : 110,6 mètres, Pente moyenne : 8,9 %, Pente maximum : 40 %, Nombre de virages : 16.

- Aux épreuves de luge dames et doubles :
Longueur : 1 250 mètres, Dénivelée : 92,3 mètres, Pente moyenne : 8,8 %, Pente maximum : 43 %, Nombre de virages : 14.

- Aux épreuves juniors et aux entraînements :
Longueur : 750 mètres, Dénivelée : 54 mètres, Nombre de virages 8.

Au-delà du bâtiment de chronométrage, la piste se prolonge sur 330 mètres environ afin de permettre la décélération des engins.

1.2 Quelques caractéristiques techniques

La piste est principalement composée d'une coque mince en béton de 15 centimètres d'épaisseur environ supportée par des micro-pieux de 6 mètres à 15 mètres de profondeur et espacés de 6 mètres.

La réfrigération interne de la piste est conçue pour produire 3 centimètres de glace sur une surface de 6 700 m² environ. A cet effet, 70 kilomètres de tube sont noyés dans la coque béton de la piste. Ce circuit est composé de 70 évaporateurs comprenant des sondes dont les informations transmises à un tableau synoptique assurent le contrôle permanent de la qualité de la glace.

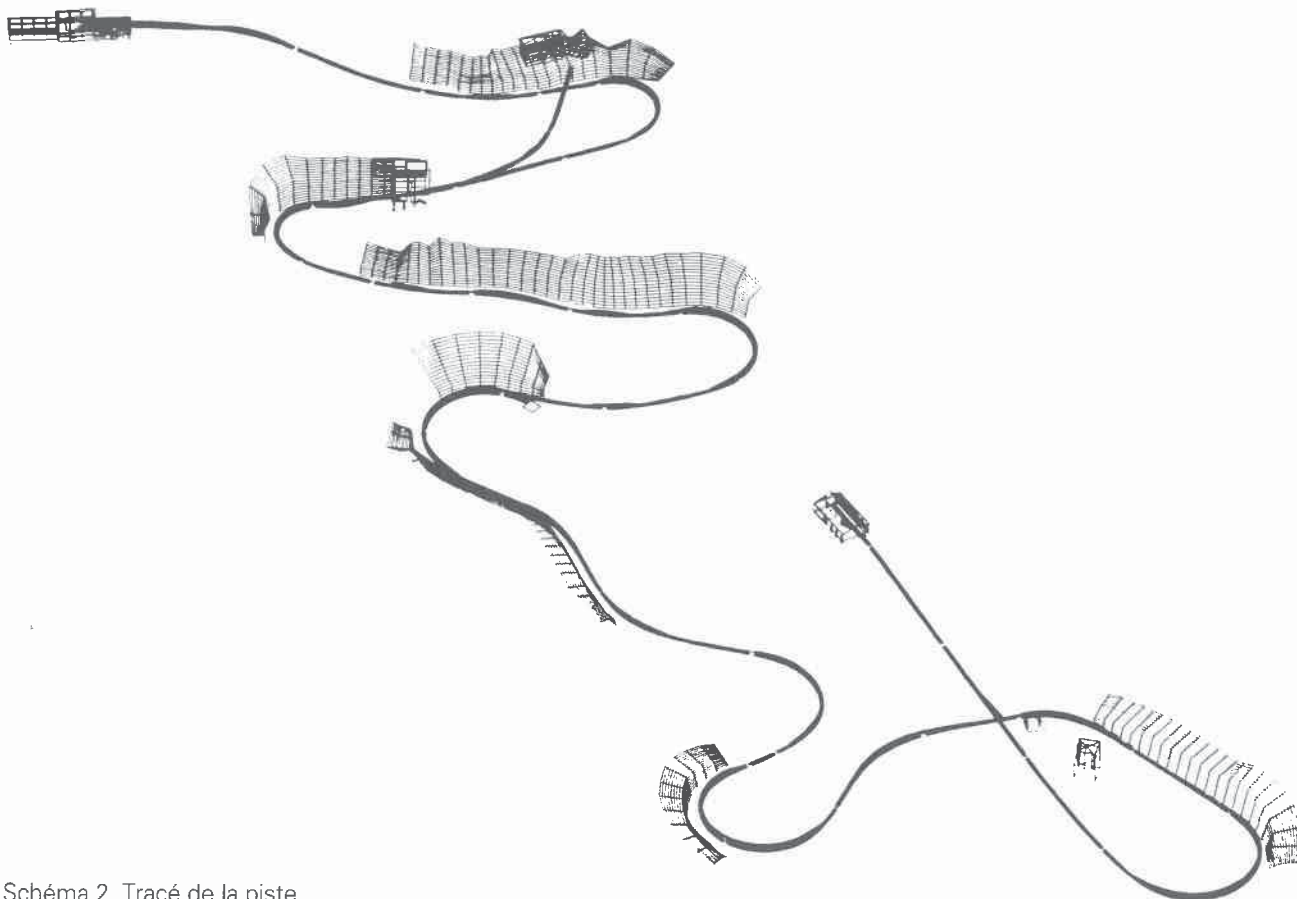


Schéma 2. Tracé de la piste.

