

aux individus avec la méthode de mesure correspondante. Parallèlement l'U.T.A.C. se réserve de poursuivre ses études actuelles sur l'origine des divers bruits, leur propagation, leurs effets isolés et cumulés du point de vue de la gêne. La construction d'une grande chambre sourde contenant un véhicule avec un banc à rouleaux permettant son fonctionnement est actuellement à

l'étude et des crédits sont prévus à cet effet au VI<sup>e</sup> Plan.

Au moment où, dans tous les pays évolués, se trouve indiscutablement à l'ordre du jour la recherche portant sur la sécurité des véhicules et sur les nuisances qu'ils produisent, l'U.T.A.C., forte de la confiance de l'Administration française et de

celle des Constructeurs d'Automobiles, de ses bonnes relations avec tous les organismes compétents en matière de recherche automobile, de ses importantes activités dans le domaine de la réglementation, de son potentiel de recherche en voie d'accroissement constant, est prête à accentuer sa contribution à l'effort concerté entrepris pour la sécurité et le bien-être de tous.



# **4.** INFRASTRUCTURES

---



### LE DOMAINE DES INFRASTRUCTURES

Ce domaine est celui, fort vaste, des ouvrages de Travaux Publics, liés soit aux transports de divers types — routes et voies urbaines, ponts, aérodromes, voies ferrées, canaux, ports, tunnels, etc. —, soit à la production et au transport de l'énergie — barrages, centrales, réseaux, etc. —, soit encore à des équipements collectifs — éducatifs, sportifs, sanitaires, etc.

Dans le cadre du Ministère de l'Équipement et du Logement, ce sont essentiellement les infrastructures du premier type qui vont retenir notre attention.

La mission générale, à leur égard, réside en trois mots : conception, construction, entretien. Ce dernier aspect ne vise d'ailleurs pas uniquement l'entretien ultérieur des infrastructures neuves : il concerne aussi le très important capital représenté par les infrastructures existantes.

On touche là un point particulier aux infrastructures : il y a très longtemps qu'on se déplace — au moins sur la route et sur l'eau — et l'« Art de l'Ingénieur » a su

produire, depuis des siècles, des ouvrages remarquables, en matière de ponts, de travaux portuaires, par exemple. Ce n'est pourtant que très récemment qu'on a reconnu la nécessité d'exercer un effort important de **recherche** dans ce domaine, alors qu'auparavant, les progrès naissaient plutôt à partir d'initiatives relativement isolées, comme le montrent par exemple, l'invention du béton armé, et ses premières applications.

C'est en effet sous la pression des transformations — véritables mutations — intervenues dans les divers modes de transport, que les « gestionnaires » du capital représenté par les infrastructures existantes, ont pris conscience d'un écart croissant entre les besoins des transports et les moyens propres à les assurer. La stagnation relative à l'entre-deux guerres, et celle de la période de l'occupation, ont accentué ce retard de façon dramatique. Il a donc fallu faire face à des problèmes complexes, dominés par l'importance considérable des sommes à consacrer à la modernisation des infrastructures existantes;

cette modernisation ne pouvait souvent s'effectuer que par la création d'infrastructures nouvelles, adaptées non seulement aux besoins présents des transports, mais anticipant raisonnablement sur leur développement escompté. En même temps, la mécanisation poussée des techniques de construction, indispensable pour exécuter dans des conditions de coûts et de délais acceptables, des travaux de cette ampleur, transformait considérablement le cadre même dans lequel s'exerçait le métier d'Ingénieur, chargé de concevoir et de calculer les ouvrages, d'utiliser les matériaux, etc.

L'ensemble de ces conditions et le souci de construire (et d'entretenir) au meilleur coût des infrastructures solides et durables, ont fait apparaître la nécessité d'un effort notable de recherche, dont les résultats constituent des moyens accrus, voire totalement nouveaux, permettant aux ingénieurs de réaliser leur tâche.

Cet effort a certes été entrepris, mais il demande à être poursuivi et même accentué, tant les problèmes sont divers et complexes.

### CARACTÈRES DE LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DES INFRASTRUCTURES

La recherche en question a d'abord un aspect résolument appliqué, et inclut un facteur « Développement ». Cela n'exclut nullement, bien au contraire, le recours à des disciplines fondamentales, voire à une recherche elle-même fondamentale. C'est ce qui la distingue, en France, de l'approche pragmatique ou empirique que revêt souvent la recherche dans d'autres

pays, notamment les pays anglo-saxons, où l'on a vu dépenser des sommes considérables pour réaliser des expérimentations dont les résultats se sont révélés très difficiles à exploiter pour des conditions différentes de celles où elles avaient eu lieu.

D'autre part, la recherche a un aspect pluridisciplinaire, et nécessite

bien souvent le concours de spécialistes variés — géologues, mécaniciens des sols, physiciens, mathématiciens, chimistes, etc.

Ces aspects se conjuguent enfin pour faire de la recherche, en matière d'infrastructure, une affaire d'équipe, nécessitant des moyens matériels et intellectuels importants, ainsi qu'une **structuration** de ces

moyens et de leur mise en œuvre. C'est dans ce sens qu'on a pu utiliser le terme de « programmation » de la recherche, sans pour autant diminuer la valeur de l'imagination et de la capacité d'invention

du chercheur individuel. Il est d'ailleurs indispensable que la recherche soit en liaison constante avec la sanction de l'expérience pratique du chantier, cette liaison étant à double sens, et chaque partie en

présence en tirant bénéfice. La liaison se fait d'ailleurs par différentes étapes — expérimentation en vraie grandeur, installations semi-individuelles, constatations sur chantiers et ouvrages.

## LES DOMAINES DE LA RECHERCHE

Schématiquement, on peut dire que les infrastructures de transport sont des ouvrages qui doivent permettre à un milieu naturel donné de supporter durablement les contraintes diverses nées des engins de transport, dans les conditions qui résultent de l'environnement. De plus, ces ouvrages font appel, pour leur construction, à des matériaux extraits du milieu naturel, plus ou moins élaborés, et recomposés ensuite suivant des processus qui constituent les techniques de travaux proprement dites. L'exploitation et l'entretien de ces infrastructures sont implicites dans cette définition, par la mention de durabilité.

On voit ainsi que les domaines principaux des recherches concernent :

- les matériaux
- leur association en structures
- l'étude du milieu naturel (sol, environnement, etc.)
- les techniques des travaux
- les problèmes d'exploitation et d'entretien.

On dira ci-dessous quelques mots de ces diverses parties du champ des recherches.

### LES MATÉRIAUX

Les infrastructures de transport sont de très grandes consommatrices de granulats (matériaux pierreux), comme d'ailleurs le bâtiment; extraits en règle générale du milieu naturel, les conditions de leur choix, de leur extraction et de leur prépa-

ration influent considérablement sur les propriétés et les qualités des ouvrages dans la composition desquels ils entrent, au même titre, bien entendu, que leurs propriétés intrinsèques. Il faut donc établir des méthodes permettant d'apprécier et de choisir les granulats.

La pauvreté relative en granulats de certaines régions, et le coût élevé des transports, ont conduit à valoriser des sous-produits industriels — le laitier de haut fourneau, notamment — qui ont trouvé en technique routière des débouchés considérables.

Les granulats doivent très souvent — on peut même dire la plupart du temps — être liés entre eux. Une autre catégorie de matériaux est donc celle des **liants**, soit hydrauliques (ciments, chaux), soit organiques (bitumes, goudrons). Les recherches sur les propriétés de ces liants en ont accru les gammes et les qualités. En outre, la « granulation » du laitier lui confère des propriétés de liant, qui ont conduit à de nouvelles formes d'utilisation de ce sous-produit; on peut en dire autant des « cendres volantes », sous-produit des usines thermiques.

Les **aciers** de construction, de même que les aciers durs pour béton précontraint ou câbles de ponts suspendus, constituent un chapitre important de recherche, pour bien dominer et employer leurs qualités.

Les **matières plastiques**, en raison principalement de leur coût (actuel) et de l'incertitude sur leur résistance au

vieillessement, n'ont pas encore connu de grandes applications en matière de travaux publics, en dehors de certains cas particuliers. La recherche doit permettre de promouvoir ces applications.

Les **matériaux composites** — associations de granulats et de liants — représentent des tonnages considérables en travaux publics. Le **béton hydraulique**, et son association avec l'acier, sous la forme de béton armé ou précontraint, ont bénéficié et bénéficieront des progrès apportés par la recherche sur leurs propriétés intrinsèques; il en va de même pour le **béton bitumineux** (ou d'autres associations de granulats et de liants, telles que les récentes graves-bitumes utilisées en couches de bases routières).

### LES STRUCTURES

Considérées comme des ensembles, elles doivent résister aux diverses sollicitations auxquelles elles sont soumises. Leur dimensionnement judicieux, tirant le parti maximum des matériaux utilisés, sans excès (qui coûte inutilement cher), ni défaut (qui aggrave les coûts d'entretien, ou peut conduire à des catastrophes), constitue un des problèmes les plus délicats qui se posent à l'ingénieur. Celui-ci doit recourir à des méthodes de plus en plus fines et élaborées, qui dépassent la résistance des matériaux classiques, et que la recherche a pour but de mettre au point, à partir de la mécanique des solides, d'une part, et d'une analyse poussée

des contraintes appliquées aux ouvrages, d'autre part. Nombreuses sont les méthodes qui utilisent des moyens de calcul automatique.

Dans un sens géométrique cette fois, la conception des tracés routiers a fait des progrès considérables, grâce à l'utilisation des ordinateurs.

## LE MILIEU NATUREL

Toutes les infrastructures sont situées — d'une façon ou d'une autre — dans un milieu naturel dont on n'est pas maître, et dont il faut connaître de façon aussi précise que possible, les propriétés.

C'est d'une part le terrain lui-même, toujours varié et hétérogène, sur lequel sont fondés les ouvrages, ou dans lequel s'inscrit leur tracé. La géologie, la géotechnique, la mécanique des sols, la mécanique des roches, l'hydrologie sont mises à contribution dans ce secteur fondamental — au sens propre du mot —

pour guider l'Ingénieur projeteur ou constructeur.

D'autres sujétions atteignent les ouvrages, dans certaines conditions particulières (air marin, ouvrages immergés) ou simplement par vieillissement des matériaux. Toute une « pathologie » des infrastructures peut être mise sur pied, avec les mesures appropriées, de diagnostic, de médecine curative et, si possible, préventive.

## LES TECHNIQUES DE TRAVAUX

On a déjà fait allusion à la mécanisation de plus en plus poussée des travaux. Une part importante de la recherche appliquée consiste précisément à mettre au point ces techniques elles-mêmes, les matériels et équipements qu'elles impliquent, et le contrôle de la qualité des ouvrages qu'elles produisent. En réalité, d'ailleurs, le contrôle de qualité constitue

une chaîne qui doit remonter aussi à l'amont que possible, du côté des matériaux de base, et descendre jusqu'au produit fini, en passant par les étapes représentées par les produits intermédiaires — matériaux composites, éléments de la structure.

## LES PROBLÈMES D'EXPLOITATION ET D'ENTRETIEN

Certains ouvrages particuliers sont d'une exploitation complexe, dont les modalités peuvent nécessiter des recherches au moment même de leur conception. D'autres problèmes naissent de circonstances particulières : viabilité hivernale, par exemple.

D'autre part, on utilise pour les opérations d'entretien, des techniques analogues à celles que met en œuvre la construction, mais qui doivent être adaptées pour tenir compte des contraintes nées de la présence du trafic.

## LES ORGANISMES DE RECHERCHE

La puissance publique constitue le principal « promoteur » de travaux publics, en matière d'infrastructures de transports. Il est donc normal qu'ayant reconnu la nécessité de la recherche dans ce domaine, elle ait constitué un important réseau de laboratoires et d'organismes de recherche.

C'est ainsi qu'une part notable de la recherche est effectuée au sein :

— de l'ensemble des Laboratoires des Ponts et Chaussées (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Laboratoires Régionaux dans les Centres d'Études Techniques de l'Équipement) (1),

— du Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (1),

— du Centre d'Études des Tunnels (1),

— du Service Technique des Ports et Voies Navigables (1),

— du Service Central Hydrologique (1),

— du Service des Phares et Balises (1),

— du Service Technique des Bases Aériennes (1).

On doit constater par ailleurs qu'en France (comparativement à beaucoup d'autres pays) les organismes d'enseignement — universitaires ou autres — n'ont pas entrepris de recherches analogues, sur un plan plus fondamental, dans le secteur qui nous intéresse.

(1) Voir liste d'adresses.

Il y a naturellement, et heureusement, des exceptions : Laboratoire de Mécanique des Solides de l'École polytechnique, Laboratoire de Mécanique appliquée à Saint-Cyr l'École, Laboratoire de Mécanique des Sols à Grenoble, I.N.S.A. de Toulouse (Béton hydraulique), pour en citer quelques-unes.

Le secteur privé apporte une contribution importante à la recherche :

● soit sous la forme d'organismes interprofessionnels (Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics au sein de l'U.T.I.; Centre de Recherche de l'Industrie des Liants Hydrauliques; Institut de Recherche de la Sidérurgie, etc.);

● soit au sein de certaines entreprises importantes de travaux, ou producteurs de matériaux, ou encore constructeurs de matériels.

## **COOPÉRATION INTERNATIONALE**

L'expansion des divers modes de transport est un phénomène mon-

dial, dans les pays développés; les pays en voie de développement ont à faire face à la création d'infrastructures, souvent dans des conditions naturelles fort difficiles. Dans ces conditions, un effort national de recherche ne peut que gagner à coopérer, sous diverses formes — échange d'informations, de missions, formation de chercheurs, etc. — avec celui d'autres pays. Cette coopération a pris forme, ces dernières

années, dans des conditions qui permettent à la technique française, à la fois de progresser, et de rayonner à l'étranger. On peut citer, par exemple, la Documentation Internationale de Recherche Routière, dans laquelle intervient activement le L.C.P.C.

**G. BRUNSCHWIG**

*Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées  
au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

# QUELQUES EXEMPLES DE RÉSULTATS DE RECHERCHES

Nous présentons ici sous forme de courtes monographies, un certain nombre d'exemples de recherches, ou de résultats récents de recherches. Il convient d'in-

sister sur le fait qu'ils ne constituent nullement un panorama complet : ils illustrent simplement quelques aspects, qu'on a voulu aussi variés que possible,

de la recherche en matière d'infrastructures. Nous tenons à remercier ici les auteurs de ces monographies.

---

## DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES : GENÈSE DU CATALOGUE DES STRUCTURES

Depuis les années 1950, on a assisté à une évolution rapide des méthodes de construction des chaussées ainsi qu'à un accroissement considérable du trafic, tant en nombre qu'en poids des véhicules. Devant cet état de fait, le recours à l'expérience est devenu très rapidement insuffisant pour proposer de nouvelles structures de chaussées et l'étude du dimensionnement des chaussées s'est révélée indispensable pour éviter aussi bien les dégradations trop rapides que les épaisseurs exagérées.

On a vu alors se former deux écoles : l'une que l'on pourrait qualifier de purement empirique et l'autre qui se nommait elle-même rationnelle, sans que beaucoup d'échanges, qui auraient pu être

fructueux, se fassent entre elles. Cette divergence provenait sans doute de ce qu'ignorant encore trop de choses de la physique du comportement des chaussées, et pris par les problèmes de l'heure, on ne savait trouver les points de contact nécessaires.

Schématiquement, les études portaient alors tant dans les laboratoires étrangers qu'à la section de Mécanique des Chaussées du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, créée en octobre 1962, sur :

- l'observation du comportement de sections expérimentales (surtout pour l'école empirique),
- l'analyse du comportement des matériaux (rhéologie et étude de la rupture),

- l'étude mathématique de modèles qui, bien que simplifiés, en arrivaient parfois à une certaine sophistication.

Ce n'est que lentement que les résultats accumulés dans ces disciplines permirent de mieux voir l'ensemble du problème, au-delà des détails, et si à la conférence sur le dimensionnement des chaussées souples d'Ann-Arbor en 1967, les différents experts apparaissaient en grand désarroi, c'est cependant à cette époque que commencèrent à s'élaborer les synthèses, encore très imparfaites, bien sûr, qui ont par exemple conduit à la Road Note n° 29 en Grande-Bretagne et au Catalogue des Structures de chaussées neuves en France.

### LES PRINCIPES DE BASE

Les principes qui ont conduit à l'élaboration de ces documents peuvent se diviser en un certain nombre de groupes :

- **Efficacité**

— ne demander à l'utilisateur que des résultats réellement accessibles et utilisables dans l'état actuel

des choses (par exemple une caractéristique très simplifiée des sols de fondation);

— présenter les solutions sous

forme claire, évitant les calculs d'une précision illusoire;

— insister sur les points sur lesquels le maître d'œuvre sera le mieux à même d'agir (déroulement du chantier).

### ● Appréciation physique des structures

— utilisation des résultats mathématiques dans le but essentiel de dégager quelques lois peu sensibles aux approximations faites, et permettant une interprétation et une utilisation des résultats expérimentaux (l'existence de certains paradoxes apparents a permis parfois des mises en question qui se sont révélées fructueuses);

— prise de conscience progressive

de l'importance de la structure dans son ensemble et non pas seulement du comportement des matériaux pris isolément (le comportement de certains matériaux comme les graves non traitées n'est pas descriptible de manière simple si on ne fait pas référence à la structure dans laquelle ils sont placés. Certaines ruptures ou certains dépassements de limite admissibles, qui ne sont pas forcément graves en soi, peuvent conduire à des reports d'efforts préjudiciables au bon comportement de la chaussée : la démarche est alors la même que celle du calcul plastique des structures);

— recherche des phénomènes dont l'influence n'est pas calculable actuellement et de l'importance de cette influence (gel, drainage et imperméabilisation, etc.).

### ● Importance de l'exécution des travaux :

— accent mis sur la qualité des matériaux et particulièrement sur leur homogénéité et leur rusticité ou faible sensibilité aux conditions extérieures (sauf cas particuliers, il convient de se méfier des formules très « pointues » qui, si elles présentent des caractéristiques exceptionnelles dans un faible domaine de variation des paramètres, deviennent très rapidement médiocres quand on s'écarte de ce domaine de variation);

— étude des conditions de bonne exécution des travaux (possibilités de compactage, qualité de l'uni, etc.).

## CATALOGUE DES STRUCTURES

Les principes qui viennent d'être énoncés ont conduit à choisir une présentation sous forme de fiches regroupant des structures normalisées en fonction de deux paramètres

discrets (sol et trafic) ainsi que des indications sur les conditions de bonne exécution (principe d'efficacité et d'importance d'exécution des travaux).

Pour chaque type de structure retenu, on a effectué les travaux suivants :

● description des efforts auxquels est soumise la chaussée,

● rassemblement des connaissances sur les caractéristiques du matériau en laboratoire,

● appréciation des conditions de mise en œuvre de ce matériau,

● analyse du comportement du matériau in-situ dans des chaussées existantes (y compris élaboration de méthodes de mesure et d'interprétation : par exemple déflectométrie),

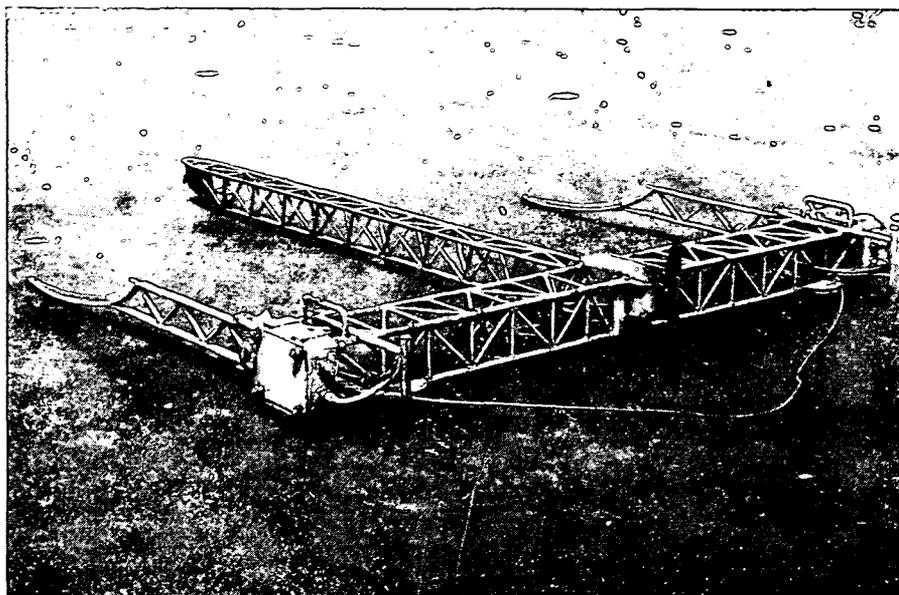
● premier projet de structure basé sur les caractéristiques mécaniques du matériau et l'utilisation d'un modèle simplifié. Analyse critique, comparaison avec les résultats in-situ, corrections éventuelles (on peut montrer par exemple que les essais de déflectométrie permettent dans certains cas de mieux ajuster les critères de rupture que ne pourraient le faire des essais de laboratoire),



Déflectographe "Lacroix" — Modèle 1972

- analyse de l'importance des phénomènes non pris en compte par le modèle (par exemple conditions de contact imparfaites aux interfaces qui peuvent conduire à modifier la répartition des contraintes, gel, etc.). Comparaison avec les résultats expérimentaux obtenus (étude du gel en laboratoire, par simulation en semi-grandeur, sur chaussée, comportement thermique dans les structures de matériaux visqueux ou élastiques, etc.). Choix d'un coefficient de sécurité approprié (tenant compte également des simplifications apportées à la définition du sol de fondation et du trafic),

- détermination du nombre de couches et de leur épaisseur exacte en fonction des conditions d'exécution (par exemple : épaisseur



Poutre de mesure — Modèle 1965

- technologique minimum et maximum des différentes couches, possibilité d'obtention d'un uni satisfaisant, etc.),

- comparaison de la structure finalement déterminée avec des chaussées existantes — ajustements éventuels.

