

L'aménagement du Rhin à l'amont du lac de Constance

Development of the Rhine above Lake Constance

PAR H. MULLER

INGÉNIEUR E.P.F.,
CHEF DE SECTION AU SERVICE FÉDÉRAL DES EAUX A BERNE

1. Utilisation de l'énergie hydraulique à l'amont de la frontière Suisse/Liechtenstein.

Environ 6,3 milliards de kWh, c'est-à-dire environ 20 % des ressources hydrauliques économiquement utilisables de la Suisse sont concentrés dans cette zone, où plusieurs groupes de centrales importants avec bassins d'accumulation saisonniers sont actuellement en cours d'exécution ou à l'état de projet.

L'un de ces projets hydrauliques les plus importants, dont l'exécution a été commencée depuis 1956, est le groupe de centrales international à 3 paliers Valle di Lei-Hinterrhein qui a une puissance installée de 630 000 kW au total, et une production d'énergie moyenne annuelle de 1 325 millions de kWh. Le bassin d'accumulation saisonnier d'une capacité utile de 197 millions de m³ se trouve en territoire italien, les trois centrales en territoire suisse. Les problèmes découlant de cet état de choses ont été réglés par une Convention entre la Suisse et l'Italie.

2. Régulation internationale du Rhin à l'amont du Lac de Constance.

Les premiers travaux systématiques pour la protection de la plaine du Rhin ont été entrepris en 1860.

Comme il s'est avéré que le Rhin ne pouvait transporter la totalité de ses matériaux solides dans le Lac de Constance (environ 3 millions de m³ de graviers et de sable par année) et ce, malgré les digues qui ont été construites et deux coupures pour raccourcir son cours, il a fallu prendre d'autres mesures. Celles-ci ont été déterminées au moyen d'essais sur modèle et de recherches portant sur le transport des matériaux. Ce sont les suivantes : modification du profil transversal à l'aval de l'embouchure de l'III, dragage des graviers à l'amont de l'embouchure de ce fleuve ainsi que dans le delta du Rhin dans le Lac de Constance. Les problèmes entre les Etats intéressés ont été réglés au cours des années par différentes Conventions.

1. Hydraulic power harnessing up-river from the border between Switzerland and Liechtenstein.

Some 6,300 million kWh, that is to say roughly 20 % of the total hydraulic power resources that can be economically harnessed in Switzerland, are concentrated in this area, in which several major power station groups with seasonal storage reservoirs are now under construction or at the project stage.

The Valle di Lei-Hinterrhein international three-stage power station group, which has been under construction since 1956, is one of the largest of these, with an overall installed power of 630 000 kW and a mean yearly output of 1 325 million kWh. The seasonal storage reservoir, which has a useful capacity of 197 million m³, is in Italy, whereas the three power stations are on Swiss territory. Agreement on questions arising from this geographical division was reached by means of a Convention between the two countries concerned.

2. International river training work on the Rhine above Lake Constance.

The first systematic attempts to provide suitable protecting works for the plain through which the Rhine flows were made in 1860. Since the Rhine then still proved itself unable to convey all its solid materials (some 3 million m³ gravel and sand every year) into Lake Constance, in spite of the dykes that had been built and the two cutoffs dug in order to shorten its course, further measures soon became necessary. These were determined by model tests and investigations into the mass transport conditions in the river. As a result, it was decided to modify the transverse profiles below the junction with the river Ill, and to dredge gravel above this point and in the delta where the Rhine runs into Lake Constance. Points at issue between the various countries affected were settled by a number of Conventions signed through the years.

Par suite de ses propriétés de cours d'eau de haute montagne, le Rhin a un caractère foncièrement différent à l'amont et à l'aval du lac de Constance. A l'amont, il est hors de question de l'utiliser pour la navigation ou de tenter de

le rendre navigable. Ce n'est qu'en fonction de l'utilisation de ses ressources hydrauliques que le Rhin peut présenter un intérêt économique pour les hommes; mais son caractère de torrent charriant des matériaux solides pose, sous

l'angle du génie fluvial, des problèmes coûteux et souvent extrêmement difficiles à résoudre, et dont la solution ne peut être trouvée, en partie, que grâce à une collaboration des trois Etats intéressés : Suisse, Autriche et Liechtenstein.