II - DONNÉES DE BASE FOURNIES PAR LE MAÎTRE D'OUVRAGE

- le plan topographique au 1/500 du site.
- le plan d'implantation planimétrique du tracé.
- le profil en long.
- le fichier XYZ des points de l'axe du projet au pas de 2 mètres.
- les paramètres variables de définition géométrique des coupes transversales.

III - BESOINS DU MAÎTRE D'ŒUVRE PROJET DÉTAILLÉ

Le groupement dans lequel le Centre National d'Équipement Hydraulique d'EDF à Chambéry assurait la maîtrise d'œuvre de la partie Génie Civil, a dû, au stade de l'appel d'offre, monter un projet détaillé pratiquement « bon pour exécution » dans un délai record de 3 mois.

Pour y parvenir, il était indispensable d'utiliser au maximum nos outils informatiques de CAO et de DAO qui ont dû cependant être adaptés à cet ouvrage particulier.

3.1 Insertion au site - Etude des terrassements et soutènements

Le plan topographique fourni n'étant pas numérique, il a fallu procéder dans un premier temps à la digitalisation des courbes de niveau.

La décision d'étudier les terrassements et les soutènements à partir de profils au pas de 5 mètres alors que le listing fourni par le Maître d'Ouvrage était au pas de 2 mètres, nous plaçait devant deux alternatives.

- soit demander les coordonnées manquantes au maître d'ouvrage au fur et à mesure des besoins,
- soit écrire un logiciel calculant les XYZ des points d'axes à un pas d'abscisse curviligne paramétrable.

La deuxième option fut retenue car elle garantissait l'indépendance nécessaire à une maîtrise des délais, et en raison du nombre important d'ouvrages annexes implantés le plus souvent parallèlement à la piste de bobsleigh (murs de soutènements).

Cette option s'est avérée judicieuse car la reprise du calcul du tracé a mis en évidence des fautes dans les fichiers fournis, au niveau des raccordements des entrées secondaires.

Principe du calcul

Identification et numérotation des tronçons qui sont :

Pour la planimétrie :

- Des droites : XY départ - XY arrivée
- Des clothoïdes : XY départ - XY arrivée - Paramètre - Identificateur du sens.
- Des cercles : XY départ - XY arrivée - Rayon - Identificateur du sens.

Pour l'altimétrie :

- Des droites : Z départ - Z arrivée - Longueur
- Des cercles : Z départ - Z arrivée - Longueur
- Rayon identificateur de concavité

Après indication du pas d'abscisse curviligne, le logiciel fournit un fichier comprenant, au pas désiré : X, Y, Z, gisement tangentiel, abscisse curviligne. Ce fichier est ensuite transféré au logiciel de CAO utilisé pour le calcul et le tracé des profils, après optimisation des terrassements qui sont importants pour un ouvrage de ce type. Déblais : 120 000 m³, Remblais : 90 000 m³, Murs cloutés : 6 000 m², Murs en terre armée : 4 000 m².

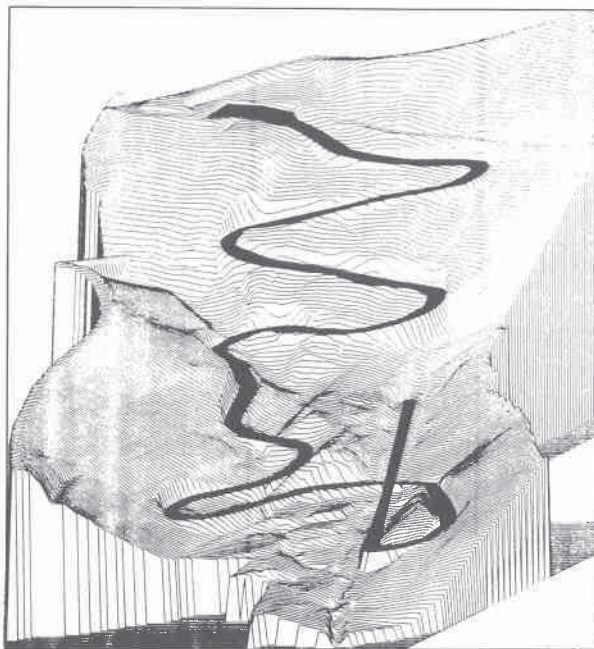


Schéma 3. Terrassements : bloc diagramme

3.2 Calcul de la structure

Le logiciel de calcul de la structure nécessitait un modèle numérique 3D de la coque. On rencontre 3 types des sections transversales :

- Type a : Section régulière en forme de U,
- Type b : Section elliptique (E) + cercle C1,
- Type c : Section elliptique (E) + cercle C1 + cercle C2.

PROFIL : 275

POINTS CARACTERISTIQUES
INTERIEUR
Y: -0.7500 Z: 0.6000
Y: -0.7500 Z: 0.1250
R: 0.125
Y: -0.6250 Z: 0.0000
Y: 0.6250 Z: 0.0000
R: 0.125
Y: 0.7500 Z: 0.1250
Y: 0.7500 Z: 0.6500
EXTERIEUR
Y: -1.0100 Z: 0.6000
Y: -1.0100 Z: 0.4500
Y: -0.9000 Z: 0.4800
Y: -0.9000 Z: -0.1500
Y: 0.9000 Z: -0.1500
Y: 0.9000 Z: 0.5300
Y: 1.0100 Z: 0.5000
Y: 1.0100 Z: 0.6500
V BETON: 0.492 M3/M
S VUE: 3.503 M2/M
S CACHE: 1.522 M2/M
S INFER: 1.800 M2/M



Schéma 4a. Section type a.

