

L'AUTOMATISATION ET LA MOTORISATION DU NIVELLEMENT DE TERRAIN

par Guy DUCHER
Ingénieur en Chef Géographe

PLAN

- 1) Introduction ou historique comparé
- 2) Développement du nivellement motorisé
- 3) Automatisation du nivellement motorisé
 - 3,1, mise en station de la mire
 - 3,2, informatisation des enregistrements
 - 3,3, automatisation des lectures :
 - 3,3,1, lectures d'appoints
 - 3,3,2, lectures sur mire :
 - 3,3,2,a, mire codée à télécommande
 - 3,3,2,b, système à laser et scanneur
 - 3,3,3, lectures simultanées des appoints et sur mire
- 4) Simplification des opérations et variantes :
 - 4,1, cheminement parallactique automatique et motorisé
 - 4,2, automatisation, motorisation et simplification par suppression d'un véhicule porte-mire
 - 4,3, méthode de la poussette
 - 4,4, nivellement sans mires
- 5) Conclusion

1) INTRODUCTION OU HISTORIQUE COMPARÉ

La méthodologie du nivellement de terrain a été considérée jusqu'à une date rapprochée comme ayant atteint et ce, dès la fin du 19^e siècle, une forme pratiquement parfaite et achevée. Il est vrai que l'extraordinaire précision obtenue dès cette époque avec des moyens simples justifiait une telle notoriété. Toutefois on peut se demander si la combinaison interactive de ces deux éléments, à savoir des résultats hautement performants, quasiment en avance sur la plupart des besoins, et une procédure d'acquisition pour le moins modeste, n'ont pas contribué à maintenir pendant longtemps le nivellement à l'écart des grands perfectionnements technologiques que connaissaient les autres disciplines.

C'est ainsi qu'à titre comparatif, dès les premiers temps de l'aviation l'on embarqua, à bord, des appareils photographiques et que rapidement naquirent

des chambres photogrammétriques spécialement conçues pour ce nouveau vecteur.

L'avion est devenu depuis un moyen moderne et irremplaçable pour exécuter de manière précise et extensive les levés. On a en effet rapidement apprécié les extraordinaires facilités de déplacement qu'il offrait aux stations d'observation et de mesures et l'on a en conséquence réalisé les équipements appropriés qu'il nécessitait. Aucun retard majeur n'est venu dans son utilisation cartographique.

De même pour le **satellite**, avec un raccourcissement encore plus spectaculaire du délai entre les premiers lancements et les applications cartographiques tant géodésiques que thématiques. Le premier SPOUTNIK date de 1957, Gagarine de 61, la première démonstration photocartographique connue, à 260 km d'altitude, date de 1965 avec GEMINI, en 1969 c'était la Lune, dès 1970 commençaient avec le SOYOUZ - 9 des essais de matériels photographiques divers désormais opérationnels et toujours en usage avec les SALIOUT ; en 1972 les satellites automatiques américains d'observation de la Terre ERTS puis LANDSAT assuraient un service régulier, encore inégalé. En 1973, SKYLAB constituait entre autres une première démonstration photogrammétrique spatiale.

On s'attend à un développement considérable, d'ici à quelques années, de ces techniques avec le projet de caméra métrique embarqué sur la navette américaine et la version européenne SPACELAB (1983) et surtout avec le projet français de saisie numérique stéréoscopique SPOT (1984).

On ne peut plus dissocier l'ensemble vecteur-capteur dans le domaine aérospatial, chacun apportant à l'autre.

Pour le nivellement de précision, rien de semblable ne s'est passé. L'avion ne lui a rien offert de comparable, le satellite non plus, même si des altimètres-radars ou des appareils de mesure des distances à laser permettent ou permettront de déterminer des profils sur de grandes longueurs, procurant des

visions d'ensemble de l'altimètre, assurant la fermeture de vastes cheminements positionnant des balises au sol en planimétrie et en altimétrie avec une précision décimétrique et contrôlant peut-être le mouvement des plaques et des formes fines du géoïde.

Mais l'**automobile** dont les débuts furent pourtant contemporains de ceux du nivellement, se développa sans rien lui apporter. Cela tient sans doute à ce que l'automobile fut longtemps considérée comme un objet de luxe, tout à fait hors de portée des prétentions éventuelles des rustiques équipes de niveleurs ! Quant au chemin de fer qui précéda le nivellement, le même raisonnement joua, avec certainement un coefficient amplificateur dû au manque de souplesse et au coût de la circulation des convois ferrés. Aussi nivela-t-on routes et voies ferrées à pied, et continue-t-on encore de le faire, 150 ans après l'apparition des moyens modernes de locomotion. L'esprit de continuité a d'ailleurs prolongé l'emploi des méthodes classiques du nivellement pédestre sur les autoroutes et les voies nouvelles du train à grande vitesse (TGV).

Cette constatation montre bien que si les techniques des levés géographiques procèdent souvent d'une même méthodologie (stationner un point, y faire des mesures, enregistrer des données diverses telles que distances, angles, dénivelées, paramètres géophysiques, densité photographique ou émissivité d'un point ou d'une surface, puis se déplacer à la station suivante...), l'histoire de leur développement n'est pas identique. Le nivellement de précision a été longtemps délaissé. Était-ce parce qu'il n'avait pas un support militaire suffisant comme l'ont eu la photogrammétrie et la télédétection vis-à-vis de l'avion et du satellite ? Était-ce parce que le rapport des coûts, des vitesses et des fiabilités, entre autos et piétons est resté longtemps apparemment rédhibitoire pour justifier de ne pas se pencher sur la motorisation du nivellement, jusqu'à ce que l'évolution en sens contraire des deux termes de la fraction ne vienne tendre à inverser le bilan économique en faveur de la motorisation. A moins que ce ne soit l'insécurité des cheminements en bordure de routes très passagères qui n'ait poussé à rattraper le temps perdu ?

Et pourtant le nivellement automatique sur route a son ancêtre. Il s'agit d'un prototype ayant fait l'objet d'un dépôt de brevet en 1881 par M. CALMETTE, ancien conducteur des Ponts et Chaussées, et dont un exemplaire est exposé à l'IGN, dans la galerie des instruments anciens, à SAINT-MANDÉ (Fig. 1). L'appareil, spécialement conçu pour la route, enregistre automatiquement les profils sur papier. La pente de la route est prise en compte par un pendule tandis que la distance parcourue entraîne le déroulement du papier par un système d'engrenages lié aux grandes roues. Ce niveleur mécanique, qui n'a peut-être jamais été réellement utilisé en production, ne nécessite aucune des interventions manuelles classiques du nivellement (mise en station, pointé, lecture, enregistrement sur carnet...).

C'est un profilographe automatique, analogue et de précision probablement médiocre, mais dont l'existence est le témoin d'une démarche conceptuelle novatrice qui est malheureusement restée trop longtemps en sommeil lorsque l'automobile est née,



Fig. 1 Profilographe automatique de 1881. (Document IGN)

alors que l'on aurait pu, de la même façon, chercher à créer un outil fonctionnel adapté à ce moyen moderne de transport.

On aurait pu ainsi transformer la fonction de simple vecteur que l'on a reconnu à l'automobile pour en faire véritablement un véhicule niveleur intégré et de précision. Il faudra attendre ces toutes dernières années pour voir apparaître les centrales inertielles qui délivrent notamment l'altitude à bord de véhicules et voir fleurir un peu partout les premiers essais du nivellement motorisé de précision.