1. Utilisation de l'énergie hydraulique dans le bassin de réception du Rhin situé en amont de la frontière Suisse/Liechtenstein.

a) VUE D'ENSEMBLE :

Le potentiel hydro-électrique, économiquement utilisable du Rhin et de ses affluents en amont de la frontière Suisse/Liechtenstein (bassin de réception = 4 550 km²), sur la base des projets connus aujourd'hui, est d'environ 6,3 milliards de kWh pour une année moyenne, alors que l'on compte sur environ 32 milliards de kWh pour l'ensemble de la Suisse; la contribution du Rhin dans le bassin considéré, par rapport au potentiel de production totale de la Suisse se monte donc à environ 20 %. Les usines hydro-électriques d'il y a une dizaine d'années ayant une puissance installée d'au moins 1 000 kW ne produisaient que 0,65 milliards de kWh environ. Mais, depuis cette époque, la construction des usines hydro-électriques dans le canton des Grisons a fait de rapides progrès, rendus nécessaires par l'accroissement continu des besoins dans toute la Suisse. Comme pour tous les cours d'eau alpins, lors de l'étude de projets de centrales hydro-électriques, les entreprises recher-

chent avant tout des emplacements appropriés pour servir de bassins d'accumulation, dans lesquels on puisse emmagasiner durant l'été les importantes quantités d'eau résultant de la fonte des neiges, pour la production d'énergie en hiver. Grâce à ces retenues, il sera possible, théoriquement, dans le bassin considéré, après la réalisation des projets actuellement à l'étude, de mettre de côté environ 780 millions de m³ d'eau d'été pour le semestre d'hiver; ce qui représente presque 16 % du débit d'écoulement annuel moyen du Rhin à la frontière Suisse/Liechtenstein. La capacité d'énergie de tous ces lacs d'accumulation, sans gain d'énergie dans les centrales à basse chute situées en-dessous, est d'environ 1,9 milliard de kWh, ce qui donnera (comme on peut le voir sur le tableau I) après l'achèvement des travaux de construction, une production d'énergie pratiquement équilibrée entre les semestres d'hiver et d'été. La figure 1 donne un aperçu des centrales et des groupes de centrales existants, en construction, ou à l'étude au début de janvier 1958 dans le bassin de réception du Rhin situé dans les Grisons.

b) PROJET D'UTILISATION INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE VALLE DI LEI — RHIN POSTÉRIEUR.

Lorsque l'on parle du Rhin suisse dans le canton des Grisons, qui se divise en deux branches présentant des bassins de réception approximativement de même grandeur, le Rhin antérieur et le Rhin postérieur, à environ 10 km à l'amont de Coire, on n'est en général pas conscient du fait que le Rhin possède déjà ici une composante internationale, bien qu'encore de faible importance. Les droits territoriaux italiens s'exercent en effet au-delà de la ligne de partage des eaux entre le territoire du Rhin et de l'Adda jusque dans la « Valle di Lei », vallée latérale dans le bassin de réception du Rhin postérieur, dans lequel s'écoule le Reno di Lei. La partie du bassin de réception italien du Rhin, qui est d'ailleurs la seule partie italienne du bassin du Rhin entier, mesure environ 53 km².

L'utilisation des ressources hydrauliques du Rhin d'Avers et du Rhin postérieur faisait l'objet, depuis des décennies, d'études de projet et de négociations. Comme il n'était pas possible, du fait de l'opposition de trois communes, d'établir un lac de retenue de grandes dimensions sur le territoire suisse en accumulant les eaux du Rhin postérieur près de Splügen, parce que les communes, dans le canton des Grisons, disposent des eaux et que ces trois communes ne voulaient pas donner leur accord à une telle solution, on mit au point une solution internationale qui faisait entrer dans le projet la Valle di Lei, d'appartenance italienne,

TABLEAU I.

Utilisation des ressources hydrauliques dans le bassin du Rhin à l'amont de la frontière Suisse/Liechtenstein (Etat de janvier 1958)

	Puissance installée MW	Production			Stockage	
		Hiver millions de kWh	Été millions de kWh	Année millions de kWh	millions de m ³	millions de kWh
Existant	434	746	800	1 546	171	367
En construction .	915	937	974	1 911	260	659
A l'étude	666	1 543	1 315	2 858	353	859
Total	2 015	3 226	3 089	6 315	784	1 885

où l'on pouvait trouver des conditions favorables pour l'installation d'un bassin d'accumulation saisonnière (fig. 2).

