CES MODÈLES RÉDUITS: DES BANCS D'ESSAIS POUR MAITRISER LA NATURE

Pour construire en toute sûreté et en toute sécurité, pour savoir exactement quelles seront les réactions de la nature à ses entreprises, l'homme ne peut rien faire. Sauf construire des modèles réduits. On ne peut jouer avec la nature. Alors on « joue » avec des maquettes. On attend. On observe. Avec modestie et avec humilité. C'est ce que fait cet ingénieur de la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques (photo ci-contre), qui dispose de 60.000 m² de laboratoires de mécanique des fluides. La technique du modèle réduit, aujourd'hui utilisée dans le monde entier, est purement française. Elle naquit à Grenoble en 1907.

Au large du Havre, un pétrolier géant: 500 000 tonnes, est en train de décharger son « or noir », face au « terminal » placé en pleine mer pour son accueil, dans la houle et sous le vent.

Quelques mètres plus loin, c'est l'estuaire de la Seine, avec sa marée, ses courants, ses bas-fonds et ses bancs de sable, qui empêchent les navires de plus de 20 000 tonnes d'accéder au port de Rouen.

Quelques mètres encore, et l'on passe en Iran. Entre la mer Caspienne et la chaîne de l'Elbrouz dans la plaine du Guilan, on est en train d'aménager 300 000 ha de rizières. Principaux ouvrages : trois barrages, ceux de Menjil, de Tarik et de Sangar ; le tunnel de Foumen, creusé dans l'Elbrouz pour le transport des eaux ; un canal de 52 km de long ; un réseau routier de 140 km.

En parcourant les 60 000 m² de laboratoires de mécanique des fluides de la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques — la SOGREAH — à Grenoble, on passe ainsi, d'un modèle réduit à l'autre, par les « quatre coins » du monde.

Car ces modèles réduits reproduisent très exactement, et jusque dans leurs moindres détails, la nature et l'action que l'homme entend exercer sur elle, pour la maîtriser ou pour la plier à ses fins.

Deux exemples : maîtriser la nature, c'est l'étude de la protection de Séville contre les crues du Guadalquivir ; la plier aux fins humaines, c'est la réalisation sur maquettes des barrages qui, en Corée, permettront à la ville de Séoul de mobiliser toutes ses ressources

Évacuateurs de crues du barrage de Serre-Ponçon. *A gauche :* essais sur maquette. *A droite :* l'évacuateur de crues tel qu'il fonctionne actuellement, dans la nature. La dissipation réalisée est de type « aérien ». Il s'agit d'un évacuateur en galerie souterraine avec deux passes en amont de 2,5 m de large par 15 m de haut.
Le volume de la retenue du barrage est de 1,2 milliard de mètres-cubes et le débit maximum qui peut être évacué de 2 000 m³/sec. A débit maximum, la vitesse du jet à la sortie de l'ouvrage atteint 30 m/sec., sa hauteur 75 m et sa longueur 100 m.

naturelles et d'accélérer son développement économique. Les modèles réduits, et les modèles réduits seulement, permettent en effet de prévoir avec certitude les réactions de la nature aux entreprises humaines : aux aménagements hydroélectriques et fluviaux, aux travaux maritimes, côtiers et portuaires, à la navigation maritime et fluviale, au génie naval, aux aménagements agricoles et urbains, aux installations touristiques, aux implantations industrielles...

Pour savoir véritablement ce qui se passe et ce qui se passera lorsque l'on construira un port, un barrage, en tel ou tel point du globe, pour agir en toute sécurité, l'homme ne peut rien faire — sauf construire ces modèles réduits. Puis attendre. Observer. Avec modestie. Avec humilité. Simplement voir et enregistrer. Constater les causes et les effets. Dresser le bilan des interactions des unes sur les autres. Et, peu à peu, modifier, parfaire, ou transformer du tout au tout ses plans et ses projets, en fonction de ces observations, jusqu'à ce que cela « colle » parfaitement.

