

... Colloque du Creusot

Utilisation des Appareils de Topographie dans l'Industrie électro-mécanique

par M. BESANCENEY,
Ingénieur à Alsthom-Atlantique

PRÉAMBULE

La vocation d'Alsthom-Atlantique n'a jamais été de faire de la topographie. Constructeur de machines à vapeur, à l'origine, passant de la machine à pistons à la turbine, constructeur de machines électriques ensuite, depuis la dynamo jusqu'aux alternateurs de grande puissance, Alsthom s'est affirmée depuis un siècle comme électro-mécanicien.

Mais, avec l'accroissement de la puissance unitaire des groupes de production, ayant comme corrolaire l'accroissement des dimensions des machines tournantes et des machines-outils, les mesures optiques, utilisant les appareils habituellement réservés à la topographie, se sont révélées les seules capables de résoudre facilement et avec précision certains problèmes liés à la fabrication, au montage et au suivi de ces grands ensembles que sont maintenant les groupes de production d'énergie électrique.

Le mécanicien a besoin d'une précision de quelques dixièmes de millimètre à 60 m de distance et souhaite rester à l'intérieur du dixième à quelques mètres. Cela correspond à des précisions de lecture de quelques secondes d'arc, compatibles avec la précision des appareils de mesures optiques (1 mm à 60 m = 3,47 sec).

Elles sont nécessaires pour obtenir un bon fonctionnement des machines.

Pour les groupes de 1 000 MW, par exemple, la ligne d'arbres est constituée de 4 rotors de turbine qui entraînent un rotor d'alternateur, ce qui représente une masse de 750 tonnes tournant à 1 500 tours/mn. Les 2 paliers extrêmes sont distants d'une soixantaine de mètres.

Les imprécisions sur les mesures de nivellement des paliers et des parties fixes, ou sur les mesures d'alignement des rotors, ont pour conséquence directe une élévation du niveau vibratoire préjudiciable au bon fonctionnement et à la durée de vie des machines.

Mais auparavant, tous les sous-ensembles qui constituent ces groupes : rotor et stator de l'alternateur, corps internes, boîtes d'échappement et rotors des turbines, ont été usinés sur des machines-outils de dimensions imposantes. Les précisions d'usinage nécessaires à un montage correct ne peuvent être

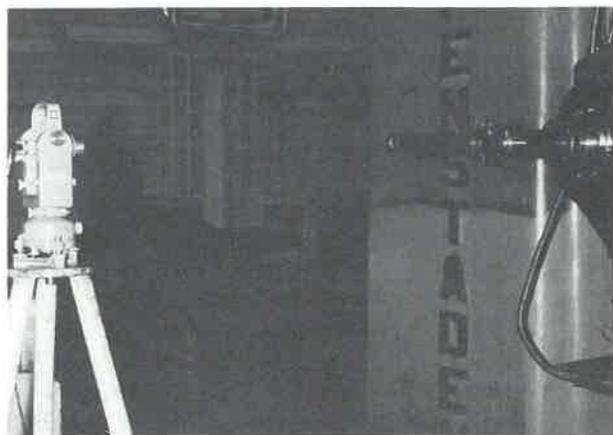
atteintes que si les machines-outils ont elles-mêmes une géométrie parfaite. Compte tenu de leur taille, les moyens de contrôle géométrique tels que l'équerre ou le cylindre étalon ne suffisent plus pour vérifier efficacement la totalité du volume d'usinage de ces machines.

C'est donc là aussi les mesures optiques qui nous ont permis de résoudre, depuis 25 ans, les problèmes de mesure de perpendicularité, de parallélisme, de planéité, de rectitude, etc... qui conditionnent la précision des machines-outils.

Ce préambule étant établi, je me propose de vous projeter un certain nombre de photos sur lesquelles nous verrons l'utilisation qui est faite des appareils de topographie dans la construction électro-mécanique.

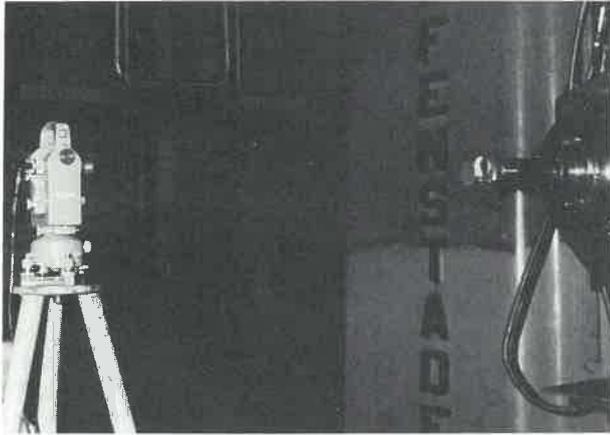
Tout d'abord, quelques exemples de mesure en atelier

Vous voyez ici une opération de contrôle de l'indexage d'un plateau tournant qui équipe une alé-seuse. Plusieurs méthodes sont utilisées suivant les machines et les précisions recherchées.



