

Aménagement du Rhin de Bâle à Strasbourg et à Lauterbourg au moyen d'une Méthode nouvelle de canalisation des Fleuves

Pour la production de la force motrice, la navigation internationale, l'irrigation des deux rives
et la protection contre les inondations

par L. MAHL, Ingénieur

L'aménagement du Rhin est une œuvre d'intérêt mondial : on ne doit rien refuser à son ampleur, qui doit assurer une richesse publique dans des domaines divers intéressant toutes les nations.

Il résultera de son organisation, soit un trait d'union entre les riverains du fleuve, soit une menace perpétuelle de difficultés d'une portée incalculable, comme les événements récents l'ont, hélas ! trop démontré.

D'où la nécessité de réaliser cet aménagement sous la forme internationale comme il s'effectue à l'amont de Bâle.

L'énergie pérenne naturelle, offerte par le fleuve et correspondant à toute celle, éphémère, d'un bassin houiller, doit être recueillie en son entier, suivant les lois de la plus stricte économie.

De vastes surfaces devront être récupérées par des endiguements et données à la culture dont la fertilité sera assurée à toute la vallée par des irrigations faciles sur ses deux rives.

La voie navigable libre sur son domaine naturel, accessible à tous les peuples dans le plus beau des cadres, sur un flot majestueux et asservi, donnant la plus parfaite sécurité aux transports économiques de toutes natures sous toutes les formes, comme à la locomotion aérienne qui aura, pour les hydravions, sur le Rhin, puis le Danube, une piste presque ininterrompue de Rotterdam à la Mer Noire de 3.500 kilomètres !

Quel merveilleux programme à réaliser par nos techniciens et nos économistes, à la condition qu'ils se détachent de méthodes surannées, d'idées préconçues et de vues égoïstes, pour ne viser que l'intérêt général de l'Europe, pivot de la paix universelle.

L. MAHL.

PREMIÈRE PARTIE

Comparaison entre les diverses méthodes et études de l'aménagement du Rhin par barrages successifs

On possède aujourd'hui des indications suffisamment précises sur le projet administratif d'aménagement du Rhin entre Bâle et Strasbourg, pour faire facilement une comparaison entre les résultats à obtenir de l'application de l'une ou l'autre des deux méthodes, celle de la dérivation préconisée d'un certain volume d'eau à l'aval de Bâle dans un canal établi sur la rive gauche et allant rejoindre le fleuve à l'amont de Strasbourg ou celle de la canalisation du fleuve même, au moyen de barrages successifs (1).

Pour l'aménagement du Rhône, la dérivation d'un volume d'eau à peu près constant fut préconisée entre l'aval de Lyon et la mer ; on a déjà, du reste, effectué la dérivation de Jonage à l'amont de Lyon suivant le moyen offert sur le Rhin. Mais pour notre grand fleuve national, la canalisation du fleuve s'imposera pour les mêmes raisons techniques que nous donnons en faveur de l'adoption de cette solution pour l'aménagement du Rhin.

En réfutant sans peine les raisons invoquées pour combattre l'idée que nous émettons de transformer le fleuve en un véritable canal, nous allons montrer comment on peut éviter de compromettre une richesse publique de premier ordre en tablant sur des considérations matérielles parfaitement démontrées.

Disons tout d'abord que les rapports administratifs ramènent avec assez de raison la question de la navigation du Rhin à ses justes proportions, qui sont d'un avenir fort limité : excellent motif pour ne rien sacrifier des avantages énormes à demander à la production de la force motrice qui est la seule ressource vraiment payante pouvant justifier l'aménagement.

Quant aux irrigations, on ne doit rien négliger pour les assurer le plus facilement possible sur les deux rives.

Dans l'aménagement par dérivation, d'après les indications assez sommaires fournies, on disposerait d'un canal offrant une section, en basses eaux, de 670 mètres carrés.

Le débit du fleuve, réduit ordinairement à 300 mètres cubes en janvier-février, variera, pendant les quatre mois de l'étiage, de 500 à 800 mètres cubes pour être de 650 mètres cubes en

moyenne, lorsqu'on aura amélioré la réserve des lacs suisses et badois. Logiquement, en attendant, il nous semble qu'on ne peut trop assécher le fleuve sur 127 kilomètres, ou le priver de plus de la moitié de son débit durant cette période, soit avoir un débit disponible de 150 à 250 mètres à la seconde à l'aval de Bâle, ce qui réduirait la production d'énergie à moins de 200.000 chevaux en moyenne durant quatre mois de l'année.

Comme, en attendant la régularisation, il est question de ne laisser à l'étiage que 50 mètres cubes dans le

fleuve, on ne pourra donc produire sur le canal une force supérieure à celle indiquée en temps d'étiage. Par compensation, durant les huit autres mois, le débit maximum envisagé serait de 815 mètres cubes dans le canal, où l'eau pourra atteindre une vitesse de près de 1^m.40 à la seconde, soit environ 5 kilomètres à l'heure.

RÉGIME ET DÉBIT DU FLEUVE

Le tableau ci-contre est résumé par un diagramme (fig. I) donnant la capacité théorique de tout le débit du Rhin au cours d'une année moyenne prise pendant la période de dix ans allant de 1904 à 1913.

Ce débit global annuel représente environ 35 milliards de mètres cubes, alors que celui du fleuve à son embouchure serait d'environ 74 milliards de mètres cubes.

La pente brute utilisable entre Kembs et Neuhof vers Stras-

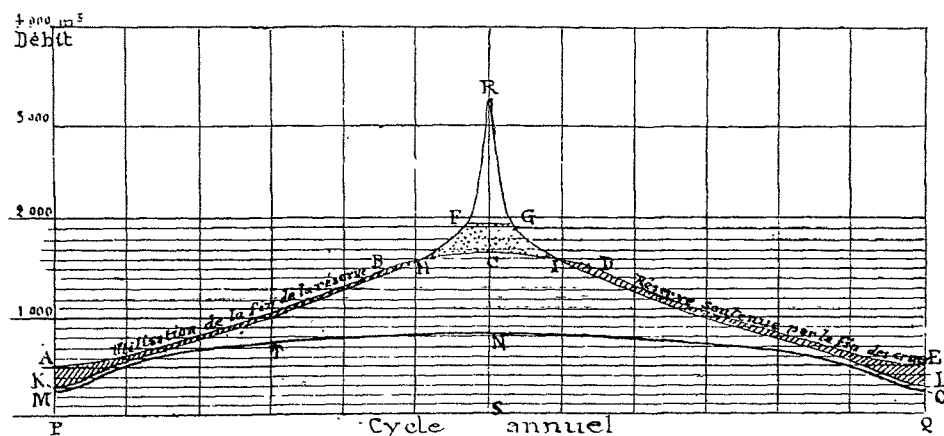


FIG. 1.

Diagramme synoptique représentant : 1° Par la courbe KHFRL, la variation du débit annuel du Rhin en moyenne pour la période décennale 1904-1913 à l'aval de Bâle. 2° Par la courbe MNO, le débit annuel que se propose d'utiliser la dérivation de Kembs à Strasbourg pour la navigation, les irrigations et la force motrice. 3° Par la courbe ABCDE, le débit annuel pratiquement utilisable, aidé d'une réserve HFGI à réaliser sur les lacs suisses et badois, en vue de réaliser la navigation internationale sur le fleuve canalisé, d'assurer les irrigations au droit des deux rives et de tirer le meilleur parti possible de l'énergie disponible. 4° Par le triangle FRG, le surplus de l'eau utilisée par les irrigations.

(1) Voir notamment le Programme de l'Aménagement du Rhin entre Huningue et Strasbourg, L. Eyrolles, éditeur, Paris.

bourg serait de 107 mètres ; mais, pour des raisons diverses, on ne fait état que de 90^m24 de chute totale dans le projet par dérivi-ations. C'est sur ce chiffre et sur un débit de 815 mètres cubes maximum que nous nous baserons, pour estimer la puissance globale susceptible d'être générée sur le canal de dérivation, et la comparer à celle à obtenir de l'aménagement par barrages sur le même parcours du fleuve, en fonction de la pente qui y existe.

La courbe P K H R I L Q figure le débit moyen annuel qui, calculé, représente 35 milliards de mètres cubes de débit par an à Bâle.