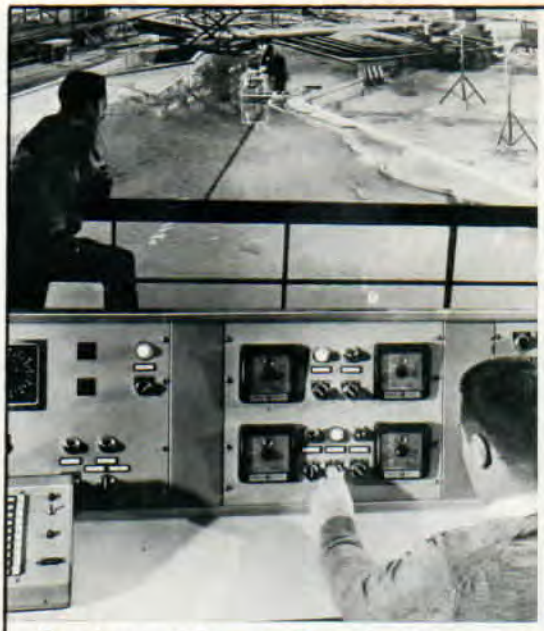
L'ampleur des études est telle que la limite d'utilisation des modèles réduits a été atteinte et qu'on a maintenant recours aux ordinateurs. Des modèles mathématiques permettent de traiter entièrement des études d'ensemble, comprenant parfois des études économiques, sur ordinateur.

Mais le modèle réduit garde son intérêt car certaines données, relatives, notamment, aux problèmes d'érosion, ne peuvent pas être mises en équations.

La conjugaison du modèle réduit et de l'ordinateur permet, par sélection préalable sur modèle mathématique, de ne traiter sur le modèle réduit qu'un nombre limité de solutions. En particulier pour des problèmes locaux, le modèle réduit est souvent construit et utilisé d'après les données du modèle mathématique.

Le modèle réduit constitue la solution la plus simple et le plus rapide. Mais surtout la plus sûre. On ne joue pas avec la nature. Si le barrage ne tient pas, le coût financier, économique et humain est trop lourd. C'est pourquoi, on « joue », d'abord avec les modèles réduits.

Ainsi, pour le modèle réduit de l'estuaire de la Seine, réalisé et actuellement étudié à Grenoble par la SOGREAH. L'objectif : déterminer, sur la demande du port de Rouen, l'emplacement des ouvrages nécessaires pour