Sans doute fallait-il attendre que les niveaux se perfectionnent pour rendre plus flagrant l'anachronisme du nivellement pédestre sur autoroute et plus évident l'intérêt à réduire les temps de parcours une fois réduits les temps d'arrêts en station. Ces projets remontent aux années 1960, lorsque l'on remplaça le système manuel à calage de bulle, asservissant la visée à la verticale, par des systèmes plus puissants, capables de démultiplier l'intervention de l'opérateur dans la mise à l'horizontale des visées. On a qualifié d'emblée ces instruments de **niveaux automatiques**, leur assurant ainsi une promotion d'ailleurs justifiée mais évacuant en revanche pour longtemps toute idée de poursuivre l'automatisation du nivellement. Comment faire admettre en effet qu'il faille progresser dans la voie de l'automatisation lorsque l'on utilise des niveaux automatiques ! Or, a-t-on réellement recensé la liste des opérations manuelles que l'on effectue encore avec les instruments automatiques, qu'il s'agisse de les déplacer, de les installer, ainsi que leurs mires associées, d'effectuer les visées, de lire les mires et les appoints ou d'enregistrer les mesures ?

L'automatisation des niveaux aura donc permis la motorisation du nivellement ; celle-ci appelle maintenant en retour une véritable automatisation de l'ensemble des opérations.

2) DÉVELOPPEMENT DU NIVELLEMENT MOTORISÉ

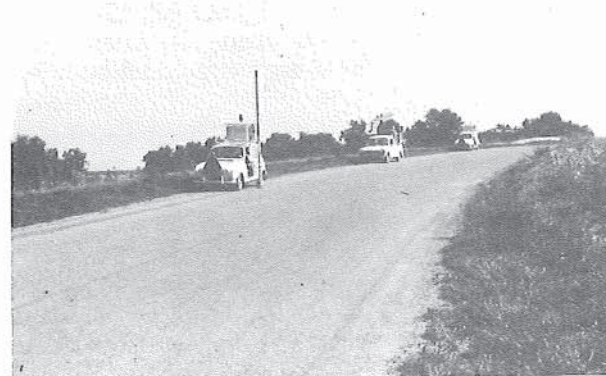
Les premiers essais de nivellement motorisé remontent à 1962 ; ils furent effectués sous la conduite du Prof. PESCHEL, de l'Université Technique de Dresde (R.D.A.).

Après plusieurs années d'efforts des constructeurs et des utilisateurs, un matériel à 3 véhicules (1 porte-niveau et 2 porte-mires) a pu être mis au point et dès les années 1971 démontrer sur le terrain les capacités du système. Depuis 1979, un équipement de série est disponible chez Zeiss-Iéna (R.D.A.), basé sur l'emploi du niveau automatique Ni 002 et comprenant des accessoires spécialement adaptés à la motorisation (trépied allongé, mires à articulation...).

Les suédois ont adopté, au Service Géographique de Gävle, vers 1977, ce système, moyennant quelques légères modifications. Les performances qu'ils ont développées depuis semblent les placer en pointe de la communauté des niveleurs. Aux États-Unis, on s'est également montré très enthousiasmé par ces systèmes, et le "National Geodetic Survey" a mis en œuvre en Floride, vers 1979, les premiers essais d'un matériel similaire comportant un véhicule niveleur avec niveau Ni 002, enregistrant les données sur bande magnétique, et deux motocyclettes portant les mires à la manière d'un side-car.



Fig. 2 et 3 Équipe de nivellement motorisé de l'IGN (Photos Rousseau IGN)



C'est à cette époque que l'IGN français, sous la conduite de l'IG Kasser, a également mis sur pied une première équipe de nivellement motorisé comprenant un niveau automatique Ni 002 et divers accessoires Zeiss-Iéna modifiés et intégrés dans les véhicules (une camionnette porte-niveau Simca 1100 et deux Renault R4 porte-mires).

On utilise une calculatrice à bord pour les contrôles de données.

Actuellement on en est à la 3^e campagne et une deuxième équipe a été mise en œuvre (voir fig. 2 et 3).

En 1980 c'est au tour du service géographique norvégien, le NGO, d'acquiescer un matériel semblable à celui utilisé à l'IGN et d'envisager, après le succès des premiers essais, de le compléter d'une 2^e équipe en 1983, puis d'une 3^e en 1984.

Ce rapide aperçu montre avec quelle rapidité semble actuellement se développer la motorisation du nivellement. C'est que les avantages pressentis se confirment à l'usage, tandis que se précisent les conditions d'emploi. Les avis convergent pour reconnaître au nivellement motorisé les qualités suivantes :

a) Une augmentation de la productivité d'au moins 30 %, grâce à la rapidité des parcours. Les vitesses moyennes de mesure mentionnées se situent aux environs de 1,5 km/h, quelquefois 2, voire 3 km/h selon la rectitude et la pente du tracé ; cela rend le nivellement motorisé 50 % plus rapide qu'à pied. Quant au coût final, incluant celui des amortissements et des calculs, effectués en direct dans le cas du nivellement motorisé, il paraît être, d'après les premiers essais de l'IGN de 1980, de 17 % moindre que dans le cas du nivellement pédestre.

b) Un accroissement de la précision des mesures, du moins si l'on poursuit ce but et que l'on respecte les conditions nécessaires pour l'atteindre. La position plus élevée de la ligne de visée l'éloigne des effets perturbateurs qu'exerce la route sur la réfraction des couches basses de l'atmosphère et l'on peut allonger les portées et/ou améliorer la précision. De plus la réduction des temps de parcours entre stations laisse moins longtemps la mire avant sans contrôle, ce qui réduit les erreurs systématiques.

On peut de plus profiter des véhicules pour alourdir les matériels et augmenter ainsi la stabilité du trépied et des liaisons avec le sol. Tous ces éléments concourent à une meilleure précision. On cite même quelquefois des valeurs inférieures à 0,4 mm/km pour l'erreur probable, au lieu de 0,55 mm/km pour les cheminements classiques de premier ordre.

c) Une amélioration du confort et de la sécurité, notamment sur les itinéraires très fréquentés, ou lorsque les conditions météorologiques sont hostiles au piéton (grosse chaleur, petite pluie...).

d) Une amélioration de la prestation fournie à l'utilisateur lorsque les conditions exigent une très grande rapidité d'exécution. C'est ainsi que l'IGN a pu effectuer des cheminements de nivellement motorisé sur le périphérique parisien au rythme de 6 km par nuit, en opérant de 23 h à 04 h, avec éclairage sur projecteurs.

Il est certain que le nivellement motorisé n'a pas partout la même efficacité et que les routes de mon-

tagne sinueuses et en pente ralentissent les opérations, sans toutefois en faire tomber le rythme en dessous de celui des cheminements pédestres. Quant aux voies ferrées, l'emploi de la seule piste cyclable exclut tout véhicule automobile.

3) AUTOMATISATION DU NIVELLEMENT MOTORISÉ

Tous les résultats obtenus avec la motorisation du nivellement de précision et que chaque nouveau développement confirme un peu plus, incitent à poursuivre les réflexions en faveur d'une automatisation encore plus poussée des opérations.

Tout y conduit, que ce soient les progrès technologiques des automatismes ou de l'informatique que l'on retrouve déjà dans les tachéomètres intégrés automatiques ; que ce soient les capacités offertes par la charge utile, la surface disponible de la plateforme, et l'alimentation électrique par l'automobile, ou les besoins immenses à satisfaire que l'on ressent tant en France, pour l'entretien des réseaux et la mise en évidence des évolutions, qu'à l'étranger où de vastes territoires sont encore dépourvus de nivellement précis.

Mais il est probable que l'automatisation se fera par étapes et qu'avant de parvenir à sa forme achevée, une longue progression est à prévoir.

Les suggestions qui suivent n'ont d'autre objet que de tenter une relance des idées dans cette voie. Elles n'ont bien entendu qu'un caractère strictement personnel, voire hasardeux ; leur faisabilité n'est ni évidente ni peut-être entièrement rentable.