## LES APPORTS ET LES QUESTIONS SANS RÉPONSE

L'ensemble des études qui viennent d'être rapidement énumérées ont conduit à la réalisation d'un catalogue qu'il est aisé de mettre à jour et à compléter et dont on veut espérer que, bien que certainement imparfait, il pourra rendre à l'utilisateur des services plus appropriés que ne le faisaient les documents existants jusqu'à présent.

Par ailleurs, au cours de sa réalisation on a été amené à élaborer ou à améliorer, pour mieux se rapprocher des préoccupations qui se précisaient, un certain nombre de méthodologies d'essai ou de processus d'études (rôles différents des sections de routes expérimentales suivant qu'il s'agit d'évaluer les possibilités de mise en œuvre d'un nouveau matériau, d'analyser

le comportement mécanique in-situ de ce matériau, ou de suivre une technique déjà arrivée au stade du développement, meilleure appréciation du rôle des phénomènes thermiques, etc.).

Enfin on a pu se poser plus clairement toute une série de questions d'ordre très différent et qui n'ont jusqu'à présent reçu que des réponses imparfaites, voire aucune réponse :

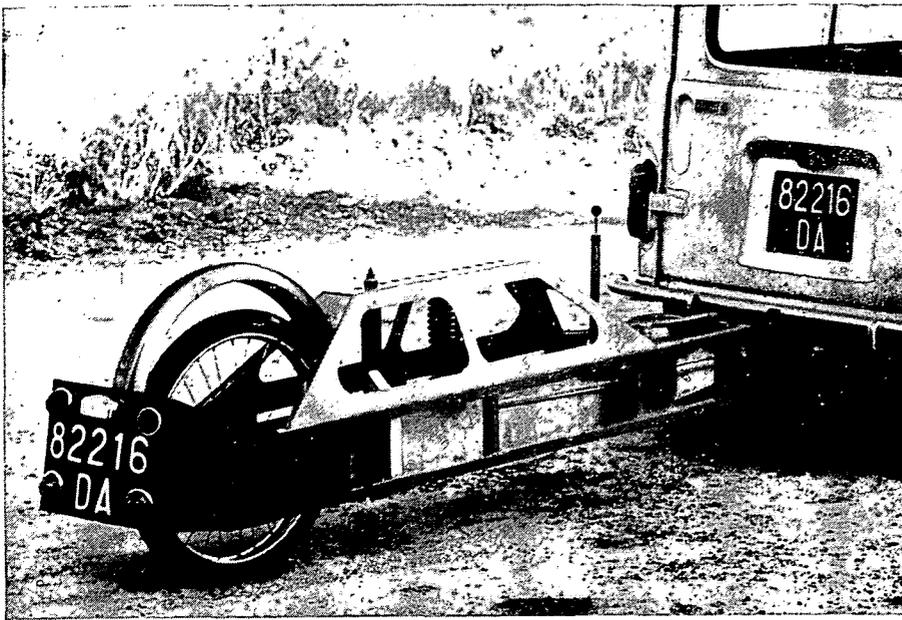
- la plus fondamentale est la suivante : qu'est-ce que la qualité d'une route (définition, critères, niveaux admissibles) ?

Doit-on essayer de répondre à cette question par une étude purement économique (si cela est pos-

sible) ? Faut-il tenter de chercher une réponse dans des sondages d'usagers (P.S.I. américain) ? Doit-on se contenter, pour choisir les niveaux, de se baser sur les réalisations actuelles ? etc.,

- vient ensuite toute une série de questions encore mal résolues, liées au phénomène de fatigue (non pas seulement du matériau mais de la structure dans son ensemble). Très généralement, comment les critères de qualité choisis pour les matériaux sont-ils liés à la qualité intrinsèque de la route ?

- puis se posent des questions d'ordre purement technologique : meilleure connaissance sur l'influence du gel et des conditions de drainage, analyse quantitative de



Analyseur de profil en long

l'influence des irrégularités de contact, caractéristiques des couches de forme, leur évolution dans

le temps, enfin (et ceci n'est pas le moindre problème) : obtention de couches de surface de durabilité

suffisante compte tenu des agressions de plus en plus violentes qu'elles subissent (augmentation du trafic et tout particulièrement du trafic hivernal, salage, pneus à crampons, etc.).

Il en est ici comme dans toute recherche, et tout progrès conduit à se poser des questions soit nouvelles, soit au contraire fort anciennes mais éclairées d'un jour nouveau. L'important est donc maintenant, d'apprécier la valeur du document établi et de l'améliorer dans la mesure du possible ainsi que de choisir les voies de recherche les plus prometteuses et les plus urgentes pour s'y lancer en sachant que toute réponse restera toujours partielle et que ce n'est que lentement que l'on pourra évaluer les progrès acquis.

Ph. LÉGER

*Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Chef du département des structures  
et ouvrages d'art  
au Laboratoire Central des Ponts  
et Chaussées*

# PROJETS AUTOROUTIERS : MÉTHODES AUTOMATIQUES DE TRACÉ

L'utilisation à grande échelle des ordinateurs dans le domaine des projets routiers a été envisagée et développée dès le début des années soixante. Cette époque correspond à la mise en chantier du plan autoroutier qui posait le problème des études en termes quantitatifs et qualitatifs. La nécessité d'assurer une sécurité convenable à des vitesses élevées entraînait un changement profond dans les méthodes d'étude géométrique : introduction progressive des courbures, des dévers, définition rigoureuse des implantations, etc. Par ailleurs, l'importance des investissements en cause rendait souhaitable des comparaisons sérieuses entre les diverses solutions possibles, ainsi qu'une estimation beaucoup plus rigoureuse des dépenses.

Ceci explique que le recours aux moyens modernes de traitement de l'information soit apparu comme indispensable pour faire face, dans des conditions de qualité et d'homogénéité suffisantes, à un volume d'études devenu brusquement très important.

Les ingénieurs d'ouvrages d'art avaient ouvert la voie avec la réalisation de programmes permettant le calcul automatique de ponts standardisés.

## PREMIÈRES RECHERCHES ET ÉTUDES

Pour les tracés, la première phase du développement a eu pour objectif de fournir un outil pour les calculs et dessins nécessaires à l'établissement du projet géométrique : calcul d'axes, de dévers, de profil en long, de profil en travers, etc.

Il faut bien noter que très rapidement, en effet, s'est avérée fondamentale l'utilisation de traceurs automatiques permettant d'effectuer, en connexion directe avec les calculs sur ordinateur, les dessins correspondants. Ceci permet d'éviter un report manuel fastidieux et coûteux et également de contrôler très rapidement et commodément la validité des calculs.

Rapidement, l'utilisation de ces procédés modernes a conduit à réexaminer les méthodes mêmes d'étude.

### ● Les opérations topographiques

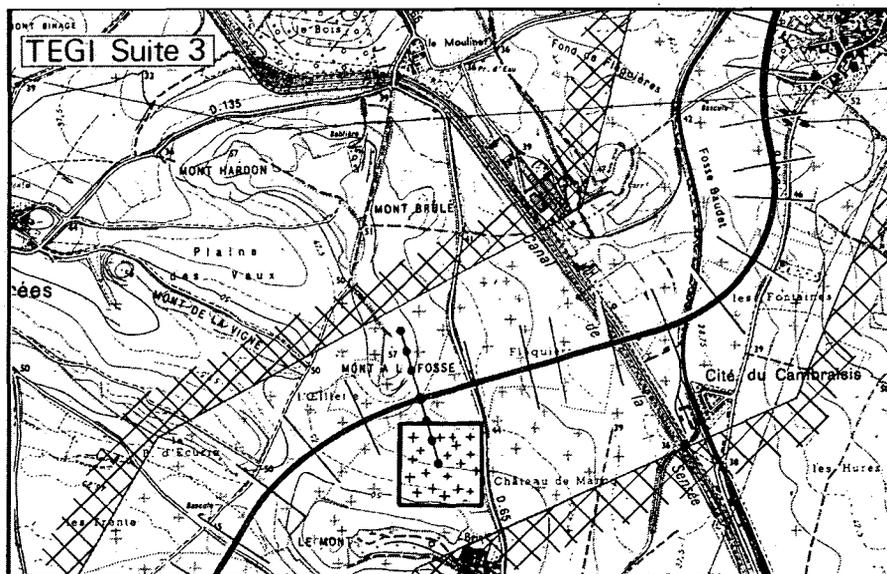
Elles ont pu être dissociées d'une connaissance exacte du tracé par l'utilisation d'image numérique du terrain dans une bande d'études. Le procédé mis au point avec la collaboration de l'Institut Géogra-

phique National, est connu sous le nom de « semis de points ». Dans la bande d'études, sont levés des points au hasard avec une densité de l'ordre de 25 à 40 points à l'hectare. L'ensemble de ces points connus donc en coordonnées X, Y, Z constitue le « semis de points ». Dans le cours des calculs, la cote d'un point dont on connaît les coordonnées planes sera déterminée par une méthode d'interpolation du deuxième ordre en utilisant les cotes des points du semis voisins.

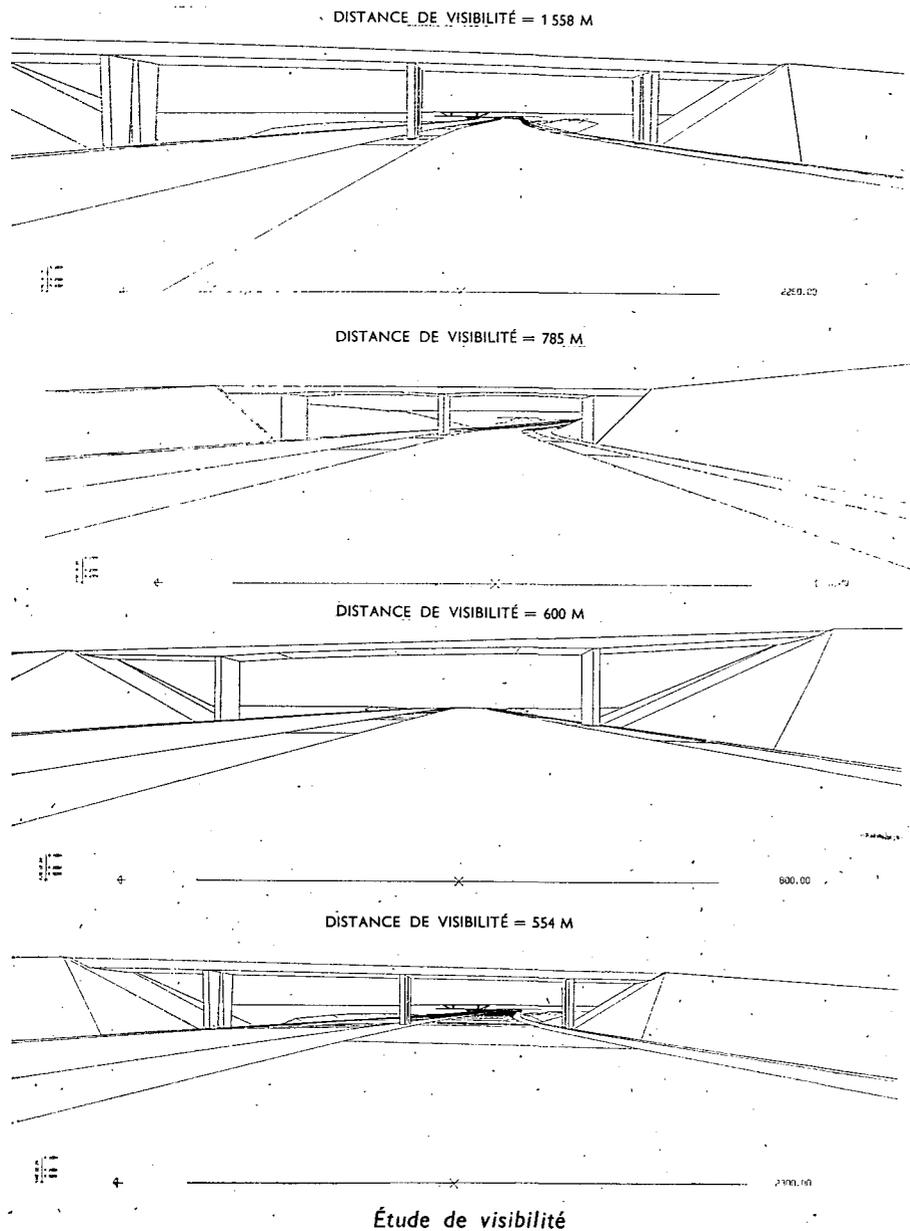
Cette méthode a été perfectionnée depuis, et des études sont toujours en cours pour augmenter sa généralité et sa précision.

### ● Les études de visibilité

Grâce au procédé dit des « masques » successifs, le problème de la



Semis de points



séparation des parties vues et cachées des perspectives a pu être résolu dans le domaine routier; les ouvrages d'art ont pu être introduits directement sur de telles perspectives. Il en est résulté la possibilité d'utiliser directement, sans aucune retouche manuelle, les dessins sortant de la machine, ce qui, joint au fait que les données nécessaires aux perspectives sont fournies entièrement par les programmes de calculs antérieurs, a entraîné un développement systématique de leur utilisation. Le programme peut également déterminer les diagrammes complets de visibilité le long de la route.

Un programme semblable mais plus souple a été établi de façon à pouvoir faire les études de visibilité à partir d'éléments plus restreints et même au stade de l'avant-projet sommaire. Ces études peuvent donc se situer à leur « bonne » place au moment de la recherche du tracé et avant que celui-ci ne soit pratiquement figé.

Quant aux implantations, elles ont pu être traitées de façon précise malgré l'utilisation de courbes non traditionnelles.

## INTRODUCTION DES DONNÉES GÉOTECHNIQUES - MOUVEMENT DES TERRES

L'orientation vers l'obtention de données géotechniques plus précises à un stade de l'étude permettant effectivement à ces données d'intervenir dans le choix du tracé, a

conduit à la nécessité de pouvoir exploiter ces données par le calcul électronique. Aussi, le programme de mise en place des profils en travers et de calcul des cubatures

a-t-il été développé de façon à pouvoir admettre des constructions de talus complexes et déterminer les volumes de terrassement suivant plusieurs couches, les données de

ces couches étant fournies en utilisant des profils géologiques (ou géotechniques) proches mais non liés directement au tracé final.

Ces résultats des cubatures peuvent être utilisés pour résoudre le problème du mouvement des terres. On peut distinguer les différents déblais suivant leurs possibilités de réutilisation, leur coût d'extraction, leur coefficient de foisonnement et de contre-foisonnement.

Les emprunts extérieurs sont donnés par leur capacité totale, leur coût fixe de mise en service, leur coût d'extraction, ainsi que leur distance d'approche de la route. Il en est de même pour les dépôts extérieurs.

Le coût de transport est déterminé par les valeurs de ce transport pour un certain nombre de distances; compte tenu de toutes ces données, le programme détermine le coût des opérations indépendantes du mouvement des terres (extraction, confection des remblais et de la couche de forme, transport dans le profil). Il cherche ensuite la meilleure solution pour chacun des mouvements concernant la couche de forme et le corps de remblais en déterminant le coût de ces mouvements.

On peut enchaîner plusieurs calculs avec des hypothèses différentes pour tenir compte par exemple des conditions climatiques ou pour déterminer l'intérêt de la mise en service de tel ou tel emprunt.

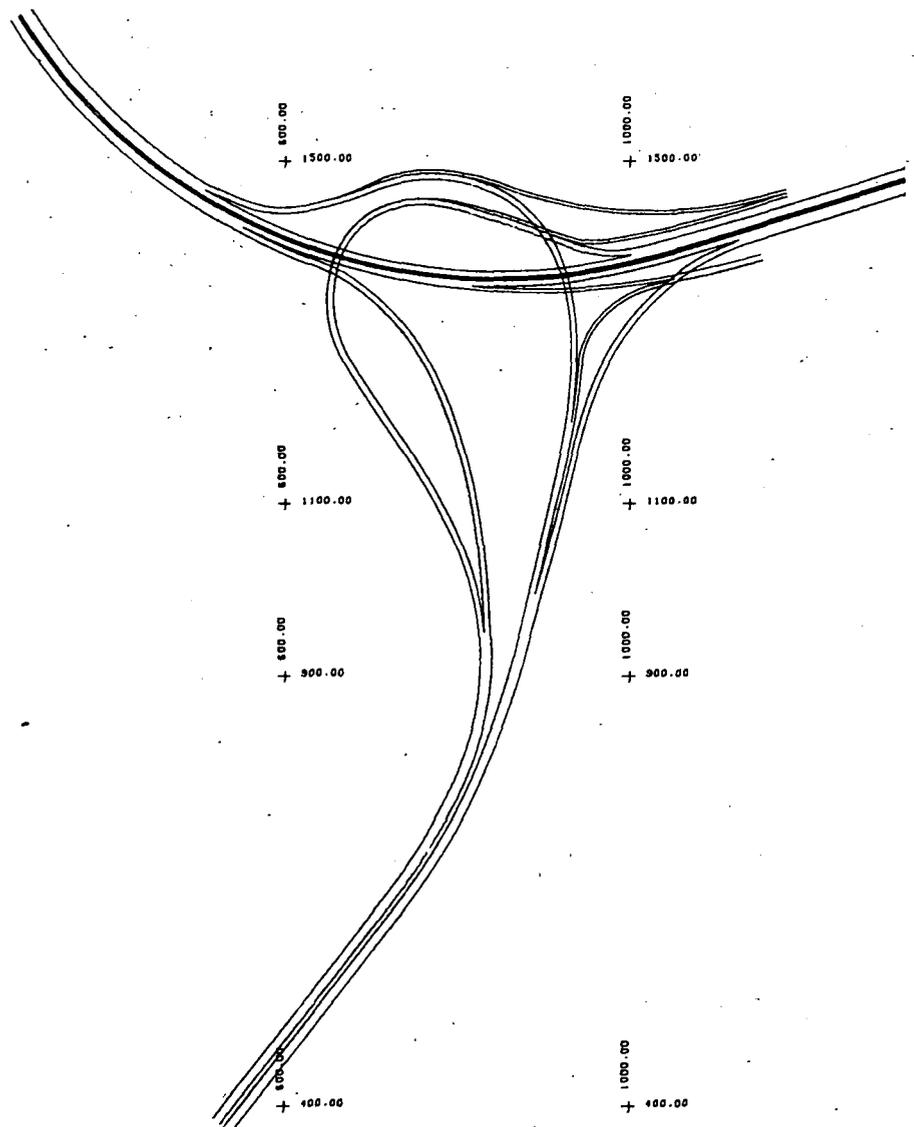
On a là un premier exemple de recours aux techniques d'optimisation (ou recherche opérationnelle), la technique utilisée étant la programmation linéaire ou, plus exactement, un de ses aspects, connu sous le nom de problème de transport.