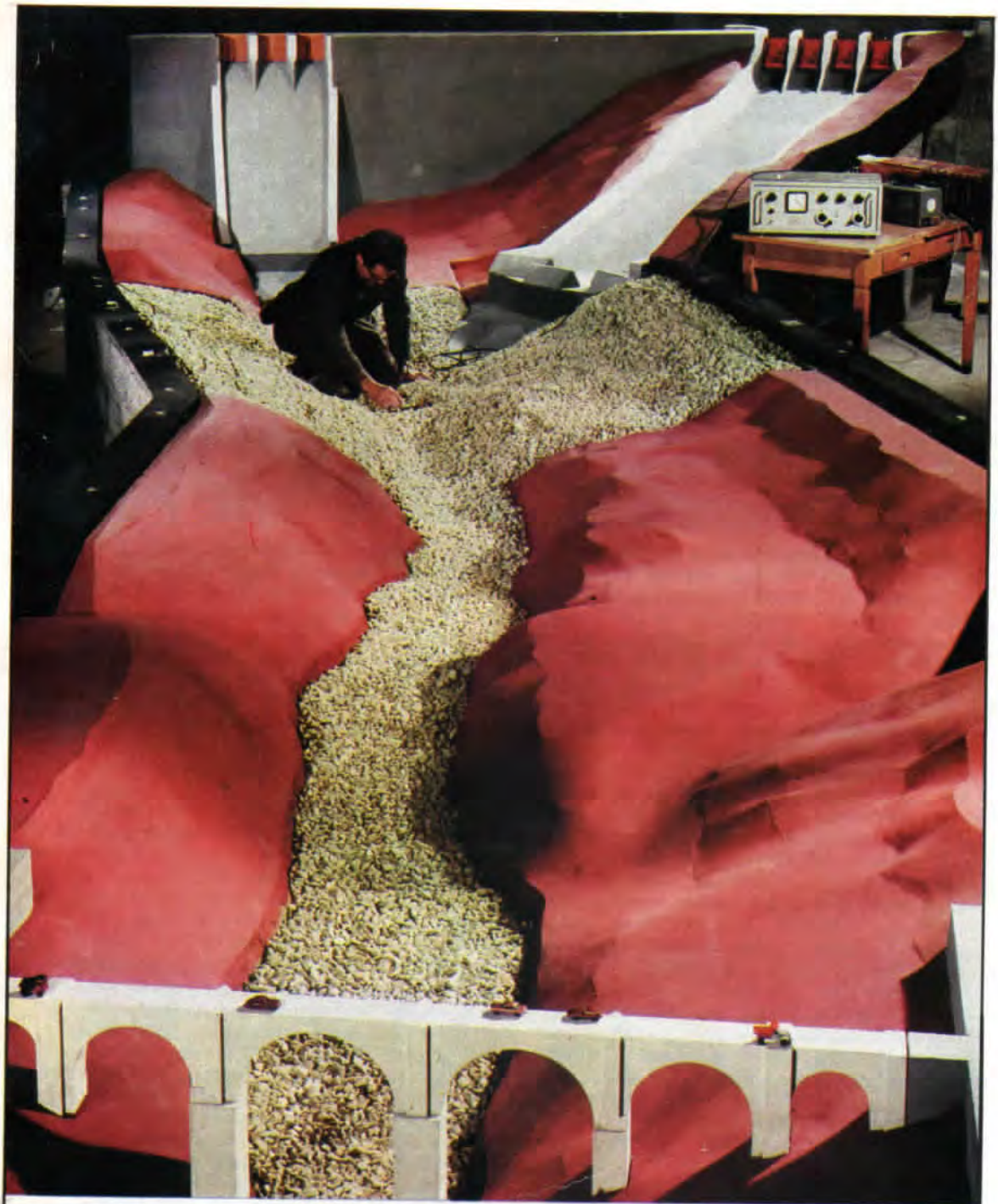
Étude expérimentale de l'estuaire de la Seine. Le modèle réduit est équipé d'une chaîne automatique de mesures et de télécommande qui groupe dans les mains d'un seul opérateur les organes de conduite du modèle (*photo de gauche*) et fournit le relevé du profil des fonds sous forme de bande perforée. A partir de cette bande, l'ordinateur trace la carte des fonds (*photo de droite*).
Une première étude sur modèle réduit, réalisée il y a quelques années, a déjà permis d'approfondir de 3 m le chenal de navigation de la Seine et, par là, d'accéder pour les navires de 20 000 t jusqu'à Rouen.

modifier les courants de la marée et permettre la création d'un chenal plus profond, dont la position et la profondeur puissent être maintenues par des dragages d'entretien limités et localisés [1].
Ce modèle est équipé d'une chaîne automatique de mesures qui fournit le relevé du profil des fonds sous la forme d'une bande perforée : à partir de cette bande, l'ordinateur trace les courbes de niveaux, la carte des fonds. De plus, il a un autre rôle : programmé sur un modèle mathématique d'études de courants, il sélectionne également les aménagements projetés. Mais, toujours, on en revient à l'expérience pratique : l'ordinateur ayant « déblayé » le travail, proposé, les digues sont étudiées sur le modèle réduit, sous l'angle de l'évolution des fonds.
Ces modèles réduits sont, le plus souvent, réalisés à l'échelle de 1/40, 1/60 ou 1/100. Méticuleusement : avec une précision de 1 mm pour les parties non « nobles », non essentielles, de 1/10 de mm pour les parties nobles. Ce n'est plus du travail de maçonnerie, c'est du travail de maquettiste. Aussi, la SOGREAH est-elle essentiellement une société de « matière grise » : sur le millier de personnes qu'elle emploie à son siège et dans ses filiales, succursales ou agences, on compte 30 % d'ingénieurs et 50 % de techniciens.

