

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Faculté des Sciences Appliquées

Ferdinand CAMPUS

Professeur ordinaire à l'Université de Liège

COURS D'
HYDRAULIQUE APPLIQUÉE
FLUVIALE ET MARITIME

Fascicule IV.

5^{me} Section : **Aménagement des cours supérieur et moyen
des cours d'eau naturels.**

1962

Université de Liège
BST - Sciences Appliquées et Mécanique
1, Chemin des Chevreuils; B-4000
B-4000 LIEGE

Copyright 1961 by F. Campus.

Tous droits de reproduction et de traduction réservés.

Reproduction et traduction même partielles ne sont permises qu'avec autorisation écrite de l'auteur.

SOCIÉTÉ COOPÉRATIVE DE L'A. E. E. S.

9, rue Sœurs de Hasque, LIÈGE

5° SECTION

REGULARISATION ET AMENAGEMENT DES PARTIES
SUPERIEURES ET MOYENNES
DES COURS D'EAU NATURELS

CHAPITRE XIX

ETUDE GENERALE DES EFFETS DES TRAVAUX AUX COURS D'EAU NATURELS

1.- OBJETS ET NATURES DES TRAVAUX

A l'état tout-à-fait naturel, c'est-à-dire sauvage, les cours d'eau présentent de nombreuses irrégularités morphologiques : bras multiples et divagants, méandres, lagunes, chutes, rapides, gorges, etc... Les formes des lits sont souvent très mobiles; les chenaux subissent parfois des déplacements très importants dans des laps de temps assez courts, comme l'établissent des photographies aériennes périodiques. D'autre part, les conditions hydrologiques peuvent aussi être très variables et irrégulières, en rapport avec les circonstances climatiques principalement, et aussi avec les caractères hydrographiques, topographiques et géologiques.

Comme les cours d'eau ont toujours exercé, comme la mer et les lacs, une grande attraction sur les collectivités humaines, en raison des avantages qu'ils peuvent présenter pour leurs activités, les populations riveraines ont éprouvé de graves préjudices des calamités provenant des inondations désastreuses dues aux grandes crues, des divagations catastrophiques des chenaux, enfin aussi des conséquences moins graves mais cependant dommageables du manque d'eau en période d'étiage, de plus en plus sensibles au fur et à mesure que le développement social, économique et politique de ces populations prenait plus d'ampleur, souvent favorisé par l'utilisation des cours d'eau. Ceux-ci sont en effet propices à beaucoup d'activités humaines : à l'agriculture, à la pêche, à l'industrie, au commerce par le transport, enfin aussi à la défense.

Aussi, au fur et à mesure de leur développement et à une allure croissante, les populations riveraines en développement ont-elles cherché à parer par des travaux appropriés aux risques et aux inconvénients de la sauvagerie des cours d'eau naturels.

Le nom le plus général que l'on puisse donner à ces travaux est celui de régularisation. Les premières mesures à prendre en général étaient celles de ménager aux rivières un cours plus ou moins régulier par l'atténuation ou la suppression des irrégularités. Une des dispositions les plus fréquentes sous ce rapport consiste dans la suppression de certains bras du cours d'eau (appelés souvent faux-bras) et la concentration des eaux dans un lit unique. Les figures 1, 2 et 3 montrent l'état des cours d'eau qui arrosent la ville de Liège, la Meuse, l'Ourthe et la Vesdre (sans parler de ceux de moindre importance, tels que la Légia) respectivement du 15^e au 18^e siècle, vers 1830 et vers 1930. Ces régularisations sont presque nécessairement accompagnées de fixation du lit ménagé au cours d'eau, afin d'empêcher sa divagation ultérieure.

Une conséquence souvent très importante de ces régularisations est la récupération de terrains enlevés au cours d'eau, mais de grande valeur, en raison du voisinage du cours d'eau, pour l'agriculture, l'industrie, les

communications et l'urbanisme. (Par exemple, à Liège, de nombreuses voies urbaines, de dimension diverses, mais toutes de grande importance, sont situées à l'emplacement d'anciens chenaux comblés).

Lorsque ces régularisations se situaient, comme c'était le plus souvent le cas, dans des régions très peuplées et actives, elles s'accompagnaient parfois, même souvent, de tentatives de protection contre les inondations, résultat beaucoup plus difficile à atteindre. Les inondations pouvaient en effet être aggravées par suite des régularisations lorsque celles-ci entravaient l'écoulement des crues au lieu de les faciliter, ce qui était le plus souvent la conséquence de la concentration des eaux dans un lit unique insuffisant.

Sous ce rapport, les régularisations des cours d'eau peuvent se distinguer, par leurs effets, en deux catégories.

Les corrections ou mieux encore, les améliorations facilitent l'écoulement des eaux, plus ou moins selon l'état des eaux. Les resserrements, par contre, que l'on a parfois aussi considérés comme des corrections, ont un effet inverse et entravent plus ou moins l'écoulement des eaux, selon leur état. (Pl. 17, fig. 3, a).

Les travaux précédemment définis ont donc essentiellement et initialement des buts de protection et de prévention de calamités, avec des avantages secondaires, tels que les récupérations de terrains utilisables. Après ce stade premier viennent des objets plus actifs et plus ambitieux, visant à tirer de plus grands avantages, services et bénéfiques du cours d'eau, par des travaux plus évolués, plus raffinés, plus précis et plus particuliers; on leur donne le nom d'aménagements.

Le type le plus caractéristique et peut-être le plus difficile de ces aménagements vise à réaliser ou à améliorer la navigabilité; il est relativement moderne.

D'autres aménagements plus anciens, mais parfois plus restreints, concernent l'irrigation ou, souvent plus récemment, l'alimentation en eau. Enfin, un type d'aménagement, ancien certes sous la forme de moulins d'assez faible importance, mais très moderne sous la forme d'usines génératrices hydroélectriques de grande puissance, a pour objet la captation des quantités considérables d'énergie hydraulique des cours d'eau naturels. Seuls seront considérés dans la suite les aménagements des cours d'eau en vue de la navigation.

Les autres aménagements relèvent plutôt des cours de constructions. Il est à noter que les aménagements visent de plus en plus, dans les temps récents, à réaliser des buts multiples. Par exemple, les derniers travaux à la Meuse liégeoise et à la basse-Meuse en Belgique ont pour objet à la fois l'amélioration de l'écoulement des crues, la protection contre les inondations, l'amélioration des conditions de navigation par le perfectionnement de la canalisation et la récupération de l'énergie hydroélectrique. Des travaux effectués concurremment sur la Vesdre supérieure sont destinés à l'approvisionnement en eau potable et industrielle, cependant que le canal Albert prélève à la Meuse de l'eau pour son alimentation et les irrigations et industries de Campine.

Dans ce qui suit, on examinera uniquement les questions de caractère hydraulique et fluvial, c'est-à-dire la régularisation et la fixation des lits en vue de réduire la divagation, la protection contre les inondations

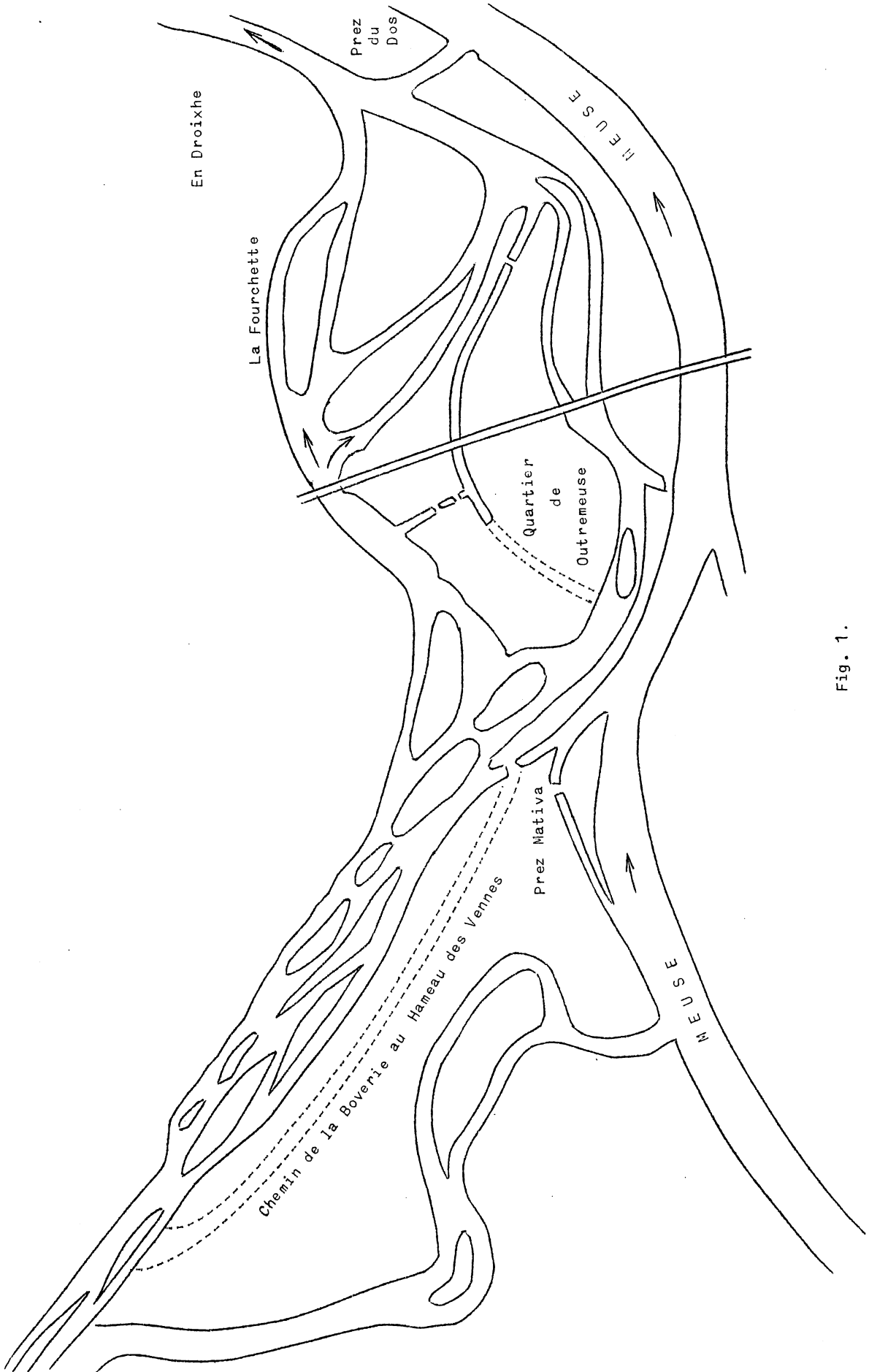


Fig. 1.