Les pourparlers avec l'Italie pendant sept années se terminèrent en 1955 par l'attribution des concessions pour le palier international Valle di Lei - Ferrera. La « Kraftwerke Hinterrhein AG » fut fondée en décembre 1956; elle comprend, du côté suisse, diverses entreprises électriques, et du côté italien, la Società Edison. Cette même année, avaient été commencés les travaux de préparation, et aujourd'hui, tous les paliers du projet sont en cours de construction.

Un des points les plus importants à régler dans la convention avec l'Italie, était la détermination de la participation de l'Italie à la production de l'énergie du groupe hydro-électrique projeté.

Eu égard au débit d'eau et à la chute, qui sont utilisables sur les territoires suisse et italien, il a été décidé que 70 % de l'énergie hydro-électrique rendue utilisable par le palier international Valle di Lei - Ferrera seraient attribués à la Suisse et 30 % à l'Italie. En considération des avantages impartis aux paliers inférieurs, résultant du lac de stockage de la Valle di Lei en territoire italien, il a été décidé que le Conseil Fédéral suisse, dans le cadre des prescriptions de la législation suisse et pour la durée des concessions des deux gouvernements (80 ans), accordera à la Compagnie concessionnaire la permission, sur sa demande, d'exporter sur l'Italie 20 % de la puissance disponible dans tout le groupe de centrales et de l'énergie produite. Etant donné la position géographique du lac de stockage projeté, il a été décidé, en outre, dans la convention, qu'à l'occasion de la réception officielle, le barrage élevé dans la Valle di Lei sur territoire italien se trouvera, à la suite du redressement de frontières convenu, en territoire suisse (lettre B, fig. 3); le territoire de même superficie (environ 0,5 km²), que la Suisse cédera à ce moment à l'Italie en compensation est désigné sur la figure 3 par la lettre A. Conformément à un article de la concession italienne, le projet et la construction du barrage et des autres ouvrages se trouvant sur territoire italien doivent être confiés à des entreprises italiennes.

Comme la construction de ces œuvres requiert des sommes gigantesques (environ 600 millions de francs suisses) plusieurs entreprises publiques et privées, du côté suisse, ont contribué à la formation du capital d'actions des « Kraftwerke Hinterrhein A.G. ». Chaque associé est tenu de couvrir la part des frais annuels lui incombant au prorata de sa participation et a le droit de réclamer une quote-part correspondante de l'énergie produite. Les actionnaires et leur quote-part de participation sont les suivants :