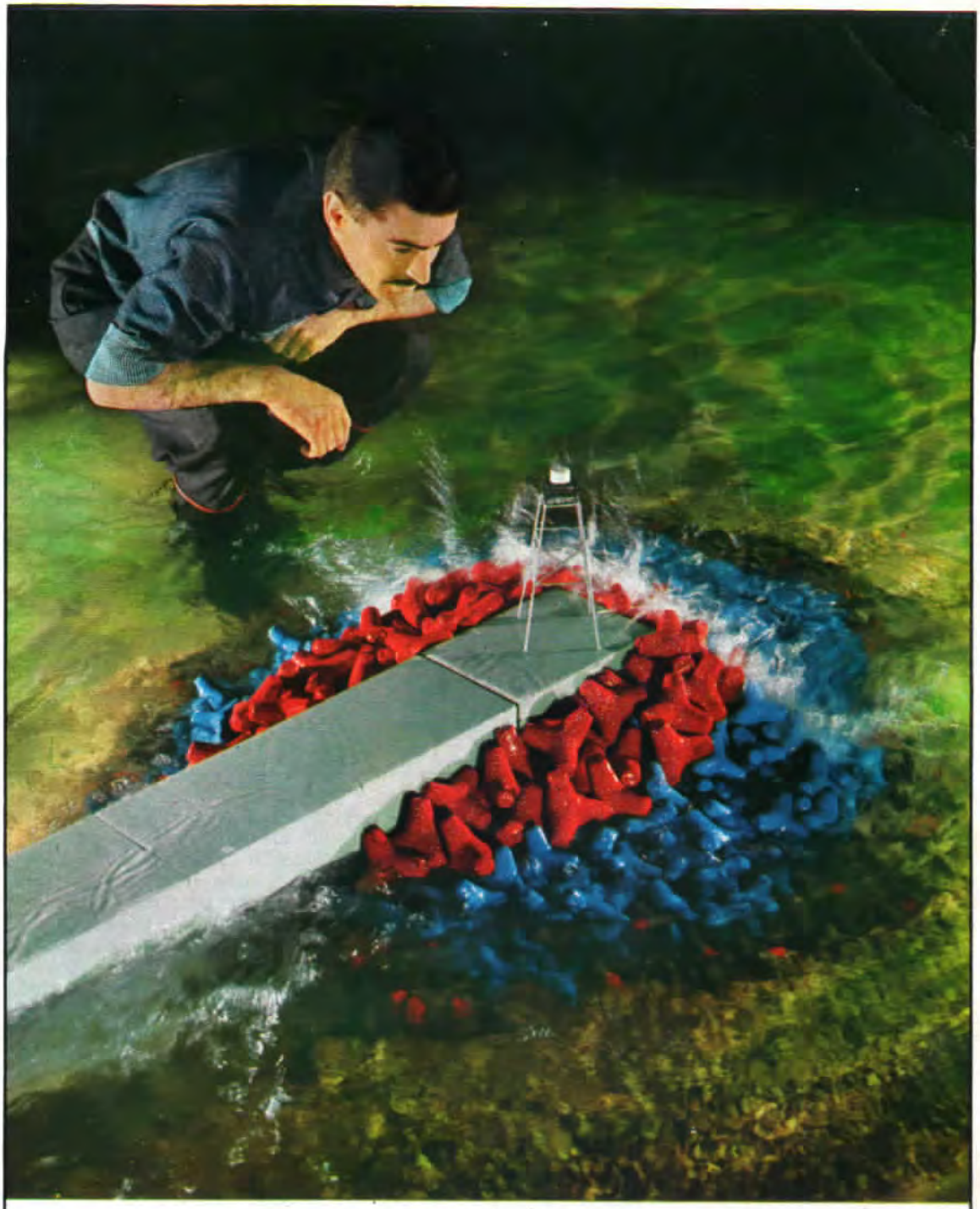
Le prix de revient d'un modèle réduit varie considérablement, bien entendu, selon l'ouvrage étudié, son importance, l'échelle retenue, les problèmes spécifiques qu'il pose. On ne peut donner de « fourchette » des prix, même très large. Cependant, l'expérience montre qu'en définitive une étude sur modèle réduit représente environ 5 % du prix de revient de l'ouvrage réalisé.
La technique du modèle réduit est purement française. Elle a vu le jour à Grenoble en 1907 avec des essais sur des modèles réduits d'une turbine et s'est élargie en 1923, avec la réalisation, par Maurice Gariel et Georges Routin, du modèle réduit de l'ensemble de la centrale de Drac-Romanche. Ainsi naquit le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, dont le SOGREAH, constituée en 1955, a repris les activités,