La courbe P A B C D E Q représente le débit rectifié par la réserve une fois réalisée sur le Bodensee et les lacs suisses. En excluant les lacs d'une surface inférieure à 1 km², ils représentent dans leur ensemble une surface de 1.252 kilomètres carrés montrée par la figure 12 ; or la réserve que nous figurons H F G I C représente une capacité de 750 millions de mètres cubes ; c'est donc une retenue d'une épaisseur de 1^m67 qui serait à constituer

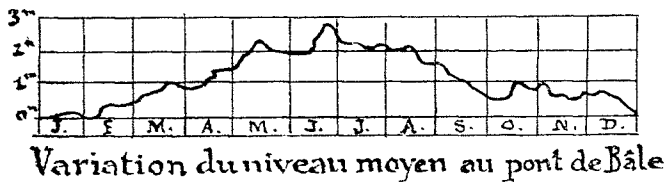


FIG. 2.

sur les lacs, réserve à peu près équivalente à celle qu'il convient de réaliser sur le Léman pour le Rhône.

Dans ces conditions, on pourra utiliser, de B à D, pendant trois mois, un débit moyen un peu supérieur à 1.500 mètres cubes à la seconde, au jour où on jugera économique l'installation complète des stations hydro-électriques en vue de la récupération pratique de l'énergie résiduaire, alors qu'elle ne sera gagée que par une

durée de trois mois environ par an. Rappelons tout de suite que la dépense afférente à l'extension des usines ne se rapporte qu'au matériel mécanique et électrique et aux bâtiments ; dans ces conditions, elle représente (à Chèvres, par exemple) 42 % de la dépense, non compris celle des lignes. D'où les kilowatts complémentaires à installer ne coûteront que les deux cinquièmes environ de ceux de premier établissement dont le prix est accru de celui de tous les travaux d'hydraulique. De sorte que, pour une utilisation de trois mois, leurs frais d'installation se justifient par rapport aux premiers installés, dans la proportion de 1 à 0,42 \times 4 = 1,68. Disons tout de suite que, dans les organes hydrauliques, une légère perte dans le rendement permet une grande élasticité dans la majoration de la puissance à produire. D'où on demandera le surcroît de production d'énergie, en temps de hautes eaux, presque entièrement à une surcharge des unités hydro-électriques ; en conséquence, le facteur 1,68, dans le cas de la canalisation du fleuve, se justifiera vraisemblablement en dessous de l'unité. Tandis que pour un canal, impossibilité de gager la production de l'énergie résiduaire par l'accroissement du débit impliquant la majoration du coût complet des installations et du canal à établir à une section suffisante ; car la dépense originelle, qu'on verra beaucoup plus grande que celle se rapportant à l'aménagement du fleuve, pour une dépense double, par exemple, et un quart de l'utilisation annuelle des unités installées donnerait 8 comme capital investi par kilowatt-heure produit, au lieu de 1,68 dans l'aménagement du fleuve.

Mais l'énergie résiduaire, vendue sur place, ne sera pas grevée de frais de lignes et de distribution ; d'où un intérêt évident à la produire ; elle utilisera surtout le matériel de rechange et, travaillant pendant l'été, elle fournira un appoint utile, au moment du stockage, aux grandes industries hydro-électriques. Un intérêt encore beaucoup plus grand sera celui de fournir à l'industrie économique aux distributions alimentées par des usines hydrauliques à l'étiage de régime jurassique.

Il est injuste de dire que l'utilisation de l'énergie résiduaire

Tableau I

Cote à l'échelle de Bâle	Débit en mètres cubes par seconde	Moyenne des durées	Moyenne des durées cumulées	Durée moyenne d'un débit certain	
				sans la réserve des lacs	avec la réserve des lacs
— 0 ^m 50	En dessous de 300.....	1,3		363,3	—
	De 300 à 319.....	1,1	2,4	362,0	—
— 0 ^m 30	— 320 à 339.....	1,2	3,6	360,9	—
	— 340 à 359.....	1,3	4,9	359,7	—
0 ^m	— 360 à 379.....	6,3	11,2	358,4	—
	— 380 à 399.....	6,4	17,6	352,2	—
	— 400 à 449.....	14,6	32,2	345,7	—
	— 450 à 499.....	15,0	47,2	331,1	—
0 ^m 30	— 500 à 549.....	12,3	59,5	316,1	365
	— 550 à 599.....	16,6	76,1	303,8	—
	— 600 à 649.....	13,0	91,1	287,2	320
0 ^m 60	— 650 à 699.....	13,9	105,0	274,2	—
	— 700 à 749.....	15,6	120,6	260,3	288
	— 750 à 799.....	15,8	136,4	244,7	—
0 ^m 80	— 800 à 849.....	14,5	150,9	228,9	256
	— 850 à 899.....	13,8	164,7	214,4	—
1 ^m	— 900 à 949.....	14,5	179,2	200,4	226
	— 950 à 999.....	17,0	126,2	136,1	—
	— 1.000 à 1.099.....	22,2	218,4	169,1	200
1 ^m 50	— 1.000 à 1.199.....	20,8	239,2	146,9	175
	— 1.200 à 1.299.....	20,9	260,1	126,1	152
	— 1.300 à 1.399.....	20,2	280,3	105,2	130
	— 1.400 à 1.499.....	19,1	299,4	85,0	108
2 ^m	— 1.500 à 1.599.....	16,8	316,2	65,9	90
	— 1.600 à 1.699.....	12,2	328,4	49,1	60
	— 1.700 à 1.799.....	11,6	340,0	36,9	—
	— 1.800 à 1.899.....	9,0	349,9	25,3	—
2 ^m 50	— 1.900 à 1.999.....	4,9	353,9	16,3	—
	— 2.000 à 2.499.....	7,5	361,4	11,4	—
3 ^m	— 2.500 à 2.599.....	3,2	364,6	3,9	—
	— 3.000 à 3.499.....	0,6	—	—	—
3 ^m 43	— 3.430.....	—	—	—	—
6 ^m 40	— 5.425.....	0,1	365,3	—	—

manque d'intérêt, parce que les entreprises du Rhin supérieur l'ont jusque-là dédaignée : moins cependant, on le verra, qu'on se propose de le faire sur le Rhin franco-allemand, puisque des usines établies, comme à Rheinfelden, pour utiliser 300 mètres cubes d'eau, en emploient aujourd'hui plus de 1.000.

Donc on peut considérer comme pratiquement utilisable un jour toute l'énergie renfermée dans la courbe P A B C D E Q. Resterait à employer la capacité représentée par le triangle F R G représentant un volume annuel voisin de 700 millions de mètres cubes, soit une perte de 2 % tout à fait négligeable pour la force motrice, mais intégralement utilisée pour les besoins d'édilités et les irrigations. Il est certain en outre que les capacités des lacs suisses et de lacs artificiels en construction et en projet viendront encore améliorer la situation.

On ne peut donner comme argument que le débit sur les usines à l'amont de Bâle devra être limité par les installations à 1.000 mètres cubes : à Augst-Wyhlen, on n'emploie même que 700 mètres cubes, n'ayant visé dans cette station double qu'à la production d'une énergie à peu près constante pour les besoins municipaux de la Ville de Bâle et ceux des chemins de fer badois. Mais les installations complémentaires, allongement des usines, substitution de turbines plus fortes, etc... ne se feront que lorsque le placement de l'énergie résiduaire se justifiera. En attendant, pour les installations futures, on compte disposer, par exemple, par exemple à Schwörstadt, 71.000 chevaux pour une puissance maximum possible de 97.000 chevaux ; à Sackingen, 45.000 chevaux sur 56.700 chevaux, etc... à titre provisoire et sans engager l'avenir ; tandis

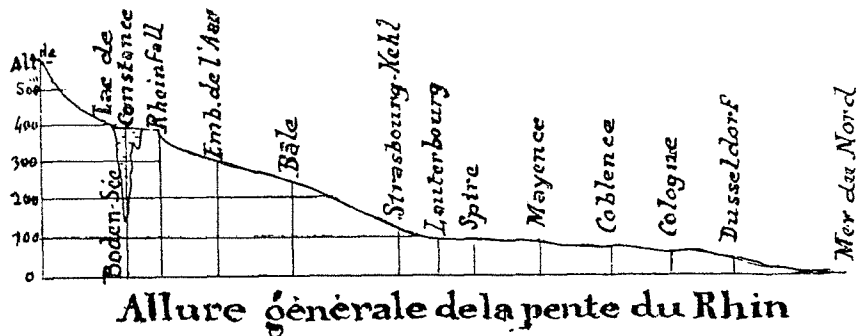


FIG. 3.

qu'on se propose d'installer une force proportionnellement moindre à titre définitif sur la dérivation Huningue à Strasbourg !