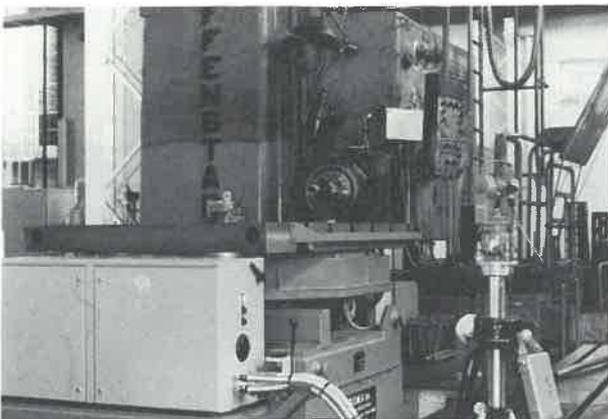
Ici, le théodolite est centré sur l'axe du plateau tournant et vise un miroir fixé sur la broche de l'alé-seuse. On commande au plateau tournant une rotation de n degrés et on vérifie au théodolite l'angle qui a été effectué.

On peut remplacer le miroir par un collimateur fixé dans la broche de l'aléuseuse. Cela permet une lecture plus facile et on peut en même temps vérifier le vrillage du plateau.



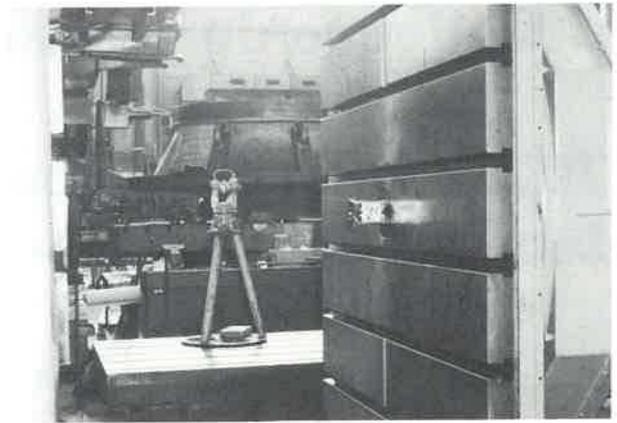
Il n'est pas toujours possible de mettre le théodolite en station sur le plateau tournant. Dans ce cas, on centre un clinomètre sur l'axe du plateau et on vise avec un théodolite depuis la taque de l'aléuseuse.

Le processus est sensiblement le même : après avoir réglé le clinomètre à zéro, on le vise en auto-collimation à partir du théodolite, dont on règle le cercle à zéro.

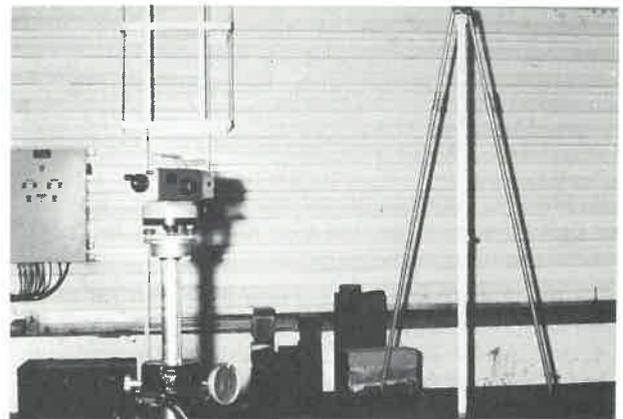


On commande à la table une rotation de n degrés, on ramène la graduation du clinomètre de n degrés en sens inverse, on vise avec le théodolite et on rétablit l'autocollimation ; la rotation du cercle du théodolite nécessaire pour retrouver l'autocollimation correspond à l'erreur de rotation du plateau tournant.

Cette méthode est moins précise que la précédente à cause de la précision propre au clinomètre (environ 10 sec).



Il s'agit ici d'une table tournante et pivotante, orientable entre les positions horizontale et verticale. Sur la photo, la table est verticale et on vérifie la rotation de 90 en 90 degrés autour de son axe. On fixe un carré optique au centre et on se règle en auto-collimation avec un théodolite sur la face de ce carré. On règle à zéro le cercle vertical ; on commande à la table une rotation de 90, 180, 270 etc, et on vérifie sur le théodolite.



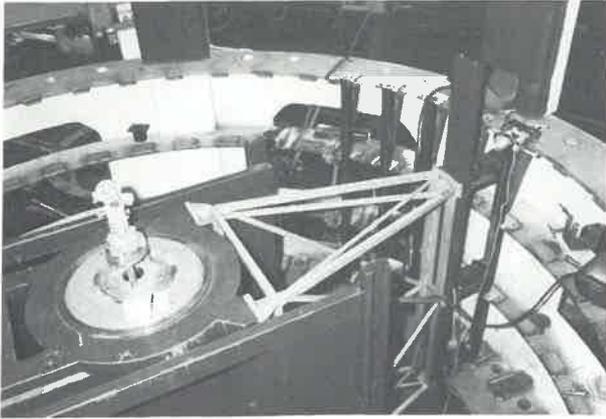
Ici, c'est une opération très simple de nivellement d'un marbre de traçage de $10\text{ m} \times 4\text{ m}$, effectuée à partir d'un niveau N3 (nouveau modèle) et d'une mire invar.