POINTS CARACTERISTIQUES
INTERIEUR
Y: -1.2586 Z: 0.6000
Y: -1.2586 Z: 0.1250
R: 0.125
Y: -1.1336 Z: 0.0000
Y: -0.5180 Z: 0.0000
A: 0.8980 B: 1.6540
Y: 0.3800 Z: 1.6540
R2: 2.5000
Y: -0.1200 Z: 3.1540
EXTERIEUR
Y: -1.5186 Z: 0.6000
Y: -1.5186 Z: 0.4500
Y: -1.4086 Z: 0.4800
Y: -1.4086 Z: -0.1500
Y: -0.0755 Z: -0.1500
Y: 0.2271 Z: 0.3741
A +0.15 B +0.15
Y: 0.5300 Z: 1.6540
RIE: 0.0000
Y: 0.5300 Z: 1.6540
R2E: 2.6500
Y: 0.1511 Z: 3.0195
Y: 0.2026 Z: 3.0504
Y: 0.0760 Z: 3.3010
CASQUETTE R: 1.165
Y: -0.7200 Z: 3.2598
Y: -0.7200 Z: 3.7779
V BETON: 0.879 M3/M
S VUE: 5.373 M2/M
S CACHE: 4.691 M2/M
S INFER: 1.333 M2/M

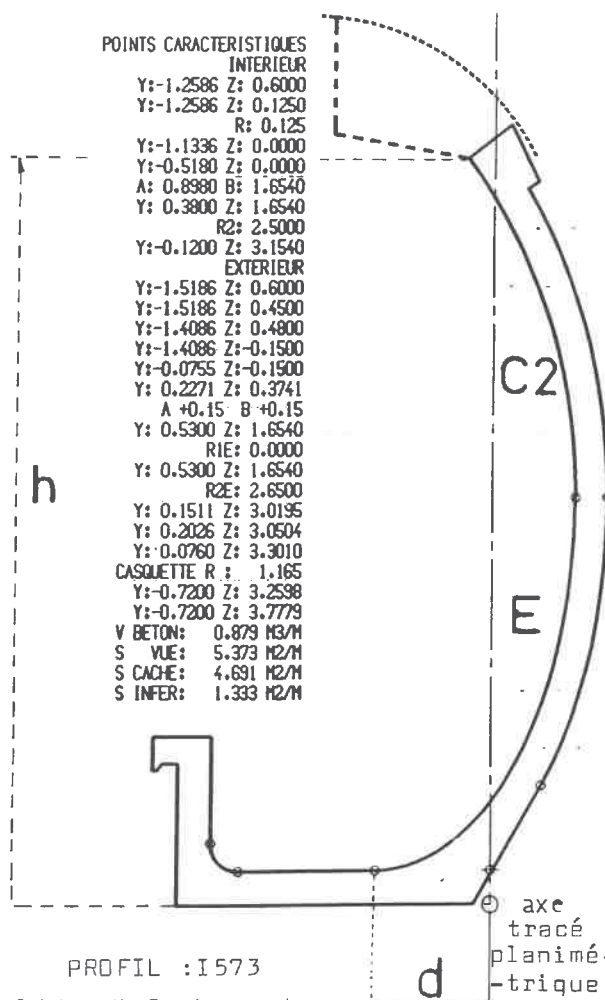


Schéma 4b. Section type b.

INTERIEUR
Y: 0.8881 Z: 0.6000
Y: 0.8881 Z: 0.1250
R: 0.125
Y: 0.7631 Z: 0.0000
Y: 0.6624 Z: 0.0000
A: 1.2848 B: 0.7847
Y: -0.4941 Z: 0.4428
RI: 0.5958
Y: -0.6224 Z: 0.8121
R2: 5.3762
Y: -0.5788 Z: 1.4957
EXTERIEUR
Y: 1.1381 Z: 0.6000
Y: 1.1381 Z: 0.4600
Y: 1.0381 Z: 0.4800
Y: 1.0381 Z: -0.1500
Y: -0.3323 Z: -0.1500
Y: -0.6725 Z: 0.4392
RIE: 0.7459
Y: -0.7724 Z: 0.8121
R2E: 5.5262
Y: -0.7415 Z: 1.3956
Y: -0.8431 Z: 1.3859
Y: -0.8267 Z: 1.5275
V BETON: 0.628 M3/M
S VUE: 4.725 M2/M
S CACHE: 2.634 M2/M
S INFER: 1.370 M2/M

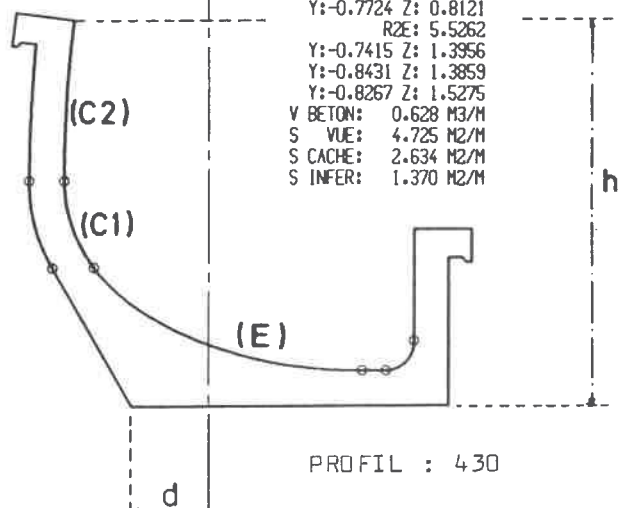


Schéma 4c. Section type c.