et l'amélioration de l'écoulement des crues, enfin les aménagements en vue de la navigabilité. Les deux premières catégories de travaux ont pour but de mettre les populations à l'abri des calamités provenant d'un fleuve puissant et capricieux, tels les grands fleuves chinois dont le lit divague dans de larges vallées d'alluvions marécageuses. La dernière catégorie englobe nécessairement dans une certaine mesure les deux autres mais est beaucoup plus délicate; elle doit apporter au cours du fleuve des modifications d'un ordre assez précis. Or, on a vu qu'en tenant compte des débits solides et liquides et des actions réciproques du lit et des eaux, les questions sont tellement complexes qu'elles échappent encore actuellement à une analyse rigoureuse. Il est donc difficile de prévoir exactement les effets de certains aménagements et les insuccès ont été fréquents. Les expériences de laboratoires ne peuvent guère donner que des indications générales et qualitatives, car il est en somme impossible de reproduire artificiellement d'une manière assez exacte les conditions déterminant les réactions mutuelles du lit et de l'eau, l'influence des nappes souterraines, etc...

Néanmoins, des études approfondies, notamment des observations coordonnées et des expériences systématiques et prolongées, peuvent donner des résultats satisfaisants.

Les régularisations peuvent être locales, c'est-à-dire de faible étendue, ou générales, c'est-à-dire intéresser un tronçon de grande longueur du cours d'eau.

2.- EFFETS GENERAUX DES REGULARISATIONS

On considère d'abord les conséquences d'une correction d'amélioration d'un cours d'eau idéal à lit fixe. Il faut distinguer le régime d'étiage et le régime de crue. En étiage, les sources, les nappes souterraines, les affluents, donc toutes les dispositions alimentaires, fonctionnent indépendamment du niveau du cours d'eau comme des déversoirs libres ou des orifices découverts virtuels; le débit est indépendant des circonstances d'amont. Il en résulte que les corrections ne peuvent exercer d'effets qu'en amont.

Il en résulte que les corrections ne peuvent exercer d'effets qu'en amont.

Vu la médiocrité du débit, ces effets sont nécessairement peu sensibles.

En crue, les orifices virtuels sont plus ou moins noyés et le débit

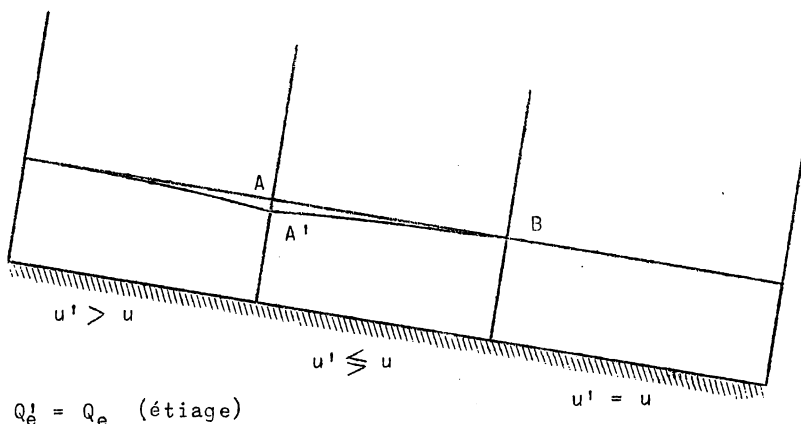


Fig. 4.

est variable et dépendant des circonstances d'aval, donc les corrections exercent un effet en aval comme en amont.

On suppose toujours établi le régime permanent, sans considérer les ondes de changement de régime. Nous admettrons par hypothèse que les corrections d'amélioration ont pour but et pour effet de réduire les pertes de charge dans la zone corrigée; donc, pour un débit donné, d'y réduire la pente superficielle.

En effet, l'équation du mouvement permanent est

$$\Delta z = \frac{(u_1^2 - u_0^2)}{2g} + \left(\frac{u_0 + u_1}{2}\right)^2 \cdot \frac{\Delta s}{C_m^2 \cdot R_m} \quad (1)$$

[cfr 2^e Section, chapitre X, par. 10, d, formule (84)].

Il résulte de là que, pour un débit donné, si les pertes de charge diminuent, la dénivellation et la pente diminuent. Par contre, pour un canal de résistance donnée, si le débit augmente, la pente superficielle doit nécessairement augmenter, ainsi que les vitesses. C'est l'inverse si le débit diminue.

Cela étant, en régime d'étiage, la ligne d'eau primitive n'est pas modifiée en aval par la correction. Dans la zone corrigée AB, il y a abaissement, la ligne d'eau devient BA', A' étant en-dessous de A. A l'amont de A', il y a abaissement, l'axe nouveau est asymptotique à l'ancien vers l'amont (fig. 4). La vitesse est inchangée en aval; elle est augmentée en amont. Dans la zone corrigée, la modification de vitesse dépend de la correction; elle est généralement augmentée.

En régime de crue, la correction influe sur le débit qui devient Q'_c au lieu de Q_c. Il faut nécessairement que Q'_c > Q_c, puisque l'axe en amont de la correction est nécessairement plus bas que l'axe primitif, ce qui entraîne une augmentation du débit des orifices virtuels d'alimentation.

En effet, si Q' = Q_c, on se trouverait dans la même situation qu'en période d'étiage (fig. 4) et il y aurait bien un abaissement de l'axe à l'amont, provoquant une augmentation du débit. Si l'on supposait Q'_c < Q_c, il en résulterait, même en dehors de toute correction, un abaissement de la ligne d'eau dans toute l'étendue du lit CD, le point initial d'aval étant considéré comme fixe.

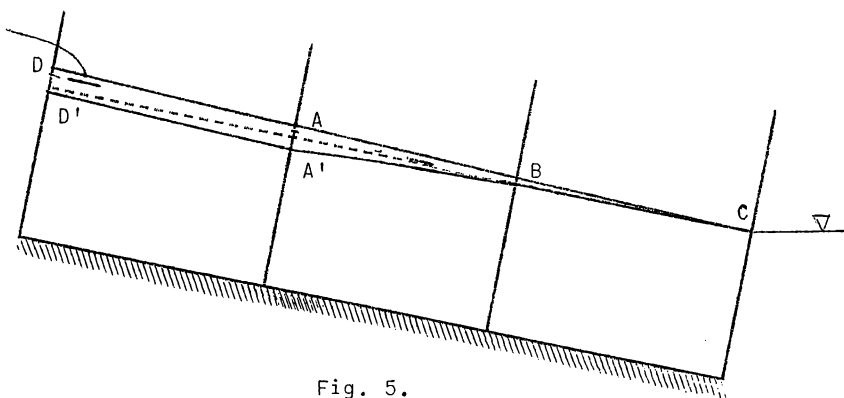
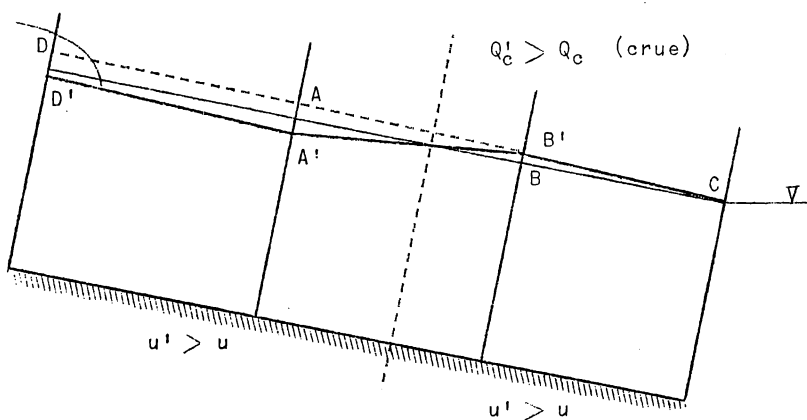


Fig. 5.

Par rapport à cet axe abaissé, la correction de la zone AB apporterait encore un abaissement supplémentaire dans la zone corrigée et en amont (fig. 5). Par conséquent, on aurait Q'_c > Q_c, ce qui est en contradiction avec la

supposition faite. Donc, on a bien Q'_c > Q_c. Il en résulte, en dehors de



toute correction, un exhaussement de la ligne d'eau dans toute l'étendue du lit et qui subsiste après correction à l'aval de la zone corrigée. Dans la zone corrigée AB, il faut qu'il y ait un abaissement AA' suffisant pour que l'axe en amont de la zone corrigée (fig. 6) réalise encore un

abaissement par rapport à la situation avant correction. D'une manière générale, les vitesses sont augmentées. La correction améliore donc les conditions d'écoulement des crues en amont de la zone corrigée et dans la majeure partie de celle-ci, mais elle les aggrave en aval, parce que le débit de crue est augmenté et que la vitesse d'écoulement est augmentée. (Le volume d'emménagement est aussi diminué en amont). Il faut vérifier si cette aggravation est admissible en aval.