Déjà sur le Rhin supérieur, pour la force installée et la puissance globale avec débit maximum de 1.000 mètres cubes, dans les usines futures, on compte avoir comme puissance installée 503.000 chevaux sur celle maximum de 578.500 chevaux disponible. En forçant de 15 % la charge du matériel, on sera donc en mesure, durant les hautes eaux, d'utiliser la part de leur puissance envisagée, — chose défendue au canal.

En somme, pour cette partie du Rhin supérieur à l'aval de l'embouchure de l'Aar, soit sur 63^k4, disposant de 64^m24 de chute brute jusqu'à Bâle, on aura une puissance de première étape installée de 503.000 chevaux, soit de 7.840 chevaux par mètre de chute brute sur une disponibilité de 9.000 chevaux. D'où pour être placé dans les mêmes conditions avec le même débit, pour une différence de niveau de 106 mètres nette, dont le canal d'Alsace doit prendre souci, et non 90^m24, une puissance installée nécessaire de $7.840 \times 106 = 830.000$ chevaux. Or, le rapport administratif passe sous silence la puissance qu'on compte installer, mais on dit que la puissance disponible sera de 721.920 chevaux ; alors que, pour se comparer au Rhin supérieur, ce chiffre devrait être de $9.000 \times 106 = 955.000$ chevaux. Il est donc, par ce fait, déjà de 25 % en infériorité sans tenir compte du débit de tous les affluents de la rive droite dont on peut bénéficier sur le fleuve, ce qui n'est pas possible pour le canal établi sur la rive gauche. Or, ces affluents provenant de la Forêt-Noire, sont de régime jurassique, donc précieux en hiver, en temps d'étiage du fleuve, alors que, sur la rive gauche, l'Ill collige les eaux de tous les affluents venant des Vosges pour les envoyer au fleuve à l'aval de Strasbourg.

ÉTUDE DE L'UTILISATION DE LA PENTE PAR UNE MÉTHODE NOUVELLE, POUVANT ÊTRE GÉNÉRALISÉE

Disons tout d'abord que nous plaçons à la base de notre proposition un approfondissement de 6 mètres par dragage du fleuve à l'aval de chaque barrage, ce dragage diminuant de profondeur à

mesure que les digues s'exhausseront par rapport à la hauteur du fond. La Commission du Rhin, appelée à envisager cette proposition, l'a repoussée sans motif plausible comme on le verra.

Cette disposition a son application tout indiquée pour l'aménagement du Rhône, de l'Isère et de la plupart des cours d'eau à grande pente charriant des alluvions.

L'approfondissement proposé pour le Rhin aura 175 mètres de largeur, et constituera un lit infra-mineur régularisé. Cependant, sa largeur sera égale à celle du débouché de l'ensemble des ouvrages, à l'amont de chaque bief.

Le lit mineur continuera à avoir sa largeur actuelle régularisée de 200 mètres, mais le lit majeur endigué aura une moyenne de largeur qu'on peut, à la faveur d'avantages divers, prévoir de 600 mètres, mais réduire à discrétion, dans la mesure qu'on le voudra, et même, sur certains points, à la largeur actuelle de 200 mètres.

A la faveur de ce grand élargissement, il sera loisible de redresser, dans une certaine mesure, les contours un peu brusques, peu nombreux, il est vrai, sur ce parcours du fleuve.

Les radiers des vannes des barrages étant au niveau de l'approfondissement aval, le fond amont sera raccordé à celui du radier, pour chaque bief, par un dragage approprié. Puis, avec le temps, la circulation de l'eau, surtout à la faveur des chasses de dégrèvement, aura tôt produit la courbe d'équilibre qui fera disparaître le relief du fond à l'aval de chaque fraction du lit mineur (Voir fig. 5).

Notre procédé apporte une innovation dont le principe se justifie aujourd'hui, grâce à la technique moderne. Au lieu de la canalisation timide du fleuve, offerte par un projet antérieur allemand, comportant quatorze barrages et n'utilisant que des chutes de 3 à 4 mètres tout en sacrifiant une bonne part de la pente, afin de laisser, en temps de crues, le fleuve libre dans son état actuel en effaçant au besoin ces barrages, nous traitons le fleuve comme un canal en lui assurant, par un approfondissement et un endiguement raisonnés, amplement la ressource d'écouler les crues maxima sans débordement, de tirer parti de presque toute la pente pour la production de la force motrice, d'avoir une vitesse d'écoulement permettant à la navigation un fonctionnement pratique et économique en tout état du débit ; puis d'avoir l'eau en potentiel sur les digues aux fins d'irrigations pratiques sur les deux rives (1). L'approfondissement, engageant une dépense relativement faible, est le facteur le plus utile, puisque de lui résultera *ad libitum* le faible relief que prendront les digues sur les rives. La largeur générale des retenues que nous proposons d'établir à 600 mètres, soit au triple de la largeur du lit actuel, viendra diminuer de près de moitié la perte en tous temps de la pente générale. En eau moyenne cette économie serait de l'ordre de 0^m60 pour l'ensemble de la longueur de la pente, donc représentant une économie de 1/2 %. D'où un avantage matériel annuel voisin de 2 millions en or gageant sans doute largement déjà sous cette forme la dépense des expropriations.

Pour l'étude de l'utilisation de la pente à l'aide de barrages successifs, prenons, par exemple, un point où actuellement cette pente du lit du fleuve est la plus faible (0^m78 par kilomètre), et voyons la ressource qu'offre le calcul de l'écoulement dans un profil comme celui que nous proposons (fig. 6) : d'après la disposition proposée, les digues auraient, en principe, une hauteur nulle, à l'aval de chaque barrage au-dessus du sol actuel des rives considéré en pente régulière de 0^m78 par kilomètre (2). Supposons les biefs d'une longueur de 10 kilomètres, dont la pente théorique utilisable serait par conséquent, de 7^m80. Grâce à l'approfondissement proposé de 6 mètres à l'aval de chaque barrage, le niveau minimum de la retenue à l'amont serait de 3^m80 plus élevé que le sol naturel des rives. Cependant, on devra se mettre en mesure d'élever ce plan d'eau de 4 mètres éventuellement plus haut pour des raisons diverses (meilleure utilisation de la pente en temps de crue, réserve momentanée dans les biefs, écoulement plus facile des crues, accroissement éventuel du mouillage pour la grande navigation, etc...). Cette hauteur de 4 mètres en plus portera donc sur le couronnement du barrage à un niveau de 7^m80 plus élevé que le sol naturel à l'amont de chaque barrage, soit à la

(1) Le groupe américain qui nous assura un premier concours immédiat, justifié, de 300 millions, à l'occasion de notre demande de concession de l'aménagement total du Rhône, présentée le 30 octobre 1918, n'acceptait que cette solution.

(2) Les levées représentées sur les rives à l'aval des barrages ont surtout un but de commodité pour que ces chaussées, à un niveau moins variable, suivent la pente des rives et se raccordent insensiblement à la hauteur des barrages.