Ces marbres en acier sont quadrillés par des vérins (tous les 1,5 m environ) pour arriver à un nivellement correct. La précision demandée est de $\pm 0,1\text{ mm}$.

Nous quittons la machine-outil pour une opération de construction d'un alternateur hydraulique.

L'opération consiste à positionner correctement les barreaux-clavette sur lesquels vont venir s'empiler les segments de tôle qui constituent le circuit magnétique du stator.

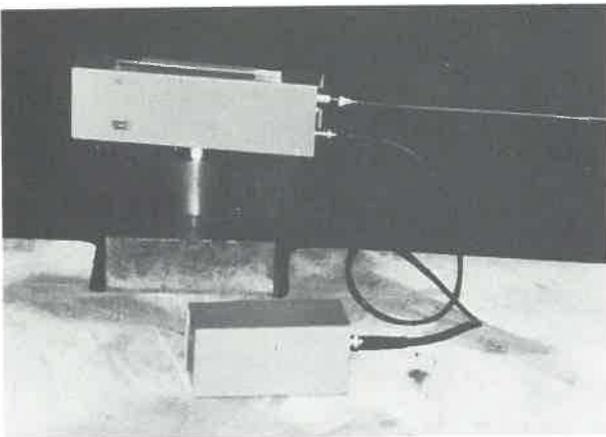
Le théodolite est mis en station dans l'axe de la carcasse. On fixe une mire éclairante sur le barreau à positionner, on vise la mire à partir du théodolite, on



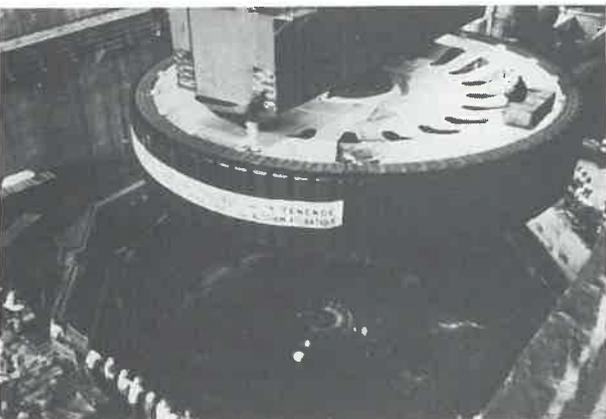
fixe provisoirement le barreau avec des serre-joints, puis on déplace la mire le long du barreau, successivement à l'emplacement des autres points de fixation. Quand le barreau est bien en place, les pièces d'ancrage sont agrafées par un point de soudure en attendant l'opération de soudage définitive.

On présente ensuite le barreau suivant sur l'outillage de positionnement et on fait tourner l'ensemble pour l'amener sensiblement à sa place. On fixe la mire et on tourne le théodolite de l'angle indiqué par les plans de construction. On répète l'opération autant de fois qu'il y a de barreaux.

J'ouvrirai une parenthèse dans les mesures optiques pour vous présenter un problème de construction un peu particulier, qui a trouvé sa solution dans l'utilisation du Distinvar.



Vous voyez ici le rotor d'un alternateur de centrale hydraulique pour le Brésil.



(Puissance : 378 MVA - 300 MW - Vitesse : 80,8 tr/mn). Ce rotor mesure plus de 16 m de diamètre et pèse 825 tonnes. Intransportable, il est donc entièrement monté sur place à partir d'éléments ou de sous-ensembles fabriqués soit en France, soit par l'industrie locale.

La difficulté consiste à monter les 22 clavettes qui vont soutenir la jante pour que celle-ci soit circulaire avec une tolérance de $\pm 0,2$ mm sur la circularité.

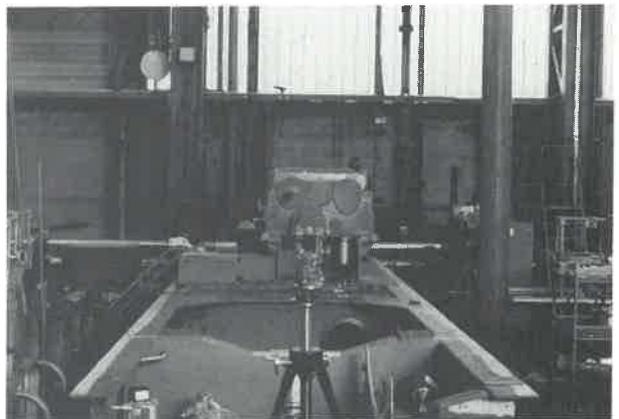
Le réglage des cordes entre clavettes se fait de la manière suivante : l'appareil Distinvar d'une part, et le point fixe d'autre part sont centrés dans la rainure de clavette à l'aide d'une pièce simple, munie d'un alésage de 30 mm et entrant juste dans la rainure.