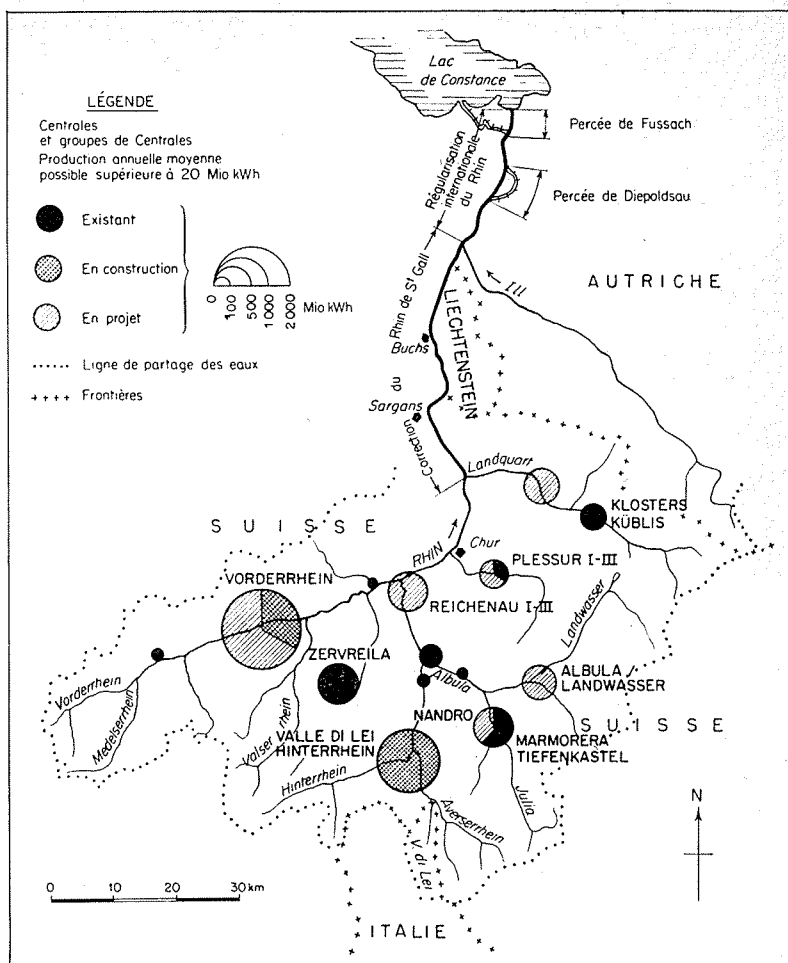


FIG. 1

Le Rhin en amont du lac de Constance. Plan d'ensemble. Exploitation de l'énergie hydraulique en amont de la frontière Suisse/Liechtenstein et correction internationale du Rhin.

SUISSE :

Ville de Zürich.....%	19,5
Forces Motrices du Nord-Est Suisse, S.A., Baden	19,5
Canton des Grisons et Communes..%	15,0
S.A. d'Electricité Aar et Tessin, Olten	9,28125
Forces Motrices Bernoises, S.A., société de participation Berne....%	7,71875
Forces Motrices de Brusio, S.A. Poschiavo	4,1
Canton de Bâle-Ville	2,5
Usines Rhétiques d'Electricité, S.A. Thusis (Grisons)	2,4
	<hr/>
	% 80,0

ITALIE :

Società Edison, Milan.....%	20,0
	<hr/>
	% 100

Il s'agit là d'un des groupes de centrales les plus importants du bassin de réception du Rhin en amont du lac de Constance. Conformément

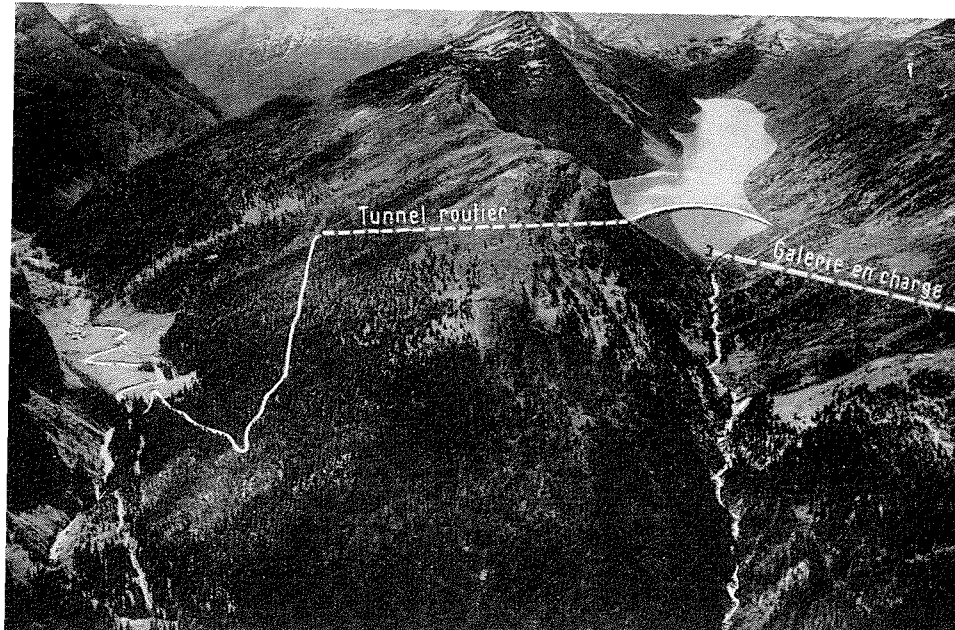


FIG. 2

Vue prise du Nord dans le Valle di Lei avec retenue projetée. Photo montage.

FIG. 3

Aménagement du Valle di Lei/Hinterrhein. Projet de 1956. Plan d'ensemble.

au projet de construction de 1956, la production d'énergie moyenne annuelle se monte à 1 325 millions de kWh pour une puissance installée de 630 000 kWh au total (fig. 3).