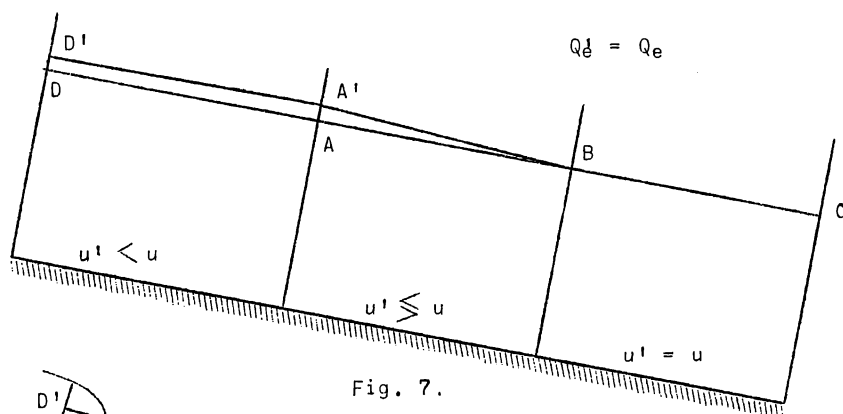


Fig. 7.

Si les travaux de correction constituent un resserrement caractérisé, qui entraîne une augmentation des pertes de charge, les effets sont inverses de ceux d'une amélioration. En régime d'étiage, il n'y a pas d'effet en aval de la zone corrigée, exhaussement dans l'étendue de celle-ci et en amont (fig. 7).

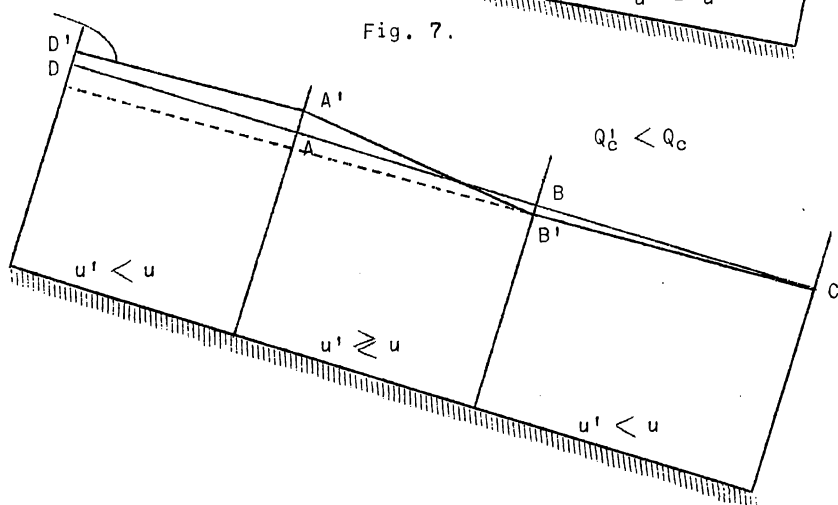


Fig. 8.

En régime de crue, un raisonnement analogue au précédent établit que $Q'_c < Q_c$. Il en résulte un abaissement en aval de la zone corrigée (fig. 8) et un exhaussement dans l'étendue de celle-ci et en amont.

Il en résulte que l'écoulement de la crue est aggravé en amont; la vitesse est généralement augmentée dans la zone corrigée.

3.- EFFETS DES REGULARISATIONS LOCALES

Dans la 2^e Section, au chapitre XI du mouvement permanent varié, on a exposé les effets de certaines discontinuités et irrégularités du lit sur l'écoulement de l'eau dans des canaux tels que les cours d'eau naturels. Leur suppression produit en général les effets inverses.

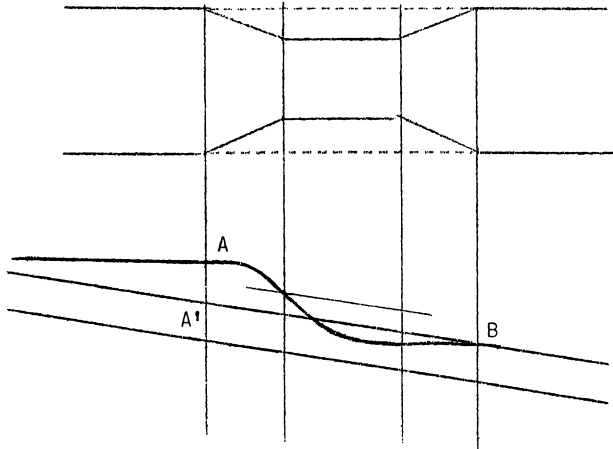


Fig. 9.

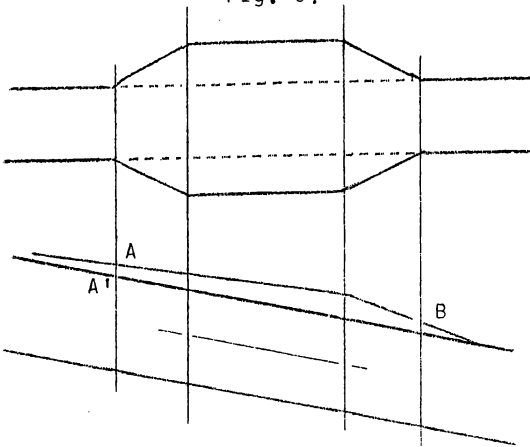


Fig. 10.

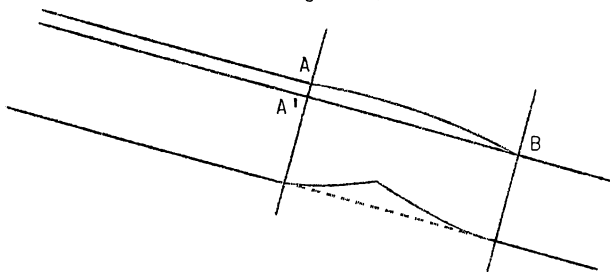


Fig. 11.

Un détroit donne lieu à une forte résistance, dont résulte un relèvement du plan d'eau. La suppression d'un détroit entraîne donc bien l'abaissement en amont dont il est question dans le paragraphe précédent. (fig. 9).

Un large bassin local produit aussi un relèvement en amont, sa suppression produit donc aussi un abaissement en amont. (fig. 10).

Un seuil agit comme un barrage et relève l'axe en amont, son arasement, qui approfondit le lit, entraîne nécessairement l'abaissement en amont (fig. 11). Une correction assez fréquente consiste à barrer par une digue submersible l'extrémité amont d'un faux-bras, qui agit comme un élargissement local et cause des pertes de charge supplémentaires, dues à un plus grand périmètre mouillé et à des zones d'eau morte et tourbillonnaires. La concentration des eaux moyennes dans un lit unique produit donc un abaissement en amont (fig. 12).

Mais le bras supprimé redevient généralement actif lorsque le cours d'eau en crue s'étale dans son lit majeur, pour éviter un rétrécissement local du lit majeur, qui pourrait aggraver les conditions

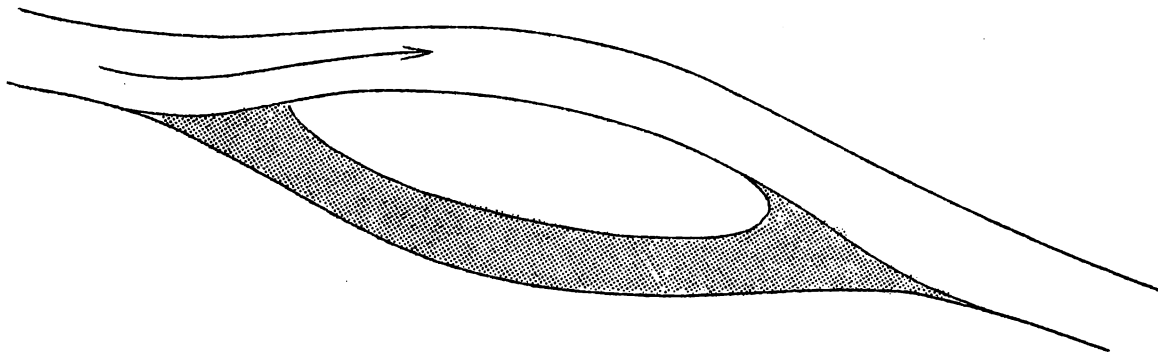


Fig. 12.

d'écoulement des crues et en augmenter les inondations en amont.

Les corrections s'accompagnent généralement de régularisations du tracé, notamment de la suppression de méandres trop prononcés. Les coupures plus ou moins courbes entraînant généralement un raccourcissement du cours d'eau, il en résulte une augmentation de la pente du fond entre

les points extrêmes fixes de la zone corrigée; elle produit aussi un abaissement en amont. (fig.13).

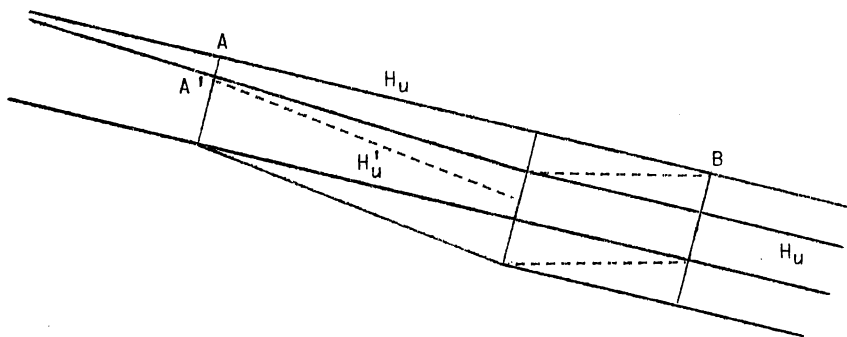


Fig. 13.