## RECHERCHE DE TRACÉS

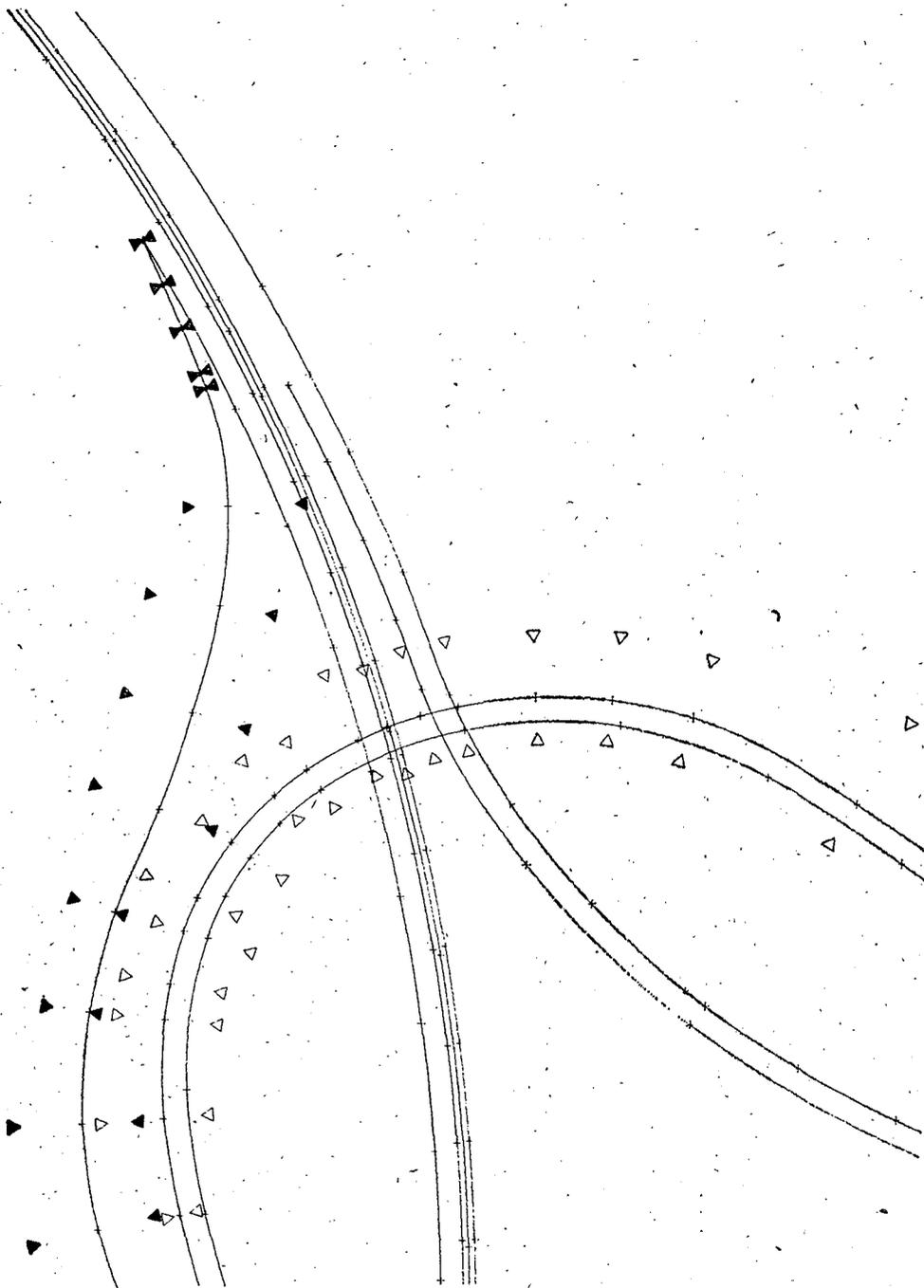
Pour la phase de recherche de tracés, des programmes bien adaptés à l'évolution des idées dans ce domaine ont été mis au point. La recherche de tracés est l'élaboration d'un compromis entre les dépenses de construction et les dépenses des usagers. Des cadres simples mais complets sont fournis, permettant de tenir compte de tous les facteurs de coûts, l'accent étant porté, pour le coût de construction, sur les terrassements et les franchissements;

les terrassements sont calculés en tenant compte des diverses couches rencontrées, de leurs possibilités de réutilisation en ayant recours au programme du mouvement des terres.

Pour les voies rencontrées, le programme détermine, compte tenu de la géométrie respective de ces voies et de la route à étudier, les longueurs de franchissements, les longueurs de voies à rétablir, les terrassements correspondants.



Étude d'échangeur



Étude d'échangeur

Le bilan de l'utilisateur est calculé en tenant compte des trafics escomptés, de l'actualisation. Le comportement des poids lourds est simulé sur le tracé de façon à déterminer leur vitesse en chaque point et,

ainsi, préciser l'emplacement éventuel des voies poids lourds, ainsi que les dépenses de temps de ces poids lourds.

Ces fonctions de coûts (construction + bilan de l'utilisateur) peuvent

servir pour la détermination par la machine d'un profil en long le plus économique. On fait là appel de nouveau aux techniques de l'optimisation, la méthode utilisée étant la méthode dynamique, la recherche se faisant dans un maillage.

Les résultats obtenus sont particulièrement encourageants. La diminution des coûts de terrassements s'établit en moyenne à 15 %, à caractéristiques géométriques égales.

Comme nous l'avons vu plus haut, l'étude parallèle de visibilité peut s'effectuer et, ainsi, l'ingénieur dispose de tous les éléments de choix pour la détermination de son tracé.

Parallèlement à ces méthodes de choix économique du parti, se pose souvent le problème de la localisation précise du tracé dans les zones difficiles où les contraintes de passage sont très astreignantes. Il en est ainsi, par exemple, des zones urbaines. Dans ce cas, la mise au point d'axes et de profils en long respectant toutes les contraintes géométriques peut être laborieuse.

Ainsi, des méthodes sont-elles mises au point pour pouvoir résoudre directement le problème.

A partir d'un tracé approximatif, et fournissant les diverses contraintes géométriques de courbures, variations de courbures, pentes, le programme essaie de déterminer une solution. La méthode utilisée est une méthode de relaxation; la ligne étudiée est définie par une série de points qu'on déblocage successivement. Chaque déblocage d'un point consiste à trouver parmi les différentes positions possibles du point (en supposant que les autres points sont fixes), celle qui correspond le mieux à un critère de continuité de la courbe.

On dispose là d'une méthode très souple permettant de tenir compte des contraintes les plus variées, et qui pourra également faciliter la synthèse géométrie-aspect économique du problème.

On peut également généraliser le problème à un ensemble de lignes (échangeurs, par exemple), où il existe non seulement des contraintes de passage que l'on pourrait qualifier d'absolues, mais des liaisons entre les divers axes.

Pour ces complexes routiers, il est également intéressant, outre la détermination des lignes principales, de pouvoir construire la surface du projet et de pouvoir, en conséquence, déterminer les facteurs essentiels du coût, surface d'emprise, de chaussée, de talus, d'ouvrages d'art, volumes des cubatures, etc.

Ces programmes, dans le domaine des échangeurs, devraient rapidement modifier les conditions des études et faciliter de façon importante la tâche des ingénieurs projeteurs dans un domaine complexe aux contraintes nombreuses et variables parfois dans le temps.

## UN NOUVEAU MATÉRIEL : LA CONSOLE DE VISUALISATION

Cet appareil est un périphérique de l'ordinateur qui a un double rôle :

— visualiser sur un écran semblable à celui d'un écran de télévision des informations, en ce qui concerne, essentiellement, des informations graphiques;

— permettre l'introduction de données à partir de modifications faites en observant les informations affichées.

Ce double rôle peut être mis en évidence par l'exemple du programme de mise au point du profil en long.

Un profil en long défini par un semis de points étant introduit (résultant, par exemple, de calcul d'optimisation), il est affiché avec la ligne du terrain naturel, les indications d'ouvrages d'art, de contraintes, etc.

Une série de touches permet d'effectuer certaines opérations dont les principales sont :

— déplacer l'image pour balayer l'ensemble du projet tout en ayant une échelle convenable;

— augmenter l'échelle du dessin;

— faire apparaître des diagnostics sur l'image si les contraintes géométriques qu'on s'est fixé sont dépassées;

— calculer les volumes et coûts des terrassements correspondant au profil;

— faire apparaître les vues en perspectives de la route projetée.

Un photostyle ou crayon lumineux permet, lui, de repérer certains points du tracé, de les déplacer, le tracé correspondant étant reconstitué immédiatement.

Ainsi, en un laps de temps réduit (une demi-heure au maximum), un ingénieur, sans aucune connaissance particulière d'informatique, peut examiner tout le profil en long d'un projet, le modifier, contrôler les répercussions d'une telle modification sur le plan de la visibilité, des variations des volumes des terrassements, etc.

La console de visualisation peut jouer également un rôle particulièrement intéressant dans le processus d'analyse des données géologiques et de constitution d'une image numérique géologique.

En effet, ce problème complexe ne peut s'envisager que par un dialogue permanent homme-machine, l'homme étant irremplaçable pour les synthèses et interprétations, la machine permettant les calculs de vérification et la

visualisation des résultats de façon quasi instantanée.

Nous pouvons donc estimer que ces appareils, pour l'instant relativement coûteux, joueront un rôle décisif dans l'établissement de projets et d'une façon générale, dans toutes les opérations de bureaux d'études, dès lors que les conditions technologiques et économiques en feront un outil accessible à tous.

Ce rapide exposé aura, nous l'espérons, mis en évidence l'objectif essentiel de ces méthodes, fournir à l'ingénieur des outils à la fois souples et complets permettant d'examiner sous tous les aspects les problèmes des tracés routiers et mettant en évidence les conséquences de ses choix.

Le rôle de cet ingénieur ne peut être qu'accentué, car ces possibilités nouvelles entraînent une responsabilité accrue. Libéré des tâches matérielles, pouvant donc se consacrer aux difficultés essentielles du tracé, examiner toutes les solutions, il lui sera beaucoup moins pardonné un mauvais choix.

P. ANTONIOTTI

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Chef de l'arrondissement  
C.E.T. au S.E.T.R.A.

# RECHERCHE SUR LA SÉCURITÉ DE L'USAGER ROUTIER : LA LUTTE CONTRE LA GLISSANCE

## QUELQUES DÉFINITIONS

Le pourcentage des accidents de dérapage, défini comme le rapport du nombre de dérapages au nombre total des accidents, est de 10 % sur chaussée sèche et de 25 % sur chaussée mouillée. Ce sont ces pourcentages, et notamment le dernier, qu'il faut réduire, par une augmentation des qualités d'adhérence sur l'ensemble du réseau, et par la suppression des zones glissantes, où se concentrent de nombreux accidents sur une longueur réduite de chaussée.

Il faut donc à tout prix que les chercheurs se penchent sur cette question pour pouvoir lutter efficacement contre la glissance.

Il faut d'abord définir les caractéristiques mesurables de la glissance ou plus exactement celles du manque d'adhérence.

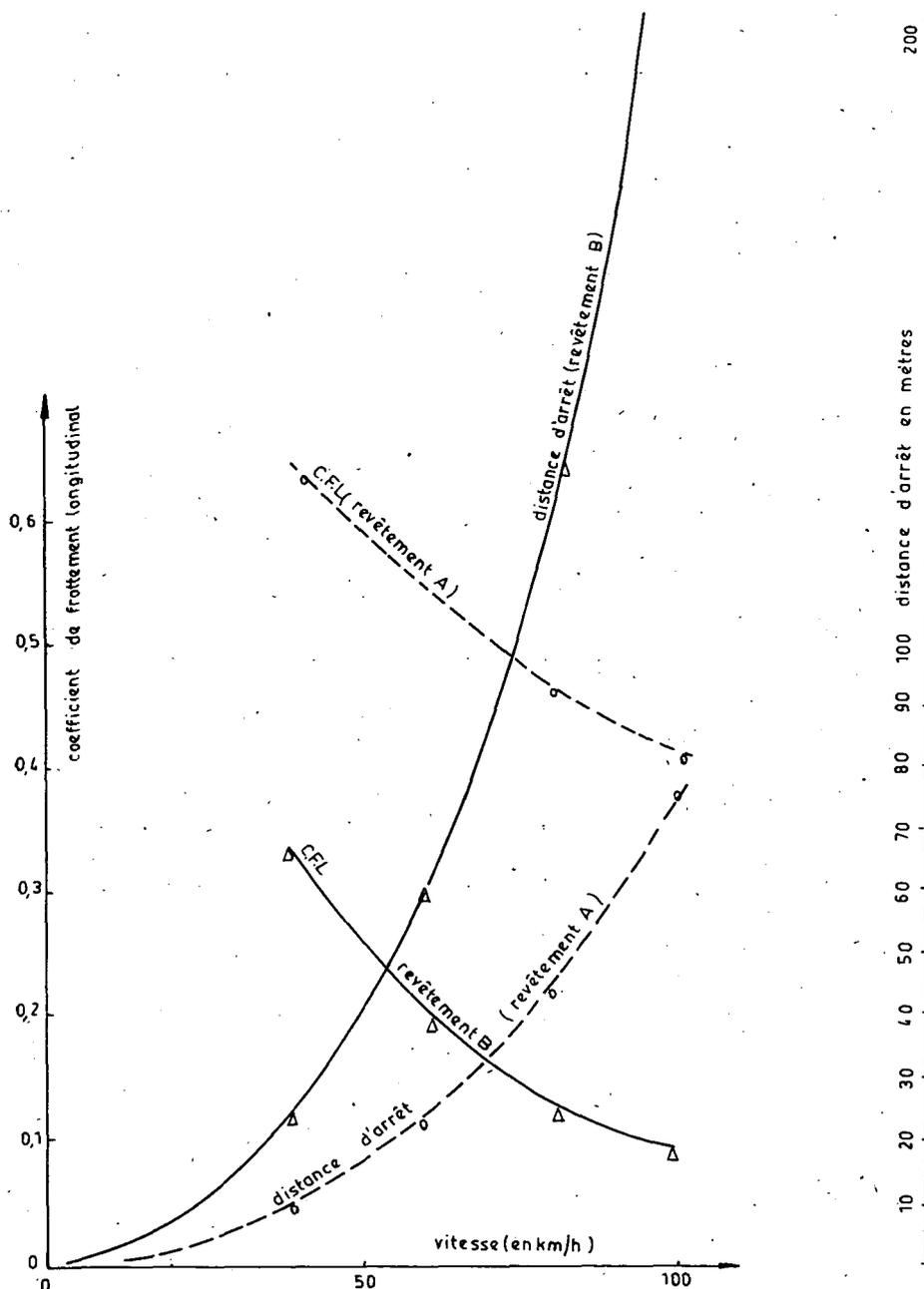
### Coefficient de frottement longitudinal (C.F.L.)

C'est le rapport de la réaction du revêtement, opposée au mouvement du véhicule freiné, au poids de ce dernier. La distance d'arrêt mesurée à partir de la vitesse de circulation jusqu'à zéro n'est pas une fonction simple de ce coefficient, qui est mesuré à vitesse constante.

Un automobiliste se rend cruellement compte du défaut d'un revêtement lorsqu'il veut, sans le pouvoir, s'immobiliser à temps derrière un obstacle.

### Coefficient de frottement transversal (C.F.T.)

C'est le rapport de la réaction agissant dans l'axe du moyeu d'une



Deux exemples tirés de la thèse de R. Majcherczyk, variation du coefficient de frottement longitudinal avec la vitesse mesurée avec un appareil de recherche pour deux revêtements différents et variation correspondante de la distance d'arrêt avec un véhicule réel.

roue qui n'est ni freinée, ni parallèle au mouvement général du véhicule, à la charge verticale supportée par cette même roue; le manque d'adhérence transversale fait que l'automobiliste sort du tracé sous l'effet, par exemple, d'un vent traversier.

Sans entrer dans le détail, il faut signaler certaines particularités de ces coefficients :

- ces derniers ne sont pas constants mais variables suivant plusieurs facteurs tels que : la vitesse du véhicule, la pression du pneu, la charge verticale, l'angle de pincement, la nature du pneu et son dessin et enfin le pourcentage de glissement pendant le freinage;

- ils sont par ailleurs fonction de la nature, des microrugosités et macrorugosités des revêtements, de la température, de l'épaisseur d'eau en surface, de l'âge et du degré de polissage des granulats de surface.

### Uni des revêtements

C'est une qualité de forme de la chaussée, liée au confort de roulement, à la sécurité dynamique des véhicules et à la possibilité pour ces derniers d'utiliser au mieux l'adhérence intrinsèque du revêtement. Les défauts d'uni peuvent être définis comme les écarts de faible amplitude entre le profil réel et le profil moyen de la chaussée. On distingue par convention les défauts d'uni longitudinaux et les défauts d'uni transversaux, entraînant respectivement des mouvements de galop et de roulis dans les véhicules.

### COMMENT EFFECTUER LES MESURES ?

Les principaux appareils actuellement au point sont :

- pour la mesure de l'adhérence à grande vitesse : la remorque L.P.C. et le stradographe C.E.B.T.P.,

- pour l'uni : l'analyseur dynamique de profil du L.C.P.C.,



Le stradographe du C.E.B.T.P. pour la mesure de l'adhérence (C.F.L. et C.F.T.)



La remorque L.P.C. pour la mesure de l'adhérence (C.F.L.).

— pour la texture superficielle : le drainomètre du C.E.B.T.P. et la profondeur au sable.

### COMMENT LUTTER CONTRE LA GLISSANCE ?

Les recherches effectuées sont conduites dans plusieurs directions : amélioration des revêtements ; mise au point de formulations à très haut niveau d'adhérence ; étude des caractéristiques de liants spéciaux ; étude des systèmes de freinage antibloquants sur les véhicules.

● Les résultats de recherches sur l'adhérence des revêtements ont mis en évidence deux paramètres fondamentaux pour obtenir de bonnes qualités d'adhérence :

— la **macrorugosité** : c'est-à-dire la texture superficielle de la surface qui favorise l'évacuation de l'eau sous le pneumatique. Cette macrorugosité est liée à la formulation (courbe granulométrique et dimension maximale des gravillons) pour les enrobés hydrocarbonés, et aux traitements superficiels (rainurage) pour les bétons de ciment (pistes d'aérodrome notamment), ainsi qu'à la forme des granulats.

Les enrobés devant aussi satisfaire à une fonction de résistance mécanique et d'étanchéité, le choix des formulations les plus satisfaisantes est un compromis entre ces diverses fonctions, compromis pouvant être déplacé selon la priorité accordée à chacune de ces fonctions. C'est dire qu'une coopération très serrée entre les divers secteurs intéressés, depuis la conception en laboratoire jusqu'à l'application sur chantier, est obligatoire.

— la **microrugosité** : c'est-à-dire la texture même de la surface des granulats, liée à leur nature. La forme anguleuse implique des matériaux concassés : le maintien des aspérités, qu'elles proviennent des faces de rupture ou des arêtes, implique une bonne résistance au polissage, une dureté et une ténacité suffisantes.



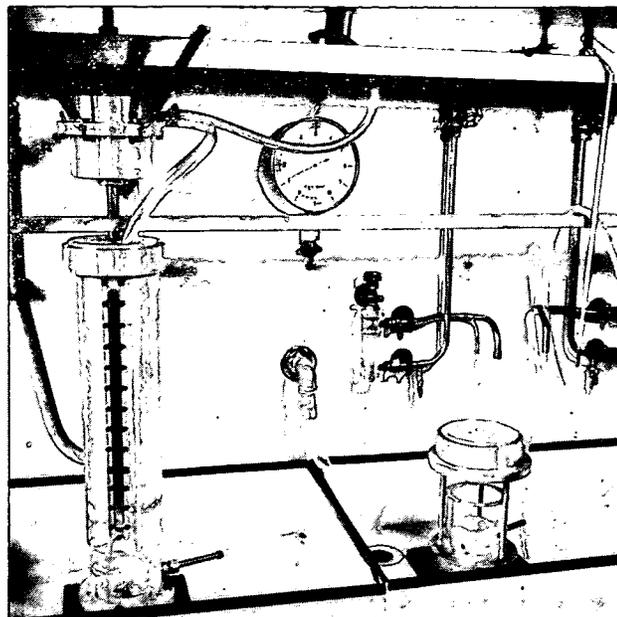
L'analyseur-dynamique L.C.P. pour la mesure de l'uni des chaussées.

● La mise au point des formulations à haut niveau d'adhérence est l'application, poussée à l'extrême, des paramètres précédents. La sélection des meilleures roches naturelles et la mise au point des granulats artificiels, plus résistants à l'usure et au polissage, nous guident pour la réalisation de ces revêtements devant assurer un niveau élevé de service dans les conditions actuelles de sollicitations. Les voies explorées pour la fabrication de granulats artificiels portent sur les laitiers, additionnés de charges minérales dures, et sur la calcination de bauxites sélectionnées, entraînant la formation de corindon, très dur.

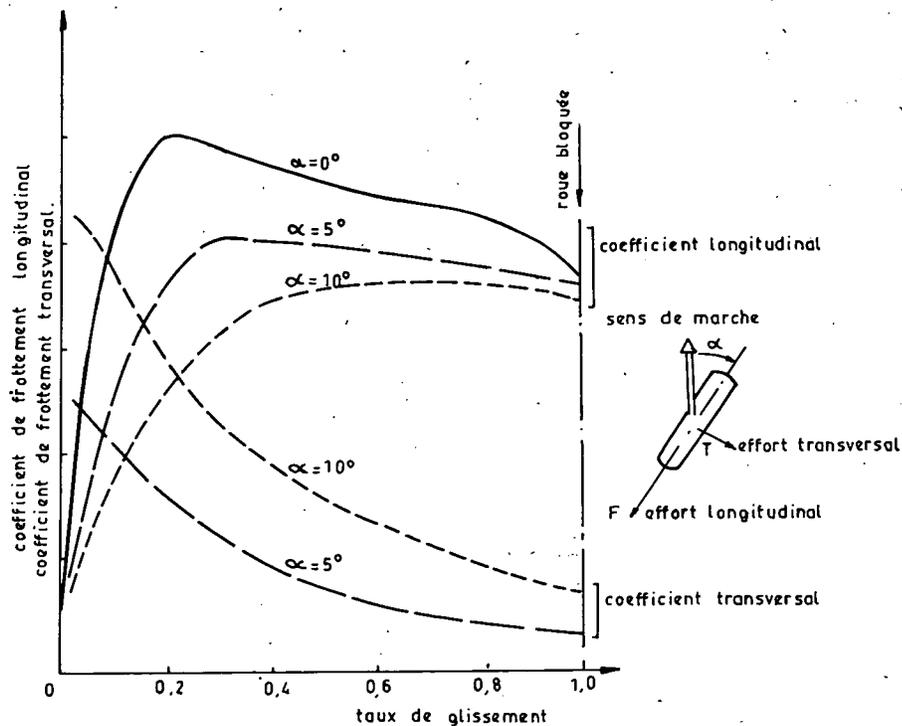
● Parallèlement, les recherches sont activement menées pour la fabrication des liants présentant avec ces matériaux l'affinité nécessaire, et la résistance mécanique suffisante, permettant le maintien des gravillons sur la chaussée, la résistance aux efforts mécaniques de la circulation et la résistance à la fatigue et au vieillissement atmosphérique pour assurer une bonne longévité du revêtement réalisé.