On mesure les rayons avec le même appareillage, en centrant le Distinvar dans l'emboîtement central du moyeu.

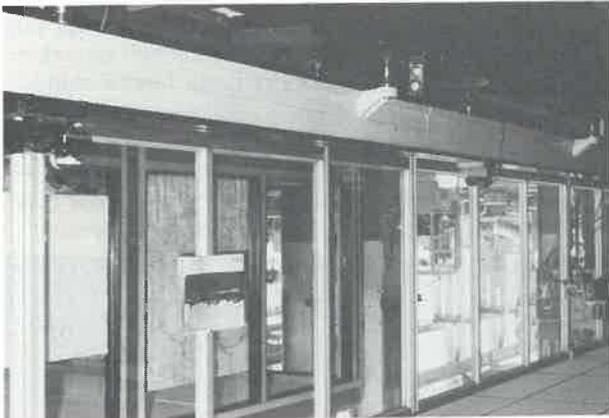
D'autres mesures, en particulier la perpendicularité des clavettes par rapport à la face de montage, sont effectuées au théodolite.

Les turbines à gaz représentent une part non négligeable dans les fabrications d'Alstom-Atlantique. Un groupe complet est constitué de 3 "colis" : un colis turbine + réducteur, un colis alternateur, un colis auxiliaire gaz. Suivant la taille des machines, la puissance disponible sur l'alternateur va de 20 MW à 110 MW.



La photo a été prise au moment de la mise en place du réducteur, sur le socle de la turbine. Le théodolite est mis en station dans l'axe longitudinal du socle. Un fil à plomb matérialise l'autre extrémité de l'axe, caché par le réducteur. Un simple miroir est fixé sur l'arbre de sortie du réducteur, que l'on positionne en recherchant l'autocollimation avec le théodolite.

Il s'agit ici d'une simple mesure d'alignement par auto-collimation sur un banc de métrologie de 12 mètres de longueur. Ce banc est constitué de 4 tronçons de 3 mètres qu'il faut aligner dans le plan vertical et dans le plan horizontal.

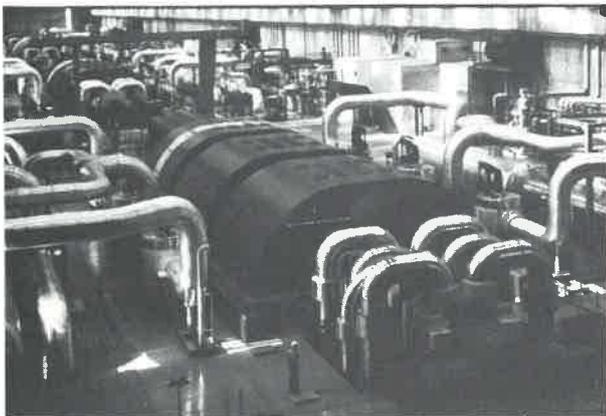


Matériel utilisé : collimateur + lunette Leitz équipée de 2 micromètres à lame à faces parallèles ;

- mettre les 2 réticules en coïncidence,
- rechercher le réticule d'autocollimation,
- déplacer le collimateur sur la longueur du banc en relevant les erreurs de rectitude et de planéité à corriger.

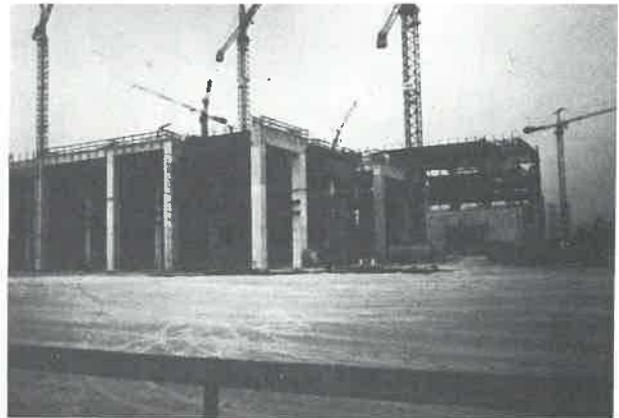
Ce réglage peut être effectué maintenant avec un faisceau laser et un équipement d'interférométrie de rectitude. Mais les 2 réglages, dans les plans vertical et horizontal, ne peuvent pas se faire simultanément.