Pour protéger des inondations, il arrive que l'on établisse des endiguements dans le lit majeur, entre lesquels on concentre l'écoulement des crues. On ré-

duit donc la largeur et on supprime de la sorte des élargissements et des zones d'eau morte, on réduit le périmètre mouillé et les pertes de charge. On peut donc, à condition de conserver dans la zone endiguée une section suffisante d'écoulement, abaisser le plan d'eau en amont, mais les conditions d'écoulement des crues peuvent être aggravées en aval de la zone corrigée ainsi que dans la partie aval de celle-ci (par. 2). Mais il faut bien noter que si l'endiguement produit un réel rétrécissement de la section par rapport aux conditions normales d'écoulement, c'est un exhaussement en amont qui se produira et un abaissement en aval, par réduction de débit. Une telle opération ne peut être considérée comme une amélioration et est en principe désavantageuse. Il en est de même à fortiori d'un resserrement généralisé.

En période d'étiage, le débit étant indépendant, il y a exhaussement

en amont et augmentation des vitesses dans la zone corrigée. En période de crue, il y a réduction du débit et exhaussement en amont si les digues ne sont pas submersibles (par. 2).

4.- EFFETS DE LA MOBILITE DU LIT ET DU DEBIT SOLIDE

On a envisagé dans les paragraphes 2 et 3 un lit idéal fixe et un cours d'eau sans débit solide. La mobilité du lit et le débit solide peuvent altérer profondément les conclusions précédentes. En effet, la correction modifie les vitesses, surtout en période de crue, où elle influe sur le débit. Or, on sait que ce sont les crues qui sont prédominantes pour les réactions mutuelles de l'eau et du lit. On sait notamment qu'un cours d'eau naturel tend vers un état d'équilibre du lit, qui résulte de la compensation de l'érosion et des apports, et s'exprime par la relation :

$$h.i = f. \frac{v_e^2}{2g}$$

[3^e Section, chap. XVI, par. 8, d), form. (56)]

v_e étant la vitesse critique d'équilibre près du fond du talweg.

La correction modifiant l'état du lit rompt donc l'équilibre établi ou en voie d'établissement. Le travail d'érosion en amont et de dépôt en aval peuvent recommencer. Il peut en résulter une réduction générale de la pente, à moins que l'érosion ne soit arrêtée en remontant par un seuil rocheux, tel que la barre d'Istein dans le Rhin. On observe à cet endroit, à la suite de la correction du Rhin, un approfondissement croissant en aval avec abaissement du plan d'eau, tandis que la fixité du seuil rocheux produit l'invariabilité des conditions sur le seuil. Il s'y produit un rapide de plus en plus dangereux. A partir de ce seuil agissant comme un niveau de base intermédiaire, l'érosion reprend vers l'amont et tend à y réduire la pente. Sous réserve de ce cas spécial, il y a approfondissement à l'amont et abaissement consécutif du plan d'eau, l'inverse se produit en aval. Cet effet se produit après toutes les corrections, aussi bien celles qui tendent à abaisser le plan d'eau en amont que les resserrlements qui tendent à l'exhausser. Les endiguements de grande étendue contre les inondations aggravent donc à la longue les conditions d'aval tout comme les autres corrections, mais en réduisant en outre le débit de crue. (Pl. 17, fig. 3, b). Les travaux de correction comportent souvent des dispositifs destinés à fixer plus ou moins le lit. Un tel lit n'a plus, dans la zone fixée, la faculté de se créer un nouvel état d'équilibre. Il peut y avoir notamment des apports solides d'amont qui ne sont pas compensés par l'érosion, d'où la nécessité d'enlever les dépôts par dragage. A vrai dire, une région fixée du lit doit se comporter par rapport à l'aval et l'amont plus ou moins comme un seuil rocheux.

D'une manière générale, il semble donc qu'il y ait intérêt à respecter le plus possible l'état d'équilibre d'un cours d'eau, sauf enlèvement d'obstacles produisant des discontinuités dans cet état d'équilibre et sauf variation trop fréquente de cet équilibre par le cheminement des formes. Il résulte notamment de l'écart de la mouille, ainsi qu'il a été indiqué

au chapitre XVI, par. 1, une tendance au déplacement longitudinal du lit. En outre, l'alternance de l'étiage et des crues provoque des remaniements constants du fond qui se traduisent par un cheminement vers l'aval.

Ce phénomène est très caractéristique dans les cours d'eau à fond assez mobile et non fixé, notamment lorsque les vitesses sont accrues à la suite de corrections en aval; c'est la cause des bancs de gravier mobiles du Rhin dans le cours alsacien. Dans les rivières à fond fixe ou fixé, le phénomène est évidemment beaucoup moins sensible. Il est utile de relever ces mouvements par des sondages périodiques et de les comparer aux variations de la ligne d'eau.

5.- NAVIGABILITE

La navigabilité exige la réalisation de diverses conditions auxquelles doivent satisfaire les eaux dites navigables. En règle générale, la navigation est interrompue en temps de crue, au-dessus des plus hautes eaux navigables, pendant un certain nombre de jours dont la moyenne annuelle dépend du régime du cours d'eau, mais peut être influencée par son aménagement.

Il faut que en période d'étiage, le chenal présente partout une profondeur et une largeur suffisante pour la navigation, sans courants ni remous dangereux. Il faut donc notamment que les chenaux se raccordent correctement sur les seuils aux points d'inflexion et que les courbures et les directions du chenal soient telles que les bateaux ne soient pas exposés à des courants et remous transversaux dangereux, notamment lorsque les eaux sont hautes. Enfin, il faut que le chenal soit aussi fixe que possible. En hautes eaux, il faut que les bateaux puissent naviguer à la fois sans être exposés à des remous dangereux et trouvent partout des profondeurs suffisantes sur leur route.

La navigabilité dépend donc d'une conformation avantageuse ou du moins correcte du lit, notamment du tracé et de la continuité de ses rives, d'après les règles de Fargue. Mais les hauteurs d'eau pour un débit donné, notamment d'étiage, dépendent des pentes. C'est donc celles-ci qu'il faut régler en vue des profondeurs; le tracé des rives en découle comme il a été indiqué au chapitre XVI.

$$\text{Pour un débit } Q \text{ donné, } h^3 \cdot l^2 \cdot i = \frac{Q^2}{C^2} .$$

Donc, à largeur l constante, h varie en sens inverse de i et à pente i constante en sens inverse de l . Donc on peut améliorer h par réduction de pente ou par resserrement. On peut combiner les deux moyens. C'est même théoriquement nécessaire pour la stabilité du lit, qui exige que

$$h \cdot i = f \cdot \frac{v_e^2}{2g} = \text{constante, d'où } h \cdot l = \text{constante}$$

et $\frac{l}{i} = \text{constante.}$

D'après cela on voit que les profondeurs nécessaires pour la navigation doivent résulter d'une manière générale et rationnelle d'une réduction de

pente. D'ailleurs, c'est dans le cours inférieur que les cours d'eau présentent généralement le maximum de navigabilité, par suite de la diminution de la pente.

La condition précédente n'est cependant compatible avec la navigabilité que si le débit est suffisant, condition qui est elle aussi réalisée le mieux dans le cours inférieur. Dans le cours supérieur ou moyen, il est fréquemment impossible de réaliser la navigabilité à cause de l'insuffisance du débit autant que des trop fortes pentes.

D'après le paragraphe précédent, les corrections des rivières à fond mobile tendent toujours à réduire la pente. En supposant qu'elles n'aggravent pas les autres conditions de navigabilité et sous réserve d'autres effets éventuellement nuisibles, les corrections doivent donc être en général favorables à la navigation. Mais il ne suffit pas qu'elles soient favorables; elles doivent encore être en outre suffisantes. Là se trouve le noeud très difficile de la question et il est permis de dire, d'une manière générale, que les corrections ne sont guère susceptibles d'améliorer d'une manière satisfaisante les conditions de navigation que dans les cours d'eau dont les conditions naturelles de débit et de pente les rendent propres à la navigation, notamment les cours inférieurs des grands fleuves. Ce n'est que dans ces conditions aussi que les effets éventuellement nuisibles des corrections au point de vue de l'écoulement des crues pourront être évités. Les resserrements aggraveront tout d'abord les conditions à l'amont, ultérieurement à l'aval. Les réductions de pente par régularisation du fond (écrêtement de hauts fonds) aggravent aussi les conditions en aval, d'une manière progressive. Mais dans les cours inférieurs, ces aggravations sont faibles par suite de la grande étendue des lits majeurs.

La régulation satisfaisante de la pente dans un tronçon d'un cours d'eau, dont les extrémités sont considérées comme fixes et présentent donc une dénivellation connue, ne peut s'obtenir que par un ajustement de la longueur. Celle-ci dépend d'un tracé convenable des sinuosités du talweg, dont la longueur peut être augmentée ou réduite selon l'opportunité. L'effet des biefs sinueux successifs et convenablement raccordés est donc de réaliser la longueur et la pente moyenne les plus favorables du cours d'eau.

Une illustration caractéristique de ces effets est celle de la première correction du Rhin entre Bâle et Lauterbourg d'après le projet du colonel badois von Tulla (1770-1828). Dans son état au début du 19^e siècle, ce tronçon du Rhin coulait dans un lit parsemé d'îles souvent très étendues, séparées par une succession de chenaux et de faux-bras, s'étendant sur une largeur totale de 2 à 3 km. A chaque crue du fleuve, de nouvelles îles se formaient, d'autres étaient englouties, le chenal était modifié. Les digues protégeant la plaine étaient fréquemment emportées.

Le projet de von Tulla prévoyait l'endiguement du Rhin entre deux digues aussi rectilignes que possible. Les eaux étaient rassemblées dans un lit unique de 220 à 250 m de largeur, sans îles. Les travaux furent exécutés de 1840 à 1860. Les berges des deux digues étaient perreyées. Certains alignements sont droits sur une dizaine de km.