Des planches expérimentales ont été réalisées, montrant un niveau d'adhérence particulièrement encourageant, les valeurs du C.F.L. (roue bloquée) atteignant 0,7 à 120 km/h, sur revêtement mouillé avec un pneu lisse.

● Lorsqu'une roue envirée est freinée, le coefficient de frottement longitudinal croît en même temps que le glissement de la roue par rapport au sol, puis il décroît lorsque le glissement augmente jusqu'au blocage complet de la roue, alors que le coefficient transversal diminue. On constate donc qu'un freinage brutal bloquant les roues peut parfois être dangereux. En effet, si les roues du véhicule sont bloquées, l'adhérence latérale décroît considérablement et l'utilisateur risque alors de quitter la route sous une faible impulsion. De là, l'intérêt de ces dispositifs antibloquants, déjà largement appliqués en technique aéronautique.



Le drainomètre du C.E.B.T.P. pour l'étude des caractéristiques de la texture superficielle des revêtements.



Variation de l'adhérence longitudinale et de l'adhérence latérale en fonction du taux de glissement.

— Lorsque la dérive est augmentée, la réaction longitudinale diminue, lorsque le taux de glissement augmente la réaction transversale décroît. Au-delà d'un certain seuil l'adhérence transversale utilisable est très réduite.

Les recherches conduites sur l'adhérence des revêtements ont mis en évidence l'importance des qualités physiques des granulats de la couche de roulement et de la texture superficielle de la chaussée.

Certaines de ces recherches ont déjà abouti à une gamme de revêtements d'adhérence satisfaisante, durables au moins dans certaines gammes de trafic et relativement peu onéreux (enrobés grenus et semi-grenus, cloutages, enduits classiques). Des progrès restent à faire pour les choix des matériaux et le traitement superficiel des bétons frais.

Pour les revêtements à très haut niveau d'adhérence, des essais pilotes ont également été effectués, dont l'efficacité a été démontrée,

en traitant avec succès des zones glissantes particulièrement dangereuses sur le réseau. Les progrès supplémentaires à réaliser auront pour but d'augmenter la durabilité de ces revêtements, par la mise au point de granulats artificiels, et de liants adaptés, d'en abaisser le coût, par un matériel adapté, permettant l'industrialisation de la mise en œuvre, sans perte de qualité et par une diminution du prix des matières premières, logiquement associée à une production en expansion.

Ce sont :

— la recherche menée sur la sélection des revêtements usuels ayant de bonnes caractéristiques d'adhérence et la mise au point de revêtements très adhérents (par des

gravillons sélectionnés ou artificiels, et des liants adaptés),

— l'application qui est faite des connaissances acquises tant pour la fabrication des appareils de mesure de l'adhérence que pour celle des appareils de mise en œuvre des revêtements, qui mettent à la disposition de l'ingénieur une gamme de revêtements à caractéristiques superficielles favorisant la sécurité des usagers.

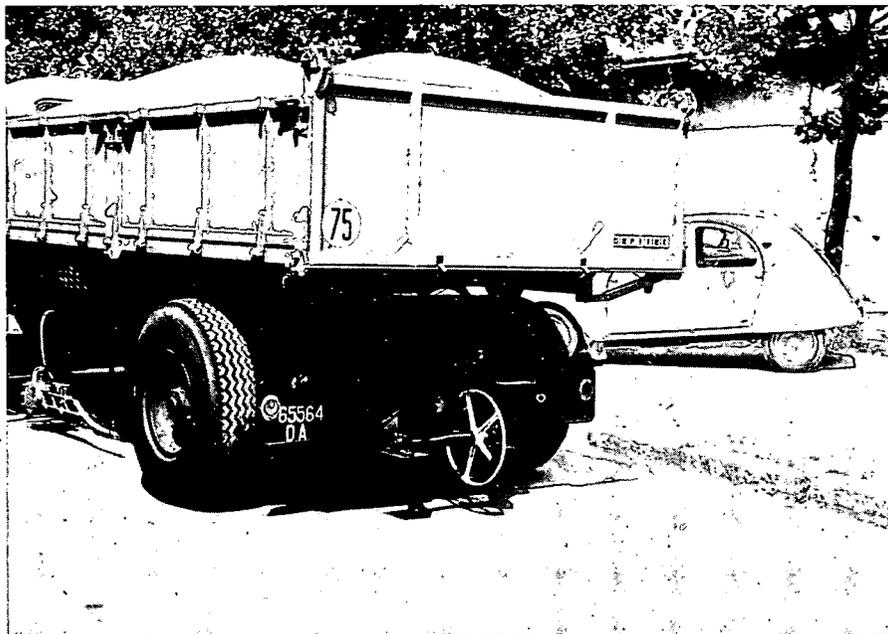
J. LUCAS

*Chargé de mission au département Chaussées  
du Laboratoire Central des Ponts et  
Chaussées*

Y. TCHENG

*Chef de la division Sols-Recherche  
du C.E.B.T.P.*

# LES ÉTUDES PRÉALABLES DE RENFORCEMENTS COORDONNÉS



*Défectographe Lacroix.*



*Vibreur léger.*

Un des problèmes à résoudre en matière de renforcement des chaussées existantes, est de déterminer la « force portante » résiduelle de la chaussée existante, de façon à pouvoir déterminer le renforcement qu'il faut lui apporter pour que l'ensemble (chaussée ancienne + renforcement) présente les caractéristiques structurales convenables pour un bon comportement sous le trafic considéré.

Ce problème est en fait, pour de nombreuses raisons, plus difficile que le dimensionnement des chaussées neuves.

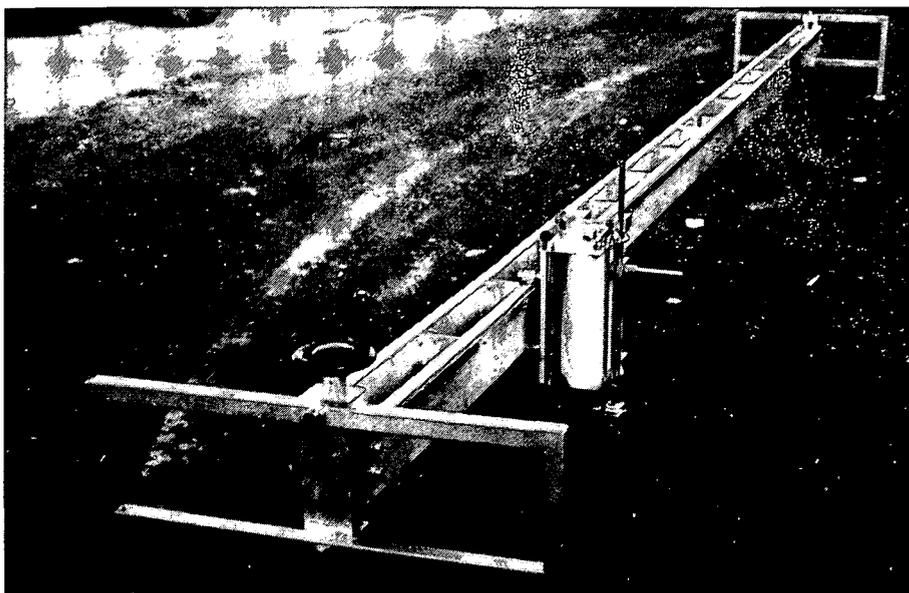
Parmi les raisons principales, on peut citer les suivantes :

● outre le trafic, on se trouve en face de deux données de base au lieu d'une :

- le sol support,
- l'ancienne chaussée.

Chacune de ces deux données étant par ailleurs plus difficile à appréhender, en raison notamment de leur variabilité plus grande : l'ancienne chaussée se trouve incluse dans la nouvelle structure alors que l'on connaît assez mal les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs de cette ancienne chaussée; ces caractéristiques variables et sujettes à évolution, s'écartent par ailleurs assez notablement des hypothèses que l'on est obligé de faire pour aborder le problème mathématique (élasticité, homogénéité, isotropie...).

La validité des théories et programmes de calcul actuellement disponibles, très satisfaisante dans le cas des chaussées neuves, s'en trouve amoindrie.



Transversoprofilographe.

● Pour élaborer une structure de chaussée neuve, on peut jouer sur trois paramètres :

- la couche de forme,
- la couche de fondation,
- la couche de base.

Au contraire, dans le cas de renforcement, on ne dispose plus que d'un seul paramètre : la couche de renforcement.

Cette couche travaille donc dans des conditions difficiles et l'on se trouve fréquemment conduit à la dimensionner (en nature et en épaisseur) pour assurer sa résistance propre (non-rupture par traction à sa base) et non pour réduire à la valeur admissible la contrainte de compression sur le sol support.

Le premier problème est d'effectuer l'auscultation de la chaussée existante pour apprécier sa « force portante » résiduelle.

Trois approches sont possibles :

- les méthodes basées sur la mesure, par auscultation non destructive, de certains paramètres de comportement mécanique (déflexion, rayon de courbure de la déflexion, vibreur léger...);

— les méthodes basées sur une observation externe de l'état de surface de la chaussée;

— les méthodes basées sur des observations internes (sondages et carottages).

Après examen attentif du problème et de ses difficultés, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il fallait réaliser une combinaison de ces trois approches, le poids relatif à donner à chacune de ces trois approches dans la combinaison dépendant d'ailleurs :

- du prix moyen (et du délai) jugé admissible pour ces études,
- du problème posé dans le contexte régional.

Dans les régions à climat tempéré, les mesures de déflexion pourront jouer un rôle prépondérant, tandis que dans les régions où le problème gel-dégel se pose, elles sont tout à fait insuffisantes.

En tout état de cause, la combinaison des trois approches est indispensable, chacune se valorisant mutuellement.

Nous avons fait dans les années antérieures, un gros effort pour les mesures de déflexion.

Le déflectographe Lacroix a vu son utilisation généralisée (30 appareils sont en service dans les Laboratoires Régionaux). Nous terminons à l'heure actuelle la mise au point d'un déflectographe à châssis rallongé dans le but d'avoir une appréciation aussi exacte que possible de la déflexion et de son rayon de courbure, même dans le cas des chaussées comportant des assises traitées, en principe peu déformables.

Pour compléter l'analyse non destructive de ces chaussées, nous disposons également du vibreur léger. L'examen de la propagation d'ondes de Rayleigh à diverses fréquences, nous permet de déterminer les caractéristiques de déformabilité (et dans une certaine mesure d'épaisseur) de diverses couches de la chaussée.

Au niveau de l'appréciation de l'état de surface de la chaussée, nous avons également fait un gros effort.

Au viagraphes et au transversoprofilographe manuel est venu s'adjoindre l'analyseur dynamique du profil en long. Nous nous attachons également à la mise au point de transversoprofilographe automatique.

Les observations visuelles se révélant également très instructives, nous nous efforçons de les objectiver et de les quantifier à l'aide d'un « catalogue des dégradations ».

La méthodologie d'analyse est maintenant bien au point, bien qu'elle ait encore à progresser.

L'ensemble des éléments d'information recueilli est synthétisé sous forme d'un schéma itinéraire.

Par contre, un certain nombre de difficultés subsiste au niveau de l'interprétation (avec un risque de subjectivité non négligeable).

Cette méthodologie a été appliquée en 1971, aux 2 500 km sur lesquels ont été choisis les itinéraires, à renforcer en 1972, son application débute pour 3 400 km (pro-

gramme 1973-1974 de travaux de renforcements coordonnés).

Elle est par ailleurs appliquée lors des études de renforcements des RN et CD effectuées par les Directions départementales de l'Équipement.

Les éléments ainsi recueillis sur la « force portante » résiduelle de l'ancienne chaussée permettent donc d'effectuer le dimensionnement du renforcement en tenant compte :

a) des caractéristiques des matériaux à utiliser (grave-laitier, grave-bitume, béton bitumineux),

b) des lois de la « mécanique des chaussées ». Le programme Alize 3 nous permet, en faisant les hypothèses de base suivantes :

- matériaux élastiques et linéaires,

- sol de fondation infini dans les 3 dimensions,

- chaque couche de chaussée

infinie en plan (jusqu'à 6 couches peuvent être introduites),

- charges statiques et circulaires, de calculer les contraintes, déformations et déplacements en tout point.

Les mesures expérimentales que nous sommes maintenant capables de faire (déflexions statiques à l'aide des déflectomètre et déflectographe, déflexion dynamique à l'aide de capteur de déflexion, déformation horizontale à l'aide de jauges de déformation, contrainte verticale à l'aide de capteur de pression) nous ont permis de constater un très bon accord qualitatif et d'asseoir ainsi, assez solidement, la validité du modèle.

Nous l'améliorons à l'heure actuelle :

a) par introduction des forces de volume (gradient de densité, gradient de température...) spécialement indiquées dans le cas des couches rigides ou semi-rigides,

- b) en introduisant des dalles de dimension finie,

c) par des constatations expérimentales (sections et chantiers expérimentaux, suivi des renforcements déjà réalisés...),

d) et enfin, grâce à l'expérience des ingénieurs routiers.

La difficulté du problème, telle qu'elle a été explicitée au début de cet article nous a jusqu'à présent empêché de présenter un « Catalogue de Structures » des renforcements, tel qu'il existe pour les chaussées neuves, mais l'amélioration de nos connaissances pour arriver à cette élaboration est un objectif essentiel du L.C.P.C. (Département des Chaussées) et du S.E.T.R.A. (Division des Chaussées).

R. SAUTEREY

*Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Chef du département Chaussées  
du Laboratoire Central  
des Ponts et Chaussées*

# MISE AU POINT D'UN MATÉRIAU NOUVEAU : LA TERRE ARMÉE

Encore inconnu il y a quelques années, le mot **terre armée** a maintenant acquis droit de cité dans le domaine du génie civil.

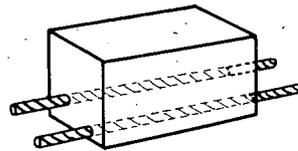
L'essor de cette nouvelle technique a été particulièrement rapide, puisque les premiers ouvrages importants ont été construits en 1968 et

qu'à l'heure actuelle on peut dénombrer environ une centaine de réalisations.

## PRINCIPE DE LA TERRE ARMÉE

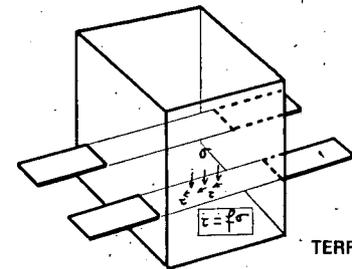
La terre armée est avant tout un **matériau composite** comme le béton armé, bien que ses applications ne soient pas encore aussi étendues et aussi variées. Elle est en effet formée par l'**association de terre et d'armatures**, ces dernières étant le plus souvent des bandes métalliques, placées horizontalement et susceptibles de supporter des efforts de traction importants.

Comme le béton armé encore, elle présente l'avantage de pouvoir améliorer, avec économie, les propriétés mécaniques du matériau de base, la terre, en n'armant que dans les directions où ce dernier est le plus sollicité. C'est le **frottement** entre la terre et les armatures qui intervient essentiellement dans la terre armée : la terre transmet aux armatures par frottement les efforts qui se développent dans la



BETON ARME

Efforts transmis par adhérence.



TERRE ARMÉE

Efforts transmis par frottement.

masse, les armatures se mettent alors en traction et tout se passe comme si la terre possédait, dans les directions où sont placées les armatures, une **cohésion** dont la valeur est directement proportionnelle à la résistance à la traction des armatures.

Le principe de la terre armée repose ainsi sur l'existence d'un frottement entre le sol et les armatures et nécessite que la terre de remblai utilisée ait un bon frottement interne (sables, graves), ce qui écarte a priori l'utilisation de sols comme les argiles saturées.

## LA PEAU

Avec ce matériau cohérent mais souple qu'est la terre armée, il est possible de construire des ouvrages (murs de soutènement, culées de ponts, voûtes, etc.).

Aux extrémités libres de ces ouvrages, il est nécessaire de prévoir une « **peau** » pour empêcher la

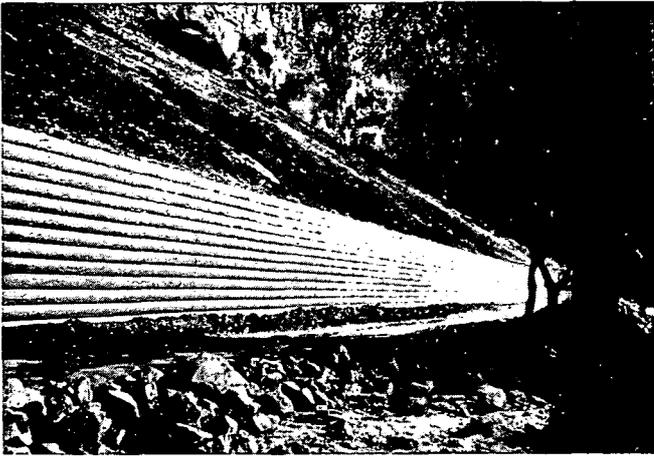
terre de s'écouler entre les armatures. Cette peau, dont le rôle est loin d'être aussi important que celui des armatures, doit présenter plusieurs caractéristiques.

● Tout d'abord, elle doit être **résistante**, car elle supporte les efforts au voisinage immédiat de l'extrémité de l'ouvrage.

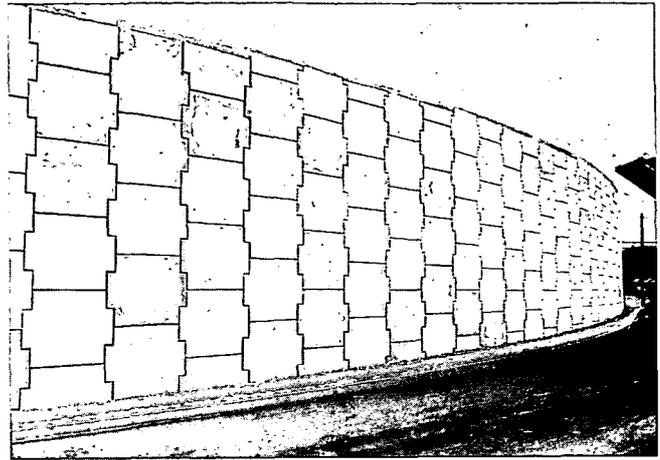
● Elle doit être **flexible** pour conserver à la terre armée sa qualité de souplesse.

● Elle doit ensuite être **esthétique**, car l'aspect du parement d'un ouvrage constitue un élément architectural important.

● Enfin, elle doit être constituée



Autoroute A. 53 — Mur de la Giraude  
(éléments de peau métallique)



Mur de quai à Sète (écailles de béton).



Mur de Montreuil.

par **éléments** pour permettre une construction simple.

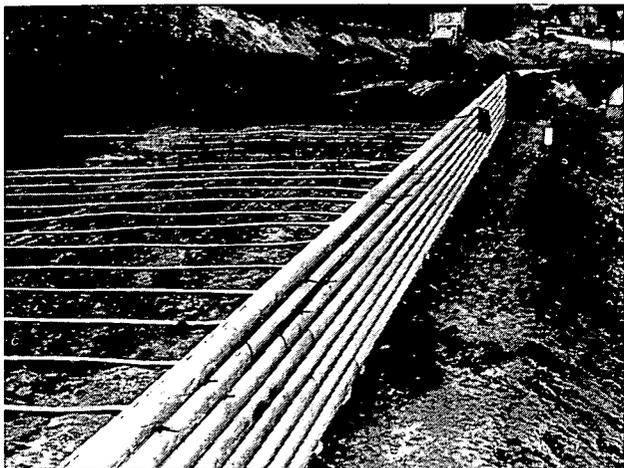
Deux générations de peaux ont été développées, la dernière étant toute récente :

- les peaux en **éléments métalliques**;
- les peaux en **écailles de béton**.

Pour les ouvrages de soutènement à parements verticaux, ces peaux sont ainsi constituées :

un élément métallique a une section semi-elliptique de 25 cm de haut et de plusieurs mètres de long. Il est constitué du même métal que les armatures qui sont fixées aux extrémités inférieure et supérieure de l'élément de peau. La construction d'un ouvrage se fait donc par couches de 25 cm séparant les différents lits horizontaux d'armatures.

C'est ce type de peau qui a été utilisé dès le début de la terre armée. Sa souplesse et surtout sa résistance permettent de construire des ouvrages de très grande hauteur : le record est actuellement détenu par le Pakistan, où pour la construction du barrage de Tarbela a été réalisé un mur en terre armée de 40 m de hauteur.



Mur en terre armée d'Incarville (en construction).



Montage des écailles de béton.