(1) C'est la seconde étude sur modèle réduit réalisée par la SOGREAH pour le port de Rouen : les travaux d'endiguement effectués à la suite de la première étude ont déjà permis d'approfondir de 3 mètres le chenal de navigation retenu sur la Seine.

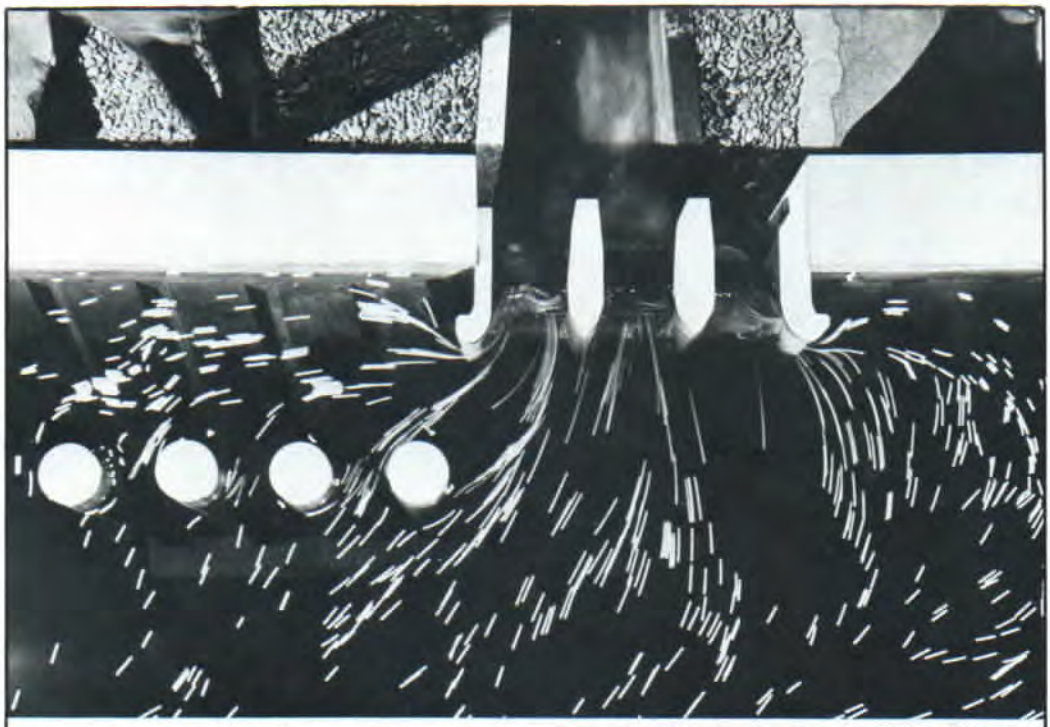
(suite texte page 110)



Modèle réduit, à l'échelle de 1/100e, du barrage d'Alcantara, sur le Tage, actuellement construit par l'Hydro-Electrica-Espanola.
Étude des évacuateurs de crues et des vidanges de fond : il s'agit d'éviter l'érosion des berges et du lit. Essai de dissipation aérienne de l'énergie, par projection de l'eau en l'air et dispersion de fines gouttelettes.
Cette technique n'a, finalement, pu être retenue : le modèle réduit a été modifié pour la mise au point d'une solution du type bassin de dissipation avec radiers et blocs de dissipation.