Vérifications sur les sites de montage

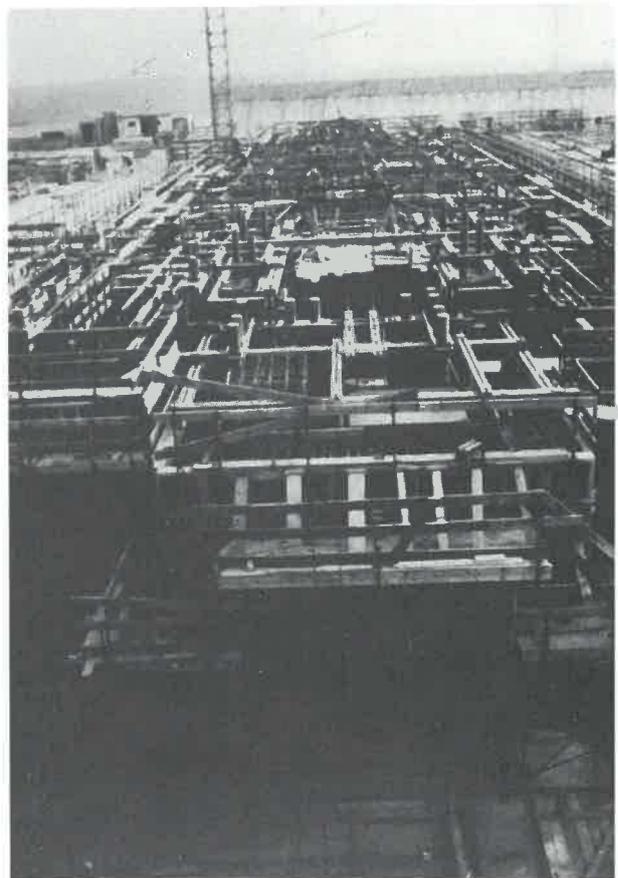


Présentation de la Salle des Machines d'une Centrale Nucléaire de 4 Groupes de 1 000 MW.

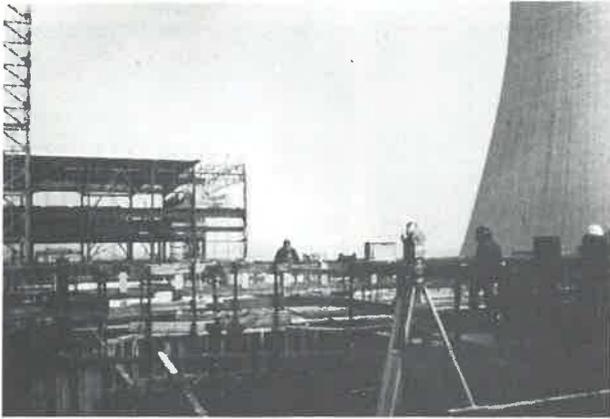
Vue de l'ensemble avant la coulée de la table du groupe (description - dimensions).



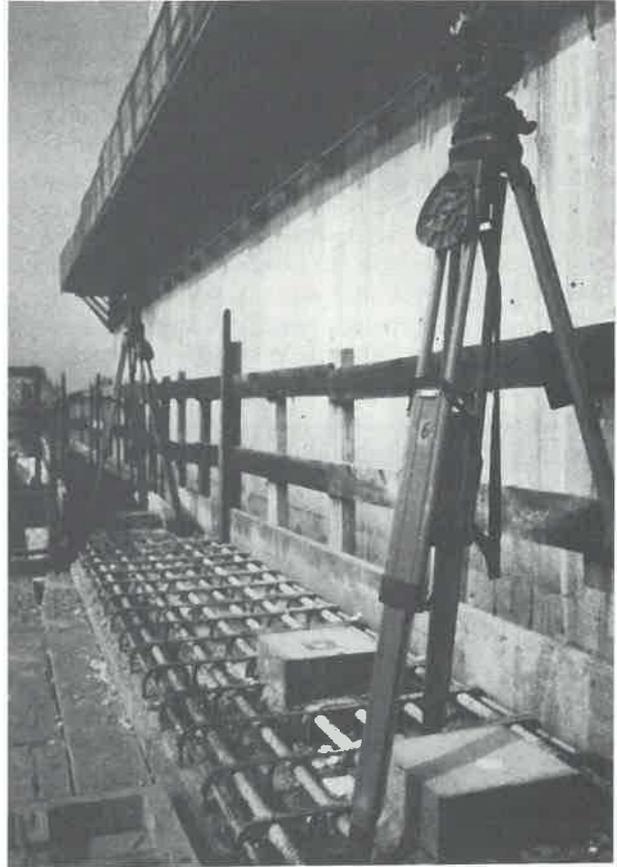
Le ferrailage du béton avant coulée. Pourtour des massifs des séparateurs. Fourreaux d'ancrage des corps de turbine et des boîtes d'échappement. Trémies et planchers provisoires.