PROFIL : 430

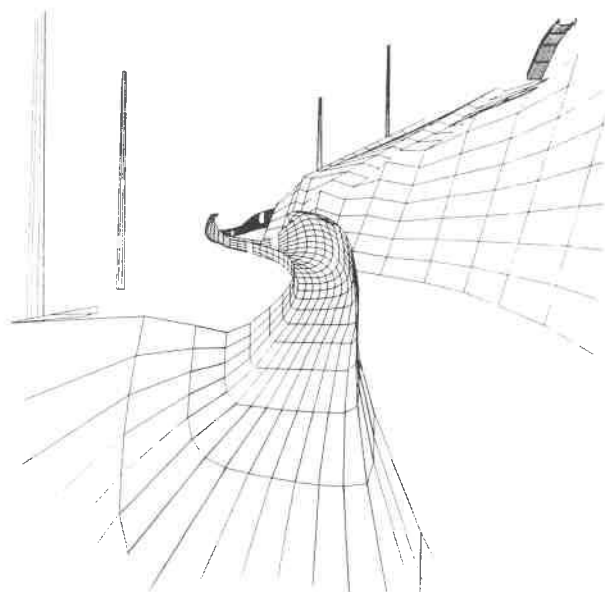


Schéma 5. Vue 3D d'un tronçon.

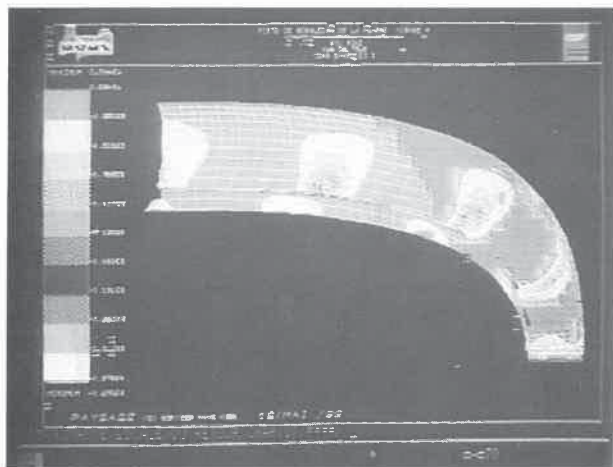


Photo 6. Calcul des contraintes.

Le point de fond de piste est décalé d'une valeur d , et h caractérise la hauteur de la section.

Les valeurs des demis axes a et b des ellipses, les rayons $R1$ et $R2$ des cercles, le décalage d , la hauteur h de la section sont des variables qui nous ont été communiquées au pas d'abscisse curviligne de 50 centimètres.

Nous n'avons pas pu obtenir l'algorithme du calcul de ces variables.

Nous avons transféré au logiciel de calcul de structure, un fichier sous forme de points également répartis sur la section transversale.

IV - PRINCIPE DE RÉALISATION PROTOTYPE

4.1 Tolérances d'exécution

Elles sont définies par contrat de la façon suivante :

Tolérance absolue

Sur l'ensemble de la piste : ± 5 mm par rapport aux cotes données pour l'exécution.

Tolérance relative

Pour deux points quelconques distants de 100 mètres : ± 5 mm sur les écarts relatifs par rapport aux coordonnées théoriques.

Pour deux points quelconques distants de 2 mètres : ± 2 mm sur les écarts relatifs par rapport aux coordonnées théoriques.

4.2 Choix de la méthode

En raison des tolérances requises, de l'impossibilité de construire des coffrages du fait de la géométrie évolutive, nous avons choisi d'opérer par réglage in-situ, en temps réel en utilisant le système EDF MINOS de métrologie 3 D (Métrologie Industrielle par Numérisation d'Objet Spatiaux) moyennant quelques adaptations pour la circonstance.

Le matériel comprend :

- 2 théodolites Wild T2000 couplés à un calculateur portable PC par un câble interface en X.
- 1 mire à ruban d'invar sur laquelle des bases formées de cibles collées ont été étalonnées par interférométrie.

Le principe du contrôle d'une section, schématisée ci-dessous, comprend les étapes suivantes : (figure 7)

- 1 - Mise en autocollimation des deux théodolites.
- 2 - Mise à l'échelle de la base formée par les théodolites par visées zénithales et azimutales sur les cibles de la mire étalon.
- 3 - Observation des sections à contrôler. Les points de contrôle sont matérialisés par des cibles autocollantes.
- 4 - Calcul X Y Z des cibles.
- 5 - Calcul de la distance normale à la courbe théorique (D_n).
- 6 - Edition des résultats sous forme d'une fiche de résultats mentionnant les actions de l'assurance qualité (figure 8).