Plan d'ensemble général

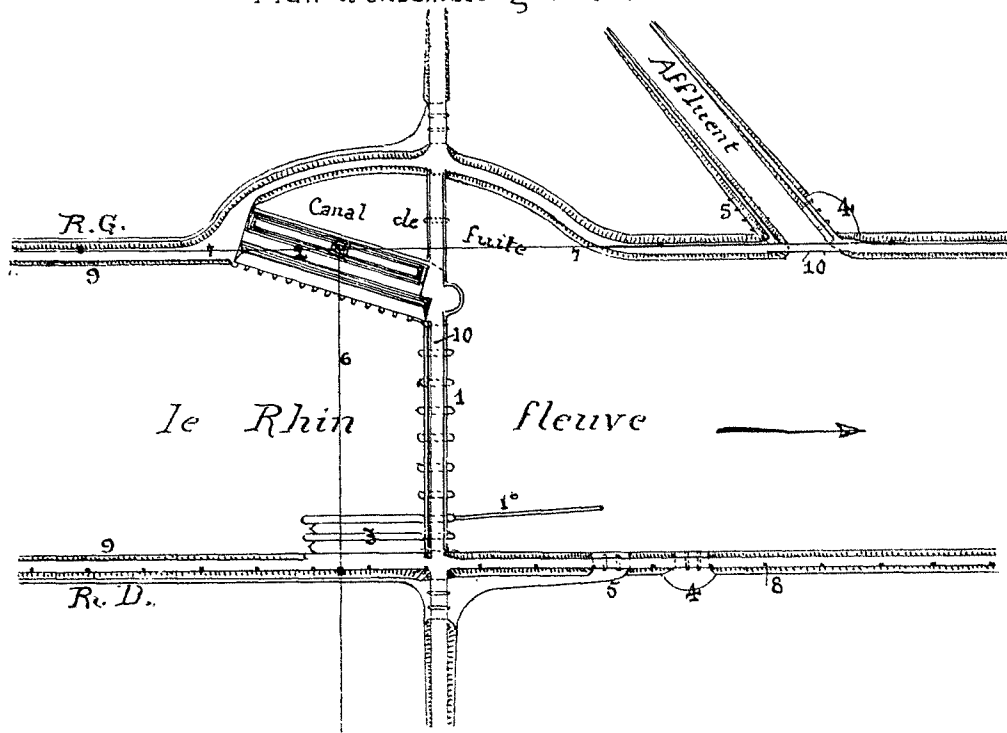


FIG. 4.

Schéma de la disposition à donner aux installations

- 1. Barrage et vannes de décharge système Stonay.
- 1b. Estacade.
- 2. Usine hydro-électrique utilisant 8 à 15 mètres de hauteur de chute et un débit pratique de 300 à 500 mètres cubes à l'étiage et plus de 2.000 mètres cubes en hautes eaux et aux heures de pointe.
- 3. Ecluses jumelles pour la navigation.
- 4. Déversoirs automatiques pour les crues exceptionnelles.
- 5. Reversoirs des eaux latérales de toute nature.
- 6. Ligne de distribution régionale de l'énergie.
- 7. Ligne électrique de raccordement des usines hydro-électriques.
- 8. Ligne de halage électrique double.
- 9. Digues de retenue et routes latérales.
- 10. Ponts carrossables.

Diagramme type

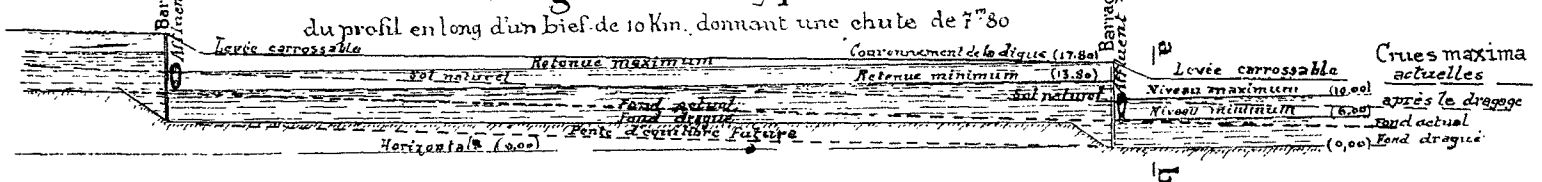


FIG. 5

Profil type suivant ab du fleuve canalisé (Ech. 1/2000)

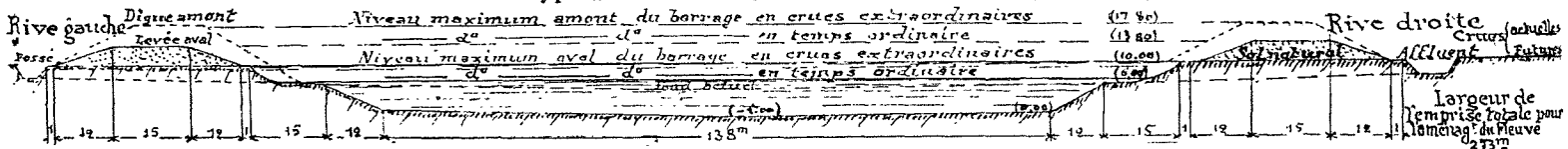


FIG. 6

Profil type du canal proposé

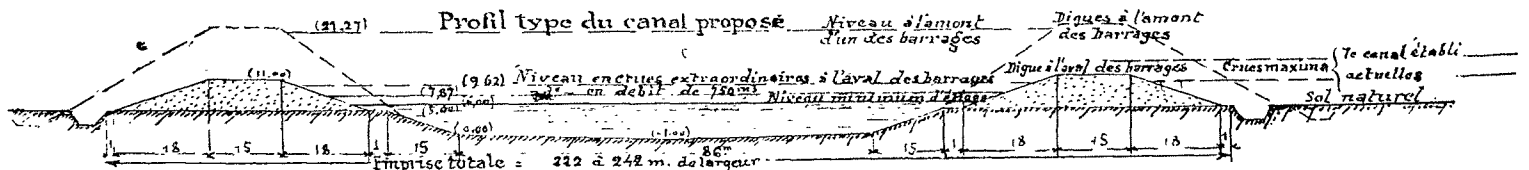


FIG. 7

Diagramme de l'aménagement du Rhin à l'aide de barrages successifs entre Bâle et Strasbourg.

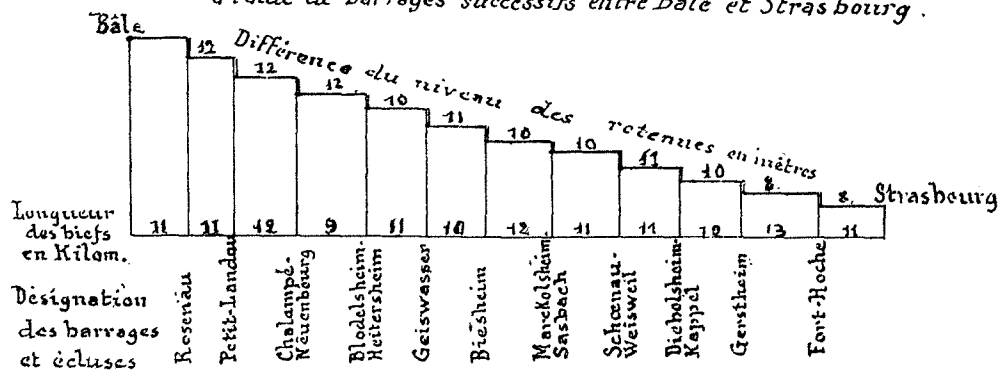


FIG. 13

hauteur maximum de chute envisagée supposée existante encore en temps de crues exceptionnelles, alors que les biefs, vers leur amont non endigué, seront pleins seulement jusqu'au niveau du sol naturel. Toute propagation de la circulation souterraine de l'eau sera empêchée par l'enrobage de l'ensemble de toute la périphérie des biefs à l'aide de palplanches métalliques enfoncées dans le substratum, et en grande partie enrayée par le fossé formant cunette qu'on disposera au bas et à l'extérieur de chaque digue. Ces filtrations ne se justifieront, du reste, qu'au droit de l'aval de chaque bief, si toutefois les moyens employés pour les prévenir sont inefficaces.

Les fossés viendront donner une limite en hauteur à toute action résurgente, et colligeront les eaux de pluie et des petits affluents pour les conduire à l'aval de chaque barrage.

Ajoutons que l'intérêt de ce fossé ne se justifiera presque nulle part, le fleuve étant en grande partie bordé de îlons en assurant amplement l'office.

Examinons quelle doit être la pente à sacrifier pour assurer l'écoulement d'une crue maximum (5.500 mètres cubes) supérieure à la plus élevée, celle du 13 juin 1876, dont le débit fut de 5.415 mètres cubes à la seconde.

Ne considérons d'abord que le profil restreint montré par la figure 6.

La section endiguée, dans ses parties les plus réduites, sera sensiblement un trapèze de

$$S = \left(\frac{209 + 150}{2} \right) \times 14^m50 = 2.600 \text{ mètres carrés ;}$$

le profil mouillé P, de 214 mètres carrés ; d'où le rayon moyen

$$\frac{S}{P} = 12,15$$

Comme la vitesse

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{5.500}{2.600} = 2^m12,$$

la formule

$$V = 56,85 \sqrt{RI} - 0,072$$

donne

$$2,12 = 56,85 \times \sqrt{12,15 \times I} - 0,072 ;$$

soit pour la pente I par mètre, une valeur de 0,0001075. Dans la formule de Tadini, le facteur 56,85 est remplacé par 50 ; mais il résulte des expériences de Bazin, vérifiées sur la Seine et la Saône, que le coefficient à admettre peut être de 55.