L'écaille de béton est un élément plus élaboré qui marque une évolution technologique importante dans le développement de la terre armée. Ses dimensions sont environ de 1,5 m x 1,5 m avec 18 cm d'épais-

seur. Son poids est de 1 tonne. La construction d'un ouvrage avec ce type de peau se fait par couches de 37 cm entre les lits d'armatures. Des joints, des jeux, des possibilités de mouvements d'une écaille à

l'autre, donnent à cette peau une souplesse importante et permettent notamment la construction d'ouvrages courbes. Elle est, par ailleurs, plus économique que la peau métallique et très appréciée des constructeurs.

## EXEMPLES D'OUVRAGES

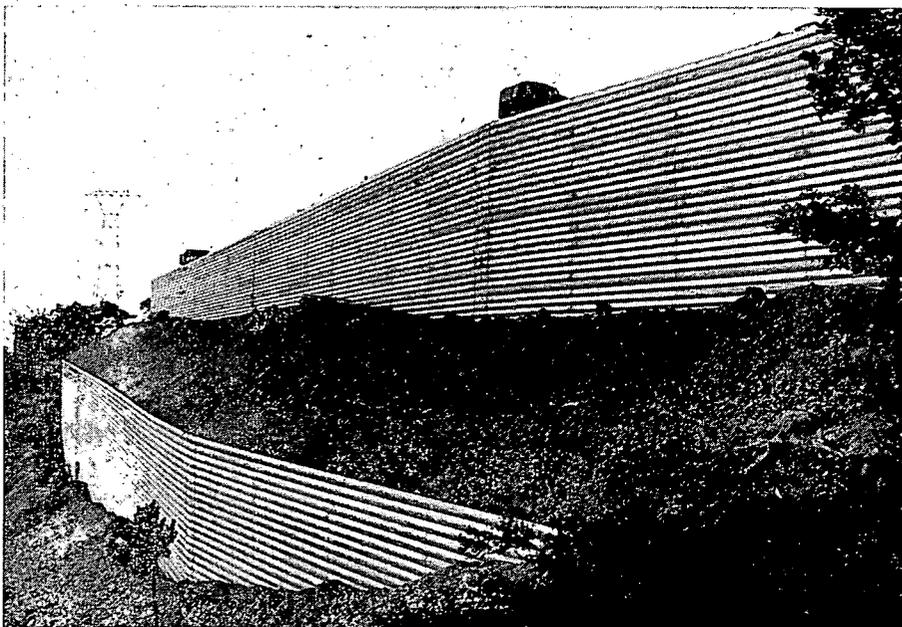
Le matériau terre armée possède des **qualités techniques** importantes.

La première qualité est la **souplesse** qui permet de construire des ouvrages massifs peu sensibles aux

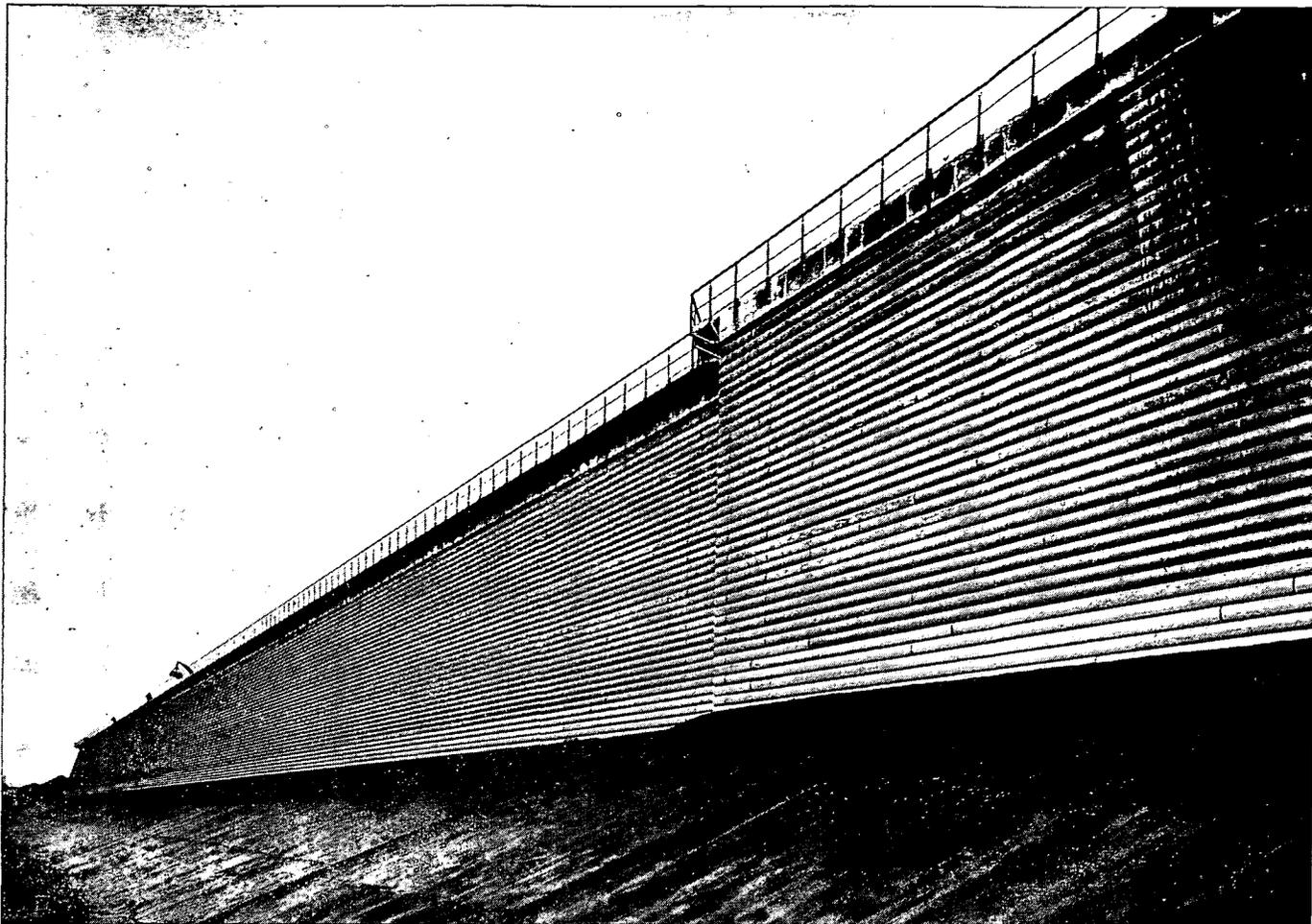
déformations et aux tassements différentiels. Ce matériau ne connaît pas la fissuration, cause de nombreuses difficultés dans l'utilisation des bétons et, en ce sens, il peut être utilisé sur de mauvais sols de fondations.

Sa deuxième qualité est sa **facilité et sa rapidité de mise en œuvre**. Le procédé est industrialisé, les éléments de peau métalliques et armatures sont fabriqués en usine, les écailles de béton sont préfabriquées. La construction d'un mur en terre armée s'apparente à un mécano simpliste et se répète selon les trois étapes suivantes : 1) pose d'un niveau d'éléments de peau; 2) pose d'un lit d'armatures; 3) mise en place d'une couche de terre. Même pour les ouvrages de très grande hauteur, aucun échafaudage n'est nécessaire.

En règle générale et avec un prix courant pour le matériau de remblai, un mur de soutènement en terre armée est plus **économique**



Autoroute A. 53 — Murs de Vigna.

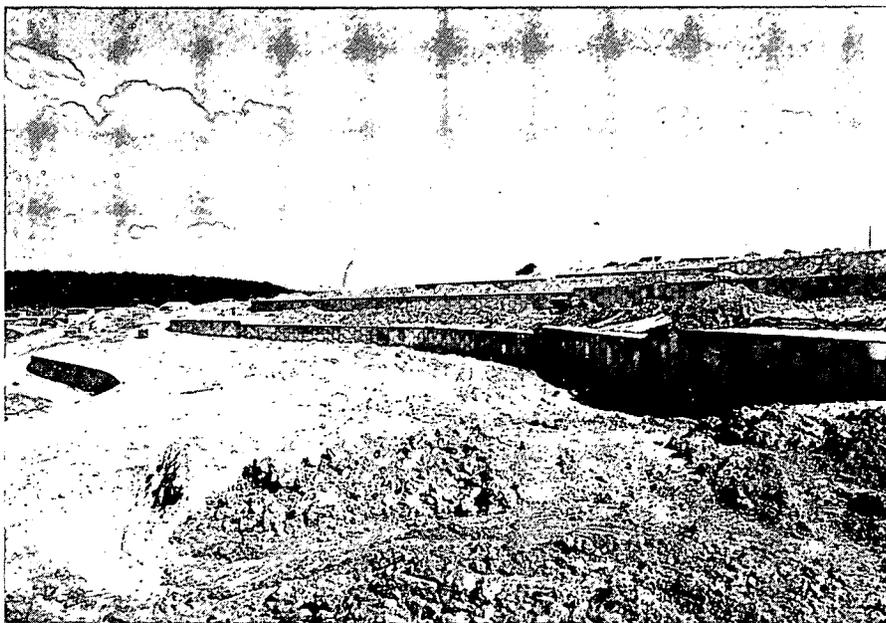


*Mur du parc de stockage minéralier du port de Dunkerque*

qu'un mur en béton armé. L'économie peut devenir très importante si le sol de fondation est médiocre et rend nécessaire pour le mur en béton armé l'exécution de fondations profondes : dans ce cas, le mur en terre armée fondé superficiellement permet l'économie des fondations profondes, ce qui représente fréquemment 50 % par rapport au coût total du projet du mur en béton armé.

Aussi, le procédé de la terre armée permet-il d'apporter des solutions originales et économiques à des problèmes très divers.

Il permet de réaliser des murs, des plates-formes et généralement tous les ouvrages de soutènement de génie civil. C'est actuellement le



*Murs courbes du domaine des Gâtines à Plaisir.*

grand domaine d'application du procédé. La technique des écaillés de béton est très utilisée dans les ouvrages urbains ou elle s'intègre parfaitement aux autres ouvrages en béton.

Plus particulièrement, la terre armée s'est largement développée dans les domaines suivants :

#### — Domaine routier

Murs d'échangeurs — Plates-formes d'autoroutes - Murs de soutènement pour routes de montagnes - Murs de soutènement de remblai - Culées de pont.

#### — Domaine des ouvrages industriels

Murs pour parcs de stockage - Merlons de protection etc.

#### — Murs de quai

L'utilisation d'écaillés de béton est très économique lorsqu'un mur de quai peut être construit à sec, à l'intérieur d'une enceinte ou à marée basse. L'emploi d'écaillés épais de grandes dimensions permet de construire, lors des basses mers, la partie haute de grands murs de quai en terre armée, soumise à des efforts d'accostage. La

partie basse est construite en éléments de peau métalliques par grandes parties préfabriquées.

#### — Domaine de l'environnement

Aménagement de murs de soutènement, de terrains, de bassins, etc. La technique des écaillés de béton permet d'obtenir dans ce domaine des effets architecturaux variés. En quatre mois, ont été construits au domaine des Gâtines, à Plaisir, 2 km de murs courbes qui ont permis d'implanter dans un site en pente 800 maisons individuelles sur terrasses.

## HISTORIQUE ET DÉVELOPPEMENT DE LA TERRE ARMÉE

L'inventeur de la terre armée, Henri Vidal, a présenté pour la première fois son nouveau matériau au cours d'une conférence qu'il prononça le 7 mars 1966. C'est à cette occasion que le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, préoccupé à l'époque par l'édification de remblais autoroutiers de grande hauteur sur des pentes naturelles instables, prit connaissance de cette technique et des possibilités qu'elle pouvait offrir pour la solution de problèmes difficiles. De là est née une collaboration active entre l'équipe de mécaniciens des sols du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et M. Vidal, collaboration qui s'est progressivement étendue aux différents types d'ouvrages susceptibles d'être envisagés avec ce matériau et aux divers problèmes soulevés par son emploi. Après six années écoulées, une telle collaboration entre un service de l'administration et un bureau d'études privé se révèle très fructueuse pour la technique française. Pour en juger, il suffit de voir le nombre et la diversité des ouvrages en terre armée réalisés ou projetés, tant en France qu'à l'étranger.

C'est sur l'autoroute A. 53, qui se développe en arc de cercle

autour de Menton, que furent construits les premiers grands murs en terre armée. La traversée d'une zone d'éboulis instables et en forte pente (20° à 30° sur l'horizontale) posait au moment du projet (1966-1967) des problèmes techniques particulièrement difficiles à résoudre. Le choix était entre une solution d'ouvrage d'art, coûteuse mais apparemment possible avec des fondations spéciales et une solution de terrassements moins onéreuse mais techniquement impossible avec les procédés classiques. Au cours de discussions entre le maître d'œuvre et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, des massifs en terre armée furent envisagés et il s'avéra qu'il s'agissait là de la seule technique possible pour une solution de terrassements. Aucune référence d'ouvrages en terre armée n'existait alors et les méthodes de dimensionnement reposaient sur des hypothèses non vérifiées. Le Laboratoire Central entreprit rapidement les premières recherches sur ce matériau et après les premiers résultats et de nombreuses discussions sur le projet, le maître d'œuvre, M. Tanzi, alors Ingénieur des Ponts et Chaussées, prit la décision de construire dans cette zone l'auto-

route en terre armée. L'autoroute de Menton restera comme le premier ouvrage où l'on ait utilisé la terre armée en grande quantité : sept murs — de 4 à 23 m de haut, de 10 m à 200 m de long — d'un volume total de 60 000 m<sup>3</sup>.

Depuis, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a effectué de nombreuses recherches sur la terre armée, conseillé et suivi la réalisation de beaucoup d'ouvrages. Même si l'on ne dispose pas à l'heure actuelle d'une explication théorique complète sur le mécanisme de travail de la terre armée, on est en mesure de dimensionner avec sécurité et avec une bonne économie tous les types d'ouvrages en terre armée.

Sans doute le Ministère de l'Équipement et du Logement publiera-t-il des directives ou des recommandations sur l'utilisation de la terre armée, comme cela fut le cas pour le béton précontraint. Un tel document, tout en apportant aux maîtres d'œuvres les renseignements nécessaires à une bonne utilisation du procédé, officialisera les résultats obtenus dans cette nouvelle technique.

## RECHERCHES ULTÉRIEURES

Les considérations précédentes sur les avantages de la terre armée ne sauraient faire oublier qu'aucune technique n'est universelle et que tout procédé a ses limites d'utilisation. Ces limites ne sont d'ailleurs pas invariablement fixées. Elles peuvent évoluer en fonction des résultats des recherches, tant sur la technologie que sur la connaissance du matériau. Pour la terre armée, quatre problèmes restent encore à résoudre :

- le problème de l'**adhérence**, c'est-à-dire de la répartition des efforts le long d'une armature en liaison avec le frottement terre-armatures;

- la mise au point de **méthodes de dimensionnement** plus fines cernant de plus près la réalité;

- l'élaboration de critères pour le **choix du matériau de remblai** à utiliser dans la terre armée;

- le problème de la **corrosion** des armatures qui conditionne la durée de vie des ouvrages.

Dans la mesure où la terre armée permet de résoudre avec économie et avec facilité des problèmes techniques jusqu'à présent réputés difficiles, elle trouve tout naturellement sa place parmi les matériaux classiques utilisés dans le domaine du génie civil : terre, sols traités,

bétons, béton armé et béton précontraint, métal.

Les nombreux ouvrages réalisés témoignent de la validité de son utilisation et de l'étendue de ses possibilités. Le développement de ce nouveau procédé à l'étranger, notamment au Canada, au Japon et récemment aux États-Unis, permet un rayonnement de la technique française.

F. SCHLOSSER

*Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Chef du département de  
Mécanique des sols  
du Laboratoire Central  
des Ponts et Chaussées*

# AMÉLIORATION DE L'EMPLOI DES MATÉRIAUX EXISTANTS : EXEMPLE DU BÉTON ARMÉ OU PRÉCONTRAIT

L'étude expérimentale des structures réelles est rendue nécessaire par l'incessante évolution des matériaux employés (aciers améliorés; nouveaux bétons : légers ou de résine; nouveaux produits de synthèse), des formes ou des dimensions des ouvrages (immeubles de grande hauteur; ponts à géométrie complexe), des modes d'exécution (préfabrication; ouvrages composites) ou de la conception de la sécurité et donc des textes réglementaires (méthode des états-limites, calcul à la rupture). Chacune de ces tendances marque un progrès dans l'économie et la sécurité des constructions. Encore faut-il savoir ne pas aller trop loin, et apporter la preuve expérimentale du bien-fondé des raffinements envisagés. Chaque évolution fait en effet apparaître de nouveaux problèmes ou peut amplifier dangereusement des phénomènes restés jusqu'à présent très secondaires.

Examinons, au simple titre d'exemple, quelques-unes des recherches récemment exécutées dans le plus grand laboratoire français de génie civil : le Centre d'Essai des Structures de Saint-Rémy-lès-Chevreuse (1).

Ces exemples ont essentiellement trait aux structures en béton armé ou précontraint, matériaux les plus employés dans la construction actuelle. Notons que les recherches du C.E.S. sont menées de concert avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Notons encore que la plupart

(1) Voir l'article d'Y. Aubert, Directeur général de l'U.T.I., relatif aux « Centres professionnels de recherche du bâtiment et des travaux publics », n° 60.

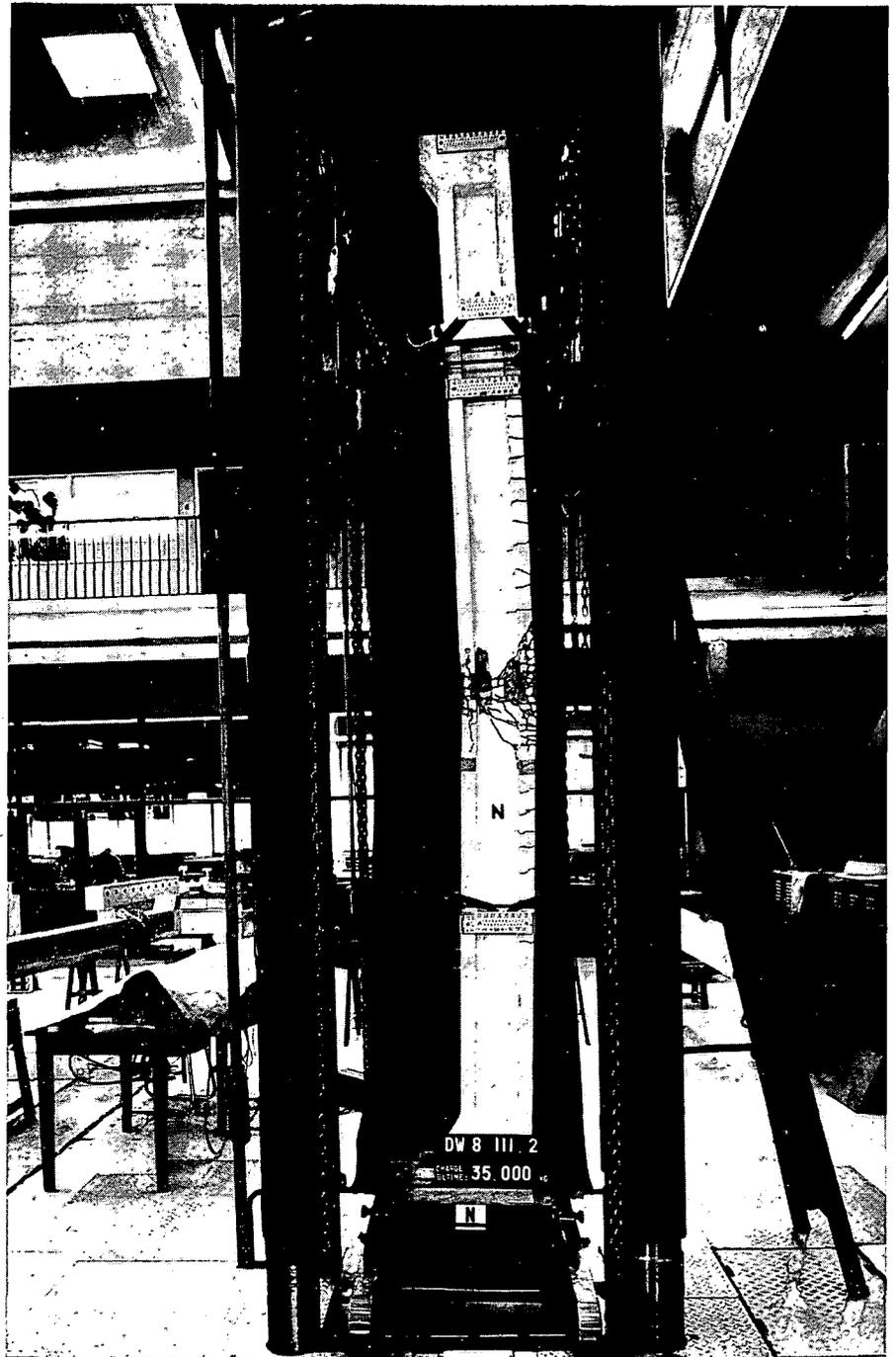


Fig. 1. — Flambement d'un poteau en béton armé de section en forme de H.

des recherches intéressant le domaine des ponts ont fait l'objet, en 1971, d'une action concertée entre le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, d'une part, et l'Union Technique Interfédérale, d'autre part, chacun assurant la

moitié du financement des recherches concernées.