Quatre choix possibles de rattachement au canevas du chantier :

- les coordonnées des deux stations A et B sont connues.
- la station A est connue - B calculée après orientation en A (VO) et mise à l'échelle AB.
- A calculée par relèvement - B calculée après mise à l'échelle AB.
- Relèvement sur A et B (suppose au préalable un micro canevas local très précis (quelques dixièmes de mm), réalisés par le même système de mesures).

4.3 Mise au point sur Prototype

Pour tester les choix techniques des différents corps de métiers, le contrat prévoyait la réalisation d'un prototype sous forme d'un élément de virage de 12 mètres de long, qui fut construit durant l'hiver 89-90 en un lieu différent (Albertville).

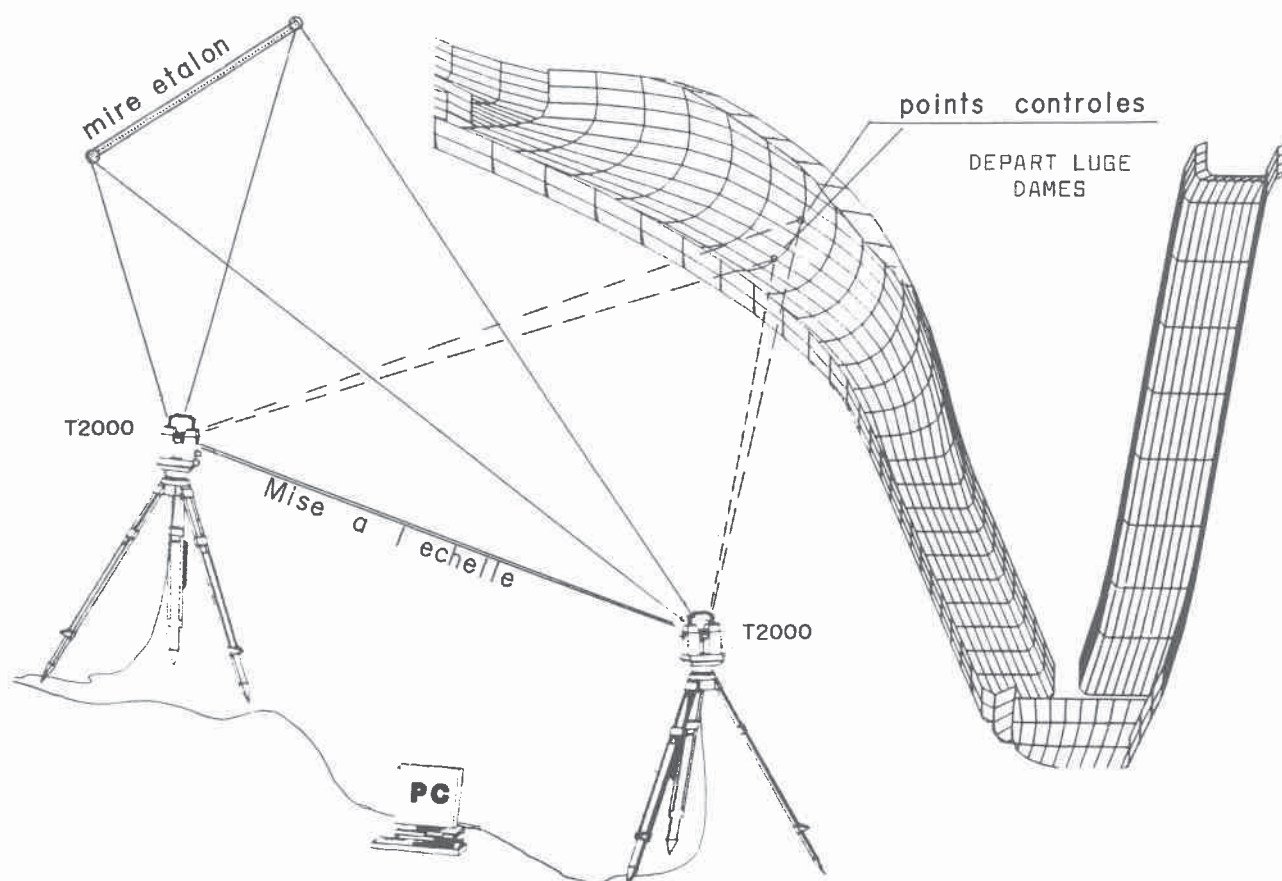


Schéma 7. Principe du contrôle.

DIVISION TOPOGRAPHIE
INTER-REGIONALE DE LYON

05-06-1990
13:16:19

LA PLAGNE-PISTE DE BOBSLEIGH

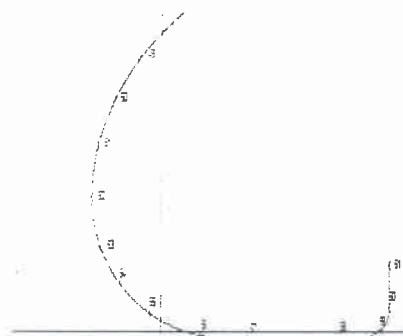
CONTROLE SECTION: 2618

PM: 1309 m

FICHIER: S2618MT1.DAT

Unité déplacements: mm
* signifie hors tolérance

CONTROLE EN USINE									
POINT	D1	D2	hors tol.	nvle cale	N1	N2	N3	N4	N5
1	0.0	0.0							
2	0.0	0.0							
3	0.0	0.0							
4	0.0	0.0							
5	0.0	0.0							
6	0.0	0.0							
7	0.0	0.0							
8	0.0	0.0							
9	0.0	0.0							
10	0.0	0.0							
11	0.0	0.0							
12	0.0	0.0							
13	0.0	0.0							
14	0.0	0.0							
15	0.0	0.0							
16	0.0	0.0							
17	0.0	0.0							
18	0.0	0.0							
19	0.0	0.0							
20	0.0	0.0							