Comme on disposera de 7^m80 de pente sur la section théorique de 10 kilomètres envisagée, il restera donc 6^m73 de chute disponible sur cette section. D'où la perte totale, en crues extraordinaires, sur la longueur de 127 kilomètres entre Bâle et Strasbourg, serait de 13^m70, soit 12,8 % de la pente totale. En endiguant le fleuve sur une largeur plus grande on va voir cette perte se réduire à peu de chose. Tandis qu'on a prévu 107 — 90,24 = 16^m76, soit 15,6 % de perte de la pente dans le canal en eaux moyennes, dont on aura encore à retirer l'exhaussement du niveau à l'aval du canal en temps de crues ; soit de 2 à 4 mètres portant la perte à près de 20 %.

On perdra bien moins dans le fleuve, si on tient compte, dans les calculs, de la section moyenne d'écoulement dans chaque bief, au lieu de la section minimum, ce qui compensera très largement le fait de la paroi rugueuse du fond formé de cailloux roulés, mais que des apports moins lourds adouciraient à la faveur d'une circulation moins active. Enfin cette perte sera réduite de moitié, environ, si la largeur des biefs de retenue est portée à 600 mètres en moyenne, comme nous le proposons. D'où une perte, en temps de crues extraordinaires, d'environ le tiers de celle permanente à envisager sur le canal.

Voilà l'éloquence inexorable des chiffres !

Du reste, pourquoi ne pas simplement se rapporter aux résultats vécus offerts par les usines placées à l'amont qui, avec la même eau, le même régime et sensiblement le même débit, accusent des variations de chute, par exemple à Augst-Wyhlen, de 7^m18 à l'étiage, lorsque le niveau de l'eau est au zéro de l'échelle du pont de Bâle ; de 5^m80 en eau moyenne lorsque ce niveau est à 1^m60 et de 4^m29 le niveau de Bâle étant à 3 mètres (1) ?

Mais en se référant au tableau I, ces 3 mètres de crues ne se produisent pas tous les ans. Quant aux variations que nos calculs accusent beaucoup moindres, dans notre évaluation, la chose est due à la section exceptionnelle que nous donnons à l'écoulement à la faveur des dragages allant en profondeur de 6 mètres à zéro dans chaque bief, puis à la surélévation en temps de crues pouvant atteindre 4 mètres au maximum tant à l'amont qu'à l'aval des barrages que permettront les digues prévues, sans arrêter l'entrée des eaux des affluents, comme nous l'avons ménagée vers l'amont de chaque bief. Au besoin, les affluents seront approfondis ou endigués dans une mesure appropriée. Quand l'eau se relèvera à l'aval des barrages de 4 mètres, on fera une retenue équivalente à l'amont ; c'est faute de s'être assuré une telle latitude que les barrages du Rhin supérieur accusent des différences encore très acceptables lors des crues, puisque la perte de charge est alors compensée bien au delà par le débit sur les turbines, chose bien justifiée par le fait que la puissance produite croît avec le débit du fleuve.

Il est indispensable d'assurer la possibilité d'emploi de la plénitude de puissance en hautes eaux aux usines ; un **aménagement copieux et définitif de ce grand fleuve international n'accepte pas de demi-mesure, tant que la dépense à envisager cadre avec la ressource réalisée.**

Nous pouvons tout prévoir pour que la navigation, en temps de crues extraordinaires, ne soit pas gênée par le défaut de tirant d'air sous certains ponts ou viaducs anciens, mais durant les deux ou trois jours de durée de ces crues. Ces ouvrages seront au besoin relevés, dans la mesure du nécessaire, bien que la chose ne paraisse nulle part bien justifiée. Dans l'état de danger où serait alors le canal, privé de ses relations au fleuve aux deux extrémités, ses ports alors inondés, etc..., sa navigation serait bien autrement paralysée !

Ajoutons que l'accroissement de la retenue dans les grands lacs suisses fera certainement disparaître pour l'avenir toute chance de débit même voisin de 4.000 mètres cubes ; d'où la certitude d'avoir un endiguement suffisant en le réalisant suivant nos indications, pour qu'on n'ait jamais plus d'inondations dans les vals du Rhin. Le fait de préserver des plaines immenses et de nombreuses cités des inondations périodiques vaut bien quelques sacrifices !

MISE EN VALEUR DE LA FORCE MOTRICE

En accordant, même au projet par dérivation, le bénéfice de la réserve des grands lacs suisses dans la mesure où il pourra en tirer parti, on voit qu'avec le débit de 815 mètres cubes maximum envisagé et 500 mètres cubes minimum, le volume d'eau utilisable par an est représenté sur le diagramme (fig. 1) par la courbe P A N E Q dont l'expression est donnée sensiblement par le double trapèze P A N S représentant un cube annuel de 22 milliards de mètres cubes au lieu de 35 milliards que nous justifions au cours de cette étude comme utilisables par la canalisation du fleuve, les irrigations comprises, soit les 63/100, et, de ce fait, une perte de plus d'un tiers de l'énergie totale, sans tenir compte de la meilleure utilisation de la pente à obtenir de l'aménagement par barrages que nous allons pleinement justifier.

Par rapport à notre évaluation portée plus loin de la production d'énergie de près de 8 milliards et demi de kilowatts-heure pour l'ensemble du fleuve canalisé de Bâle à Strasbourg, la production sur le canal ne serait donc, de ce chef, que les 22/35 de ce chiffre, soit 5 milliards 350 millions de kilowatts-heure par an, avec un déchet du tiers.

Mais la perte de charge dans le canal par rapport à celle à prévoir dans le fleuve rend la perte bien plus élevée.

En calculant un écoulement moyen pris en T dans la figure 1, avec un débit de 750 mètres cubes, pour une pente moyenne de $\frac{90,240}{127,000} = 0,0007$ par mètre dans le canal, on trouve, pour la perte de charge en eaux moyennes, le profil mouillé P étant sensiblement de 128 mètres ; la section supposée de 680 mètres carrés, mettant la vitesse à 1^m20 ; d'où le rayon moyen R = 5^m30. Comme la vitesse $v = 1^m20$, la pente calculée est de 0,000078 par mètre. D'où une perte sur la pente de $0,078 \times 127 = 10$ mètres en chiffre rond sur la parcours total de Bâle à Strasbourg en temps du débit moyennement utilisé durant deux cents jours par an. Or, cette perte de charge est acceptée de plus de 16 mètres dans le projet de canal. Dans ces conditions, le produit en kilowatts-heure brut se trouverait réduit de 15 % rien que par la perte de charge !

(1) Page 20. *Schiffbarmachung des Rheins von Basel bis in den Bodensee*, von BAURAT, J. Altmayer, Karlsruhe.

En faisant le même calcul pour voir ce qui se produit dans le fleuve canalisé avec un débit moyen, le plus soutenu par an de 1.150 mètres cubes, donc presque moitié plus grand que le maximum prévu dans le canal, sans nous prévaloir tout d'abord de l'avantage de la moyenne de la section des biefs, on aura $S = 1.820$ mètres carrés et $P = 200$ mètres. D'où $V = 0^m632$ et, pour la pente, $I = 0^m0000106$ par mètre, ce qui fait une perte de charge de 1^m35 au total dans le fleuve, durant les eaux moyennes, entre Bâle et Strasbourg, au lieu de 16 mètres dans le canal, alors que notre moyen fournira une énergie déjà beaucoup plus grande que le débit utilisé.

En nous prévalant du rayon moyen qu'on pourrait prendre au milieu de la longueur du bief, dans une largeur générale de la retenue endiguée de 600 mètres, au lieu de sa partie la moins profonde et la moins large, la perte de charge serait bien inférieure à 1 % au lieu de 15 % dans le canal ! En effet, si, en dehors de la section envisagée minimum, on considère celle donnant un écoulement appréciable de l'eau sur le reste de la surface endiguée de 600 mètres de largeur, cette surface, de 400 mètres de largeur, aura une profondeur moyenne générale de 6 mètres au minimum. En lui appliquant la formule de Bazin, pour la pente envisagée de $I = 0,0000106$, on a $S = 6 \times 400 = 2.400$ mètres carrés, $P = 415$ environ, d'où $R = 5,77$. De ces facteurs résultera une vitesse d'écoulement de 0^m43 qui, pour la section supplémentaire envisagée de 2.400 mètres carrés, assurerait un débit de 1.030 mètres cubes en plus du débit de 1.150 mètres supputé dans la section minimum proposée en temps de débit moyen.