Les buts des recherches expérimentales entreprises sont très divers, depuis l'établissement ou la vérification d'une nouvelle théorie ou

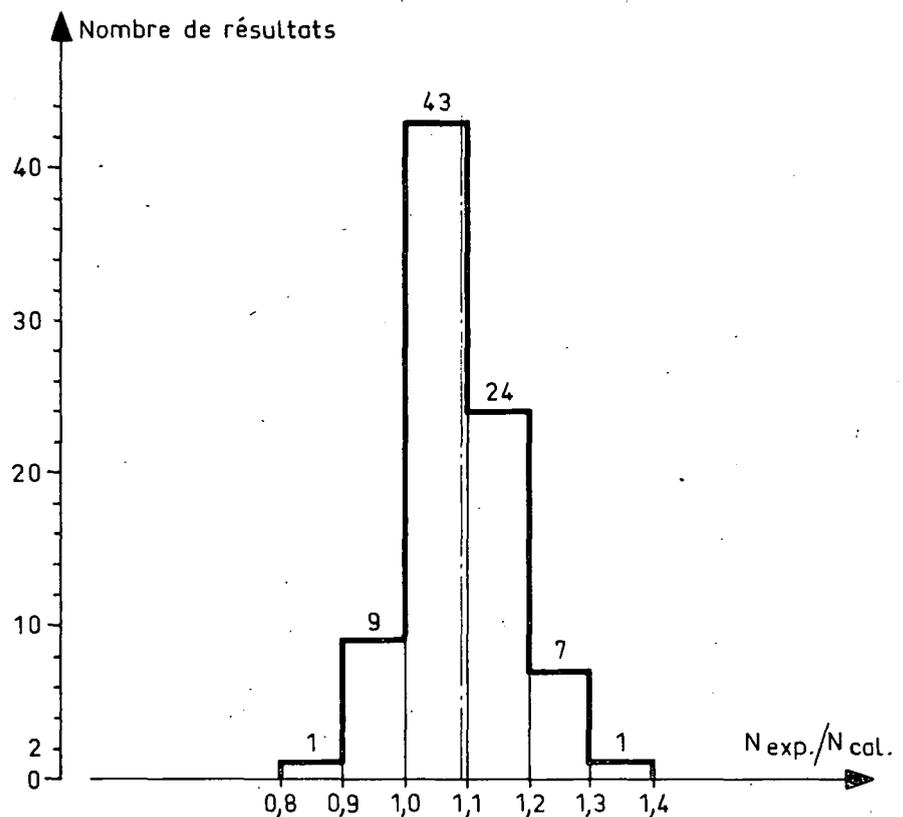
d'une méthode de calcul originale (exemple : torsion (§ 3) ou flambement (§ 2) des pièces en béton), jusqu'à la recherche de lois empiriques lorsque la théorie fait défaut (exemple : joints entre panneaux préfabriqués (§ 4)).

## MISE AU POINT D'UNE NOUVELLE THÉORIE DU FLAMBEMENT DES POTEAUX EN BÉTON ARMÉ

L'ingénieur-constructeur doit toujours avoir présent à l'esprit le danger de rupture prématurée par flambement que connaît toute pièce comprimée dès qu'elle est suffisamment élancée. Les conséquences peuvent en être catastrophiques, car le flambement d'un seul poteau peut souvent entraîner la ruine de toute l'ossature dont il fait partie. Or les théories classiques d'instabilité élastique ne s'appliquent pas aux poteaux en béton dont la rigidité varie sans cesse au cours d'un chargement par suite de leur fissuration. Par ailleurs, le béton est loin d'être le matériau élastique parfait que considèrent ces théories.

L'idée de base d'une théorie originale et générale des pièces comprimées en béton armé a été lancée par Pierre Faessel et son bien-fondé a été prouvé expérimentalement au Centre d'Essai des Structures, par des essais de flambement qui ont porté sur des poteaux en béton armé de sections diverses (carrée, rectangulaire, H, U) et chargés à leurs extrémités avec des excentricités quelconques. La figure 1 montre un poteau de section en H après flambement sous charge appliquée dans son plan de plus grande inertie.

La figure 2 représente l'histogramme des rapports entre les valeurs expérimentales et calculées des efforts de rupture obtenus dans les essais de 85 poteaux de section carrée. La concordance entre l'expérience et la théorie est satisfaisante.



|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Nombre d'essais          | 85    |
| Valeur moyenne           | 1,091 |
| Coefficient de variation | 7,42% |

Fig. 2. — Histogramme des rapports des valeurs de flambement expérimentale et calculée, pour 85 poteaux en béton de section carrée.

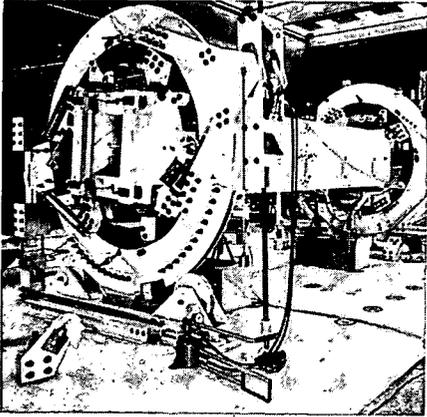


Fig 3. — Dispositif d'essai à la torsion d'un caisson de section carrée de 1 m de côté.

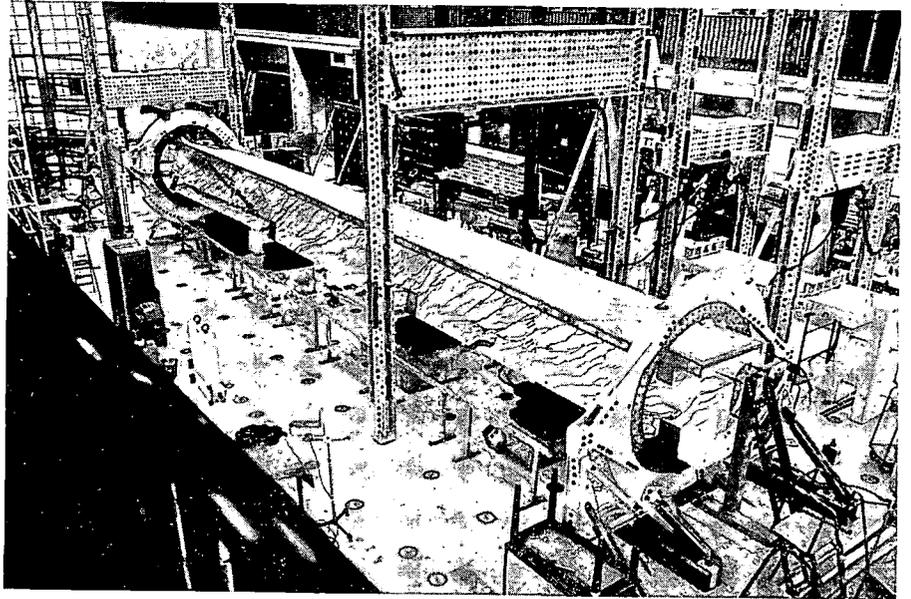


Fig. 4. — Rupture par torsion d'une poutre en béton précontraint de section pleine, en forme de double té.

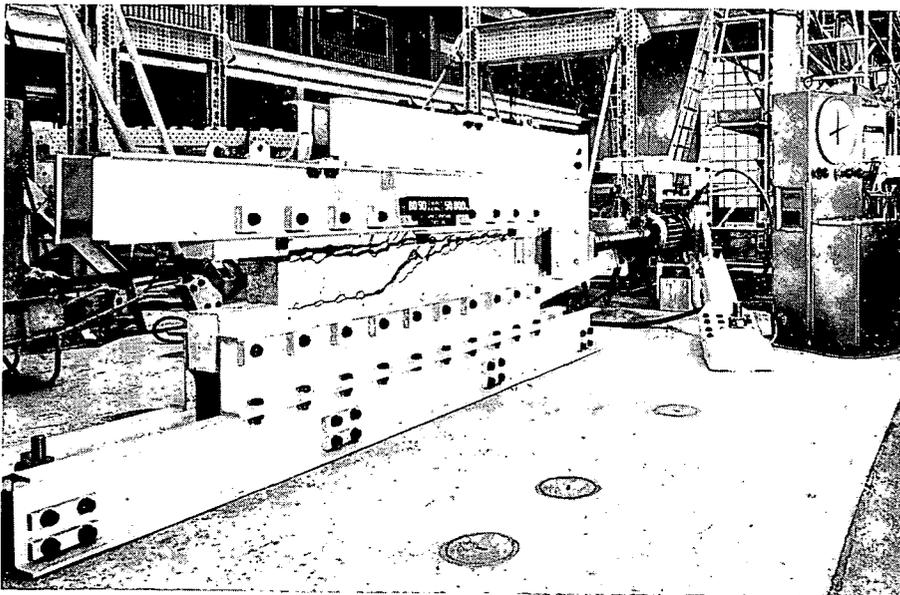


Fig. 5. — Dispositif d'essai d'un joint entre panneaux préfabriqués, sur la plateforme du C.E.S.

Une nouvelle série d'essais sous chargement de longue durée va être entreprise en atmosphère conditionnée de façon à préciser l'influence du fluage du béton sur le risque de flambement.

Parallèlement, l'exploitation de la méthode de calcul a été banalisée par la mise au point d'un pro-

gramme de calcul électronique, qui a notamment servi à l'établissement de « Tables d'états-limités ultimes des poteaux en béton armé » par P. Faessel, J.-R. Robinson et A. Morisset (S.D.T. - Paris 1971), faciles à utiliser par les projeteurs pour l'étude des poteaux les plus couramment rencontrés en pratique.

Cette nouvelle méthode de calcul a déjà été entérinée par le règlement français (modificatif aux règles C.C.B.A. 68 en date du 5 juin 1970). On peut prévoir qu'elle va faire sous peu son entrée dans les Recommandations Internationales C.E.B.-F.I.P.

## ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ OU PRÉCONTRAIT VIS-A-VIS DE LA TORSION

Après l'avoir longtemps négligée, on recourt de plus en plus à la résistance à la torsion des éléments de structures pour en assurer la stabilité et la résistance, qu'il s'agisse des ponts très courbes ou biais des voies urbaines, des noyaux résistants d'immeubles de grande hauteur soumis à un vent non symétrique, ou de tabliers ou de planchers démunis d'entretoises.

Mais le comportement des poutres en béton vis-à-vis de la torsion, en phase fissurée, d'une part, et à rupture, d'autre part, est très mal connu. Le Service d'Étude des Struc-

tures a donc entrepris des essais à la torsion, combinée ou non de flexion circulaire sur des poutres de section pleine ou creuse de forme carrée, circulaire ou en double-té, en béton armé ou précontraint.

Les figures 3 et 4 montrent respectivement un caisson de section carrée de 1 mètre de côté, et une poutre en double-té de 17,5 m de longueur après rupture par torsion pure.

Ces essais ont déjà permis de prouver qu'une pièce pleine en béton soumise à la torsion se comporte comme si elle était creuse, son

noyau intérieur fissuré de façon généralisée constituant un vide mécanique.

Par ailleurs, ils montrent que ces pièces connaissent, avant rupture, une adaptation plastique qui permet à leur résistance d'atteindre sa valeur maximale.

Parallèlement, une théorie originale de prévision des charges de rupture par torsion-flexion a été établie, dont les résultats concordent remarquablement bien avec ceux des essais effectués dans le monde entier (plus d'une centaine au total).

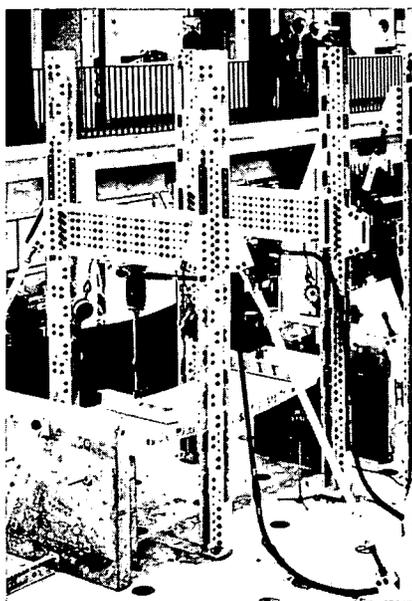


Fig. 6. — Essai d'un plancher en béton composite.

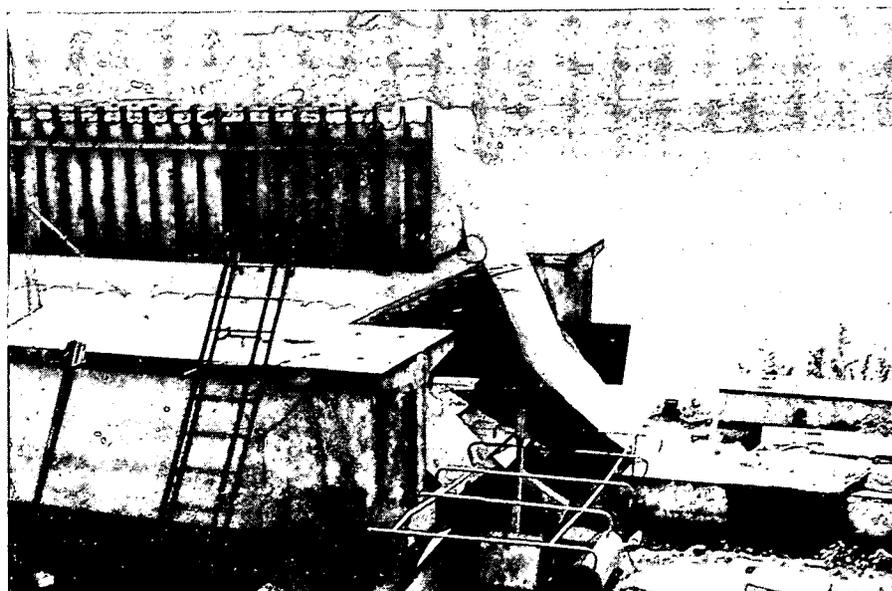


Fig. 7. — Dispositif d'essai d'un tablier de pont sans entretoise

# ETUDE EXPERIMENTALE DES JOINTS ENTRE GRANDS PANNEAUX DE BATIMENTS PREFABRIQUES

L'industrialisation de la construction des bâtiments fait recourir de plus en plus souvent à la préfabrication de grands panneaux porteurs verticaux, de hauteur égale à celle de l'étage. Les procédés mis au point par les entreprises françaises connaissent un grand succès à l'étranger, et plusieurs dizaines d'usines en U.R.S.S., au Japon, etc. exploitent les brevets français. Le principal problème que posent ces constructions concerne la réalisation et la résistance des joints horizontaux et verticaux qui relient ces panneaux, et qui risquent de constituer les parties les plus fragiles des constructions.

Sous l'action du vent ou éventuellement, de séismes, les diverses

consoles verticales, constituées par des panneaux superposés, fléchissent et tendent à glisser les unes sur les autres. Les joints sont donc soumis à des efforts de cisaillement. Leur résistance dépend au plus haut point de leurs formes et de leurs armatures de couture. La détermination de cette résistance ne peut guère être qu'expérimentale.

Aussi a-t-on étudié systématiquement depuis 1965, au Centre d'Essai des Structures les divers cas possibles :

— joints horizontaux ou verticaux entre panneaux coplanaires ou perpendiculaires,

— surfaces des joints : lisses, striées, ondulées ou crantées,

— importance, formes et dispositions des armatures variables,

— possibilité éventuelle de faire jouer aux chaînages de planchers le rôle de verrou de contreventement.

La figure 5 montre un dispositif d'essai de joint sur la plate-forme du C.E.S.

Les résultats obtenus pourront servir de base expérimentale aux Recommandations Internationales en cours d'établissement par le Comité Européen du Béton et le Conseil International du Bâtiment. Ces résultats ont déjà été présentés en France, Belgique, Angleterre, Pologne et Roumanie.

## AUTRES RECHERCHES EN COURS

Parmi les principales autres recherches en cours, citons :

— l'étude, qui ne peut guère être qu'empirique, des assemblages dans les constructions en béton (la figure 6 montre un élément de plancher composite après rupture par flexion) ;

— l'influence de l'absence d'entretoises dans les tabliers de ponts : la figure 7 montre le dispositif de chargement par cuve à eau, pour un tablier à 2 poutres dont la figure 8 donne un exemple de déformation ;

— l'effet du temps sur le comportement des constructions en béton, matériau vivant par excellence, avec l'étude de sa fissuration, de sa déformation par fluage et de la redistribution des efforts que celle-ci provoque dans les ouvrages hyperstatiques construits par phases successives, comme c'est le cas de la majorité des grands ponts modernes ;

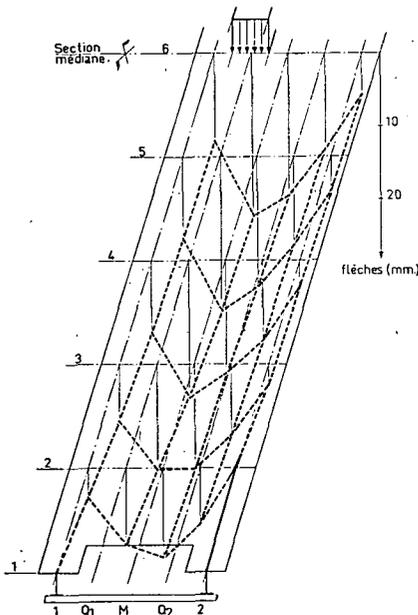


Fig. 8. — Déformée d'une travée à 2 poutres sans entretoise.

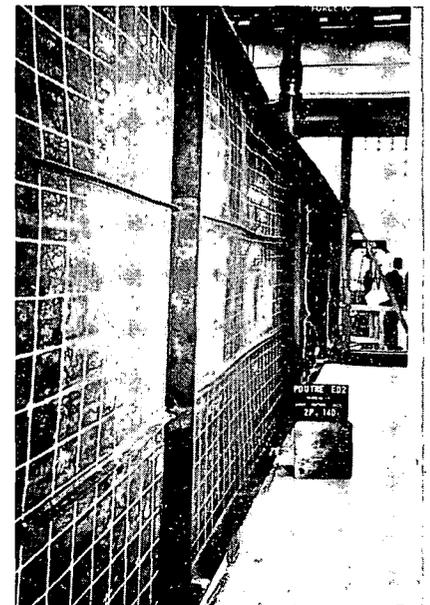


Fig. 9. — Vue de détail de l'âme d'une poutre métallique après sa rupture par voilement.

— l'étude du voilement par cisaillement-compression des âmes des poutres métalliques, menée pour le S.E.T.R.A. avec le C.T.I.C.M., et qui a montré le bien-fondé de la récente réduction des raidisseurs adoptée par le nouveau règlement des ponts métalliques. La figure 9 montre un détail d'une âme voilée de poutre en double-té.

Les quelques exemples qui viennent d'être cités montrent combien est large le domaine de la recherche appliquée pour les structures de génie civil. On trouvera des renseignements plus précis dans les comptes rendus que publient, au mois de juin de chaque année, les « Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics ».

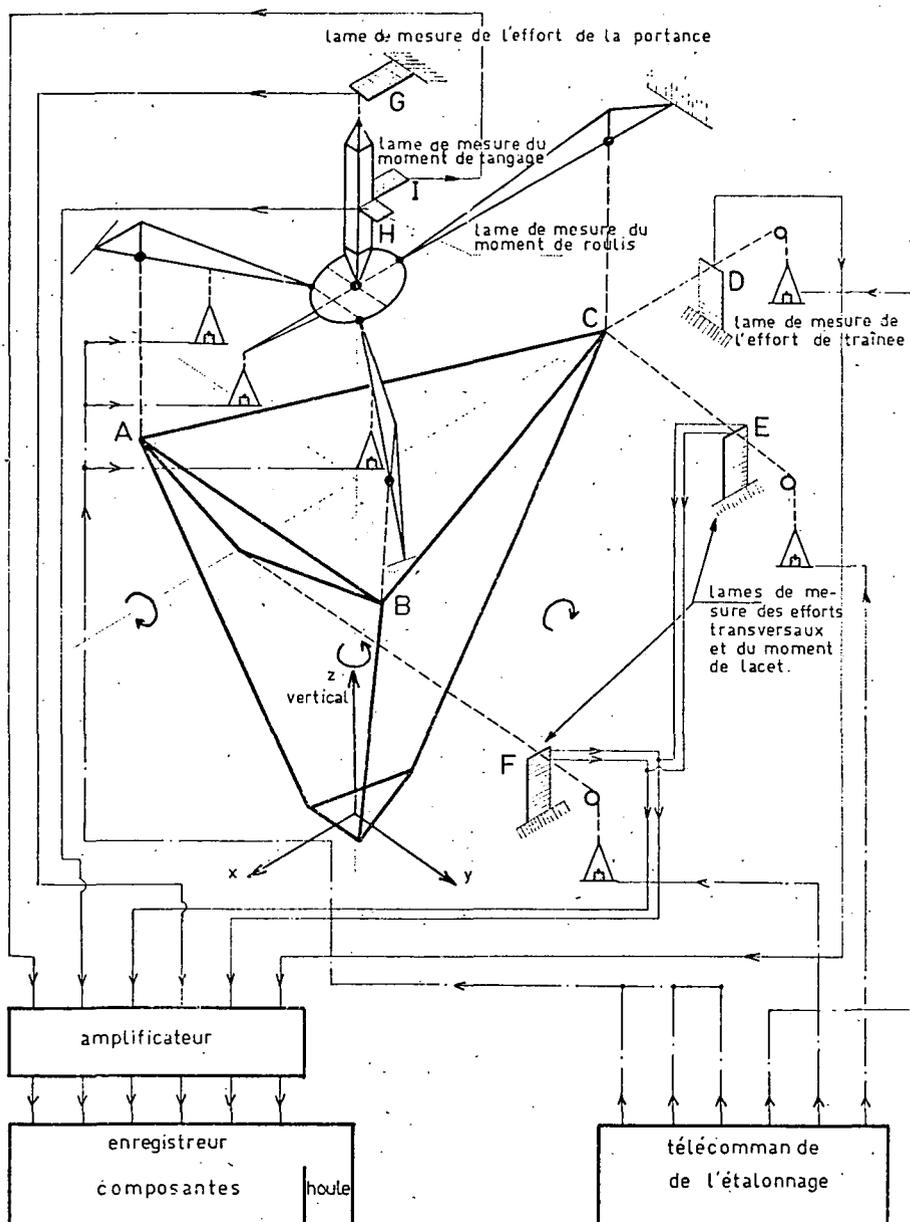
Mais ces quelques exemples montrent quelles précautions il faut prendre pour parvenir à construire de façon économique et sûre, c'est-à-dire à être hardi sans être téméraire.