3,1, Mise en station de la mire

Le nivellement mettant en œuvre simultanément un niveau et deux mires, une symétrisation des opérations de mise en station paraît souhaitable a priori. Après avoir rendu automatique l'horizontalité de l'axe des niveaux, peut-être sera-t-on conduit à automatiser la verticalisation des mires ?

Cela irait dans le sens de l'accélération des processus en station et d'une meilleure précision.

3,2, Informatisation des enregistrements

Bien des progrès paraissent encore possibles s'ils ne sont pas déjà à portée de main, dans le domaine de l'informatisation et de l'enregistrement des lectures, afin de remplacer l'actuel carnet manuel.

L'emploi sur le terrain de calculatrices constitue déjà un pas en avant ; celui de **systèmes à cassettes magnétiques** en est un autre encore plus décisif. De tels systèmes, type Geodat ou Compucorp, se sont par ex. révélés concluants à l'IGN pour le relevé automatique des profils, avec traitement automatique sur mini-ordinateur Tektronix et dessin sur table traçante Benson. Les temps de calculs en bureau sont réduits de manière considérable, peut-être de 5 à 10 fois. S'agissant de saisies à bord de véhicules, les problèmes de robustesse des matériels informatisés vis-à-vis des conditions météorologiques, des poussières, du sable... devraient être moins critiques que dans les cheminements à pied, la protection d'ensemble étant mieux assurée et le choix des appareillages étant plus indépendant des paramètres poids et encombrement.

Ces systèmes offrent de plus en nivellement l'intérêt supplémentaire de pouvoir effectuer un contrôle de marche de manière plus automatique en chaque station et de permettre la compression des données brutes à reverser ensuite sur bande magnétique.

Accessibles immédiatement, sans entraîner aucune modification sur le matériel de nivellement, ces systèmes devraient se répandre rapidement. Ils amèneront les opérateurs à se familiariser avec l'entrée informatique des données dès le terrain. Toutefois la portée des progrès qu'ils introduiront reste encore limitée. Il faut encore entrer manuellement les données au clavier, qu'il s'agisse des lectures sur mires, des appoints et des codes divers relatifs au travail en cours.

Aussi est-on conduit naturellement à examiner les possibilités des **enregistreurs à la voix** et leur intérêt pour le nivellement. Ces appareils remontent déjà à une trentaine d'années lorsque le "Bell Laboratory" présentait dès 1952 un matériel d'entrée vocale sur ordinateur capable de reconnaître les 10 chiffres avec un taux de réussite de 99 %, pour un seul locuteur. Des progrès ont été faits depuis et en 1975 la Société "Systems Engineering Laboratories" commercialisait à l'époque pour 100 kF le "Voice Input processor" ou TTI 500, avec un vocabulaire comprenant un certain volume de mots et de nombres. Le nombre de mots dépend de la taille mémoires du micro-ordinateur associé, mais elle dépasse facilement 16 mots, voire 32 avec 8 k mémoires.

Certes ces systèmes, conçus essentiellement pour les tâches d'atelier, sont encore largement méconnus. Sont-ils déjà fiables, et quel est leur rapport coût/performances ?

Certains appareils bas de gamme tel que le SR 8 de Phonic Inc, arrivent à reconnaître 16 mots isolés, prononcés par un seul locuteur, pour un prix de 3,5 kF ou le Vocon 5 000 de Heuristics qui connaît 64 mots étalonnés, pour 12 kF. Peut-on utiliser ces systèmes sur le terrain, du moins dans les conditions offertes à bord d'un véhicule ? Le TTI 500 nécessitait un branchement sur 110/220 V., sous 50 Hz, consommait 500 W et pesait 23 kg. Quel genre de microphone faut-il utiliser et n'y a-t-il pas lieu de craindre des effets parasites dûs par ex. au vent, aux passages d'autres véhicules... Pour s'assurer de la bonne reconnaissance des données, faut-il incorporer sur le véhicule l'ordinateur de traitement qui affiche en sortie sur une console de visualisation et quasiment en direct le dernier enregistrement entré ? Quoi qu'il en soit, il serait très utile d'explorer cette voie, de la tester, de mieux connaître les performances réelles de ces systèmes, leur taux d'erreur, leur robustesse, leur coût, leur rapidité réelle d'enregistrement, leur exploitation en aval, et le confort procuré ou non à l'opérateur.

On pourrait, pour le nivellement, se contenter pour commencer d'un appareil à capacités limitées, permettant d'enregistrer les nombres de 0 à 9 énoncés séparément, accompagnés de quelques instructions très simples.

Un essai en nivellement motorisé n'alourdirait pas le travail, car le véhicule niveleur ayant un chauffeur-secrétaire, ce dernier pourrait continuer à tenir le carnet manuel pendant la période d'expérimentation.

Par la suite il n'aurait que des croquis ou la supervision à effectuer.

Ces enregistreurs vocaux devraient présenter l'énorme avantage de permettre à l'opérateur de se concentrer entièrement sur les pointés-lectures, d'éviter tout risque d'erreur, surtout si un contrôle est visualisable en temps réel, et d'être moins contraignants et plus fiables qu'une entrée par clavier.

Les temps à l'arrêt en station, une fois la mise en station assurée, en seraient réduits d'autant, ou, à temps égal, on pourrait multiplier considérablement les pointés, si cela améliorerait de manière significative la précision.

3,3, Automatisation des lectures

Mais le système précédent a l'inconvénient majeur de maintenir les lectures entièrement manuelles. Son avantage est d'être facile à mettre en œuvre immédiatement ; mais il n'exclut absolument pas de s'orienter à terme vers des systèmes plus performants, à lecture automatique.

La difficulté de l'automatisation des lectures en nivellement réside dans la décomposition des lectures en deux parties, la partie principale (cm) étant lue sur la mire et les appoints sur le niveau. Les deux parties proviennent de capteurs distincts, situés l'un sur le niveau dans le véhicule niveleur, l'autre sur la mire, dans le véhicule porte-mire, à 50 ou 100 m du premier. Il faudra donc non seulement automatiser la lecture de ces deux composants mais les enregistrer dans l'ordre, avec une certaine synchronisation, de manière à pouvoir reconstituer facilement les lectures en bureau et sans fautes.

3,3,1, Automatisation des lectures des appoints

On peut imaginer divers dispositifs de lectures et d'enregistrements automatiques des appoints. En se basant sur le fait que la commande de la lame des appoints est à rotation et munie d'un tambour divisé en 100 parties correspondant chacune à 0,1 mm ou en 1 000 parties de 1 cmm, on pourrait adjoindre au tambour un **codeur rotatif** muni d'un limbe, gradué conformément à un mode absolu, séparant de manière bi-univoque 100 ou 1 000 positions angulaires, pour éviter tout système d'interpolation électronique. Ce limbe devrait donc compter de 7 à 10 pistes concentriques. A une époque où les tachéomètres intégrés sont pourvus de limbes à une dizaine de pistes séparant automatiquement (par interpolation) 10⁶ positions angulaires sur un tour, un tel système ne devrait être ni compliqué ni trop onéreux.

Un avantage supplémentaire de ce système serait de permettre une multiplication facile des pointés à la lame d'appoint, avec contrôle des écarts et compression des enregistrements en ne **gardant que la moyenne des lectures**.

Bien entendu il ne faudra pas oublier d'ajouter à cet enregistrement automatique la partie principale de la lecture (rang en centimètre du trait encadré sur la mire), et cela, en regard de l'appoint correspondant. Pour le faire de manière à faciliter l'exploitation informatique en aval, il faudra accéder à la mémoire contenant les appoints et lui incorporer les informations de la station (n°, code) et les lectures sur la mire. L'accès devrait se faire en station, par **clavier**

digital, ou pourquoi pas, par un **enregistreur vocal** du type de ceux évoqués en 3,2.