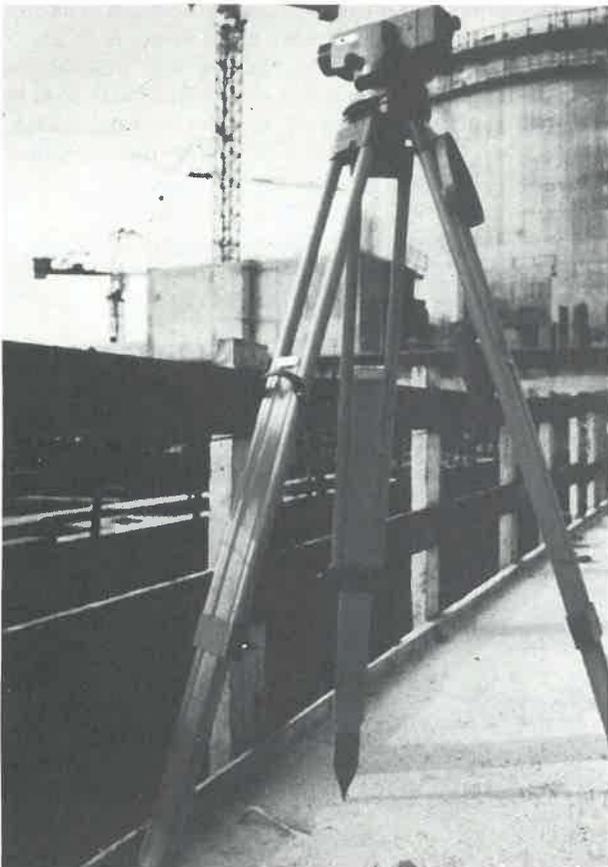
Opération de nivellement d'une plaque de base.



Théodolite en station au-dessus d'un repère topographique du génie-civil matérialisant l'axe du groupe sur un ferrailage de poutre transversale.

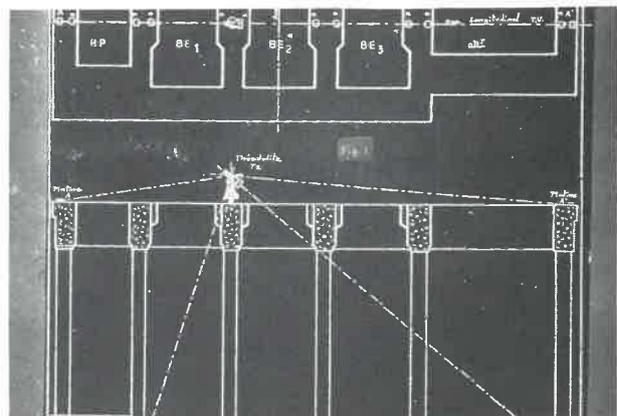


Niveau en station pour le nivellement d'une plaque de base de palier.



Les précisions recherchées dans ces conditions sont de l'ordre de 1 à 5 mm. Quelques semaines après la coulée de la table, après disparition des coffrages, nous intervenons à nouveau pour le tracé des axes (axe longitudinal et axes transversaux), l'implantation des repères topographiques, le relevé d'altitude par rapport au béton du radier, la vérification des dimensions des trémies, du positionnement et de la verticalité des fourreaux d'ancrage, etc.

Ce croquis représente la disposition des appareils de mesure pour ramener sur la table l'axe longitudinal

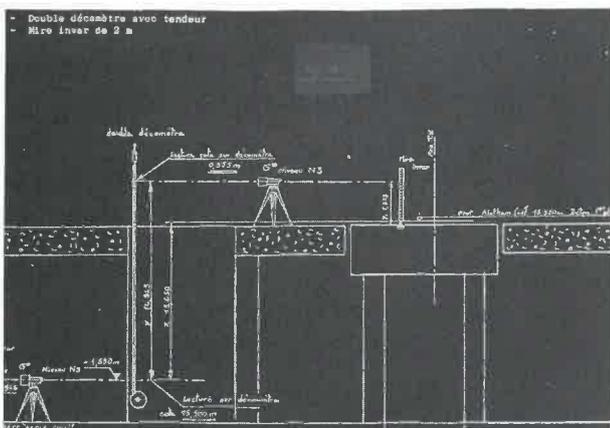


qui a été matérialisé sur le béton du radier par 2 repères scellés.

On met le théodolite en station sur la table, à un emplacement d'où l'on pourra viser successivement chacun des 2 repères. Par retournements successifs, on se met à l'aplomb de l'axe défini par ces repères, puis on les reporte sur la table, sur des platines qui ont été noyées dans le béton 1^{ère} phase, platines dont nous avons vérifié la position avant la coulée.

Cette opération de traçage des axes est très importante, puisque c'est à partir de là que vont s'effectuer toutes les opérations de montage et, ultérieurement, de révision du groupe. La précision demandée à ce stade est de l'ordre de quelques dixièmes de mm.

Une autre mesure importante est schématisée ici : c'est la mesure de l'altitude de la table par rapport au radier.



On part du repère géodésique implanté à hauteur du radier, et, au moyen de 2 niveaux, 2 mires en invar et un double décimètre tendu à 15 kg, on détermine l'altitude du point topographique scellé dans le béton 1^{ère} phase de la table.

Cette mesure n'est faite que pour un seul point de la table, à partir duquel on effectue le nivellement des autres points.