J. FAUCHART

*Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Chef du Service d'essais  
des structures du C.E.B.T.P.*

# LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DES PORTS MARITIMES ET DES VOIES NAVIGABLES

## I — L'ACCOSTAGE DES GRANDS NAVIRES



Étude — Schéma de principe de la balance hydrodynamique.

Depuis deux à trois ans, la Direction des Ports Maritimes et des Voies Navigables a lancé un certain nombre de recherches générales en vue d'améliorer les connaissances sur l'action des phénomènes naturels les plus importants pour l'étude des ports et de leurs ouvrages : houle et transports solides en particulier.

L'action de la houle sur les corps immergés fait l'objet d'une étude étalée sur plusieurs années, confiée au Laboratoire National d'Hydraulique (1), qui devrait permettre de mettre au point des méthodes sûres et pratiques pour la détermination des efforts exercés par la houle sur des corps de formes quelconques, fixes ou mobiles.

Il s'agit d'une étude théorique (mise au point d'un modèle mathématique) mais avec vérification sur modèle réduit, à l'aide du nouveau grand canal à houle (canal 19), qui vient d'être installé au L.N.H.

Des résultats intéressants et déjà utilisables ont été obtenus : mouvements d'un navire amarré en un point et soumis à l'action de la houle, du vent et des courants (en théorie « linéaire »), effort exercé par la houle sur un cylindre. Les études vont se poursuivre avec des hypothèses plus générales (« délinéarisation » de la position du navire) et avec des corps de formes diverses (cône, sphère...), de façon à obtenir un véritable catalogue qui permettra, par composition, d'évaluer les efforts sur des ouvrages comme les

(1) Voir liste d'adresses

plates-formes en mer, les tourelles de signalisation, les bouées, etc.

Nous traiterons plus longuement d'une étude assez voisine, confiée également au L.N.H., qui a pour but de déterminer les mouvements d'un navire soumis à la houle, **en profondeur faible**, c'est-à-dire lorsque la marge entre le fond du navire et le fond de la mer (ou « pied de pilote ») ne représente que 10 à 20 % du tirant d'eau du bateau.

Cette situation correspond à un navire qui entre dans un port ou qui accoste à un quai.

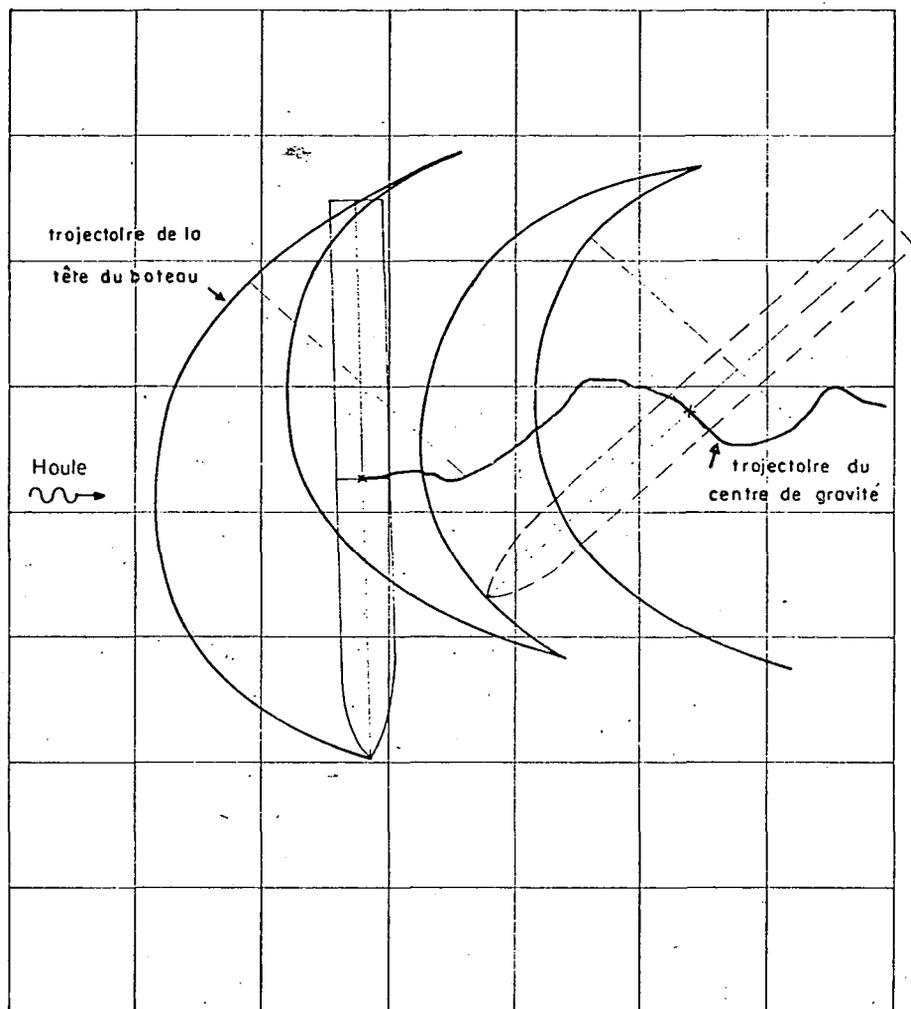
L'accostage est une opération qui devient de plus en plus difficile avec l'augmentation de la taille des navires. Les effets de la houle et du vent sur un navire croissent avec sa taille, sans que des moyens d'action (moteur du navire, remorqueurs) puissent être augmentés dans les mêmes proportions.

Pour les futurs pétroliers de 500 000 t par exemple, on considère que l'accostage devra être possible pour des vents de 90 km/h qui produiront sur le navire des efforts horizontaux de l'ordre de 120 t.

D'autre part, en raison de l'accroissement de la masse, le moindre mouvement du navire correspond à une énergie cinétique considérable et tout choc avec un obstacle insuffisamment déformable, comme un quai, risque d'endommager gravement la coque du navire, qui est relativement fragile, et l'obstacle lui-même.

On doit donc équiper les quais en appontements avec des défenses élastiques permettant un accostage « en douceur », tant que la vitesse du navire n'est pas trop grande (les vitesses normales vers le quai sont de 0,20 à 0,30 m/s pour l'accostage des grands navires).

Les défenses deviennent des ouvrages très importants et très onéreux. Pour la réception d'un grand pétrolier de 500 000 t, on envisage des défenses qui pourront absorber une énergie de 4 000 tm.



Mouvement du bateau sans amarres sous l'action de la houle seule.

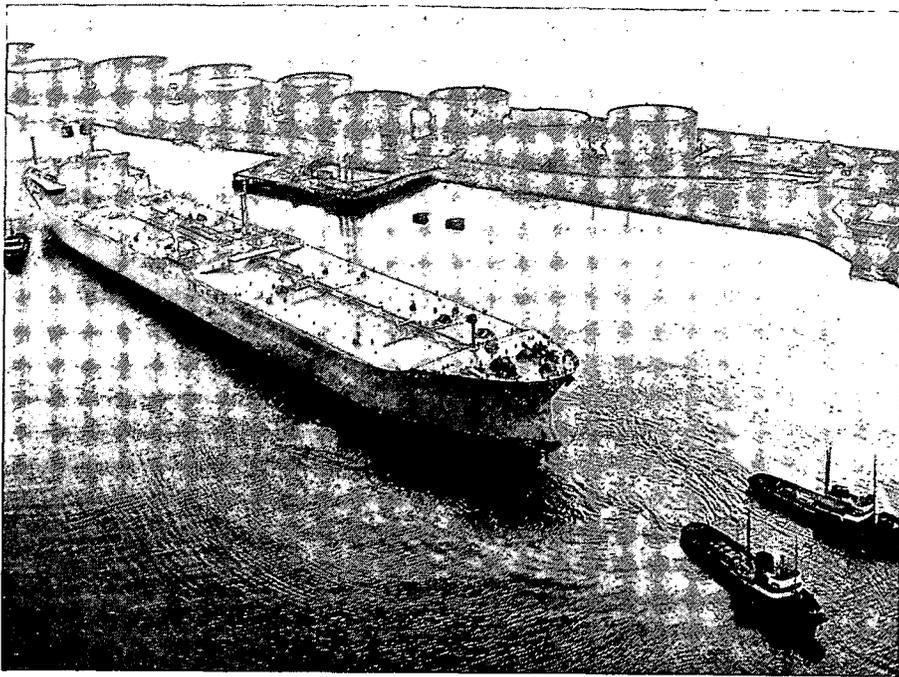
La connaissance du mouvement du navire est évidemment d'une importance capitale pour le dimensionnement de ces défenses.

De nombreuses études expérimentales sur modèles ont été réalisées. Signalons par exemple les études de Leclerc, Giraudet, Nagai, le rapport du « British oil Handling Committee » et l'exposé très complet de Vasco-Costa. Dans nombre de ces expériences les auteurs se sont attachés à mettre en évidence une masse hydrodynamique (aussi appelée masse ajoutée), tout se passant comme si le navire avait une masse (virtuelle) supérieure à sa masse réelle. En réalité, si les mouvements

ne sont pas périodiques, on ne peut définir un tenseur des masses ajoutées que pour un corps totalement immergé dans un fluide infini.

L'hypothèse, nécessaire dans cette étude, d'une faible profondeur, introduit une difficulté supplémentaire importante.

Le L.N.H. a commencé par le cas le plus simple d'un problème bidimensionnel, en considérant seulement une tranche de navire soumise à une translation vers le quai sous l'effet d'une force motrice qui peut être une amarre, un remorqueur, ou simplement le vent.

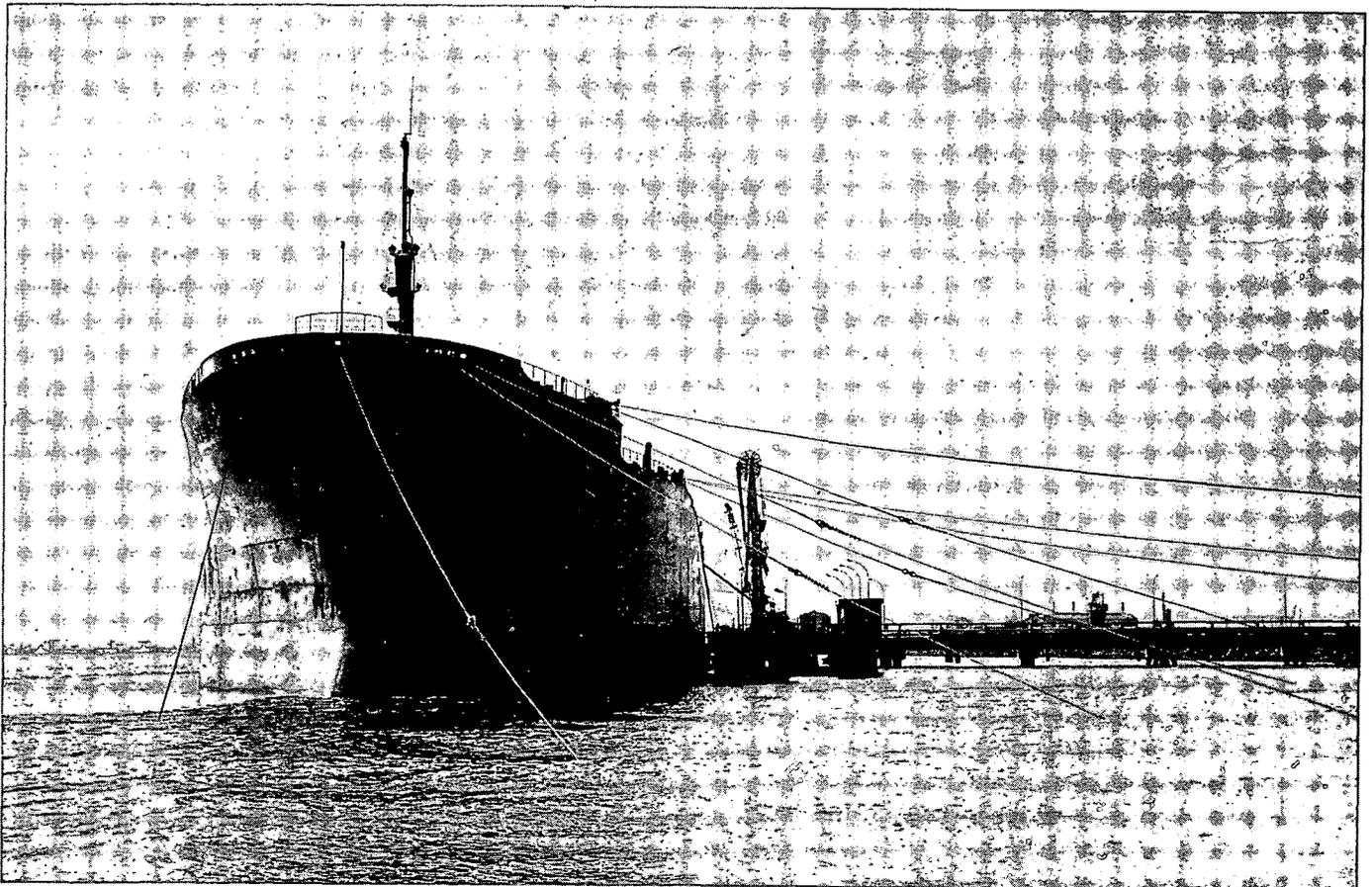


*Manœuvre d'accostage d'un pétrolier de 206 000 tonnes  
au port autonome du Havre.*

Un programme de calcul sur ordinateur a été établi (A.C.C.O.S.T.). La réaction de l'eau a été introduite par les équations générales de l'hydrodynamique et non pas avec l'hypothèse simplificatrice de la masse ajoutée. L'écoulement à surface libre en dehors du bateau est pris en compte, au moyen des relations caractéristiques, avec les pertes de charge (frottement et traînée).

Lorsque le navire atteint la ligne de défenses de l'ouvrage d'accostage, le calcul prend en compte la réaction des défenses, jusqu'au moment où la vitesse s'annule. L'éventuel mouvement de recul du navire n'est pas calculé.

Le programme donne alors la valeur de l'énergie absorbée par la défense, de sa déflexion maximale et de l'effort maximal exercé sur le navire.



*Grand pétrolier accosté au port de Donges (port autonome de Nantes-Saint-Nazaire).*

Il permet de déterminer le coefficient de masse virtuelle dans l'impact, qui est le rapport de l'énergie absorbée par la défense à l'énergie cinétique du navire seul, avec sa vitesse au moment où il touche la défense (ou vitesse d'accostage). Ce coefficient est donc particulièrement important pour le calcul des défenses.

L'exploitation de ce programme a montré qu'il s'accordait bien, en général, avec les résultats expérimentaux.

Des abaques ont été établis et des conclusions ont pu être dégagées, que nous résumons ci-dessous.

— Avant l'impact sur la défense, le coefficient de masse virtuelle est voisin du rapport : profondeur/pied de pilote. On peut ainsi déterminer la vitesse d'accostage, si on connaît la force extérieure qui agit sur le navire.

— Pour une force extérieure donnée, la vitesse d'accostage :

— augmente beaucoup avec le pied de pilote (elle double environ quand le pied de pilote passe de 15 à 90 %);

— ne dépend pratiquement pas du frottement de l'eau sur la coque du navire lorsque le pied de pilote est supérieur à 10 à 15 %. Dans le cas contraire, elle diminue rapidement avec le pied de pilote;

— varie peu que le quai soit plein ou perméable, sauf pour de très faibles pieds de pilote (avec un quai perméable la vitesse d'accostage est plus grande).

— Le coefficient de masse virtuelle correspondant à l'impact :

— augmente beaucoup quand le pied de pilote devient faible (moins de 10 %) et quand la raideur de la défense diminue;

— augmente linéairement quand la vitesse d'accostage décroît, d'autant plus que le pied de pilote est faible.

Le L.N.H. est passé ensuite au problème d'un navire de longueur donnée qui peut avoir un mouvement de lacet (rotation d'axe vertical) en sus de la translation latérale vers le quai.

Le navire est schématisé par une suite de tranches verticales, et on admet que l'écoulement autour de ces tranches est bidimensionnel, c'est-à-dire qu'on néglige la composante longitudinale des vitesses. Cette hypothèse n'est pas valable pour les extrémités, mais l'erreur commise affecte peu le résultat global, car généralement les grands navires sont beaucoup plus longs que larges.

Un programme a été établi (D.I. M.P.), qui effectue le calcul de l'accostage d'un navire le long d'un quai

perméable garni de deux défenses élastiques. Le navire est d'abord poussé vers le quai par une force motrice. On suppose qu'il n'est pas tout à fait parallèle à la ligne des défenses. Deux chocs successifs sont donc calculés, ainsi que le mouvement de lacet provoqué par la détente de la première défense.

Ce programme est en cours d'exploitation pour étudier l'influence des divers paramètres et dresser des abaques.

Parallèlement, le L.N.H. a attaqué le problème général à 3 dimensions, avec un navire représenté par un parallélépipède rectangle.

Le navire peut alors avoir 6 mouvements : translation latérale et longitudinale, pilonnement (déplacement vertical d'ensemble), lacet, tangage et roulis.

On conçoit que cette étude est très difficile, surtout en raison des conditions aux limites à satisfaire et au couplage entre les deux systèmes mécaniques différents : navire et eau.

La mise en équation a été faite, ainsi que des programmes partiels.

Ainsi, on peut espérer avoir bientôt un modèle mathématique qui permettra d'analyser complètement les mouvements d'un navire en faible profondeur.

## II — L'AUTOMATISATION DES ÉCLUSES

Les recherches entreprises depuis quelques années dans le domaine des voies navigables visent deux objectifs principaux. Le premier est l'étude de type d'ouvrages nouveaux pour résoudre au mieux les problèmes exceptionnels qui seront posés par la réalisation des grandes liaisons fluviales envisagées, notamment pour le franchissement des grandes chutes. Cette dernière question a fait l'objet d'un article dans

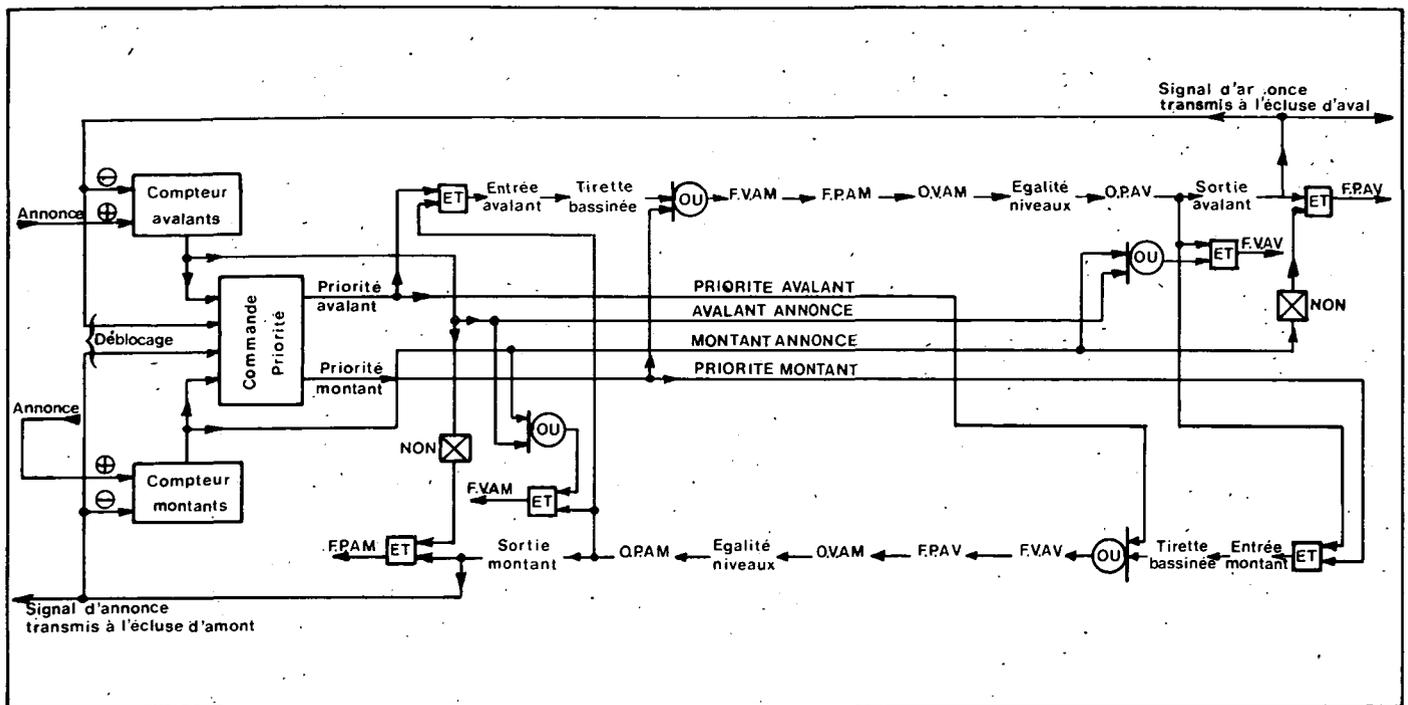
un précédent numéro de ce bulletin. Nous n'y reviendrons donc pas.