L'intérêt d'un système de lecture et d'enregistrement automatique des appoints serait d'accroître probablement la rapidité et le confort des mesures, l'observateur n'ayant plus à quitter l'oculaire de la lunette pour lire l'appoint.

On pourrait, si l'on préfère, à temps égal, répéter davantage les pointés. Ce système rendrait enfin les lectures d'appoints impersonnelles et par conséquent dépourvues de tout systématisme dans l'interpolation, comme on peut en apercevoir au voisinage des positions en coïncidences des traits (1). Finalement la précision y gagnerait de toute façon avec un tel système.

3,3,2, Automatisation des lectures sur mires

Le système évoqué précédemment (en 3,3,1) n'apporte qu'une solution partielle car les pointés sur mires, leur lecture et leur enregistrement restent manuels. Aussi peut-il être intéressant de chercher à aller plus loin et d'automatiser la lecture des mires. Différents systèmes peuvent se concevoir qui exigent vraisemblablement une modification de la mire elle-même, afin de la rendre capable de capter numériquement le trait visé. A une époque où les règles codées à détecteurs peuplent les multiples modèles de machines à commande numérique, un tel dispositif ne devrait pas apparaître trop futuriste, surtout lorsqu'il s'agit de moderniser des matériels de métrologie fine, auto-portés, faisant l'objet d'une utilisation intense.

Limitons nous par ex. à 2 systèmes possibles.

3,3,2,a, Mire codée à télécommande

Si l'on ne désire pas bouleverser trop les mires actuelles à ruban centimétrique en invar, on peut essayer de les utiliser telles quelles en les considérant comme étant graduées en **mode incrémental**. Il faudra alors ajouter à la mire un **lecteur mobile, télécommandé** par l'opérateur. Ce lecteur comprendrait un index visible dans le niveau et que l'opérateur amènerait en regard du trait visé (à 1 mm près). Ce lecteur serait muni en plus d'un dispositif de comptage des graduations de la mire. L'enregistrement se ferait par un top de l'opérateur, passant par la télécommande. L'inconvénient de ce système est d'être assez lourd (car il suppose que l'on a de plus déjà automatisé la lecture des appoints), et de séparer les données enregistrées, l'appoint étant enregistré dans le véhicule de l'opérateur, la lecture sur mire l'étant dans le véhicule porte-mire ; à moins de retransmettre par la radio de télécommande ces informations dans le véhicule de l'opérateur. De plus l'opérateur doit effectuer un pointé supplémentaire, celui sur l'index du lecteur mobile ; ce qui, même si celui-ci n'a pas besoin d'être précis, ne simplifie pas la procédure.

Le système étant incrémental il faudrait de plus bloquer le lecteur sur la mire une fois le pointé effectué, et ce, rigidement jusqu'au pointé suivant, à la station suivante, et de plus identifier le sens de dépla-

(1) Voir travaux et thèse du Docteur-Ingénieur Agha-El-Kalaa (IGN - Juin 1981).

cement du lecteur (comptage vers le haut, décomptage vers le bas), en espérant qu'aucun parasite n'introduira des erreurs (poussières sur des traits ?). C'est une automation en mode relatif, qui a généralement l'avantage de ne nécessiter qu'un matériel plus léger, moins onéreux, mais qui risque de présenter une fiabilité moindre.

Aussi pourrait-on chercher à remplacer le ruban centimétrique actuel en invar, ou du moins lui ajouter une graduation linéaire, **codée en absolu**. La mire faisant 3 m, il faudrait 8 ou 9 pistes pour coder de manière absolue 300 positions centimétriques.

Le pointé se ferait comme avec la mire incrémentale précédente, par un lecteur mobile télécommandé, coulissant sur les règles codées et portant un index que l'opérateur amènerait de même en coïncidence approximative avec le trait centimétrique visé. Les capteurs de déplacement pourraient être à contact, ou à induction ou mieux à cellule photo-électrique et les données relatives aux 8 ou 9 pistes seraient encore à retransmettre comme précédemment, pour enregistrement avec les appoints.

3,3,2,b, Système à laser et scanneur

Pour éviter à l'observateur d'avoir à télécommander le lecteur de la mire on pourrait recourir à un autre système, plus automatique, en utilisant directement l'axe optique de la lunette du niveau et en le rendant actif par un **laser** éclairant la mire. Il vaudrait mieux activer effectivement le niveau plutôt que de se servir d'une lunette d'alignement auxiliaire, parce que cette lunette introduirait de la parallaxe entre le laser et l'axe du niveau, et que la tâche de l'impact du laser sur la mire serait trop large. Fonctionnant en lunette afocale pour garder un impact peu variable avec la distance (la divergence angulaire du laser He-Ne étant de l'ordre de 10^{-3} radian en entrée, elle tombe à 10^{-4} en sortie avec le grossissement $10\times$, provoquant un élargissement de la tache de 1 cm à 100 cm), le diamètre de l'impact serait égal à l'ouverture de l'objectif, soit 3 ou 4 cm. On prendra donc plutôt un dispositif déjà existant dans le commerce, tel que l'**oculaire à laser** GL02, adapté aux théodolites Wild T 2 et aux niveaux Wild N 3 et concentrant la lumière laser en un point au centre du réticule. Le faisceau laser, traversant la lunette du niveau et par conséquent le compensateur d'inclinaison et la lame des appoints, coïnciderait exactement avec l'axe de visée. De plus le faisceau laser serait focalisé par la divergente de mise au point du niveau et l'impact sur la mire pourrait ainsi être réduit à un diamètre de moins d'un centimètre. Certes cette tache serait encore trop grosse et de contour trop imprécis pour permettre le fin pointé avec le laser et l'opérateur devrait continuer à pointer le trait de la mire avec le réticule en agissant sur le bouton des appoints du niveau. Pour ne pas être gêné, il pourrait effectuer ce pointé laser éteint, pour ne l'allumer qu'ensuite et contrôler que l'impact reste centré sur le trait de la mire. Des filtres protégeant l'œil de l'observateur du faisceau laser, il n'y a aucun danger à redouter dans ce contrôle.

Resterait à déclencher la lecture du trait centimétrique de la mire éclairé par la tache laser. Pour cela il n'est plus nécessaire d'utiliser la mire codée à 8 ou 9

pistes mentionnée en 3,3,2,a. Il suffirait d'ajouter à chaque trait centimétrique de la mire un **capteur photo-électrique** dont l'état changerait sous l'éclairage du laser. Le système pourrait être conçu de manière à ce que l'interrogation successive des 300 capteurs soit déclenchée automatiquement dès que l'un au moins d'eux aurait reçu la lumière laser. On obtiendrait ainsi une séquence où ne répondraient que le ou les capteurs éclairés. En principe un seul devrait répondre oui, si la tache était large, 3 répondraient, centrés sur le trait visé, dont la position moyenne serait correcte. Resterait à numériser le rang du capteur activé et à l'enregistrer pour réaliser ainsi l'automatisation des lectures sur mire de manière très simple pour l'opérateur.

Le système fonctionnerait en somme un peu comme un capteur à balayage push-broom mais de manière plus simple (300 capteurs au lieu de plusieurs milliers, avec réponse par tout ou rien et non par un classement densitométrique étalonné en 64 ou 256 niveaux de gris).

Il n'en reste pas moins que les lectures des appoints et de la mire sont encore séparées, ainsi que les enregistrements, sauf si une transmission radio ramène les lectures sur mire dans la mémoire des lectures des appoints.