Les trois paliers de cet aménagement sont les suivants :

- Palier I : Valle di Lei-Ferrera.
- Palier II : Ferrera/Sufers-Bärenburg.
- Palier III : Bärenburg-Sils.

Le lac d'accumulation situé à l'amont du palier I dans la Valle di Lei a une capacité utile de 197 millions de m³; il est rempli pour 1/3 par les affluents naturels venant du propre bassin de réception italien, et pour 2/3 par les adductions venant des vallées suisses voisines, ainsi que par les débits d'eau pompés provenant du Rhin d'Avers à Innerferrera. Diverses études comparatives ont prouvé que la construction d'un barrage-voûte pour fermer la vallée était la solution la plus économique. Ses dimensions principales sont : Hauteur maximum au-dessus du sol de fondation=138 m; Longueur de la crête 635 m; Epaisseur du béton au pied du barrage=28 m; Cubage du béton=810 000 m³.

La centrale de Ferrera, située sur le Rhin d'Avers, dans laquelle, outre les génératrices sont également placées les pompes, restitue l'eau turbinée dans une galerie à écoulement libre qui conduit au second lac d'accumulation de Sufers (palier intermédiaire) situé sur le Rhin postérieur. La capacité utile de ce lac artificiel est de 18,3 millions de m³. Le palier intermédiaire de Sufers-Bärenburg présente la chute la plus concentrée, et de ce fait le plus grand débit équipé. Cet état de choses est dû en outre à la nécessité d'adapter le débit équipé du palier III, ayant sa centrale à Sils, à l'aménagement du Rhin postérieur envisagé dans le Domleschg à l'aval de cette centrale. Pour équilibrer les débits d'eau utilisés dans le 2^e palier, ainsi que les affluents du bassin de réception intermédiaire,

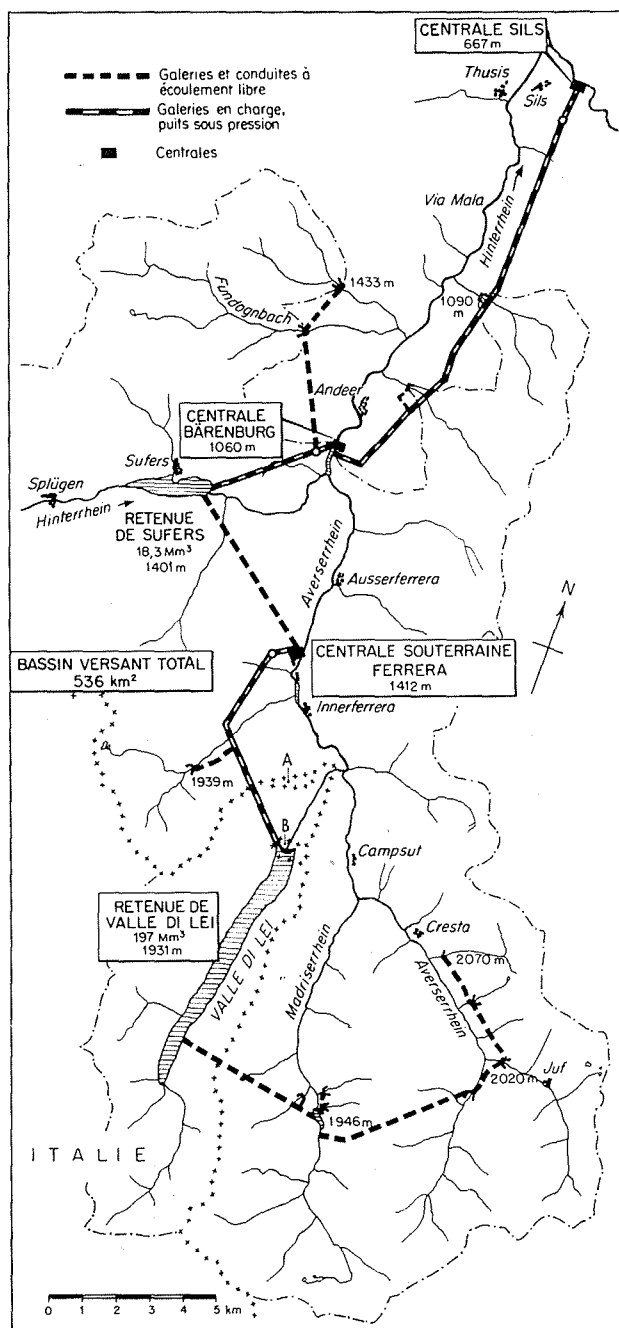


TABLEAU II
Débits équipés, chutes, production.