OBSERVATIONS

Constante altimétrique 1470.6957 m

Décalage radial 0.0 mm

N1 : HENRI N2 : PERRIER N3 :
ACTION DE SURVEILLANCE N°2 : N°3 :

Schéma 8. Fiche de contrôle.

Il était prévu de régler une section tous les deux mètres, en respectant la chronologie suivante (figure 9) :

1 - Réglage « temps réel » du gabarit porte tube par action sur les attaches (tiges filetées). Testée à la demande de l'entreprise, cette méthode inefficace est restée sans suite pour les raisons suivantes : Barre porte tube trop rigide (acier 40 x 20 mm), L'action de réglage sur un point dérèglait en partie les autres, d'où une répétition du contrôle, le porte tube se voilait, induisant des points de contact avec les tubes incompatibles avec la précision requise.

2 - Après mise en place des tubes et du ferrailage, un tube de surfaçage est posé sur des cales standard.

3 - Contrôle de l'intrados (figure 9) et détermination de l'écart normal à la forme théorique. La correction s'opère par changement des cales de réglage.

4 - Bétonnage par projection et lissage par l'intermédiaire de règles, préformées aux rayons de courbures des clothoïdes, venant prendre appui sur les tubes de surfaçages précédemment réglés.

Le prototype a permis de valider le procédé de mesures et a mis en évidence l'obligation de

COUPE TYPE

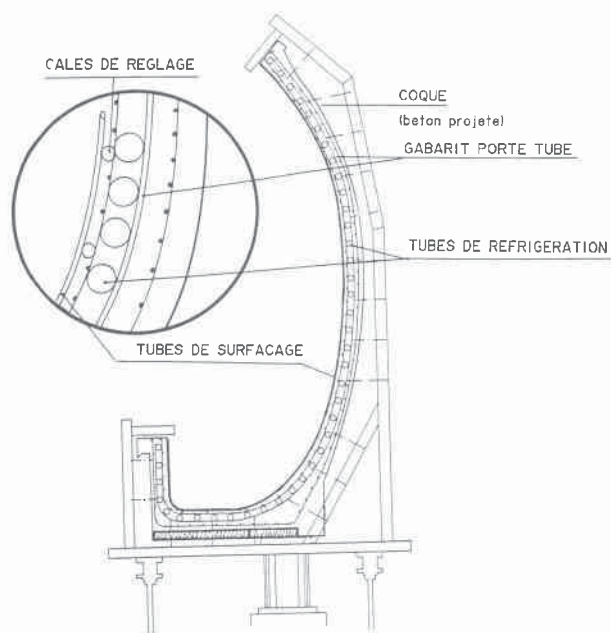


Schéma 9. Coupe type d'une section.

fabriquer le gabarit porte-tube en usine et de choisir pour celui-ci une section circulaire plutôt qu'un fer plat.

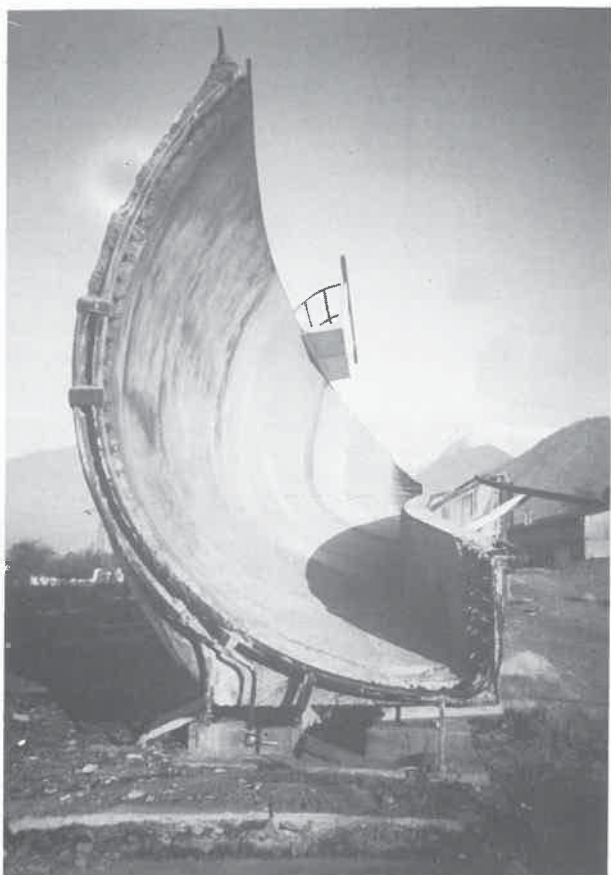


Photo 10. Vue du prototype.