3,3,3, Automatisation simultanée des lectures des appoints et sur mire

On peut chercher à pousser un peu plus loin l'automatisation déjà introduite, pour la rendre plus performante et franchir un seuil significatif dans la simplification et l'informatisation des opérations de nivellement. Le but recherché est de **regrouper les lectures** qui proviennent de deux systèmes séparés (les appoints du niveau et le trait de la mire) pour les saisir dans un unique élément situé donc dans un seul véhicule.

Cela supprimerait toute retransmission des enregistrements d'un véhicule vers l'autre, ou toute synchronisation délicate entre les deux enregistrements, si on les avait stockés séparément dans chaque véhicule.

Il est également souhaitable de chercher à supprimer tout recours à une télécommande depuis un véhicule vers l'autre. La solution ne peut donc consister qu'en un regroupement de l'appoint avec la mire, les mesures se faisant exclusivement sur la mire, avec enregistrement uniquement dans le véhicule porte-mire, ou inversement sur le niveau, avec enregistrement dans le véhicule niveleur.

Si la tache du laser envisagé précédemment (en 3,3,2,b,) était suffisamment fine et à bords nets, on pourrait l'utiliser pour effectuer à partir d'elle l'interpolation sur la mire. La lame d'appoint deviendrait alors inutile. On placerait sur la mire un plus grand nombre de capteurs, par ex. un par millimètre, soit 3 000 en tout. La tache en frappant plusieurs, un système de lecture avec interpolation automatique au $1/20$, donnerait un enregistrement numérique à 5 cmm près. Mais il est à craindre qu'un tel système soit en fait peu précis. Il ne reste donc que la dernière solution, celle où l'on ramène tout du côté du niveau. Cela signifie que l'on va traiter l'information non pas sur la mire mais sur son image située dans le plan du réticule de la lunette. Il s'agira donc **d'interpoler**

automatiquement la position du réticule par rapport aux traits d'une mire (ou plus exactement à l'image de ces traits). Il suffit donc de disposer un ou plusieurs capteurs fixes, dans le plan du réticule, sur lesquels les traits de la mire iront se projeter à travers l'objectif et la divergente du niveau. La mesure se fera grâce à un système de lecture, d'interpolation et d'enregistrement numérique automatique, basé sur les réponses de ces capteurs. C'est exactement un problème de même nature que celui de la lecture automatique des angles et des appoints sur un limbe, problème résolu par de nombreux constructeurs qui présentent sur le marché des tachéomètres intégrés à lecture automatique, à des coûts et avec des imprécisions de lectures décroissant régulièrement d'année en année. Certains atteignent déjà une précision de lecture angulaire nettement inférieure au milligrade. On peut par ex. mentionner des précisions de ± 6 dmgr avec le Wild Tachymat TC 1 et le Total Station de Hewlett-Packard 3820 A, ± 2 dmgr avec l'Elta 2 de Zeiss (RFA) et peut-être ± 1 dmgr avec les nouveaux systèmes Kern E2.

La lame d'appoint devient dans un tel système totalement inutile. On utilisera une mire passive, sans capteurs ni lecteur télécommandé. Cette mire sera **graduée en mode absolu**, car il ne serait pas aisé de compter les incréments, contrairement au théodolite où l'on mesure des angles, c'est-à-dire des différences de lectures entre 2 côtés. Le problème d'interpolation est en revanche moins compliqué pour le nivellement car, pour une précision de lecture de 1 mm, il y a 300 000 positions à repérer sur la mire, contre 4 millions pour un limbe lu à 1 dmgr près. On pourrait utiliser une **mire millimétrique**, à 3 000 positions, comprenant 11 ou 12 pistes, et un système d'interpolation à 1 % du pas, ce qui donnerait le centième de millimètre.

Mis à part le fait qu'il s'agit de lire l'image de traits situés à 50 ou 100 m de distance et non les traits eux-mêmes, on conçoit que l'analogie avec les lectures automatiques des limbes devrait rendre très simple la réalisation d'un tel système de nivellement automatique.

Des problèmes pourraient apparaître dans le bon **éclairage de la mire**. On pourrait utiliser un **laser**, et l'éclairer comme on l'a évoqué précédemment, (en 3,3,2,b) à travers la lunette équipée d'un oculaire type GL 02 par ex. La mire pourrait être munie d'un fond réfléchissant, à billes catadioptriques fines.

Plus délicats risquent d'être les problèmes dus aux **variations de grandissement** de l'image de la mire en fonction de la distance niveau-mire, car même si cette distance reste peu variable au cours du cheminement, il serait souhaitable que le système ait une gamme suffisante de fonctionnement pour permettre les visées courtes, absorber les virages de la route et les portées extrémales sur les repères.

Mais avec la micro-électricité actuelle ces problèmes ne devraient pas être insolubles. Seule la réalisation de la mire serait délicate et probablement onéreuse (encore que le nombre total de plages à graver sur les 11 à 12 pistes, codant les millimètres, s'élèverait à 6 ou 8 000, ce qui est 2 à 3 fois moins que les limbes à lecture automatique). Une limitation pourrait provenir du fait d'une trop grande finesse de

l'image des traits de la piste millimétrique de la mire dans le plan focal de la lunette, qui rendrait délicate la lecture et l'interpolation automatique. Par ex. un trait de 1 mm, situé à 64 m, aura une image de 4 microns dans le plan focal (si $f = 25,6$ cm), ce qui risque d'être 2 fois trop fin pour les capteurs actuels où les traits ont 10 microns d'épaisseur. Cela conduirait à réaliser une mire à traits bi-millimétriques et à ne lire que les 2 mm, ce qui est certainement peu préjudiciable à la précision du nivellement et réduirait d'ailleurs le nombre de traits à graver de 1 500.

Ou bien il faudrait allonger légèrement la focale et grossir davantage.

Quelles que soient les difficultés que l'on rencontrera dans la réalisation de ce système, si l'on est convaincu de son intérêt elles ne devraient pas apparaître insurmontables.

Avec un tel système, les opérations en station seraient extrêmement simples et rapides : l'opérateur, une fois la mise en station effectuée, oriente son niveau pour amener l'image de la mire sur le réticule, allume le laser d'éclairage de la mire et c'est tout. **Il n'y a plus de pointés à effectuer, de lame d'appoint à basculer, ni de lectures à relever aux appoints, ni sur la mire.** Il n'y a **aucun enregistrement à entrer manuellement** sauf en début de travail où quelques codes restent à introduire (n° de travail, n° des repères d'extrémités).

Les données sont maîtrisées dans le niveau et stockées dans le véhicule de l'opérateur.

On a certainement, avec un tel système, une version achevée du nivellement automatique motorisé ; la technologie développée actuellement chez les constructeurs ne devrait pas en éloigner la réalisation. Reste à en franchir le pas. Réalité ou utopie ?

4) SIMPLIFICATION DES OPÉRATIONS ET VARIANTES

Si la recherche d'une automatisation plus poussée des matériels de nivellement de précision est une démarche logique, qui s'inscrit dans la poursuite d'une meilleure utilisation des technologies modernes au service des immenses besoins à couvrir sur tout le globe, elle ne doit pas être la seule où les efforts sont à porter. Il faudra l'accompagner d'une maîtrise plus complète de toute la gamme méthodologique que l'on peut mettre à la disposition du nivellement par le jeu de diverses variantes simplificatrices. Il sera essentiel de bien connaître les caractéristiques de coût et de précision de chacune d'elles. Un vide important reste à combler entre les cheminements précis, donnant une précision de l'ordre de 1 mm/km, mais lourds d'emploi, et les nivellements expédiés, au baromètre, rapides mais sans aucune prétention de précision.