De la sorte, le talweg entre Bâle et Lauterbourg a été raccourci de

32 km, soit de 14 %. La pente et la vitesse ont été ainsi augmentées. A l'amont, le lit s'est approfondi par érosion, de 6 cm par an en moyenne entre Bâle et Marckolsheim. A Chalampé, à environ 30 km en aval de Bâle, de 10 cm en moyenne par an. Le Rhin s'y est creusé de plus de 7 m entre 1840 et 1950. C'est ce phénomène qui a fait émerger la barre rocheuse d'Istein, à 8 km en aval de Bâle (par. 4). Le Rhin s'est mis à charrier de grandes quantités d'alluvions en temps de crue. Des mouilles profondes se sont formées alternativement à l'une et l'autre rive. La profondeur sur les seuils intermédiaires très nombreux est faible; l'écoulement en basses eaux y est souvent presque transversal à l'axe moyen du lit. Enfin, l'ensemble du lit mineur y progresse constamment vers l'aval. Les positions des mouilles et des seuils changent sans cesse (phénomène des bancs de gravier mobiles). En aval de Brisach, il y a exhaussement du fond. Plus en aval, à Strasbourg, il y a un creusement inférieur à 1 cm par an.

De 1906 à 1924, dans le secteur Sondernheim-Strasbourg, et depuis 1930 entre Strasbourg et Bâle, des travaux de régularisation et de fixation d'un chenal navigable de 88 à 92 m de largeur et de 2 m de profondeur sous l'étiage conventionnel, ont été effectués ou entrepris. Ce chenal passe d'une berge à l'autre du lit rectifié; il est déterminé par des épis de longueur variable allant du bord convexe du chenal à la berge de la digue correspondante. Les sinuosités de ce chenal sont donc peu accusées. Près du chenal, les épis sont éventuellement noyés et prolongés par des seuils de fond.

Ces dispositifs ont donné des résultats assez satisfaisants en aval de Strasbourg, tout en exigeant des travaux d'entretien assez onéreux. En amont de Strasbourg, dans les parties du Rhin soumises à une très forte érosion, on a eu par contre des déboires. Les épis et les seuils de fond n'ont pu maîtriser l'érosion.

Des études expérimentales ont été faites, sur modèles et in situ sur la fixation du fond du lit par des revêtements en pierres calibrées. La méthode est plus coûteuse que celle des épis et le revêtement du fond s'est révélé très vulnérable par les ancres et les hélices des remorqueurs puissants.

Finalement, le problème de la navigation sur le Rhin entre Bâle et Strasbourg sera résolu :

1°) entre Bâle et Brisach par les quatre biefs échelonnés du Grand Canal d'Alsace, qui sont exécutés; (1959)

2°) entre Brisach et Strasbourg par une canalisation de la rivière, qui comportera quatre barrages éclusés dont le plus en amont, celui de Marckolsheim est en cours d'exécution en 1959. (cfr La Houille Blanche - Le Rhin, mars-avril 1959).

6.- FIXITE DU LIT

La fixité du lit est nécessaire à la navigabilité. Elle protège aussi les terres riveraines contre les dégâts de la divagation. Les dispositions employées visent même généralement à récupérer sur le fleuve des lagunes,

des terres basses immergées lors des hautes eaux ordinaires, des bras secondaires etc..., par colmatage au moyen des dépôts, principalement lors des décrues. On emploie à cet effet des digues longitudinales et transversales et des seuils de fond.

Les digues longitudinales insubmersibles ou hautes limitent le lit majeur, dont elles fixent les rives. Elles ne sont pas toujours en relation directe avec le lit mineur, qui peut éventuellement continuer à divaguer et est alors susceptible de menacer ces digues.

Les digues submersibles ou basses peuvent être établies dans le lit majeur pour contenir les petites crues d'été. Le plus souvent elles servent à fixer les rives du lit mineur, notamment d'après les tracés découlant des règles de Fargue. Elles sont généralement disposées suivant les rives concaves qu'elles fixent solidement. Ces digues longitudinales basses sont souvent employées concurremment avec des digues transversales ou épis qui partent des rives et s'avancent vers le chenal normalement à l'axe du cours d'eau ou de préférence inclinés vers l'amont à 70° environ. Les épis sont submergés et ils ont une action directrice sur le courant, qu'ils orientent à peu près perpendiculairement à leur axe. Construits en matériaux solides, ils retiennent les grèves du fond. On les dispose principalement le long des rives convexes entre les points d'inflexion. (Planche 16, fig. 1).

Ils favorisent et régularisent les atterrissements à ces rives, suivant un profil et un tracé avantageux. Ils y sont rarement limités par des tronçons de digues basses longitudinales aux rives du lit mineur.

Ces épis disposés entre la rive et le chenal sont généralement plongeants, c'est-à-dire de hauteur décroissante de la rive vers le chenal.

Il en est de même des épis que l'on dispose quelquefois entre les digues basses des rives concaves du lit mineur et le chenal; ils servent à fixer le plafond et le talweg en ces endroits exposés aux affouillements progressifs et profonds. Ces épis fortement noyés et plongeants, sont très profonds et peu saillants dans le talweg; on leur donne le nom de seuils de fond.

De tels épis plongeants prolongés par des seuils de fond peuvent parfois suffire à fixer les rives concaves, sans digues basses longitudinales.

Les épis plongeants des rives convexes sont parfois prolongés aussi au delà du chenal par des seuils de fond peu saillants, près et à l'aval des points d'inflexion.

On emploie aussi des épis saillants ou levées transversales submersibles dans le lit majeur, dont les extrémités sont renforcées en forme de musoirs ou se retournant d'équerre en tronçons de digues basses longitudinales. Ils ont pour but de consolider la fixation des rives du lit mineur par colmatage des terrains du lit majeur entre les levées transversales. Les épis plongeants et les seuils de fond, les digues basses longitudinales plus ou moins continues et les levées transversales en arrière dans le lit majeur sont souvent combinés en vue d'un résultat d'ensemble. La figure 2 de la planche 18 en donne une très suggestive illustration, d'après Girardon.

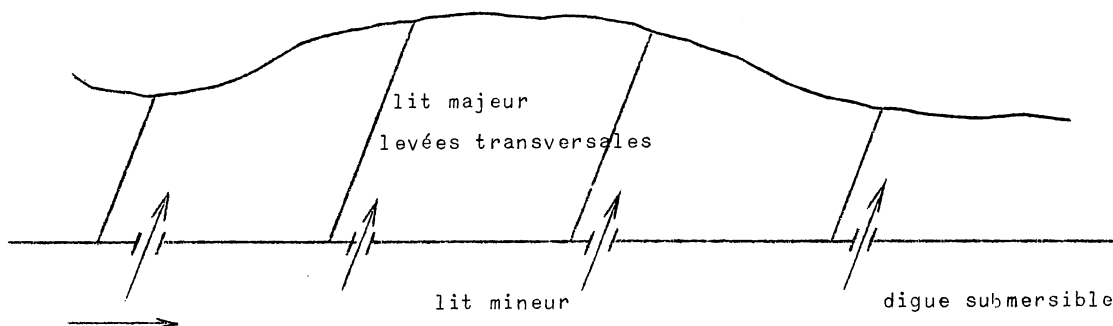


Fig. 14.

Il est très recommandable de diviser le lit majeur derrière les digues basses longitudinales en compartiments qui évitent l'érosion par des courants violents de crue, mais favorisent au contraire le colmatage. Il est favorable d'ouvrir les digues basses aux extrémités amont des compartiments, en vue de permettre l'accès plus facile des eaux limoneuses des crues. (fig. 14).

Les épis et les levées transversales sont plus favorables au colmatage que les digues basses longitudinales, surtout s'ils sont inclinés vers l'amont. L'inclinaison vers l'aval est défavorable, tant pour le colmatage que pour la conservation des rives. La distance moyenne des épis entre eux est égale à la largeur de régularisation entre rives. En basses eaux, il se produit entre les épis plongeants du lit mineur un courant d'eau en circuit qui part de la face amont de l'épi d'aval, remonte le long de la rive et continue par la face aval de l'épi d'amont, avec des tourbillons plus ou moins marqués dans les angles d'amont des anciennes rives (fig. 15).

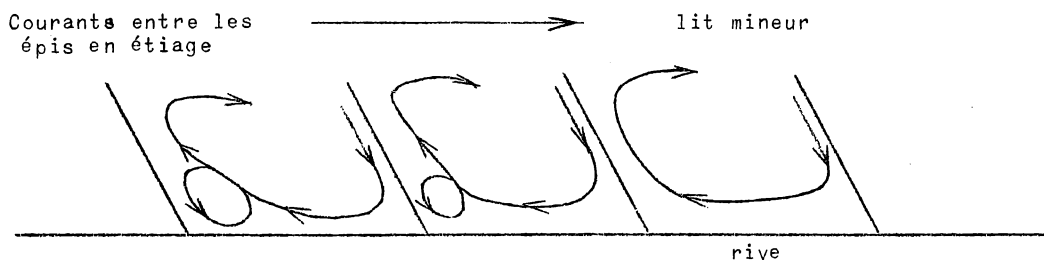


Fig. 15.