Si nous écartons les cas de débits annuels les plus élevés durant quatre jours, nous ne sommes plus en présence que d'un débit de 2.500 mètres cubes, qui, au point de vue de la perte de charge, avec S réduit à 2.600 mètres carrés, donne pour la pente $I = 0,0000199$. D'où une perte totale pour tout le parcours de 2^m54 et de 0^m20 seulement par bief théorique de 10 kilomètres, et avec la largeur portée à 600 mètres, la perte totale ramenée à 1^m40 au plus, et à 0^m11 par bief théorique de 10 kilomètres.

En nous plaçant dans l'éventualité du débit extraordinaire de 3.500 mètres cubes qu'on ne voit pas tous les cinq ans, on trouve $I = 0,0000413$ par mètre, soit 5^m25 pour le parcours total de Bâle à Strasbourg, soit 0^m48 en moyenne, de perte de chute pour chaque barrage, et avec la surlargeur de 600 mètres, cette perte de pente réduite à moins de 3 mètres, soit 0^m27 en moyenne pour chaque bief.

Tout cela sera subordonné, nous l'avons dit, à la hauteur des digues qui, combinée avec l'approfondissement, permettra une variation de hauteur voisine de 4 mètres de la retenue à l'amont, en même temps qu'une majoration égale du plan d'eau à l'aval de chaque barrage.

Si, dans les rapports administratifs, on ne fait état que de 90^m24 de chute totale sur une différence de niveau qu'on avoue pouvoir varier de 107 mètres à 104^m50 , étant donnée la perte de charge totale que nous justifions sur l'ensemble des barrages, nous sommes fondé de prendre le chiffre de 106 mètres comme celui de la pente totale que nous utilisons, le principe des grands biefs étant admis. En outre, puisque les majorations du plan d'eau, en temps de crues, sont subies sensiblement à l'amont comme à l'aval de nos ouvrages de décharge, nous n'avons pas à nous préoccuper d'un facteur variable de hauteur surtout à l'aval comme dans la solution par dérivation.

D'où la justification possible ci-après de la production de la force motrice dans les deux cas.

Avec le débit global de 22 milliards de mètres cubes supposé utilisable par an par le canal, et un potentiel total, seulement conforme à l'indication du rapport, de 90^m24 , on peut produire :

$$\frac{22.000.000.000 \times 90,24 \times 1.000 \times 0,85 \times 0,95}{102 \times 3.600} = 4.350.000.000$$

de kilowatts-heure,

en admettant 95 % du rendement sur les génératrices électriques et 85 % sur les turbines de hauteur de chute moyenne.

Mais tirant parti de l'emploi de 35 milliards de mètres cubes d'eau en tenant compte modérément du débit des affluents de la rive droite, sur les turbines avec notre projet comportant l'utilisation d'une chute totale moyenne de 106 mètres, et en employant les mêmes facteurs de rendement, nous produirons, en aménageant le fleuve par barrages :

$$\frac{35.000.000.000 \times 106 \times 1.000 \times 0,85 \times 0,95}{102 \times 3.600} = 8,2 \text{ milliards de kilowatts-heure}$$

par an, soit 89 % de plus d'utilisation de l'énergie de l'eau que par le canal avec les réserves des lacs suisses supposées réalisées, l'eau résiduaire utilisée en plus par les irrigations.

Mais dans les termes stricts du projet par dérivation, le rendement de 75 % proposé, et sans la réserve due à la régularisation des lacs, l'équation devient, pour 21 milliards de mètres cubes d'eau qu'on prévoit utiliser :

$$\frac{21.000.000.000 \times 90,24 \times 1.000 \times 0,75}{102 \times 3.600} = 3.870.000.000 \text{ kilow.-h.}$$

par an. Comment alors produire 5 milliards 600 millions de kilowatts-heure comme l'invoquent les rapports administratifs ?

On ne produirait alors que les 45 % de l'énergie que nous estimons récupérable pratiquement sur le Rhin entre Bâle et Strasbourg. Comment parler alors de 800.000 chevaux quand, à l'étiage, avec 90^m24 de chute indiquée, mais le débit réduit à 250 mètres cubes, en créant la situation abusive d'assécher le fleuve, il ne s'agira que de

$$\frac{90,24 \times 250.000 \times 0,85 \times 0,95}{75} = 242.000 \text{ chevaux électriques,}$$

soit 175.000 kilowatts pour tout le Rhin ; et en temps même de débit maximum, où le volume d'eau employé sera de 815 mètres cubes sur le canal, la force produite serait de

$$\frac{90,24 \times 815.000 \times 0,85 \times 0,95}{75} = 790.000 \text{ chevaux électriques,}$$

soit 572.000 kilowatts.

Que la Société des Nations n'accepte pas la réduction à 50 mètres cubes du débit à laisser en étiage dans le fleuve : les 175.000 kilowatts d'étiage seront réduits alors peut-être à moins de 100.000 !

Mais là encore ne se limite pas la perte : l'utilisation des eaux des affluents de la R. D., défendue au canal, offre une ressource très appréciable : la surface intéressée à la précipitation de 1^m60 d'eau par an représente 6.350 kilomètres carrés environ, et un volume de 10 milliards de mètres cubes, soit les 2/7 du débit dont nous faisons état, venant de Bâle, ne permettant cependant qu'un potentiel d'utilisation moyen de 53 mètres entre Bâle et Strasbourg. C'est donc une ressource de 1 milliard 100 millions de kilowatts-heure à ajouter à celle supputée de 8 milliards 200 millions, avec l'avantage très précieux que cette énergie est de régime d'hiver. Si on considère qu'en cette saison cette ressource d'eau est le double de sa moyenne annuelle, elle assure au fleuve un appoint de 189.000 kilowatts de puissance, alors que cette dernière est réduite à 257.000 kilowatts quand le débit d'étiage descend à 300 mètres cubes. D'où une majoration de la puissance d'étiage de 73,5 %. Cependant le rapport de la Commission déclare ce concours insignifiant !

Dans une certaine mesure, on peut, en outre, recourir à la ressource suivante : qu'on suppose une canalisation appropriée de 15 kilomètres environ de longueur allant au niveau, de l'Ill prise à l'aval de Mulhouse, à la retenue du deuxième barrage projeté à Petit-Landau ; l'hiver, l'eau des crues de l'Ill sera écoulee directement au fleuve à l'étiage, en lui apportant un contingent d'énergie, alors que, l'été, l'eau abondante du fleuve sera cédée à l'Ill pour le grand bien de ses irrigations. Il y a donc une ressource certaine à incorporer, venant du régime jurassique, pouvant, par le moyen présenté, presque doubler le débit d'énergie d'étiage du fleuve, et justifier au moins à 66 % l'infériorité de la solution par dérivation sur celle de la canalisation du fleuve.

En résumé, en n'utilisant que les 22/35 de l'eau, la perte dans la solution par canal sera de ce fait de 37 % supérieure à celle offerte par la canalisation du fleuve : de plus, la perte triple par infiltration représentant un déchet de 10 % de l'eau dérivée, soit 6,3 % de l'eau totale ; enfin 14 % de perte de charge dans le canal, soit 8,8 % de l'énergie totale. D'où pour l'ensemble 52 % de perte de rendement sur celui de la canalisation du fleuve.