4,1, Cheminement parallactique automatique et motorisé

En particulier les mesures de **nivellement géodésique** par visées inverses réciproques, de longue portée, peuvent reprendre de l'intérêt. Les cheminements n'en restent pas moins nécessaires, notamment dans les zones peu dégagées et des méthodes comme le **cheminement parallactique**, par **mesure de sites** au théodolite sur des mires ou des

telles que celles qui avaient été expérimentées à l'IGN vers les années 1970 par l'ICG Richarme, semblent adaptées à certains travaux où une précision de 1 cm/km suffit. On pourrait les moderniser en utilisant des tachéomètres intégrés automatiques, ce qui accélérerait considérablement les mesures de site en station, grâce à la double présence d'une collimation automatique et de systèmes automatiques de lecture et d'enregistrement des limbes et des appoints. La visée de nombreux voyants dans les deux positions de la lunette ne serait plus un handicap à ces méthodes. Les distances pourraient être mesurées directement par le tachéomètre ou par un distance-mètre annexe et apporter une donnée supplémentaire précieuse, améliorant le calcul des cotes en supprimant toute déduction de distance d'après les différences de sites entre voyants. De plus les portées pouvant être plus longues que dans le nivellement de précision, de l'ordre du double (130 à 150 m), l'intérêt de la motorisation n'en sera que plus évident, les temps de parcours devenant nettement prépondérants sur ceux passés en station. Il est envisagé de procéder à des investigations dans ce sens à l'IGN.

4,2, Automatisation, motorisation et simplification par suppression d'un véhicule porte-mire

Tous les systèmes actuels de nivellement motorisés sont basés sur une transposition de la méthodologie utilisée dans le nivellement pedestre.

C'est une démarche constante dans tout perfectionnement. Mais on peut s'interroger si dans le cas du nivellement, une simplification ne pourrait pas intervenir, à condition de bien en connaître les conséquences sur la qualité.

On pourrait ainsi supprimer une mire sur les deux, ce qui rapprocherait le nivellement des cheminements du topographe, et serait très bénéfique sur les coûts, dès lors qu'on motorise et que cette méthode économiserait un véhicule sur les 3 (réduction de 33 %).

On sait que le **nivellement classique** à pied, met en œuvre 2 mires et 1 niveau N_1 situé au milieu ce qui permet de transférer l'altitude de la 1^{ère} mire M_1 sur la 2^e M_2 (voir fig. 4).

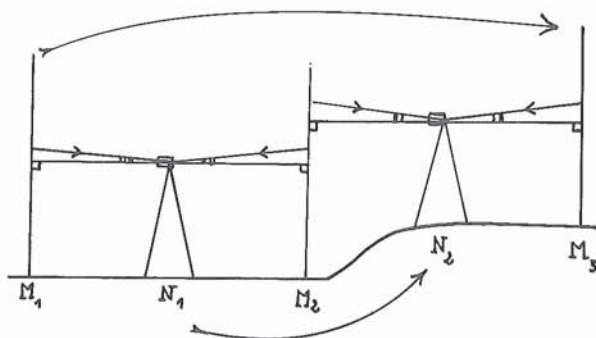


Fig. 4 - Nivellement classique

A pied il n'est pas question de simplifier davantage la procédure et de supprimer par ex. l'une des deux mires car :

a) le temps en station serait trop long et d'importantes erreurs risqueraient de s'introduire par suite d'instabilités en N_1 , sur le niveau, le temps que le porte-mire se déplace de M_1 en M_2

b) on n'aurait aucune fermeture, c'est-à-dire aucune possibilité de faire deux pseudo-cheminements par le jeu des pointés-lectures, l'un dans le sens $M_1 M_2$, l'autre en sens inverse, $M_2 M_1$.

Déjà dans son traité de nivellement de 1948, l'IGV Vignal signalait que c'était "pour hâter les opérations en station que l'on employait 2 mires, alors qu'une seule pouvait suffire et qu'on éliminerait ainsi l'erreur au talon".

Notons d'ailleurs que dans le nivellement actuel, on n'est pas à l'abri de semblables instabilités puisqu'il existe une phase du processus où la mire avant reste seule en station, sans contrôle possible de sa stabilité, le temps qu'elle devienne mire arrière, l'autre mire allant de M_1 en M_3 et le niveau de N_1 en N_2 (voir fig. 4).

Aussi peut-on se demander si, dans les conditions du nivellement motorisé, **l'une des deux mires (et son véhicule) ne saurait être supprimée** (voir fig. 5,b). En effet, le temps de parcours $M_1 M_2$ est beaucoup plus rapide qu'à pied, réduisant d'autant les risques d'instabilité, et les matériels peuvent être beaucoup mieux protégés contre de telles instabilités (nature du revêtement routier, écrans contre le soleil et le vent, trépieds et crapaudines plus stables, plus lourds, niveaux automatiques...).

Ce sont en effet les critères de stabilité et de rapidité qui influent au premier ordre sur la précision et justement ceux que favorisent l'automatisation et la motorisation du nivellement.

Une procédure allégée peut donc s'envisager, supprimant une mire. Les temps d'attente en station seraient alternativement répartis sur le niveau et sur la mire.

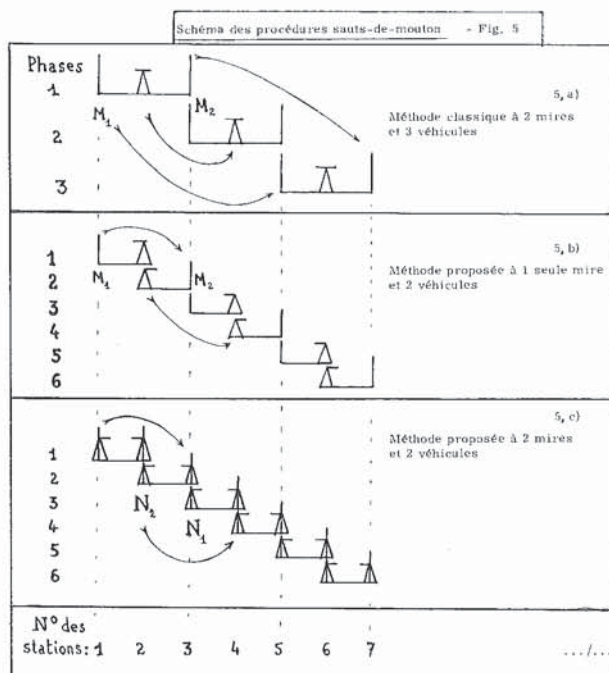
Il suffira de s'assurer que la stabilité verticale des deux est équivalente pour éliminer cette cause d'erreur, ce qui, en nivellement motorisé et avec un niveau automatique, devrait être beaucoup plus réalisable que pour le nivellement à pied, où le trépied du niveau est trop léger et mal protégé.

Si l'on craint, ou si l'on démontre, que la suppression de l'un des deux véhicules porte-mire est rédhibitoire pour le nivellement de précision, en revanche il se peut qu'elle reste justifiée pour le nivellement parallaxique signalé en 4,1, : cela pourrait constituer une incitation supplémentaire à un emploi plus étendu de ce mode de nivellement qui ne nécessiterait alors que 2 véhicules, 1 opérateur et 2 chauffeurs et pourrait s'avérer très avantageux par son rapport coût/précision.

Une variante améliorante de la procédure proposée pour le nivellement de précision consisterait à **ne supprimer que le 2^e véhicule porte-mire mais non la 2^e mire**, que l'on placerait dans le véhicule - niveleur et d'ajouter dans le véhicule porte-mire un second niveau visant cette 2^e mire. Cette méthode permettrait ainsi d'exercer un contrôle supplémentaire et **d'augmenter la précision** sans alourdir notablement les coûts (il faudrait 1 opérateur de plus).

Mires et niveaux pourraient être distincts, effectuant chacun leur propre cheminement dans le cadre d'un nivellement double.