Il se forme un affouillement en aval de la tête de l'épi d'amont et un dépôt immédiatement en aval, qui tend à rejoindre la tête de l'épi d'aval (fig. 16). Cette disposition favorise l'entrée des eaux de crue qui se dirigent de l'ouverture ainsi créée vers l'ancienne rive en remplissant tout l'espace entre les épis et le colmatant (fig. 16). Le colmatage est donc actif et progressif. La forme des têtes des épis semble exercer peu d'influence. Si les affouillements en terrain mobile sont possibles : il faut protéger les têtes contre les affouillements. Si le fond

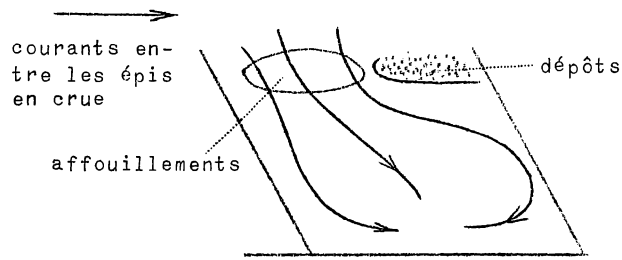


Fig. 16.

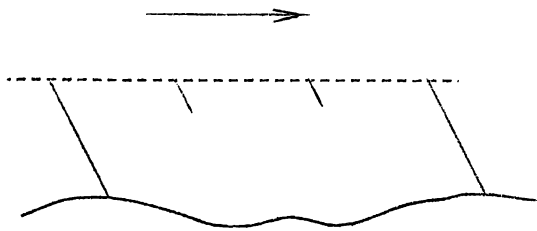


Fig. 17.

du lit est revêtu pour éviter les affouillements, il faut des épis plongeurs pour faciliter le colmatage. Il n'est pas nécessaire que tous les épis aillent de la nouvelle rive à l'ancienne. L'observation a été faite que dans les rivières à grand débit solide, qui colmatent facilement, on peut disposer entre des épis complets deux ou trois tronçons d'épis en arrière de la nouvelle rive; ils forment le point de départ de dépôts progressifs (fig. 17). Leur distance et leur longueur doivent être convenablement déterminées par l'observation.

Les épis coûtent moins cher que les digues longitudinales, ils colmatent plus vite et ils exigent moins d'entretien; par contre ils produisent moins vite l'effet de régularisation et ils peuvent donner lieu entretemps à des effets défavorables de remous et de courants transversaux.

Ils conviennent surtout pour le colmatage.

Les digues basses longitudinales régularisent plus vite, mais elles sont plus coûteuses et elles demandent un grand entretien. Elles conviennent surtout pour la navigation. Pratiquement, on combine presque toujours les deux systèmes, comme l'a proposé Girardon.

7.- AMELIORATION DE L'ECOULEMENT DES CRUES ET PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

En principe, il faut réserver à l'écoulement des crues, qui constituent des phénomènes naturels dont les causes échappent presque totalement à l'action humaine, un lit majeur suffisant. Mais les vallées des grands fleuves traversant des régions peuplées ont généralement été encombrées, au cours des âges, de constructions édifiées par les riverains, à cause de tous les avantages que procure le voisinage d'un cours d'eau.

Il a été indiqué (chap. XIV), que les crues sont variables et présentent des maxima exceptionnels, qui se produisent à des intervalles assez éloignés, correspondant à l'alternance séculaire des périodes sèches et humides. Ceci explique que des constructions aient été édifiées anciennement dans les lits majeurs jusqu'à la limite des crues ordinaires, et que les terrains repris sur le fleuve aient été inondés lors des grandes crues

suivantes. D'autant plus que, par rapport à l'état primitif, le lit majeur a subi un véritable resserrement et souvent un endiguement effectif. Or, on a observé qu'il en résulte une aggravation progressive des crues, ce qui explique que les plus hautes eaux d'un cours d'eau vont constamment en croissant, indépendamment des modifications apportées par l'industrie humaine au bassin hydrographique, qui peuvent accroître encore cet effet par accélération du ruissellement général.

Il faut donc distinguer entre les mesures propres à améliorer l'écoulement des crues et celles destinées à assurer seulement la protection contre les inondations. On voit, d'après ce qui précède, qu'elles sont très souvent antagonistes. Ce n'est qu'à la faveur de circonstances très propices que les deux buts peuvent techniquement et économiquement se concilier. Néanmoins, il faut toujours s'imposer comme règle de les accorder le plus possible.

L'amélioration de l'écoulement des crues s'obtient par la réduction des obstacles à l'écoulement, donc par la régularisation : suppression des seuils, des détroits, des bassins, des bras superflus, en général de toutes discontinuités quelconques du plan, du profil en long et des profils en travers. Il doit en résulter un accroissement du débit de crue, (par. 2), donc une moindre durée de la crue, une amélioration sensible en amont et une légère aggravation en aval, mais qui peut être rendue acceptable dans le cours inférieur, où la vallée s'élargit, par un calibrage convenable du lit majeur. Ces mesures ne peuvent donc généralement pas être considérées dans leur ensemble comme une protection contre les inondations, mais elles peuvent très sensiblement et avec une efficacité assez durable, par le moyen de travaux en aval, améliorer la situation d'une région riveraine exposée à des submersions calamiteuses.

Ces travaux diminuent aussi la violence du courant en hautes eaux et prolongent les hautes eaux navigables. Ils contribuent donc à la navigabilité par la diminution des durées d'interruption de la navigation en raison des hautes eaux.

La protection contre les inondations considérée, sans tenir compte de l'écoulement des crues, a généralement pour effet de réduire l'écoulement des crues par des endiguements constituant des resserrements. Elle aggrave donc nécessairement la situation en amont et peut finir par l'aggraver en aval.

8.- EFFETS ACCESSOIRES DES CORRECTIONS

On a vu que les corrections ont peu d'effet sur l'étiage si le débit est indépendant. Par contre, elles influent sur le débit des crues, sur le débit solide et sur l'état d'équilibre du fleuve. Ces influences ont été établies d'après la notion théorique des orifices virtuels d'alimentation, qui supposent que les dispositifs d'alimentation sont en quelque sorte indépendants de l'état du cours d'eau en période d'étiage, mais pas en crue.

En fait, ces influences dépendent des réactions mutuelles des alimentateurs et du cours d'eau, surtout en période de crue. Dans certains cas,

la dépendance est directe : les réactions mutuelles des cours d'eau et de leurs affluents ainsi que des nappes souterraines en période de crue sont évidentes. Une augmentation du niveau des crues réduit leurs débits, mais augmente le niveau des affluents et relève la nappe souterraine; ce dernier effet agit au profit des eaux basses consécutives. L'inverse se produit en cas d'abaissement du niveau des crues.

L'alimentation indépendante exigerait des ouvrages régulateurs, par exemple du genre des déversoirs réglables établis dans les barrages et les ouvrages de prise d'eau, tant aux confluent qu'aux sources. Il est difficile d'agir sur les nappes souterraines, elles ont d'ailleurs une influence atténuée sur les crues, par suite de la lenteur des phénomènes de filtration et de la tendance à l'imperméabilisation du lit par déversement du cours d'eau dans la nappe souterraine. L'influence des nappes souterraines est quasi annulée si le lit est colmaté. L'effet des corrections se répercute en quelque sorte sur tout le bassin; il faut en tenir compte non seulement au point de vue de la correction même, mais des conséquences extérieures.

Il faut veiller à ne pas troubler profondément l'équilibre des nappes souterraines, à ne pas en empêcher l'écoulement et à ne pas provoquer la formation de marécages, par exemple par colmatage imperméable des rives. Il en est de même pour les affluents; il faut prévoir des ouvrages permettant le passage des eaux de ruissellement à travers les digues, mais évitant le reflux des eaux du fleuve en crue dans la vallée à travers ces ouvrages. Il faut recourir dans ce cas à des dispositifs prévoyant une évacuation naturelle ou artificielle des eaux de ruissellement dans le cours d'eau principal au-dessus du niveau des digues. Pour cela, on peut écouler directement dans le cours d'eau par gravité, par une dérivation surélevée à niveau libre ou par une conduite forcée, les eaux collectées à un niveau assez élevé ou éventuellement relevées par le moyen d'un barrage (protection de la ville d'Amboise sur la Loire). Les eaux dont le niveau est inférieur à celui des crues du fleuve y sont refoulées par pompage. Parmi ces eaux de ruissellement, il faut considérer dans les villes, les eaux des égoûts, qui doivent toujours être refoulées par pompage. (Exemple du Bassin de Liège). Les travaux d'endiguements insubmersibles doivent donc être toujours accompagnés de travaux de drainage et d'assainissement. (Planche 18, fig. 2 b et 2 c).

9.- REMARQUES GENERALES AU SUJET DES CORRECTIONS

Il résulte de ce qui précède que les améliorations des cours d'eau naturels sont parmi les travaux les plus délicats des ingénieurs hydrauliciens, par suite de l'incertitude de leurs effets. Cela provient non pas d'un manque d'études, mais bien de la complexité considérable des phénomènes ainsi que de leur diversité. Les cours d'eau ont en somme une individualité; les observations faites sur l'un ne peuvent être transposées à un autre qu'en cas de grande analogie des deux cours d'eau et encore d'une manière relative seulement, mais pas du tout en cas de dissemblance caractérisée. C'est ainsi que des méthodes différentes de correction ont été apportées aux fleuves très tranquilles des plaines allemandes et aux fleuves français du régime mixte.

L'hydraulique théorique se trouve en défaut et ne peut servir que d'auxiliaire. Même l'expérience sur modèles ne peut être utilisée qu'avec la plus grande circonspection pour l'étude qualitative de certains points généraux bien définis, car tout dépend des réactions mutuelles du cours d'eau et du lit, dont les caractères déterminants ne peuvent être reproduits, même approximativement.

L'étude d'une correction est nécessairement de longue haleine - ce qui ne veut pas dire qu'elle doive être traînée en longueur. Elle doit être basée sur une information et sur une documentation aussi étendues que possible. Dans cette question difficile, la connaissance est réellement la somme des efforts, des travaux, des expériences, des succès et des échecs des innombrables hydrauliciens, souvent anonymes, du passé. Peu de questions doivent autant que celle-ci inciter les ingénieurs à la modestie.