CONSÉQUENCES DE LA CANALISATION DU FLEUVE A LA FAVEUR

D'UN APPROFONDISSEMENT GÉNÉRAL DU LIT

Depuis que le lit majeur, toujours divaguant sur de vastes surfaces, a vu son lit mineur limité entre des levées, puis contraint de s'écouler entre un régime d'épis, on sait que le fond gagne en profondeur près de 10 centimètres par an dans les parties à grande pente, alors que des atterrissements se produisent à l'aval. La pente d'équilibre devra s'établir un jour, mais le résultat en sera

une gorge, partant de la barre d'Istein, d'autant plus profonde qu'on aura à équilibrer le fond du lit sur un parcours plus grand. Pour enrayer en pays de montagne de tels approfondissements, on établit des marches d'escaliers en boullins ou en pierres formant autant d'obstacles à l'entraînement du fond ; voilà déjà une raison pour aménager plus en grand le fleuve à l'aide de barrages successifs. Comme il serait extrêmement coûteux de rapprocher les barrages aux fins d'empêcher tout affouillement ultérieur, ne convient-il pas mieux de prévenir ces affouillements en en faisant disparaître en partie la cause, et en procédant, dès l'établissement des barrages, à un dragage en grand de toutes les parties du lit mineur susceptibles d'être entraînées ? On limitera ainsi la longueur des fractions à équilibrer, en améliorant le mouillage.

Mais le Rhin ne charrie presque que les éléments de son propre fond, n'ayant pas d'affluents très alluvieux à l'aval du lac de Constance jusqu'à Strasbourg. Donc ce travail de dégravage en grand ne sera plus à recommencer, pas plus que l'enlèvement des atterrissements. D'où, à notre avis, en divisant la pente en biefs de 10 à 12 kilomètres entre les barrages, la pente d'équilibre sera en fait facilement réalisée à la faveur d'un dragage général du lit mineur d'une profondeur atteignant 5 à 6 mètres tout au plus à l'amont de chaque bief, suivant la profondeur des rives, et venant finir à rien vers leur extrémité aval.

L'ordre de la dépense spéciale à envisager de ce chef n'est pas excessif : l'approfondissement du lit mineur à effectuer seulement sur une moyenne de 160 mètres de largeur avec 5 ou 6 mètres de profondeur maximum représentera un curage moyen de 2^m50 pour la longueur de chaque bief ; d'où, en fait, pour toute la longueur envisagée du fleuve un volume de 50 à 60 millions de mètres cubes à draguer.

En employant des engins de grandes dimensions pouvant enlever quotidiennement au moins 3.000 mètres cubes, comme ce fut le cas sur certains canaux du Nord, ce sera, pour une vingtaine de dragues, dont deux par bief, un travail à accomplir en trois ans, au plus ; soit le temps nécessaire à l'exécution des onze barrages proposés, si on veut bien les entreprendre tous à la fois comme nous le conseillons. Pour ce qui regarde l'évacuation des déblais, une grande partie, la moitié au moins, sera utilisée à l'exécution des digues et le surplus à exhausser certains terrains marécageux et les chaussées aboutissant aux ponts des barrages. D'où une dépense à comprendre sans peine dans celles de l'aménagement de la force motrice.

Si cette dépense, à raison de 1 fr. 25 en or au maximum par mètre cube de fouille, représente 75 millions de francs d'avant-guerre, cette somme à répartir sur les 8,2 milliards au minimum de kilowatts-heure qu'on peut demander à l'aménagement proposé seulement jusqu'à Strasbourg, met la dépense en capital à 0 fr. 009 environ par kilowatt-heure installé et à 0 fr. 00065 par kilowatt-heure vendu ! Nous détruisons ainsi la légende de l'énorme dépense qu'un tel approfondissement comporte !

Est-ce que le canal, pour une largeur moyenne de 105 mètres et 8 mètres de profondeur, ne va pas représenter une fouille supérieure à celle d'approfondissement du fleuve, et à un prix à sec, avec roulage sur Decauville, majoré de plus de moitié ; soit pour la fouille seule du canal peut-être 200 millions en or ; puis des digues plus coûteuses pour plusieurs raisons, expropriations, cube, étanchement, etc. ?

Et les voies et cours d'eau à dériver, les ponts à multiplier, etc. ?

Mais là ne se limite pas l'intérêt de l'approfondissement général proposé : une raison encore plus préoccupante milite en sa faveur.

On sait que le Rhin coule à la surface d'un lit d'alluvions d'une très grande porosité constitué, en grande partie, de galets et de sable grossier. Lors de l'exécution du canal du Rhône au Rhin, on rencontra de très grandes difficultés à rendre étanche la cuvette du canal aux abords du fleuve. Cette complication n'a pas échappé à l'administration qui, pour le canal du Rhin, demande qu'on prévoie le revêtement du plafond de ce canal sur toute sa largeur et ses faces, soit 150 mètres au moins, alors que les auteurs du projet estimaient devoir, comme à Jonage, se contenter de rendre imperméable la section des digues.

Si l'étanchéité du fond doit être demandée à un colmatage général à l'aide d'un corroi d'argile ou d'un bétonnement, au lieu d'une telle solution pour aménager le lit du fleuve, on peut estimer préférable de l'approfondir, pour descendre les biefs à un niveau engageant une moindre pression latérale de l'eau sur des digues moins élevées, la dépense des digues se confondant en partie avec celle exposée plus haut.

En généralisant l'enfoncement périphérique de palplanches métalliques, dont le rôle est très économique, comme on le verra, chaque bief, en comprenant la fondation du barrage, sera mis ainsi à l'état de cuvette étanche. Grâce à la méthode de l'approfondissement proposé, on pourra, dans la canalisation du fleuve, avoir, si on le désire, sensiblement le même nombre de biefs que dans l'aménagement par dérivation. L'étude générale préalable nous fixera à ce propos. Mais le canal demandera des expropriations, et, au lieu d'apporter le concours de nouveaux ponts que le fleuve recevra sur les barrages, on ne fera, au contraire, que rendre l'accès difficile à toute une rive du fleuve. Enfin, il ne pourra plus être question d'établir des ports, des irrigations, etc..., sur la rive droite du fleuve : cause de perpétuels ennuis qu'on se créera bien volontairement du côté badois, où les questions d'intérêt local auront, comme toujours, plus d'acuité que celles d'un caractère international.

EXEMPLE DE JONAGE COMME DÉRIVATION DE FLEUVE

Mais pourquoi le capital investi par kilowatt-heure installé par la méthode de la dérivation serait-il bien moins élevé qu'il le fut à Jonage vers Lyon en 1895-1898, alors qu'aujourd'hui tout a au moins quadruplé de prix ? Pour la canalisation du fleuve, nous voyons en exemple que le capital investi fut de 0 fr. 16 par kilowatt-heure installé aux usines du barrage d'Augst-Wyhlen à l'amont de Bâle, établies sur le Rhin en 1913, tout en comprenant la complication de deux usines et la dépense de l'établissement de l'écluse. Aujourd'hui, on voit ce capital investi par kilowatt-heure être de 0 fr. 50 au barrage-usine de Pougny-Chancy sur le Rhône à la frontière franco-suisse, ce qui fut justifié par le renchérissement au triple au moment où les travaux furent entrepris. Or, à Jonage, il y a trente ans, le capital investi par kilowatt-heure fut de 1 franc. Même si on devait trouver aux abords du Rhin le possibilité de réaliser 12 mètres de chute dans des conditions aussi favorables qu'à Lyon, le capital installations par kilowatt-heure ne serait actuellement pas moindre de 4 francs. Mais les frais du canal d'aménagé à Jonage furent insignifiants de plus, on n'eut pas à colmater le fond du canal, grâce à l'étanchéité du sol. D'où la certitude de dépasser au delà de 5 francs la mise de fonds par kilowatt-heure installé sur toutes dérivations aux abords du Rhin. D'autant plus qu'à Jonage on a limité la récupération de l'énergie à celle constante à demander au débit d'étiage, et que, sur le canal du Rhin, on compte utiliser de l'énergie moyenne qui fera défaut quatre mois de l'année, tout en ne tirant aucun parti des eaux de crues ; d'où une dépense stricte en rapport avec la production constante à Lyon, tandis que sur le canal du Rhin, des unités inconstantes dont les frais seront une charge pour les unités permanentes pendant leur chômage, et une majoration du prix indiqué plus haut.

La navigation vers Bâle étant d'un faible intérêt et les irrigations ne pouvant assurer des fiscalités importantes, le produit de la force motrice devra, par conséquent, couvrir presque tous les frais. En estimant le kilowatt-heure à un minimum de 10 % du capital investi, il coûtera donc 0 fr. 50 comme production. Et c'est dans de telles conditions qu'on voudra, avec les forces du Rhin, concurrencer l'énergie thermique qui coûte 0 fr. 15 ! C'est un défi au bon sens !