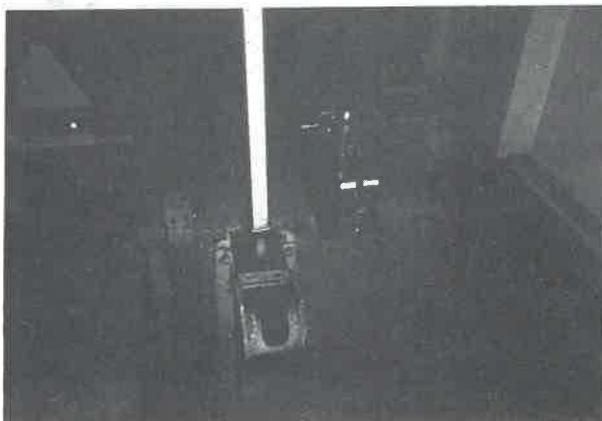
Vérifications sur les sites en exploitation

Les mesures optiques sont très largement utilisées au cours du montage du groupe, pour les réglages de nivellement des parties fixes, l'alignement des paliers et des corps des turbines, ce qui permet de réduire au minimum les réglages au moment de la présentation des rotors.

Enfin, une fois le groupe en service, nous exerçons une surveillance périodique de la stabilité dimensionnelle de la fondation, pour 2 raisons :

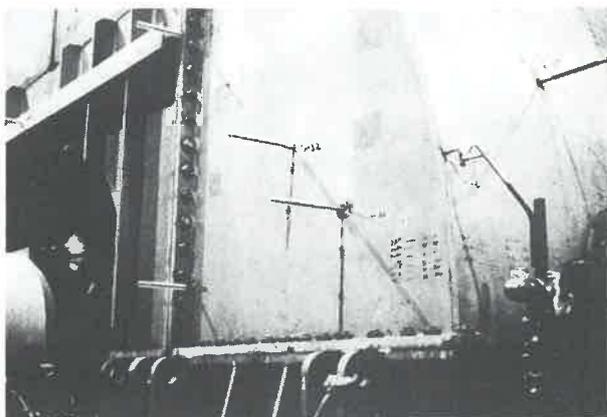
- d'une part, prévoir les opérations de réglage ou de re-lignage éventuel à programmer au planning des prochaines révisions ;
- d'autre part, et compte tenu du nombre de groupes identiques actuellement en service, établir une statistique des évolutions et des déformations de ces tables de béton.

Au cours de ces vérifications périodiques, on reprend la mesure de l'altitude de la table par rapport au radier.

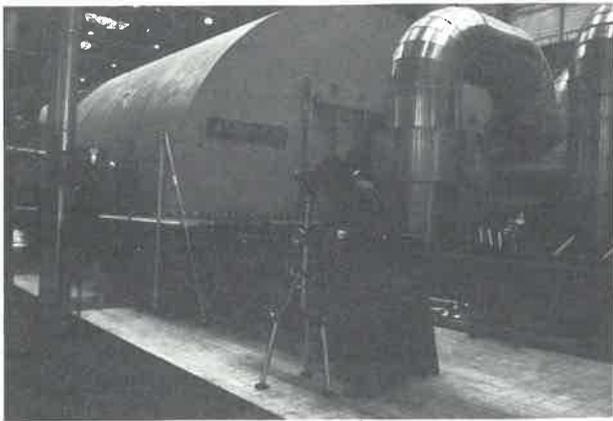


Des cannes de silice de 1 mètre sont empilées dans un fourreau le long d'un pilier. Leur disposition n'est pas toujours idéale, mais au moyen d'une mire en invar, on peut très bien reporter la lecture sur le point topographique le plus proche.

Une autre méthode est en cours d'essais comparatifs avec les cannes de silice. Elle utilise le fil invar et l'appareil Distinvlar. Le fonctionnement du Distinvlar étant basé sur l'équilibre d'une balance, on ne peut l'utiliser qu'horizontalement. Nous avons dû adapter un renvoi d'angle à 90° pour faire des mesures verticales. Ce complément a du reste été étudié par le labo de métrologie du CERN, qui était le concepteur de l'appareil. Le fil invar est réglé à longueur lors de la première mesure, puis identifié à la référence du groupe. La lecture du compteur du Distinvlar est consignée. Le fil reste en place. Ultérieurement, lorsque cette méthode de mesure sera officialisée, le fil prendra place dans le fourreau réservé aux cannes de silice. Lors des mesures suivantes, il suffira de fixer le Distinvlar sur le plancher de la salle des machines, d'accrocher le fil et de faire la lecture du compteur (précision 0,1 mm).