Protection d'un musoir de jetée à l'aide de tétrapodes. Ces blocs de béton, de 15 à 25 t, furent d'abord, en modèles réduits, quatre balles de ping-pong recouvertes de pâte à modeler. Ce modèle réduit est celui d'une jetée se trouvant au Japon, le plus gros « consommateur » au monde de tétrapodes — plusieurs centaines d'applications — en raison de la fragmentation de ses roches naturelles : on n'y trouve guère de blocs de plus de 500 kg.



Visualisation des lignes de courant par confettis dans un modèle réduit hydraulique. Des confettis de 15 mm de diamètre environ sont « semés » à la main dans le courant hydraulique. Un appareil photographique, dont l'axe optique est vertical, prend en « pose » la surface du modèle réduit. Les mouvements des confettis entraînés par l'eau se traduisent sur le film photographique par des taches allongées qui, à l'échelle de la photographie, deviennent des traits blancs, caractérisant les lignes de courants.

(suite de la page 107)

pour les élargir de l'hydraulique, qui reste la vocation première, à la mécanique des fluides et à la thermodynamique.

Quelques grandes dates dans l'histoire de la SOGREAH : 1956, l'Organisation du Plan Septennal d'Iran lui confie l'étude et la surveillance des travaux de l'aménagement agricole des 300 000 ha de la plaine de Guilan (en cours depuis 1961) ; 1960, elle étudie pour la ville de Cannes l'élargissement de la Croisette et l'engraissement artificiel de la plage ; 1964, le gouvernement de la République de Somalie et la B.I.R.D. (Banque Internationale pour le Reconstruction et le Développement) confient à la SOGREAH l'étude technico-économique de l'aménagement d'un port en eau profonde à Mogadiscio ; 1968, la Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale (DATAR) charge la SOGREAH de l'exécution des études préliminaires à la mise en valeur touristique de la côte Aquitaine : 1967, mise en service, pour la Société Esso, sur un lac proche de Grenoble, de l'école de pilotage des pétroliers géants — reproduits en miniatures, ou presque : tout juste à l'échelle humaine, cela va sans dire. A la suite de la SOGREAH ou, plutôt, du Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique, d'autres laboratoires du même type se sont créés dans divers pays, et notamment aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne. En France, on en compte trois principaux, qui, depuis une vingtaine d'années, ont totalisé plus de 800 modèles réduits pour le monde entier. Mais la SOGREAH présente deux particularités : elle est peut-être le seul laboratoire d'études hydrauliques au monde à ne pas être financé par l'Etat, d'une part ; elle a, d'autre part, conservé une certaine supériorité technique sur le marché mondial : plus de la moitié de son activité est exercée hors de France. Elle travaille pour les pays industrialisés aussi bien que pour les pays en voie de développement et, fréquemment, les organismes internationaux : BIRD, Banque Mondiale, Nations Unies, Fonds Européens, etc., font appel à sa collaboration. En 1967, elle a exporté 55 % (soit 35 540 000 F) de son chiffre d'affaires, qu'il s'agisse d'études réalisées à Grenoble sur modèles réduits pour le compte de pays étrangers, ou de

L'aboutissement de plusieurs années d'études, d'essais, de tâtonnements sur modèles réduits : l'ouvrage tel qu'il se présente dans la nature. **Ci-dessus le barrage de Tarik, sur le Sefid Roud (Iran).** Il fait partie du vaste ensemble d'ouvrages destinés à irriguer 300 000 ha de rizières dans la plaine du Guilan, entre la mer Caspienne et la chaîne de l'Elbrouz. La SOGREAH assure l'ingéniérie complète de cette opération. Les études ont commencé en 1956 : il a fallu d'abord établir les cartes de la région, qui n'existaient pas...

travaux d'ingéniérie complète, qui vont de l'étude sur maquettes et sur plans à la livraison d'ouvrages prêts à fonctionner. La SOGREAH se place ainsi au 212e rang dans le classement des entreprises françaises qui exportent le plus. En 1965, elle a obtenu le Grand Prix des 4 Oscars de l'exportation.