On ne peut donc pas aller avec plus de certitude vers un échec financier qu'en persistant dans cette manière de voir : nos finances seraient une fois de plus compromises, puisqu'on devra alors liquider la force produite tout au plus au tiers de son prix de revient ! car c'est une utopie pure de penser faire supporter une partie de la charge par la navigation et les irrigations pour l'une ou l'autre solution.

Grâce à notre méthode d'aménagement, il n'y a rien à retenir de l'allusion faite dans l'étude administrative, à l'obligation d'effacer ces barrages en temps de crues, puisqu'ils ne perdraient, en temps de hautes eaux ordinaires, à peine chacun moins de 0^m50 en moyenne sur 8 à 13 mètres de hauteur de leur retenue individuelle grâce aux raisons invoquées plus haut. On n'en est plus aux barrages qui s'effacent puisque au contraire, les vannes Stonay, aujourd'hui d'un emploi général, se soulèvent strictement dans la mesure nécessaire en quelques minutes, au lieu de la lente manœuvre souvent rendue impossible (Suresnes en 1910) par la surprise pour les autres systèmes de barrage mobile. Nous ne pensons pas qu'on persiste dans l'intention d'effacer le barrage

d'Huningue, dès que les crues se montreront. Le 10 janvier 1910, où une crue subite de l'Arve donna au Rhône à Chèvres un débit inconnu jusque-là, la levée des vannes ne fut que des trois cinquièmes de leur hauteur au barrage, et la hauteur de chute, largement compensée par une majoration du débit, fut réduite de moitié environ durant une journée sans que le service de la force motrice ait eu à en souffrir.

PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

Le débordement étant en principe à tout jamais empêchés, la loi des fiscalités pour assèchements s'appliquera, aidée d'autres ressources, telles que l'économie de la pente, la pisciculture, les chantiers maritimes et fluviaux, etc., qui compenseront au delà les frais d'expropriations, même dans le cas où on réalisera, comme nous le proposons, des biefs de 600 mètres de largeur moyenne pour chaque retenue.

RÉALISATION RAPIDE ET ÉCONOMIQUE DES TRAVAUX

La technique moderne offre des ressources précieuses à cet égard :

1° Plus de sondages tubés, mais des vieux rails enfoncés au mouton pour reconnaître la consistance du fond ;

2° Accroissement de cette consistance aux points voulus en pratiquant en grand des injections de ciment d'autant plus efficaces que le fond est de nature poreuse, comme le cas se présente dans le substratum qui nous intéresse formé de cailloux roulés et de sable ;

3° Dans de telles conditions, limitation de la largeur des semelles à l'aide de rails, de pilots en ciment armé, pieux à vis et de palplanches métalliques amovibles enfoncés par exemple à 5 mètres plus bas que le fond à draguer ; injections consécutives, puis même sans batardeau ni caisson, immersion par un procédé que nous avons étudié (l'auto-plongeur) d'un béton consistant assurant une solidité parfaite aux massifs ainsi délimités sur lesquels on élèvera la superstructure des bajoyers, piles, estacades, etc... ;

4° Pour prévenir les filtrations souterraines importantes, on établira, comme garde-radier, tant à l'amont des ouvrages qu'à l'aval du radier de 20 mètres de largeur à réaliser à la suite des ouvrages de décharge, un masque en palplanches métalliques, jointives, d'un système connu, enfoncées au mouton (fig. 15) ; ou simplement on effectuera une ou deux lignes transversales d'injections de ciment, à l'aide d'un pieu à vis tubulaire, dont le principe fut jugé digne d'intérêt dans le rapport de l'éminent et regretté professeur Broca au Conseil supérieur des Inventions au nombre de ses conclusions favorables à l'adoption de notre projet d'aménagement du Rhin. Cette méthode montre tout particulièrement son avantage pour étancher les retenues dans la masse des digues, mais devant atteindre plus de profondeur, comme garde-radier, dans le lit ;

5° Le radier des ouvrages de décharge sera réalisé par une surface cimentée entre les piles, puis, à l'aval, par un platelage en sapines fixées sur des traverses scellées sur un fond consolidé au besoin par des injections comme nous l'avons dit. Ces plate-lages à l'abri de l'air résistent plus longtemps à l'action érodante du passage des alluvions et à des causes diverses d'altération, que les revêtements coûteux souvent employés ;

6° On procédera d'abord à l'enfoncement des palplanches métalliques sur le tracé des digues, comme nous l'avons dit. Puis le dragage général réalisé préalablement comme nous l'avons proposé dans le lit, les digues seront établies en même temps ve c tout le soin que doit comporter leur étanchéité obtenue :

1° soit par la méthode préconisée par M. l'inspecteur général Galliot, des palplanches en madriers, enfoncées puis remplacées, à mesure de leur soulèvement, par du béton comprimé, cette application se superposant à mesure de l'élévation du remblai ; 2° par toute autre méthode économique notamment par un ou deux masques formés par des injections de ciment, l'édification à mesure d'un masque formé de dalles en sidéro-ciment, etc.

Dans ces conditions, les travaux coûteux en caissons perdus seront supprimés, et ceux à l'aide de caissons amovibles, réduits à des cas de revêtements superficiels sous l'eau ;

7° Si on a à faire disparaître des seuils comme celui de la barre d'Istein pour obtenir la profondeur prévue, on emploiera au besoin la méthode du poinçon qui, dans un calcaire analogue, dans le port de Bleyth, a permis d'effectuer des déroctages sur la base de 1 fr. 50 le mètre cube ;

8° Ce ne seront pas les premiers barrages établis sur des fonds d'alluvions de même nature (Voir la basse Isère, le Drac, Pougn-Chancy, etc).

Puis si on juge possible le barrage de dérivation à l'amont de Kimbs, pourquoi pas les autres ?

Enfin le travail mécanique sous toutes ses formes, dragages à la chaîne, suceuses, bennes ou pelles preneuses, hersages, etc. ; les transports et dépôts sur rives ou en remblais, l'enfoncement des pilots et palplanches métalliques et des tubes à vis d'injection, la préparation des bétons et mortiers, leur immersion, etc..., permettront d'avoir une main-d'œuvre relativement réduite et des prix de revient acceptables pour la réalisation de l'œuvre avec ensemble sur tous les points à la fois ;

9° Abandon des méthodes surannées comportant l'emploi de matériaux hétérogènes. pierre de taille, moellons, béton, etc., sujets à dislocations et fuites, toujours en défaut, difficiles à réparer, et demandant leur stabilité discutable à leur masse. Le ciment armé, au contraire, offre une ressource d'économie, de rapidité d'exécution, de jonction solide et très étanche des assemblages, de consistance raisonnée et immuable de toutes les parties. On réalisera, par ce moyen, dans des cales de radoub, au besoin, les éléments complets des bajoyers, des piles et radiers des vannes : l'ensemble, si l'on veut, de sas complets des écluses. etc. Ces éléments comporteront, sous les points utiles de leur base, des chambres pour le travail à air comprimé qui, du reste, ne se justifiera qu'à une profondeur relativement faible, les étanchements de circulation souterraine devant être généralisés à l'aide de palplanches métalliques très jointives. Puis les éléments seront mis à flot, supportés au besoin par deux allèges, et conduits à leur place pour y être immergés bien plus facilement qu'on ne pratiqua, dans la Seine, l'échouement des caissons formant des éléments complets du passage sous-fluvial du Métropolitain à Paris.

L'étanchement sous les digues et dans le lit ne semble pouvoir être envisagé économiquement par aucun autre moyen que par les palplanches métalliques, les rives étant une suite de lagunes à peu près continue. Il se pourra même qu'on ait à pousser plus bas que 5 mètres en certains endroits l'interception de toute circulation souterraine. Cependant, à partir de la rencontre de bancs d'argile et de masses arénacées mêlées d'argile les rendant compactes comme on l'a reconnu à la profondeur que nous envisageons, le masque sera privé d'intérêt : nous l'emploierons peu ou prou, voulant ne laisser place à aucune surprise pour l'avenir au sujet des sous-pressions et des *renards* sous les digues.

Enfin, disons que, si ces diverses ressources ont leur emploi plus ou moins consacré par la pratique, tous les esprits avisés leur feront crédit. Pour les digues, on objectera qu'il n'est pas d'usage de tenir ainsi en permanence le flot des fleuves : on l'admet bien pour celui des canaux à des hauteurs plus élevées et des distances souvent plus longues. Nous disons plus loin comment devront se comporter les digues.

(A suivre).