Elle doit être ensuite basée sur une connaissance parfaite du cours d'eau, au point de vue topographique, hydrographique, hydrométrique et hydrologique. Il ne faut pas entendre par là une connaissance empirique basée sur une longue observation journalière, mais non coordonnée du fleuve, qui peut être utile pour des points de détail, mais non pour une conception d'ensemble. Cette connaissance doit être basée sur des levés complets du cours d'eau, des courbes de régime, des courbes limnimétriques des débits, des courbes de crue, des courbes pluviométriques, etc..., c'est-à-dire une étude scientifique complète du fleuve.

Lorsque ces éléments indispensables à l'étude d'une correction existent, il faut chercher par des moyens théoriques et expérimentaux une méthode convenant au cours d'eau. Un principe fécond, qui limite moins les résultats que les insuccès et donne par le fait même, semble-t-il, le maximum qu'il soit possible d'obtenir, est celui qu'il faut corriger avec prudence, délicatesse presque, et non modifier brutalement, profondément. Il faut tirer le meilleur parti possible de l'individualité du fleuve, non chercher à la modifier par une excessive contrainte. On peut ainsi espérer faire contribuer le cours d'eau à sa propre correction, au moins pour maintenir les nouvelles rives qui lui sont fixées, entretenir ses profondeurs, colmater ses lagunes et ses faux bras. L'entretien est alors réduit au minimum. Au contraire, une modification brutale trouble l'équilibre du fleuve et produit des réactions inévitables, qui tendent à détruire ou réduire l'oeuvre de l'homme. Il en résulte une vraie lutte, très caractéristique dans les grands endiguements par exemple, et où le fleuve remporte très souvent de grandes victoires, qui sont pour l'homme de calamiteuses catastrophes.

En plus, il faut alors des travaux constants de perfectionnement et d'entretien, sans compter la réparation des dégâts dus aux catastrophes éventuelles.

Ce principe de progressivité est dû principalement aux hydrauliciens français et on peut considérer comme type d'application exemplaire, la correction de la Garonne par Fargue et celle du Rhône par Girardon, basées sur des études patientes, théoriques, expérimentales et observatives. C'est d'une telle étude que sont déduites les règles de Fargue, qui ont été parfois critiquées comme généralisations excessives par certains hydrauliciens.

Il est certain, en effet, que les points les plus précis des travaux de Fargue ne conviennent que pour la Garonne, de l'étude du cours de laquelle ils ont été déduits. Mais cela ne diminue en rien la portée de ses règles générales ni le mérite de Fargue. Ses résultats incitent à refaire, pour chaque cours d'eau dont on projette la correction, une étude scientifique, analogue à la sienne, considérablement facilitée par les principes généraux mis en lumière par Fargue.

Une telle étude doit montrer notamment comment sont constitués les bons passages, comment sont constitués les mauvais et la différence des deux. La correction doit tendre alors à transformer les mauvais passages en bons par une modification corrélative de leurs dispositions. Cette opération doit être progressive. On peut ainsi éprouver aux moindres frais l'efficacité des divers dispositifs de correction, dont le système définitif n'est arrêté qu'à bon escient. Les corrections doivent être conduites généralement d'aval en amont et être progressives.

Ces principes s'appliquent surtout aux corrections étendues ou générales et, selon l'esprit, aux améliorations locales ou à celles qui sont basées sur des dispositifs spéciaux, tels que des réservoirs, etc...

Ces remarques très générales paraissent évidentes et convenables, semble-t-il, pour toutes les questions quelconques; surtout les deux premières : documentation et étude précise. Cependant, il semble qu'elles aient été souvent négligées dans le passé. Cela provient de la très grande importance des études préalables, dont on veut s'affranchir par hâte ou défaut d'activité. L'insuccès en est la conséquence presque inévitable. Ce sont les expériences antérieures et surtout les insuccès qui ont démontré la nécessité des études précises et qui en ont fourni en même temps les premières bases. Dans tout pays développé, des monographies fluviales complètes devraient exister, ainsi que des annales d'observations continues. La base indispensable à toute étude fluviale existerait ainsi d'avance, ce qui permettrait d'agir à coup sûr dans le minimum de temps.

CHAPITRE XX

TRAVAUX ET METHODES DE CORRECTION ET D'AMENAGEMENT

1.- REGULARISATIONS OU CORRECTIONS LOCALES

D'après les règles de l'hydraulique théorique comme d'après celles de Fargue, il faut corriger les discontinuités qui entravent ou troublent l'écoulement des eaux. Les régularisations, systématiques ou isolées, doivent donc établir une continuité telle que le fleuve pourrait l'établir lui-même et, s'il n'y a pas urgence, par sa propre action.

Cette dernière méthode est principalement applicable aux corrections de rives, aux resserrements locaux et au colmatage des faux bras. Elle emploie des digues basses longitudinales et des épis submersibles pour provoquer le colmatage des parties abandonnées du lit. Ces digues basses sont construites en enrochements, en gravier et en sable dans les régions où ces matériaux abondent (cours supérieur et moyen, régime torrentiel et mixte), ou en bois et fascinages, ce dernier système surtout dans les plaines basses (cours inférieur). Au lieu d'employer des digues longitudinales submersibles, dont le fonctionnement est basé sur le déversement par dessus la crête, suivi d'une perte de vitesse provoquant le dépôt des matières solides en suspension, qui ne peut être actif que pour les eaux très limoneuses des crues, on a employé avec plus de succès des ouvrages longitudinaux perméables, mobiles ou réglables, qui permettent le colmatage par les eaux moyennes. En principe, ils comportent une file alignée de pieux ou de forts piquets émergeant au-dessus du niveau des eaux moyennes et réunis en tête par un cours de longrines. A cette construction sont fixées des parois immergées qui, placées en-dessous de la surface libre, obligent l'eau et les matières solides qu'elle charrie, à passer entre elles et le fond. Il se crée ainsi une dénivellation motrice entre l'amont et l'aval des cloisons

si l'ouvrage est bien disposé par rapport au courant et si la section libre de passage est bien établie. Il se produit donc une mise en vitesse suivie d'une dissipation d'énergie cinétique. Le fond est affouillé immédiatement en amont de ces ouvrages tandis que les matières solides se déposent et se fixent en aval (fig. 18).

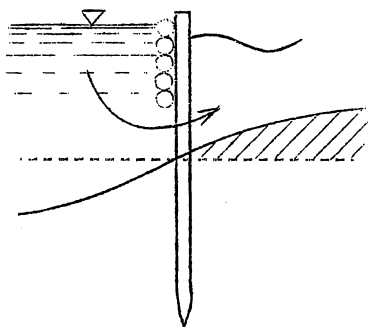


Fig. 18.

Ce dispositif convient surtout pour les ouvrages longitudinaux. Il a donné d'excellents résultats en Bavière avec le système Wolf (planche 17, fig. 1), dans lequel des parois en fascines, claies, branchages ou planches oscillent librement dans le sens

du courant autour de la longrine supérieure. Le réglage peut se faire par ouverture ou fermeture de panneaux si la hauteur des parois n'a pas été bien choisie. Le système permet de régulariser des profils et des rives, de combler des anfractuosités, de resserrer les sections trop larges, etc...

En Amérique, au Mississippi et au Missouri; en Europe, dans le Danube, la Drave, la Theiss, etc..., on s'est servi de troncs et de branches d'arbres munis de nombreuses ramures, dont on a fixé les pieds au fond par des masses de lestage, tandis que les têtes flottaient librement ou étaient soutenues par des fûts vides. (Système Brownlow-Weed des Indes ex-britanniques, planche 16, fig. 3, a). Ces dispositifs sont fixés à 3 ou 4 m de distance des nouvelles rives projetées et parallèlement à celles-ci; les dépôts consistants se forment rapidement derrière (planche 16, fig. 3 b et c). Sur la Loire, on a employé avec succès les barrages réglables Audouin. Les panneaux entre les pieux sont obturés par des vannes en bois dont on peut régler la levée.

Ces systèmes donnent des résultats excellents dans les cours d'eau à grand débit solide, surtout de gravier et de sable, donc en régime torrentiel et mixte. Le système Brownlow-Weed est le plus simple et le plus robuste. Le dispositif Audouin, construit au moyen de gros pieux à longue fiche, a résisté aux crues et aux glaçons de la Loire. Le système Wolf, plus léger, résiste aux crues ordinaires mais doit être enlevé avant l'hiver pour éviter la destruction par les glaces et les crues violentes. Il ne convient donc qu'au réglage du lit des basses eaux et des eaux moyennes. Ces ouvrages provoquent une régularisation très progressive et presque sans répercussion en amont. Ils produisent en somme une modification transversale de la section localisée aux environs des ouvrages et qui ne modifie pas très sensiblement les caractéristiques hydrauliques dans un lit assez large. Mais l'action peut être assez lente et par le fait même aléatoire; les crues peuvent la compromettre.

Cependant, des ouvrages perméables de cette nature ont été employés très fréquemment pour les travaux d'amélioration du Mississippi inférieur, non seulement sous forme d'ouvrages longitudinaux, mais aussi d'ouvrages transversaux attachés aux rives et surtout pour les resserrlements. (cfr The improvement of the lower Mississippi River for flood control and navigation, par T.H. Jackson et D.O. Elliott, 1932, U.S. Waterways experiment Station, Vicksburg).

Pour la formation de nouvelles rives, on a notamment employé des écrans à claire-voie en planches, articulées sur le fond à des fascines lestées et à des caisses lestées de pierres et supportées en tête par des fûts flottant près de la surface. Ces écrans prenaient une position inclinée dans le sens du courant. (fig. 19)

On a aussi employé des parois inclinées d'abattis (grosses branches), disposées suivant le talus à réaliser et fixées sur le fond par des massifs de pierres (fig. 20).