L'exemple le plus frappant d'une découverte effectuée grâce aux essais sur maquettes et exportée dans le monde entier est sans doute celui du tétrapode. Le brevet remonte à une vingtaine d'années. Il fut mis au point par l'ancêtre de la SOGREAH : le Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique.

Le tétrapode est un bloc artificiel en béton non armé destiné à la constitution de carapaces de protection des ouvrages maritimes. On utilisait autrefois des blocs de béton, solidement arrimés les uns avec les autres. L'inconvénient : sous la force des vagues, l'eau se glissait entre les blocs et, lorsque les vagues redescendaient, ceux-ci étaient soumis à de fortes sous-pressions — du fait même qu'ils étaient étroitement collés les uns aux autres. Ils finissaient ainsi par être éjectés.

La conception du tétrapode partit donc du postulat opposé : il faut utiliser des blocs ayant un fort indice de vide (50 %) — ainsi l'eau, une fois entrée, pourrait-elle facilement s'évacuer — et qui s'interpénètrent. Le tétrapode présente un avantage économique essentiel : il permet de réduire de 15 à 20 % le prix de revient d'une digue (plusieurs millions de centimes par mètre). Cela, grâce à une économie de matériaux : les qualités des tétrapodes permettent d'abaisser la crête de l'ouvrage et de raidir la pente de la carapace. Le volume du noyau de la jetée, ainsi que celui du béton de la carapace s'en trouvent ainsi considérablement réduits. Un exemple ? Deux ports, sur la même côte, au Maroc : Casablanca, protection traditionnelle, par blocs de béton, 100 tonnes de poids unitaire ; Safi, qui a choisi la solution tétrapode : 25 tonnes de poids unitaire... Economie aussi, dans les moyens de mise en œuvre, puisque, à efficacité égale, les tétrapodes sont moins lourds que des blocs classiques et économie, encore, dans le temps de construction.

Enfin, le tétrapode constitue la seule solu-

Pays humide, jadis fiévreux et misérable, le département de l'Ain
drainage. Ci-dessus : un modèle d'évacuateur de crues prévu au

tion possible pour certaines installations où les enrochements classiques ne peuvent convenir, soit parce que la houle est trop forte (en certains points de la côte Atlantique, par exemple, où elle atteint 8 à 9 mètres d'amplitude), soit parce que l'on ne trouve pas, localement, de blocs de roche suffisamment importants. C'est le cas, par exemple, au Japon, où la roche est très fragmentée : on n'y trouve guère de blocs de plus de 500 kg — alors qu'en Bretagne, à titre de comparaison, on trouve facilement des blocs de 15 à 20 tonnes. Cela explique que le Japon soit l'un des principaux utilisateurs de tétrapodes dans le monde.

La première application du tétrapode remonte à 1950. Depuis, et dans le monde entier, plus de 450 ouvrages ont été équipés d'environ 1 500 000 tétrapodes, représentant approximativement 9 000 000 de tonnes de béton.

La mise au point du tétrapode est le résultat d'une série d'études sur modèle réduit et d'approches successives. La première maquette du premier tétrapode fut réalisée avec quatre balles de ping-pong, collées les unes aux autres, et recouvertes de pâte à modeler...

Gérard MORICE

Portezuelo Grande : encore un modèle de barrage conçu par les techniciens de la Sogréah.

'Ain 'est assaini peu à peu par le au Coiselet par la Sogréah.