On pourrait peut-être alléger le système en les regroupant rigidement sur un support commun, placé au centre du véhicule pour permettre le retournement de l'ensemble, et viser commodément vers l'avant et vers l'arrière. On ferait ainsi l'économie d'un trépied. Sans nuire à l'indépendance des deux cheminements effectués par les deux niveaux, l'installation des mires sur les mêmes appuis que les niveaux permettrait de faire un contrôle de marche plus rigoureux, au moins en différé en bureau (à moins de relier les deux véhicules par radio pour que ce contrôle se fasse en direct en station). En revanche toute instabilité verticale dans la liaison avec le sol retentirait de la même façon sur le niveau et la mire et passerait inaperçue, le temps du saut-de-mouton. C'est bien cette instabilité qui reste l'écueil final du nivellement, qu'il soit à pied ou motorisé, avec 3 ou avec 2 véhicules. C'est sur ce point que des études plus approfondies seraient à mener. Quoiqu'il en soit du montage retenu pour le niveau et la mire on réaliserait ainsi une identité complète des deux véhicules portant chacun une mire et un niveau et une parfaite symétrie dans les opérations se faisant par sauts-de-mouton 1 3 et 2 4 (voir fig. 5,c).



On aurait deux cheminements totalement indépendants : le premier effectué par le niveau N_1 qui, en station 3, assure la nivelée entre 2 et 4, et le deuxième effectué par le niveau N_2 , qui, en station 2, effectue la nivelée des stations 1 et 3. Pour éliminer les défauts de non-horizontalité de l'axe optique des niveaux et les erreurs dues à la réfraction, il faudra continuer à égaliser les portées : on doit donc avoir les distances

$$1-2 = 2-3 \text{ (niveau } N_2) \text{ et } 2-3 = 3-4 \text{ d'où } 1-2 = 2-4...$$

C'est-à-dire qu'il faudra égaliser toutes les portées du cheminement, ce qui, s'agissant d'un travail sur un grand itinéraire routier (ou autoroutier), ne devrait pas être trop gênant. Aux extrémités du cheminement, sur les repères, une dissymétrie dans les portées interviendra au détriment du nivellement opéré

par l'un des deux niveaux. Les distances étant alors rapprochées, le défaut principal risque d'être dû à l'instabilité angulaire de l'axe optique en fonction de la distance (jeu et désalignement de la divergente de mise au point), mais n'est-ce pas déjà le cas avec le nivellement à pied ?

Une attention particulière devra être portée sur les **temps d'exécution** des méthodes à 2 véhicules qui multiplient en apparence le nombre de phases par 2 mais réduisent la durée de chacune, peut-être aussi par 2. En effet, si l'on compare les procédures, on constate que les stations occupées par la (ou les) mire et le niveau sont rigoureusement les mêmes en nombre et position, quelle que soit la méthode. De même le nombre des visées est le même ainsi que les temps de parcours.

Dans la méthode classique, on peut considérer que le saut-de-mouton s'opère entre mires parcourant chacune au total une fois le cheminement pendant que l'autre est arrêtée. Les temps d'attente totaux correspondants, supportés par les mires, sont donc de 2 fois le temps de parcours du cheminement par le porte-mire.

Dans les méthodes proposées, le saut-de-mouton s'opère entre la mire et le niveau, chacun parcourant au total une fois le cheminement pendant que l'autre est à l'arrêt. Les temps d'attente totaux correspondant, supportés moitié par le niveau, moitié par les mires, restent donc les mêmes, soit 2 fois le temps de parcours, avec peut-être même une réduction due aux plus grandes légèreté et maniabilité de l'équipe. Sur route, il est peut-être plus rapide de n'avoir qu'un véhicule à déplacer à la fois que 2, qui doivent de plus respecter l'égalité des 2 portées et effectuer les dépassements nécessaires sur un trajet de 100 à 200 m. Si on ne devait constater aucune perte de temps ni de précision avec ces méthodes nouvelles à 2 véhicules, on pourrait donc en espérer, au prix d'un équipement spécialement adapté, peut-être plus onéreux au départ, une réduction importante des coûts de fonctionnement.

Des essais de ce genre sont également envisagés à l'IGN par l'IG Kasser, mais en utilisant le matériel de nivellement classique actuel, ce qui pourra ne pas refléter exactement ce que serait la situation avec des appareils entièrement automatiques, tant au point de vue précision qu'effectif de l'équipe. Ces essais devraient toutefois être très instructifs au plan de la mise en œuvre et de la pratique sur route.

4,3, Méthode de la poussette

Il pourrait apparaître que les problèmes des dépassements entre véhicules soient, lorsque l'on opère sur une route très fréquentée ou une autoroute, un handicap pour la méthode motorisée classique par sauts-de-mouton. On pourrait alors chercher à supprimer tout dépassement en utilisant **une méthode de poussette**, chacun suivant l'autre, (voir fig. 6,b), à condition de baliser les stations par ex. par un clou-repère. Les temps de parcours seront divisés par 2 puisque le niveau et les mires se déplacent ensemble, ce qui constitue un élément très avantageux. En revanche il est exclu de ne travailler qu'avec une mire. Il faudra revenir aux deux mires et aux 3 véhicules.

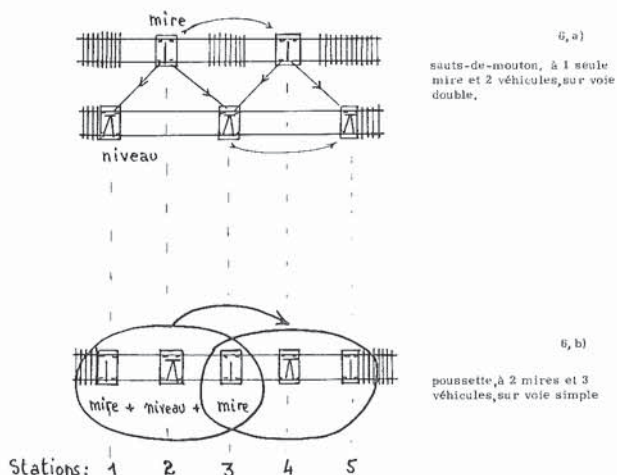


Fig. 6 Schéma des méthodes sur voie ferrée

Quant aux voies ferrées, où la piste cyclable est trop étroite pour supporter la motorisation du nivellement, il faudrait carrément placer les véhicules niveleur et porte-mires dans des draines spéciales, sur rail. Pour des raisons de faisabilité, il conviendrait de n'utiliser qu'une seule voie pour de tels cheminements motorisés. Seule la méthode de la poussette le permet (fig. 6,b), tandis que celle par sauts-de-mouton avec 2 véhicules immobilise 2 voies (fig. 6, a) ce qui la limite considérablement. Quant à la méthode saut-de-mouton classique, avec 2 mires et 3 véhicules, elle bloquerait 3 voies, ce qui l'interdirait pratiquement sur rail.

La méthode de la poussette semble donc une solution au problème. Signalons toutefois, que, pour éliminer toute erreur systématique liée aux mires, qu'il s'agisse des erreurs de talon ou de graduation, il faudrait effectuer obligatoirement un cheminement double, aller et retour, en permutant les mires lors de l'inversion du sens du parcours. Cela ne devrait pas gêner l'application de la méthode, car le retour du matériel au point de départ est de toute manière nécessaire, et en l'effectuant sous la forme d'un cheminement, on dispose à peu de frais d'un contrôle supplémentaire. Resterait à définir l'endroit de l'appui des mires sur le sol, de façon à garantir la stabilité du repère, le temps que la mire arrière prenne la place précédemment occupée par la mire avant. Si le rail ne fléchissait pas trop aux joints, ce serait une solution simple, sinon il faudra peut-être utiliser le sol de la piste cyclable, en le marquant d'un clou repère, comme sur autoroute.