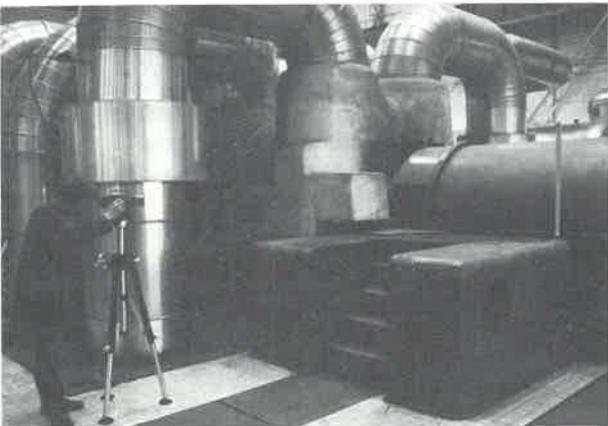


Au cours des premières mises en service, les bureaux d'études ont souhaité vérifier certaines hypothèses de calcul sur la déformation des boîtes d'échappement. Nous avons fait ces mesures au moyen de tiges en invar soudées sur la boîte aux points à mesurer, la visée étant faite par un théodolite.



Pour la surveillance du nivellement de la table, 38 points de repère topographiques sont scellés dans le béton, sur le pourtour du groupe et aux quatre coins de chaque palier.

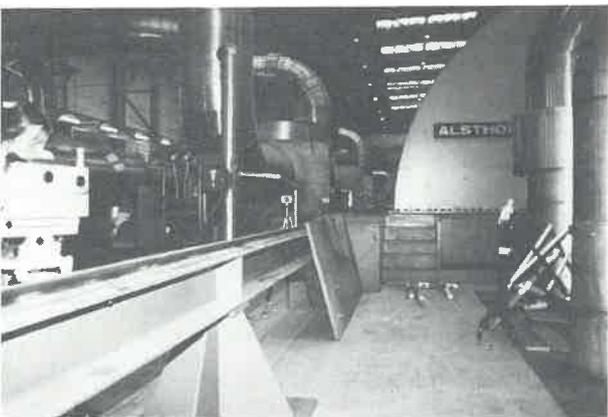
A partir du point topographique de référence, on effectue, par cheminements successifs, le nivellement complet de la table (précision recherchée 0,1 mm).



De même, on mesure l'altitude des joints des paliers, en 4 points, pour vérifier si leur pente est conforme à celle demandée au montage. Cela permet de prévoir les retouches à effectuer au cours des révisions programmées.

On vérifie également le nivellement des massifs latéraux qui portent les séparateurs-surchauffeurs.

Certains des points topographiques situés sur le pourtour de la table, ont été alignés au moment de leur implantation. Pour détecter une éventuelle distorsion de la table, qui conduirait à un désalignement dans le plan vertical, on procède à une vérification de cet alignement.



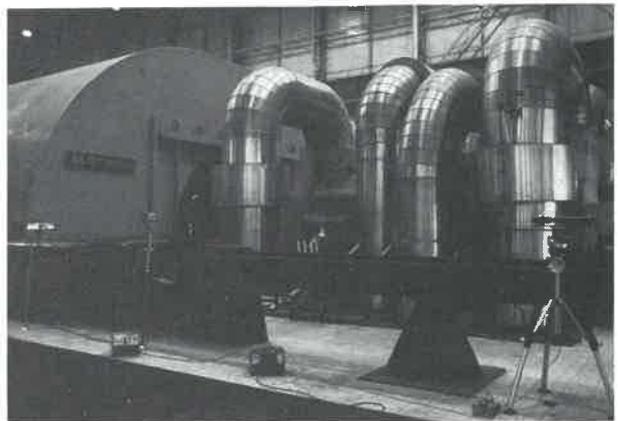
Pour faire ces mesures d'alignement, on utilise la lunette Zeiss-Jena, dont la portée est suffisante, mais qui, malheureusement, n'a qu'une capacité de mesure de ± 1 mm.

On voit ici la lunette et 2 trépieds porte-mire. Le dernier trépied, que l'on ne distingue pas, porte une mire éclairante (précision recherchée : 0,1 mm).

Les difficultés liées à l'utilisation de la lunette Zeiss-Jena (capacité de mesure réduite, sensibilité aux vibrations) nous ont conduit à nous intéresser au laser d'alignement à récepteur asservi, développé par le CERN à Genève.

Nous avons déjà fait des mesures qui nous encouragent à persévérer dans cette voie.

Nous voyons ici l'ensemble de l'équipement : le tube laser et son collimateur, une mire de centrage et le récepteur.



Le laser en station le long du groupe, avec le récepteur en position rapprochée sur le 2^e point topographique et la mire de centrage sur le 1^{er} point.

En guise de conclusion, je voudrais simplement préciser que le personnel d'Alstom, et particulièrement à l'Établissement de Belfort, est très sensibilisé à la mesure optique et lui fait confiance. Nous n'avons vu que quelques exemples de son utilisation dans les ateliers, mais pour le personnel, depuis l'atelier jusqu'au chantier de montage, la présence d'un théodolite ou d'un niveau ne constitue pas une curiosité, et il arrive très fréquemment qu'il fasse appel aux instruments de topographie pour résoudre un problème de construction original, dans lequel les moyens de mesure conventionnels poseraient bien souvent des questions d'outillage spécifique et de durée de la mesure pour obtenir la même précision.