Palier	Débit équipé m ³ /s	Chute moyenne		Puissance installée kW	Production d'énergie pour une année moyenne		
		brute m	nette m		Hiver millions kWh	Eté millions kWh	Année millions kWh
I. Valle di Lei-Ferrera....	45	491	477	185 000	234	—	234
II. Sufers-Bärenburg	80	326	319	215 000	230	257	487
III. Bärenburg-Sils	70	408	392	230 000	286	377	663
Total.....		1 225	1 188	630 000	750	634	1 384
Ferrera, Pompes.....	8			48 000	—	59	59
Production d'ensemble nette					750	575	1 325

un bassin de compensation d'une contenance utile d'un million de m³ est placé en avant du palier inférieur. Le tableau II donne une vue d'ensemble des données caractéristiques et de la production d'énergie des trois paliers.

La période de construction totale de cet aménagement s'étend sur 7 années, si bien que les trois paliers seront terminés en 1963. On peut voir le plan du programme de construction sur le tableau III, mais il faut noter à ce sujet que les travaux de préparation ont déjà été commencés en 1956 après l'entrée en vigueur de la convention avec l'Italie, comprenant entre autres la construction de routes d'accès, l'installation de l'alimentation en courant pour la construction, des sondages, etc.

TABLEAU III
Programme de construction.

Palier ou ouvrage	Mise en chantier	Mise en route	Achèvement
Barrage Valle di Lei...	1958		1962
Valle di Lei-Ferrera...	1958	oct. 1961	1962
Sufers-Bärenburg	1959	juil. 1962	1963
Bärenburg-Sils.	1957	juil. 1960	1961

2. Régularisation internationale du Rhin à l'amont du lac de Constance.

La navigation actuelle et envisagée pour l'avenir sur le Rhin à l'aval du lac de Constance, ainsi que l'utilisation de l'énergie hydro-électrique, ne pourraient être envisagées dans la même mesure si le Rhin ne pouvait « s'épurer » dans le lac de Constance; à sa sortie du lac il est complètement débarrassé de ses matériaux solides et de son limon. On a établi les quantités de galets et de limon charriées par le Rhin de son bassin de réception jusqu'au lac de Constance, soit une surface de 6 122 km², grâce à des mesures au delta du Rhin qui ont été effectuées tous les dix ans depuis 1911. Le résultat de ces mesures a montré que les dépôts annuels se montent à environ 3 millions de m³ et que l'embouchure du Rhin s'est avancée dans le lac d'environ 25 m par an (valeur moyenne) au cours des 50 dernières années. Par suite de l'attrition des matériaux solides, ce ne sont qu'environ 50-100 000 m³ de graviers et de sable qui parviennent annuellement dans le lac; la plus grande partie, de loin, est donc formée par du limon.

Cependant que le Rhin, dans son cours supérieur — ainsi que ses affluents — posent maints problèmes du point de vue génie fluvial par leur action érosive, le fleuve crée de grandes difficultés de la frontière Liechtenstein/Suisse jusqu'à son embouchure dans le lac de Constance du fait que sa pente sur ce parcours ne

lui permet plus de transporter complètement les matériaux solides. En conséquence, le lit du Rhin à Buchs se trouve aujourd'hui à environ 3,5 m au-dessus du fond de la vallée et, en période de crue, le plan d'eau est d'environ 9 mètres au-dessus du fond plat de la vallée. A l'aval de Buchs, et jusqu'au lac de Constance, on rencontre des conditions analogues : une grande partie des agglomérations et du sol fertile de la vallée dépend entièrement de la protection des digues de crues. Des crues catastrophiques peuvent atteindre 3 000 m³/s sur ce parcours, alors que le débit minimum qui ait jamais été observé est de 43 m³/s.