Quoi qu'il en soit, à l'époque, qui ne fait que s'ouvrir, des trains à grande vitesse TGV, où les travaux de voie ne pourront se faire que de nuit, en période d'interruption du service, il paraît aberrant de se contenter d'une méthode de déplacement pédestre pour les nivellements de précision, qu'ils soient effectués pour la surveillance de la voie ou empruntent simplement son itinéraire.

4,4, Nivellement sans mires

Enfin on peut se demander si des progrès ne sont pas à rechercher dans le domaine des capteurs d'altitude, afin de parvenir à niveler automatiquement les

cheminements avec un seul véhicule, sans utiliser un second véhicule, tel que le véhicule porte-mire. On pense naturellement aux **systèmes inertiels** qui présentent déjà des réalisations très intéressantes, notamment chez Litton (système Span Mark) ou Ferranti. Sur route, avec des arrêts toutes les 3 à 5 minutes, on obtient actuellement des précisions de localisation de 40 cm en planimétrie et de 25 cm en altimétrie.

Certes on est loin des performances du nivellement de précision, encore qu'il serait intéressant de suivre les développements du "Ferranti Inertial Rail Surveyor", spécialement conçu pour des mesures angulaires à grande vitesse sur voie ferrée.

Tous ces systèmes comportent 3 gyroscopes et 3 accéléromètres et fournissent par double intégration les positions x , y , z . Dans le cas de l'altitude, l'intégration en z se trouve perturbée par la pesanteur. Aussi dans le cas des cheminements ferroviaires, où le contrôle de l'altitude est peut-être à séparer des autres paramètres, pourrait-on réaliser des systèmes simplifiés ne fournissant que z , mais avec plus de précision ; on pourrait par ex. doubler ou tripler les capteurs de z , pour améliorer les résultats par compensation dans les moyennes, supprimer en revanche les capteurs x et y , en ajouter peut-être d'autres comme par ex. des inclinomètres, si ces appareils pouvaient être amortis convenablement et être lus en permanence lors des déplacements à vitesse à peu près constante.

S'agissant d'itinéraires permanents, dont les reprises périodiques en nivellement sont assurées, on pourrait lors d'un premier levé, mesurer une fois pour toute et de place en place sur la voie les paramètres nécessaires à la correction des mesures. C'est ainsi qu'une draine de géophysique **mesurerait la gravité** tous les kilomètres et en chaque point caractéristique du profil de la voie. La connaissance de cette donnée améliorerait certainement de manière sensible les mesures inertielles. Peut-on espérer atteindre ainsi le centimètre, et est-ce suffisant, ou faudra-t-il nécessairement le millimètre ? En tout cas, il semble à priori que le rail doive mieux se prêter que la route à l'amélioration des performances des systèmes automatiques de ce genre, basés sur l'intégration continue de mesures de nivellement effectuées en permanence, en dehors de tout arrêt en station.

Ces systèmes, versions modernes du profilographe de 1881, devraient, grâce à l'absence d'arrêts, diviser par 10 ou 20 les temps actuels d'exécution des cheminements motorisés. Contrôler le nivellement du TGV Paris-Lyon en deux nuits deviendrait possible. C'est probablement la solution d'avenir, si tant est que l'on peut gagner un ou deux ordres de grandeur sur la précision actuelle de ces systèmes.

Espérons qu'une conjonction d'intérêt envers de tels systèmes pourra se manifester entre constructeurs, niveleurs et utilisateurs des résultats du nivellement et permettre de progresser dans les études préliminaires de faisabilité.

5) CONCLUSION

Les quelques réflexions précédentes contiennent probablement beaucoup d'affirmations qui ne sont

pas encore suffisamment étayées par des études et des essais correspondants. Elles ont pour but de relancer la discussion en vue d'optimiser le nivellement et de le faire bénéficier de toutes les possibilités technologiques modernes (électronique, automatismes, informatique, motorisation...), afin qu'il puisse rattraper le retard accumulé.

Une maîtrise approfondie de l'élasticité de la précision et du coût correspondant, en fonction de la procédure employée et des perfectionnements apportés, serait à mener à son terme.

Rien n'est peut-être directement faisable de tout ce qui a été suggéré, du moins par un seul organisme, mais inversement le contraire ne paraît pas démontré. Les constructeurs ont un très grand rôle à jouer, mais avant de se lancer dans de nouveaux prototypes, des études de marché leur sont nécessaires afin de leur permettre de mieux connaître l'ampleur de la demande, les possibilités d'investissement dans de tels systèmes et le degré d'automatisation souhaité.

Il s'agit de définir quelle étape viser, et qu'elle ne soit ni trop futuriste, ni trop attentiste.

Faut-il automatiser seulement la saisie d'une partie des lectures, ou toutes les données, perfectionner les systèmes basés sur des principes tout à fait différents, comme les systèmes inertiels, ou en concevoir de nouveaux, totalement adaptés au déplacement continu sur route ou sur rail ?

Ces démarches peuvent-elles être volontaristes et isolées ou ne doivent-elles pas plutôt s'insérer dans un dialogue très ouvert, centré sur l'automatisation (voir fig. 7) et reliant les divers partenaires représentatifs des secteurs de l'utilisation, de l'instrumentation, de la méthodologie et de l'exécution ?

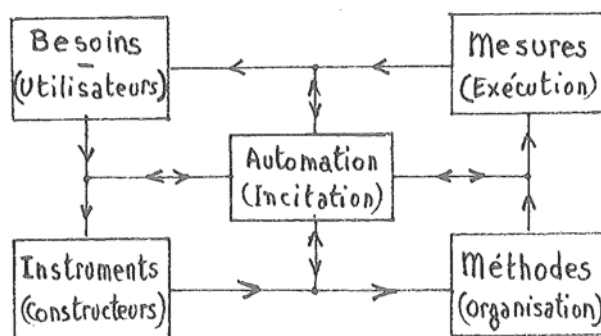


Fig. 7

Quel organisme public pourra impulser et coordonner ce mouvement, et le pourra-t-il de lui-même ? Saura-t-il sur quel maillon intervenir ?

Comment faciliter le bouclage du cycle et le réitérer ?

Le développement de la robotique, la volonté affirmée de relancer en France la recherche appliquée, et l'augmentation de 50 % prévue en 1982 pour le budget de l'aide à l'innovation géré par l'ANVAR, sont des éléments positifs dont devrait chercher à bénéficier le nivellement de précision, à condition que sa modestie bien connue ne l'en empêchât point.

Une grande part de la suite appartient aux niveleurs, et plus généralement à l'ensemble des topographes.

G.D.

ABONNEMENT 1982 A LA REVUE XYZ de l'Association Française de Topographie

Pour s'abonner à cette revue, vous adressez votre demande, accompagnée du chèque de règlement, à l'adresse suivante :

**ASSOCIATION FRANÇAISE
DE TOPOGRAPHIE
"Abonnements"
39^{ter} rue Gay-Lussac
75005 PARIS**

En cas de changement d'adresse, nous invitons nos abonnés à bien vouloir communiquer à l'adresse ci-dessus la dernière bande accompagnée de la somme de 4,00 F en timbres-poste.

Abonnement 1 AN (4 numéros)

- FRANCE = 250 F
- AUTRES PAYS = 300 F

Tous les membres de l'A.F.T. sont automatiquement abonnés à la revue xyz.

Les abonnements ne sont pas rétroactifs et commencent à la date du règlement.

Achat d'un seul numéro - même adresse que ci-dessus. (sous réserve de disponibilité)

- FRANCE = 70 F
- AUTRES PAYS = 80 F