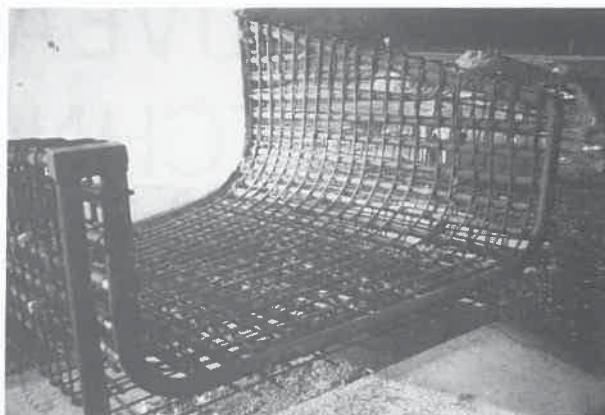


Photo 11. Vue du prototype.

V - CONTRÔLE EN USINE

Le choix d'une préfabrication en usine du gabarit porte-tube a permis de transférer les actions d'Assurance Qualité de cette pièce sur le fournisseur. Nous avons alors procédé à des actions de contrôle des gabarits par sondage, soit en usine, soit sur le site après déchargement.

Les étapes de la préfabrication :

les fournitures au prestataire d'un tracé des sections sur calque stable à l'échelle du 1/1 ; Traçage sur marbre à l'aide d'un pointeau (photo 12) ; Cintrage et fabrication du gabarit (photo 13) ; Contrôle éventuel (photo 14).

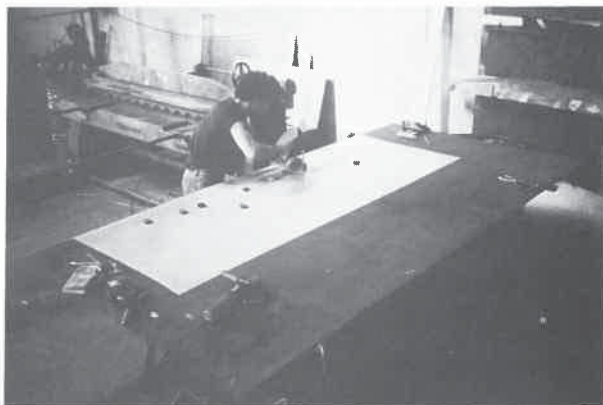


Photo 12. Traçage en usine.

VI - RÉALISATION DE LA PISTE

6.1 Canevas de Référence

A notre demande, le maître d'ouvrage nous a notifié un canevas de référence sur piliers que nous avons souhaité à une tolérance de ± 2 mm sur chacune des coordonnées.

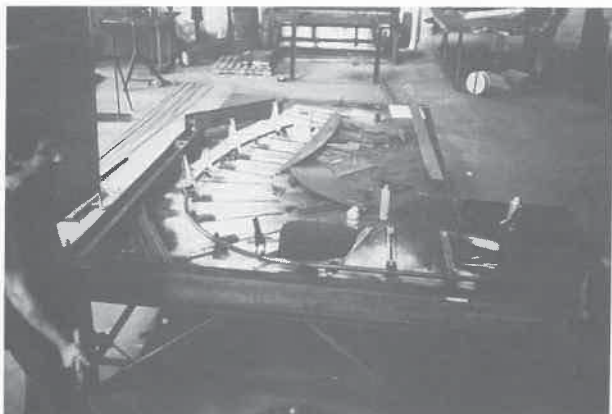


Photo 13. Fabrication gabarit porte tube.

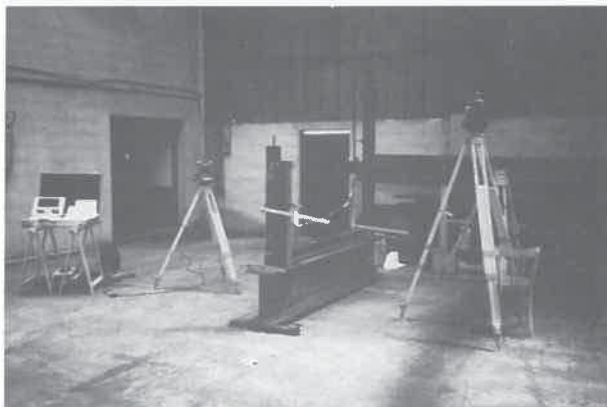


Photo 14. Contrôle en usine.

Difficultés induites par ce canevas

- Canevas de 9 piliers extérieurs aux travaux dont 6 piliers se sont avérés instables, voire inutilisables, en raison de l'amplitude des mouvements.
- Ce canevas ne faisait pas parti de notre prestation. Sa maintenance beaucoup trop lâche a induit quelques difficultés d'implantation.
- Eloignement incompatible avec une utilisation intensive et les tolérances requises.

En conséquence, nous avons pris en charge sa densification par l'ajout de 25 piliers supplémentaires, positionnés principalement dans les virages.

6.2 Evolution de la prestation

L'amplitude des réglages du tube de surfacage par changement de cales, ne pouvait rester que minime, car cela se traduisait par une variation de l'épaisseur d'enrobage béton des tubes de réfrigération.