Le second objectif est de dégager les dispositions les plus économiques pour la construction des ouvrages courants et d'améliorer la productivité de ces ouvrages.

Dans ce cadre, il y a notamment en cours une étude générale des défenses de berge, confiée à la S.O.G.R.E.A.H., qui devrait per-

mettre de mieux choisir les types de défenses et de mieux dimensionner leurs éléments. Les défenses et les revêtements de berge peuvent représenter une part très importante du coût de construction d'un canal (25 % par exemple pour le Canal du Nord). Des économies très appréciables peuvent donc résulter de cette étude.

D'autre part, cette année va être commencée une étude générale



Projet-type d'écluse automatique — Schéma logique simplifié.

d'alimentation des écluses par les têtes, pour déterminer jusqu'à quelle hauteur de chute peut être prévu ce système d'alimentation, qui est le plus économique.

## L'AUTOMATISATION DES ÉCUSES

On sait que les écluses sont particulièrement nombreuses sur beaucoup de canaux anciens où le trafic est assez réduit. Les éclusiers sont donc mal utilisés et leur salaire est faible. Malgré cela les dépenses totales relatives aux éclusiers représentent un pourcentage très élevé des dépenses d'exploitation de ces canaux.

Il était donc logique de chercher à automatiser complètement des écluses, pour réduire le nombre des éclusiers et donner à ceux qui doivent être maintenus un rôle plus

élevé de surveillance et de contrôle du trafic.

Assurer le passage des bateaux à une écluse sans la présence d'un éclusier est évidemment un problème bien plus difficile que d'automatiser un ascenseur ou un passage à niveau. Il ne peut guère être abordé que pour les écluses qui ne peuvent admettre qu'un seul bateau, comme toutes les écluses du type Freycinet.

A l'heure actuelle plusieurs installations portant sur 4 ou 5 écluses consécutives d'un canal ont été faites ou sont en cours d'exécution (Canal de l'Oise à l'Aisne, Canal du centre, Canal de la Sambre à l'Oise).

Le Service Technique des Ports Maritimes et des Voies Navigables a mis au point, avec l'aide d'un groupe de travail, un projet-type tenant compte des enseignements apportés par les réalisations déjà effectuées. Le principe est le suivant :

— les bateaux sont annoncés à l'écluse par des moyens divers

qui seront examinés plus loin. Dans chaque sens chaque bateau annoncé s'ajoute dans un compteur et il est retranché quand il sort de l'écluse ;

— en fonction de la position de l'écluse et des bateaux inscrits dans les deux compteurs, une logique détermine les manœuvres à effectuer et commande ces manœuvres. Pour des raisons évidentes de sécurité, seul le déclenchement de la bassinée est laissé à l'initiative du marinier, qui doit simplement actionner une tirette placée au bord du sas ;

— lorsqu'il y a une chaîne d'écluses assez rapprochées, des informations essentielles sur la position des écluses ainsi que les alarmes sont transmises par câble à un poste central de surveillance où se tient un agent. Cet agent n'intervient qu'en cas d'incident. Il ne peut pas agir à distance sur les commandes de l'écluse, il est obligé de se déplacer pour remettre l'écluse en service.

## LA LOGIQUE EST RELATIVEMENT FACILE A CONCEVOIR

Le déclenchement d'une bassinée dépend d'un organe appelé « commande de priorité » qui peut avoir 3 positions (attente, priorité à l'avalant, priorité au montant). Lorsqu'une priorité est commandée, cet organe est bloqué et sa position ne peut être modifiée seulement lorsque le bateau sort de l'écluse.

L'attribution de la priorité se fait toujours en faveur du bateau (inscrit au compteur de l'écluse), qui trouvera l'écluse prête à la recevoir.

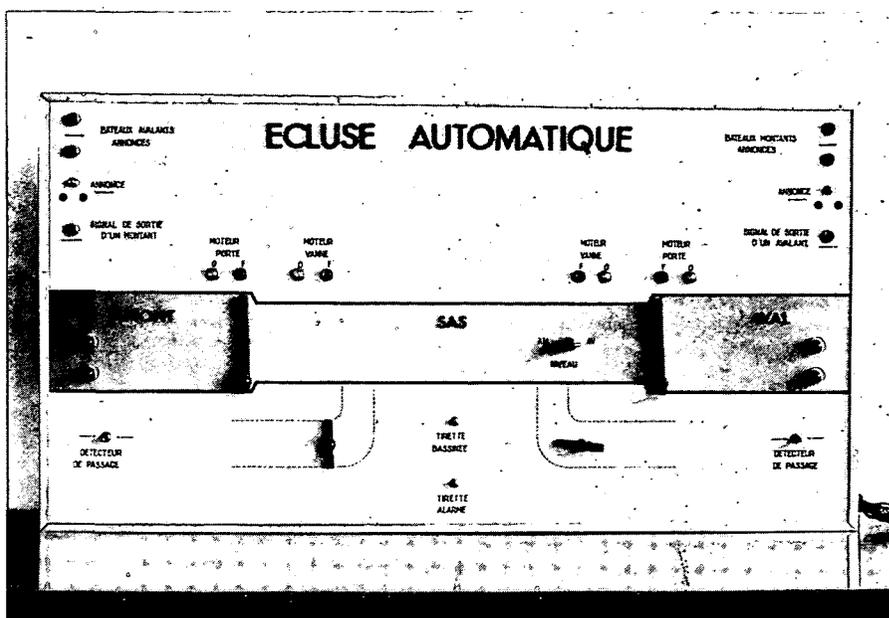
On peut, si c'est nécessaire, avantager un sens de navigation en temporisant les annonces des bateaux qui viennent dans l'autre sens.

Lorsqu'une priorité est établie, pour un avalant par exemple, l'opération est toujours commencée comme si on devait faire préalablement une fausse bassinée.

Si l'écluse est déjà prête (sas au niveau amont), l'ordre de fausse bassinée correspond à un simple contrôle de la position des portes, vannes et niveau du sas. Si le sas de l'écluse est au niveau aval, la fausse bassinée est réellement déclenchée. Dans les deux cas, la fin de cette première phase est l'ouverture de la porte amont.

Lorsque cette porte est ouverte le feu d'entrée de l'écluse à l'amont passe au vert.

Lorsque le bateau avalant pénètre dans le sas, il actionne un « détecteur de sas » situé à l'entrée qui a pour but de contrôler l'entrée du bateau et de mettre en tension la tirette de bassinée avec une temporisation de 20 s environ après que le bateau ait libéré le détecteur de sas. Le bateau étant entré et amarré dans le sas, le marinier doit actionner la « tirette de bassinée » qui déclenche la suite des manœuvres (fermeture de la porte amont, ouverture des vannes aval). Lorsque le sas atteint le niveau aval, un détecteur d'égalité des niveaux déclenche l'ouverture de la porte aval.



Maquette d'écluse automatique réalisée au Service Technique des Ports Maritimes et des Voies Navigables.

Lorsque la porte aval est ouverte, s'il y a un bateau montant ou avalant annoncé, la fermeture des vannes aval est déclenchée, ceci pour gagner du temps, cette manœuvre étant nécessaire par la suite dans ce cas.

Le bateau en sortant de l'écluse actionne un autre « détecteur de sas ». Lorsque le bateau a libéré ce détecteur après une temporisation de 20 à 30 s, le signal de sortie de l'écluse est émis. Ce signal a plusieurs effets :

- il débloque la commande de priorité, comme nous l'avons vu ci-dessus ;

- s'il n'y a pas de bateau montant annoncé, il provoque la fermeture de la porte aval.

A partir de cette position, si un autre bateau est annoncé, un autre cycle reprend de la même façon.

On voit que s'il n'y a aucun bateau annoncé, l'écluse reste en position d'attente avec la porte aval fermée et les vannes aval ouvertes. Ceci a été prévu pour des raisons de sécurité, afin qu'un bateau non

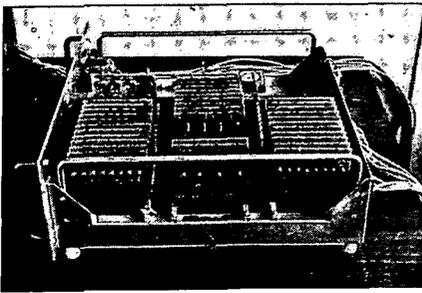
annoncé ne puisse pas pénétrer dans l'écluse.

D'autre part, il est prévu dans le dispositif logique un certain nombre de cas où l'alarme doit être déclenchée, en dehors de l'action du signal d'alarme par le marinier (tirette placée à côté de la tirette de bassinée).

Dans ces cas un signal d'alerte retentit au poste de commande et l'alimentation du bloc de commande de l'écluse est interrompue. Le fonctionnement de l'écluse ne peut reprendre qu'après intervention manuelle d'un agent.

Dans le cas où le processus logique est interrompu pour une raison quelconque (bateau annoncé n'entrant pas dans le sas, marinier n'actionnant pas la tirette de bassinée), il n'y a pas d'alarme, mais le fonctionnement de l'écluse est arrêté. L'agent régulateur placé au poste central doit s'apercevoir de cet arrêt et intervenir.

Dans la plupart des réalisations, les circuits logiques sont constitués



*Maquette d'écluse automatique  
réalisée au Service Technique  
des Ports Maritimes  
et des Voies Navigables.*

*Détail du bloc de commande.*

par des relais statiques (à semi-conducteurs). Des circuits intégrés ont même été proposés.

**Les détecteurs d'égalité des niveaux** qui ont été utilisés jusqu'à présent sont tous basés pour des raisons de simplicité, sur le léger entrebaillement de la porte qui se produit lorsque l'égalité des niveaux est réalisée entre le sas et un bief. Il suffit donc d'une simple fin de course.

Ce type de détecteur de niveau présente toutefois un inconvénient pour la logique : lorsque l'égalité des niveaux est réalisée, les ondes dans le bief peuvent provoquer la fermeture des portes pendant quelques secondes. On n'a plus alors aucun élément pour connaître la situation du sas. C'est pour cette raison que la commande d'un cycle commence systématiquement par la fausse bassinée.

Ce sont les détecteurs de passage des bateaux qui posent les problèmes les plus difficiles.

Pour les détecteurs d'entrée et de sortie du sas, la largeur à contrôler est la largeur de l'écluse (5,20 m à 6,00 m).

Plusieurs procédés ont été utilisés (barrages lumineux avec cellules photo-électriques, barrage à infra-rouge, barrage mécanique sous la forme d'une perche de 1,50 m de

longueur environ, qui est repoussée par le bateau.

Ces systèmes ont donné des résultats satisfaisants, bien qu'ils aient tous quelques inconvénients mineurs, (lampes grillées, bris des perches). Les barrages mécaniques paraissent les plus sûrs, ils peuvent être améliorés en utilisant des perches en fibre de verre, plus résistantes et plus souples.

La détection des bateaux en bief, nécessaire pour l'annonce des bateaux, constitue le problème le plus difficile. Il faut qu'un bateau puisse être annoncé lorsqu'il arrive à 800 et 1 000 m de l'écluse. Ainsi, si c'est nécessaire, la fausse bassinée pourra être terminée avant que le bateau ne soit arrivé à l'écluse, et le bateau ne perdra pas de temps.

Pour l'automatisation d'une suite d'écluses qui sont espacées de moins de 1 000 à 1 500 m, le problème de la détection des bateaux peut être élué, car on peut utiliser pour l'annonce le signal de sortie du bateau de l'écluse précédente. Il suffit de disposer un câble le long du canal. Aux deux extrémités de la chaîne d'écluse l'annonce doit être faite manuellement par des agents.

Lorsqu'on doit automatiser une écluse isolée, c'est-à-dire une écluse distante de plus de 1.500 à 2 000 m des écluses voisines, il faut pouvoir détecter l'arrivée du bateau au point où doit se faire l'annonce.

Il est difficile de trouver une solution sûre et économique à ce problème. En effet, la position du bateau n'est pas bien déterminée (le canal peut avoir 20 à 30 m de largeur) et il peut y avoir croisement ou dépassement de bateaux au point où doit se faire l'annonce.

Des procédés très divers ont été envisagés ou essayés. Le barrage (lumineux, à infra-rouge ou à hyper-fréquence) ne donne pas le sens de passage. Il faut trois ou quatre barrages avec une logique associée pour détecter un bateau avec son sens dans tous les cas.

Le radar à effet Doppler, analogue à celui utilisé pour les automobiles, paraît apporter une bonne solution à ce problème, car il peut détecter le sens de marche du bateau, mais les réglages sont difficiles : réglage du champ pour ne pas détecter un véhicule sur les chemins de service du canal, réglage de la sensibilité pour ne pas détecter des oiseaux et même les petites vagues! tout en détectant un bateau dont la vitesse peut être très faible. Les essais entrepris n'ont pas permis jusqu'à présent d'obtenir un fonctionnement avec moins de 1 % d'erreur par rapport au nombre de bateaux passés.

Le barrage mécanique, sous la forme de deux perches en travers du canal paraît trop fragile.

D'autre part des détecteurs basés sur différents autres principes (boucle d'induction, variation du champ magnétique) ont été envisagés, mais n'ont pas fait l'objet d'essai. Comme pour les barrages lumineux, il faudrait plusieurs détecteurs et une logique pour déterminer le sens.

On peut donc dire qu'on n'a pas encore pu mettre au point un système entièrement satisfaisant pour la détection des bateaux en bief.

Aussi des essais vont être entrepris dans une autre voie : chaque bateau est muni d'un petit émetteur d'onde hertzienne à très faible portée et un récepteur est placé au bord du canal, au point où l'on doit effectuer l'annonce. Le marinier a simplement la consigne d'appuyer sur un bouton de l'émetteur pendant quelques secondes lorsqu'il est à proximité du récepteur, celui-ci étant à signaler par un panneau. Un émetteur est remis à chaque bateau lorsqu'il entre dans une section de canal où il y a des écluses automatiques et lui est repris à la sortie. On choisit deux fréquences ou deux modulations différentes, l'une pour les bateaux montants, l'autre pour les avalants. Ainsi le problème de la détermination du sens de marche des bateaux est parfaitement résolu.

En prévoyant sur chaque émetteur ou commutateur pour changer la fréquence ou le canal de modulation, on peut à chaque extrémité de la section du canal donner à un bateau entrant dans cette section l'émetteur qui vient d'être remis par un bateau en sortant. Le nombre d'émetteurs nécessaires se trouve donc assez réduit.

Nous pensons que ce dernier procédé doit apporter une solution satisfaisante au problème de l'annonce des bateaux dans le cas d'une écluse isolée. C'est d'ailleurs très probablement le seul type de détection qui puisse convenir à tous les bateaux, et en particulier aux bateaux de plaisance qui sont de plus en plus nombreux sur certains canaux et qui, en raison de leurs dimensions, risqueraient d'échapper à d'autres types de détecteur.

Il faut remarquer qu'une erreur de détection, soit par défaut de

détection d'un bateau, soit par détection d'un « bateau fantôme », ne peut pas provoquer d'accident, mais seulement l'immobilisation de l'écluse.

**Une variante appelée « écluse semi-automatique »**, a été étudiée pour les canaux à très faible trafic où l'installation précédente serait peu rentable.

Tous les détecteurs de passage de bateaux ont été supprimés, ainsi que les compteurs, et la logique va être simplifiée. Il s'agit plutôt d'une écluse qui sera commandée par les usagers.

Une borne placée sur le terre-plein de l'écluse permettra au marinier d'établir un contact (à l'aide d'une clé qui lui sera remise à l'entrée de la section intéressée du canal), qui sera l'équivalent de l'annonce du bateau et qui déclenchera la commande de priorité. Le déclenchement de la bassinée s'ef-

fectuera comme ci-dessus à l'aide d'une tirette placée dans le sas.

Il est évidemment prévu des enclenchements de sécurité pour éviter des fausses manœuvres et des temporisations à la fermeture des portes pour éviter des accidents, ainsi que des feux pour autoriser l'entrée dans l'écluse, et la possibilité d'arrêter une opération en cours en agissant sur une tirette d'alarme.

Cette solution simplifiée présente l'inconvénient de faire perdre un peu de temps aux bateaux, mais elle doit être intéressante pour les canaux à faible trafic, en particulier les canaux qui seront surtout empruntés par les bateaux de plaisance.

J. ESTIENNE.

*Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées  
Chef du Service central hydrologique*

R. TENAUD

*Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées  
Chef du Service technique central  
des Ports et Voies navigables*

# LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE AU SERVICE DES PHARES ET BALISES

L'effort de recherche du Service des Phares et Balises est motivé :

— d'une part, par l'extrême difficulté des mécanismes de la perception des signaux de la signalisation maritime,

— d'autre part, par la nécessité de disposer de résultats de plus en

plus précis dans le domaine de la mesure des paramètres de ce que l'on peut appeler l'ambiance marine.

C'est principalement sur le premier de ces deux thèmes qu'est aujourd'hui axée l'activité de la Section de l'Équipement et du Logement du Centre National d'Études

des Télécommunications (C.N.E.T.), (1) tandis que le Service Technique des Phares et Balises est plus spécialement chargé du premier.

Dans un cas comme dans l'autre, le développement technologique aide la recherche mais il donne aussi lui-même des thèmes de recherches nouvelles.

## ACTIVITÉS DE RECHERCHE DE LA SECTION PARTICULIÈRE DE L'ÉQUIPEMENT DU C.N.E.T.

Si les travaux des grands prédécesseurs (E. Allard et A. Blondel) ont permis, depuis plus de cinquante ans, de dégager des règles encore valables aujourd'hui sur la perception des signaux optiques la nuit, et par temps clair, la perception de jour des feux et des amers est, en revanche, restée très mal étudiée jusqu'à une époque toute récente.

Les recherches sur la perception des signaux optiques ont ainsi des objectifs de nature différentes.

Quant à la perception des signaux optiques de nuit, il s'agit essentiellement de mettre au point et de réaliser des mesures systématiques des diagrammes de rayonnement des projecteurs et d'étudier les possibilités des sources de lumière modernes.

Quant à la perception des signaux optiques de jour, il s'agit surtout d'explorer un domaine nouveau, de se faire une idée de l'importance relative des très nombreux paramètres qui interviennent dans les phénomènes.

Enfin, aussi bien de jour que de nuit, l'influence sur la perception

des sources lumineuses des phénomènes atmosphériques tels que la brume constitue un thème très vaste de recherches à mener en collaboration avec la Météorologie Nationale.

Les principaux résultats acquis ces derniers temps sont les suivants :

— on a pu mettre en service et exploiter de façon systématique à Bonneuil-sur-Marne, une base d'essais des projecteurs au moyen de laquelle peuvent être tracés automatiquement, les diagrammes de rayonnement des projecteurs. Les photographies ci-contre représentent respectivement le local émission et le local réception de la base d'essai. Le local réception et le local émission de la base d'essai sont séparés de 250 m. On dispose ainsi d'un instrument de travail dont il n'existe, à notre connaissance pas d'équivalent dans aucun service de signalisation maritime.

— On a étudié, d'autre part, la possibilité d'élargir la gamme des couleurs des feux de signalisation maritime traditionnellement limitée aux trois couleurs, blanc, rouge, vert et introduire progressivement en

France des feux violets. Les performances des sources lumineuses dont le spectre contient des radiations violettes ont été considérablement augmentées ces temps derniers. Des portées de trois milles sont maintenant atteintes au moyen de feux violets, ce qui permet, à présent, d'envisager le développement de cette couleur.

— Dans un ordre d'idées analogues, les efforts portent actuellement sur le développement de l'emploi en signalisation maritime des sources monochromatiques vertes et rouges (lampes au thallium) au moyen desquelles les portées de nuit des feux de couleur vont pouvoir être visiblement augmentées.

— Dans le domaine de la vision de jour, trois résultats méritent d'être cités :

— les études des conditions de visibilité des feux de jour ont permis de réaliser au Havre en 1971 un alignement visible de jour, grâce auquel les grands navires peuvent suivre le chenal sur la totalité de sa longueur (soit 14 km) pendant 80 % du temps ;

(1) Voir liste d'adresses.