La première correction systématique du Rhin a été commencée en 1860, suivant l'initiative du canton de Saint-Gall. La Suisse, le Liechtenstein et l'Autriche se mirent d'accord pour endiguer le fleuve sur un parcours rectiligne aussi long que possible. De l'endroit où la Landquart se jette dans le Rhin à l'aval de Coire, jusqu'à la confluence de l'Ill et du Rhin, on a choisi un profil transversal ayant une largeur moyenne de 120 mètres entre les crêtes des digues de crues. Depuis le confluent avec l'Ill jusqu'au lac de Constance, on a exécuté le nouveau lit à double profil se composant d'un lit central de 110 mètres de large avec de chaque côté des lits majeurs (plaines inondables) de 75 mètres de large.

Cette régularisation du Rhin a été complétée, en vertu des Conventions de 1892 et 1924 entre la Suisse et l'Autriche, par les travaux de la « Régularisation Internationale du Rhin, confluent de l'Ill-lac de Constance ». Ces compléments se rapportaient avant tout à l'exécution de ladite percée de Fussach (terminée en 1900) près de l'embouchure du Rhin dans le lac de Constance, ainsi que la percée de Diepoldsau (terminée en 1923). Ces deux percées, ensemble, produisirent un raccourcissement du cours du Rhin d'environ 10 km (fig.1).

Bien que ces importants travaux de correction aient fortement réduit le danger d'inondation, il s'est avéré néanmoins qu'ils ne répondaient pas aux prévisions en ce qui concerne le transport des matériaux solides. Le fond du lit du Rhin s'élevait continuellement depuis la partie située un peu à l'aval de Sargans en descendant le cours du fleuve, étant donné qu'une partie des matériaux solides s'y déposait, ce qui obligeait à relever constamment les digues contre les crues.

Peu après l'achèvement de la percée de Diepoldsau, il s'avéra qu'il fallait absolument améliorer la situation en ce qui concerne le

déblaiement des matériaux solides. En collaboration avec le Laboratoire des Recherches hydrauliques de l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zürich, des projets d'amélioration ont été étudiés d'après les résultats obtenus d'essais sur modèle. Le laboratoire a fait des essais importants conduisant à une meilleure compréhension mathématique du problème du transport des matériaux solides, et donnant des indications fondamentales dans ce domaine.

Le résultat de ces recherches était que, à l'aval de l'embouchure de l'Ill, qui amène au Rhin des matériaux solides assez grossiers et forme par conséquent un point fixe dans le profil longitudinal du Rhin, les conditions peu favorables ne pouvaient être améliorées que par un rétrécissement du lit central tout en relevant les digues longitudinales de ce lit (pour une capacité du canal central de 1 250 m³/s). Le rétrécissement du lit central devait augmenter au fur et à mesure que l'on se rapprochait du lac, de manière inversement proportionnelle à la diminution de pente du fleuve; à l'embouchure dans le lac, le rétrécissement est de 45 mètres. Ces travaux sont en cours d'exécution depuis 1940 et doivent être achevés en 1966. Une mesure supplémentaire pour empêcher l'élévation du fond à l'aval de l'embouchure de l'Ill consiste à retarder le plus possible la progression du cours du fleuve à son embouchure dans le lac de Constance en draguant les dépôts de graviers et de sable. La Convention entre la Suisse et l'Autriche, qui se rapporte à l'exécution de ces travaux, a été signée en 1954; le délai entre le commencement des travaux et la signature de la Convention était dû aux événements des années de guerre et d'après-guerre.

Depuis 1954 il a été dragué d'importantes quantités de graviers et de sable pour d'autres travaux, à l'amont de l'embouchure de l'Ill, afin de débarrasser le lit du fleuve; grâce à cette opération, il a été enlevé au Rhin, annuellement, environ 200 000 m³ de matériaux solides. Une autre mesure, la plus efficace à long terme parce qu'elle cherche à résoudre le problème du charriage des matériaux solides à sa source même, consiste à pousser plus loin encore l'aménagement des torrents de montagne, porteurs de ces matériaux solides, en Suisse et en Autriche.

Les résultats obtenus jusqu'à présent grâce aux mesures prises semblent confirmer la justesse des renseignements donnés par les essais sur modèle, de sorte que l'on est en droit d'espérer que les mesures indiquées pour l'amélioration conduiront au but recherché, c'est-à-dire la stabilisation du profil longitudinal du Rhin de Sargans jusqu'au lac de Constance.