N'ayant pu obtenir de réponse formelle sur le critère qu'il fallait privilégier, entre le respect de forme et la constante d'enrobage, devant cette double contrainte, il devenait impératif que le

gabarit porte-tube soit implanté avec des tolérances identiques aux spécifications, relatives à l'intrados de la coque.

Dès lors, on revenait au problème de la référence, solutionné par la décision de maintenir en permanence, le canevas complémentaire, par confirmation ou nouvelle détermination des coordonnées, avant chaque utilisation par les différents intervenants.

Ceci a conduit à 25 reprises partielles ou totales du canevas.

6.3 Implantation des gabarits porte-tubes de réfrigération

Cette opération réalisée par la Société GEODE, fait l'objet d'une communication dans ce numéro de la revue.

6.4 Contrôles et Réglages des tubes de surfacage

Systématique en début de réalisation de la coque, cette opération de réglage s'est avérée inutile par la suite. Au titre de l'assurance qualité, elle est devenue une opération de contrôle par sondage.

Ceci pour plusieurs raisons et principalement :

- Les opérations préalables de fabrication et d'implantation du gabarit porte-tube étant bien rodées, il ne restait alors qu'à appliquer une cote constante, contrôlée à l'aide d'un petit gabarit.
- Les valeurs de fins réglages étaient variables car elles intégraient des mouvements dûs au sol et à la flexibilité de l'ensemble sous l'effet de la dilatation.

Le site, gorgé d'eau, présente une géologie particulièrement difficile.

6.5 Contrôles sur béton fini

L'opération de bétonnage par projection, n'allait-elle pas rendre gratuite toute cette minutie au montage ?

Quelques contrôles «Béton fini» ont montré que globalement la coque est réalisée dans le demi-centimètre.

VII - CONCLUSION

Cet ouvrage, comme tout prototype certes, mais surtout aux vues des tolérances requises, a nécessité un investissement technique important.

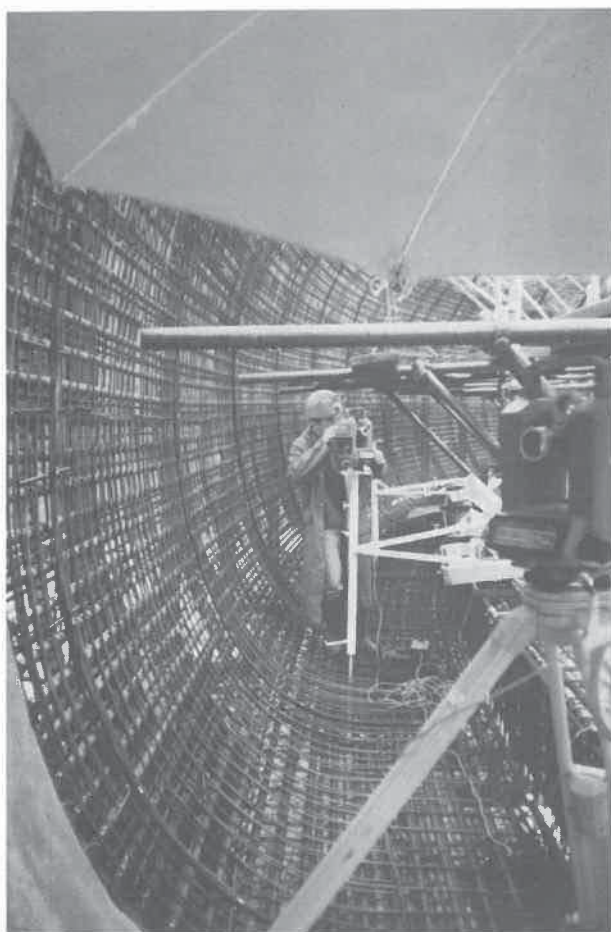


Photo 15. Contrôle et réglage sur site.

Je garderai toujours en mémoire, le souvenir de l'hilarité d'un chef d'équipe à qui j'ai annoncé lors de notre première rencontre qu'il allait devoir travailler au millimètre.

Plus tard, j'ai pu noter une évolution sensible de son comportement lorsque devant une caméra vidéo, il expliquait gravement avec son sympathique accent portugais :

« Il faut que ce soit au millimètre, car quand on voit l'allure des bobs, il faut une précision... Le virage doit avoir tant de degrés. Il ne faut pas qu'il ait un grade de plus... » (sic).

Chaque topographe est conscient que la recherche du millimètre est un état d'esprit.

Je n'étais pas inquiet quant à nos possibilités



Photo 16. Bétonnage.

de mesures, car en vertu de la règle en vigueur, notre système permettait globalement de travailler à une décimale de plus que les contraintes contractuelles.

C'est pour cette raison, que dans toute cette affaire, j'ai toujours voulu distinguer Tolérances de mesures et Tolérances d'exécution, car en toute logique, et selon le principe de la décimale de plus, n'aurait-on pas dû voir, dans les mains des monteuses ou autres coffreurs, des pieds à coulisse, plutôt que des doubles mètre ! Sans en arriver là, ces exigences auront tout de même obligé chaque intervenant à beaucoup de minutie.

Je ne sais si la mise en glace respecte les mêmes tolérances. Après la production de la glace (photo 17), le réglage se fait par grattage et à l'oeil.



Photo 17. Mise en glace.

Photo 18. Lugeur en piste.