Les resserrlements locaux peuvent être réalisés plus rapidement par des terrassements. On construit des digues longitudinales plus ou moins insubmersibles, en enrochements, fascinages, gravier ou terres protégées par des revêtements. Les déblais dragués dans le cours d'eau sont déposés en remblai

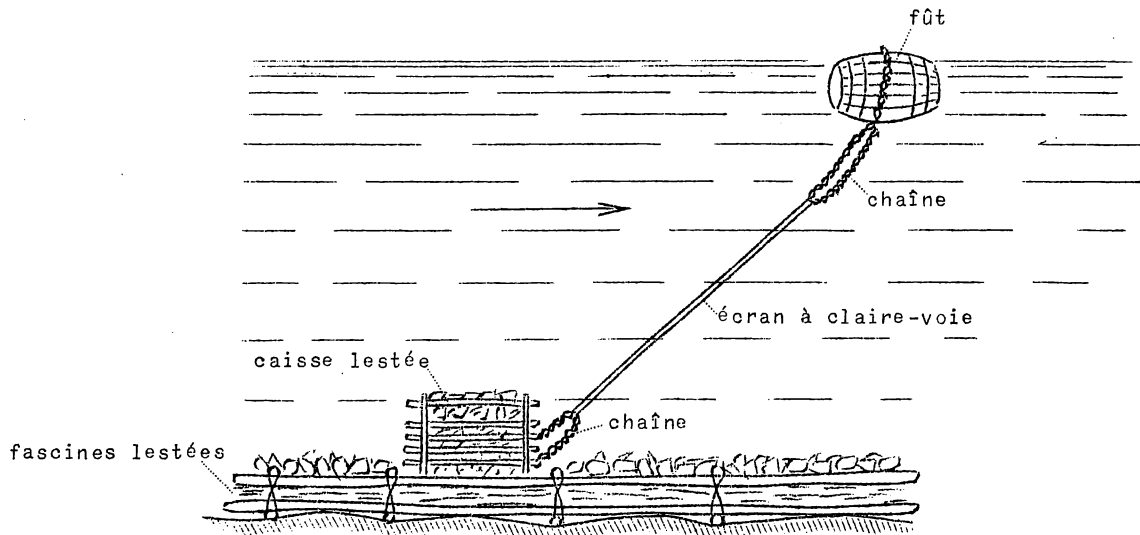


Fig. 19.

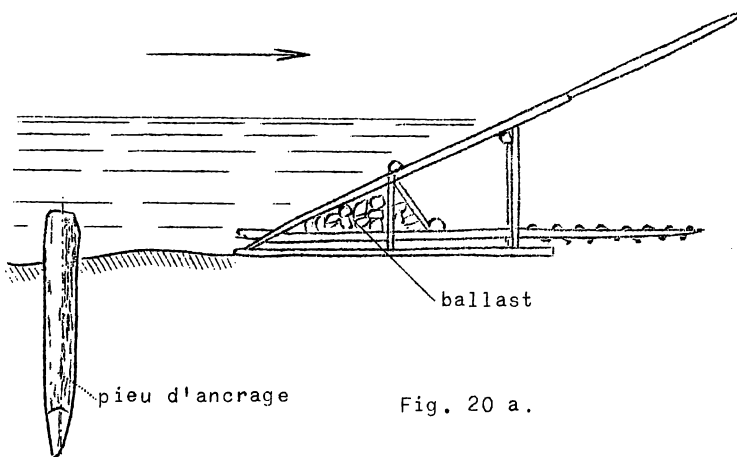
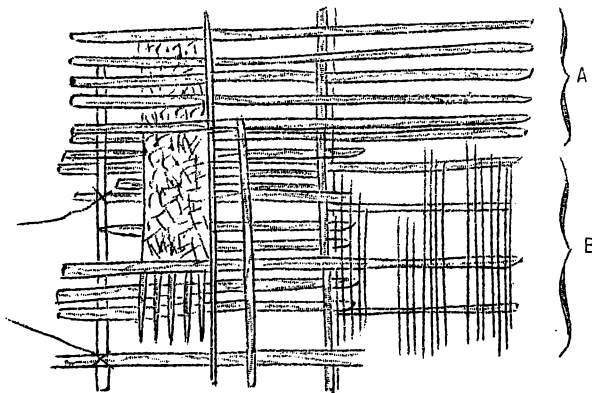


Fig. 20 a.



A : perches inclinées
B : perches inférieures

Fig. 20 b.

derrière les digues. Par exemple, pour la régularisation de certains tronçons du Pô, des sables dragués dans le fleuve ont été refoulés derrière un revêtement de fascines de soutènement élevé en même temps que le remblai. Cfr I lavori sul Po per la sistemazione del fiume a correcte libere. Annali dei Lavori Publici, mai et juin 1928). Comme dans les modifications provoquées par les ouvrages perméables, on peut considérer que les travaux de terrassement définis ci-dessus, réalisent une compensation transversale des déblais et des remblais, mais en réalisant une section d'écoulement favorable (cfr également "Bulletin de l'Association internationale permanente des Congrès de navigation", janvier 1934).

Le remblayage des faux bras se fait avantageusement de manière analogue, par des digues basses, laissant de préférence passer un certain débit aux hautes eaux. La fermeture complète se fait lorsqu'en vue de la navigation, il faut concentrer toutes les eaux moyennes dans le bras principal. Lorsque le barrage livre passage au chemin de halage, il est très oblique par rapport à la rive extérieure du bras abandonné. Il faut dans cet angle aigu du barrage et de la rive prévoir un ancrage spécial normal pour éviter les affouillements et le déracinement du barrage en temps de crue. Il est avantageux de multiplier les levées transversales dans l'ancien lit si l'on veut éviter les affouillements et par contre en hâter le colmatage. (fig. 21).

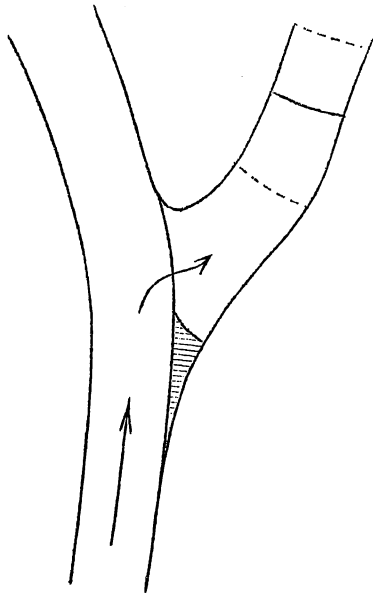


Fig. 21.

Les élargissements se font par les méthodes connues de terrassement et de dragage. L'emploi du déblai par jet d'eau sous pression est à citer; il a été employé aux travaux du Mississippi, notamment pour le réglage des nouveaux talus de berges. (réf. cit.).

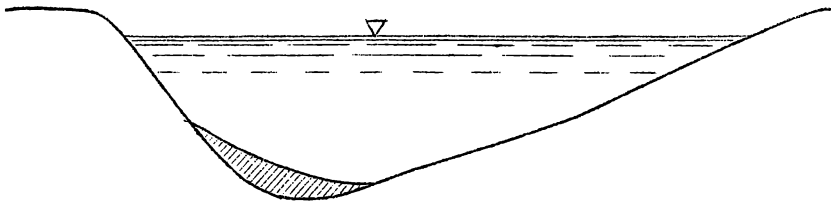


Fig. 22.

Dans les courbes, les rives concaves doivent être éventuellement protégées par des revêtements appropriés contre les effets de l'érosion.

Il faut éviter principalement l'affouillement au pied des berges par approfondissement du lit. Il convient donc de fixer en ces points les fonds trop mobiles par des seuils de fond, en enrochements ou en fascinages, arasés un peu en-dessous du plafond que l'on veut réaliser (0,30 m dans le Wésér). Ils sont légèrement plongeants et pas trop écartés ($1/5^e$ de la largeur au plan d'eau d'étiage environ). (fig. 22). On réalise de la sorte, en même temps qu'une fixation du lit, une régularisation de la pente.

2.- ENLEVEMENT DES ECUEILS ET CORRECTION DES SEUILS

Les écueils isolés, qui constituent un danger pour les bateaux, sont dragués ou retirés. S'ils sont très considérables, ils sont divisés par des

explosifs. Les seuils sont de diverses natures : les seuils rocheux élevés sur le fond du lit par l'érosion remontante qu'ils arrêtent en formant des rapides; les seuils de dépôt fixes, provenant de la configuration du cours d'eau, notamment en aval des confluent, et les seuils accidentels, dus à des éboulements par exemple.

Les seuils de dépôt, qui se produisent en un point d'inflexion, en aval d'un confluent dans le cours d'eau principal ou en amont dans l'affluent, proviennent de causes permanentes et ne peuvent donc être modifiées que par action sur ces causes. C'est donc une question de correction générale, en rapport avec l'importance du débit solide. Si cette correction ne peut donner des résultats satisfaisants et que l'on procède à des dragages, ceux-ci devront être repris périodiquement. On se contente éventuellement de draguer un chenal au travers des seuils de dépôt très importants dans un cours d'eau très large et de l'entretenir.

Un seuil accidentel, dû à un éboulement de berges par exemple, s'enlève par dragage, en tout ou partie selon l'importance et les circonstances.

Les seuils rocheux constituent un problème très difficile, à cause de la très forte pente et des courants violents dans les rapides. S'ils sont très étendus, il est impossible de les araser complètement par les explosifs, à cause de l'importance excessive du travail. Il est d'ailleurs probable, comme le prouve la barre d'Istein dans le Rhin, que l'érosion remontante fasse renaître le seuil.

On se borne généralement à établir un chenal à travers le seuil, en suivant le tracé qui se raccorde le mieux aux chenaux naturels d'amont et d'aval et en évitant les courants trop violents dans les rapides. Ces travaux ne modifient pas beaucoup l'état du fleuve et ne peuvent avoir guère que des conséquences locales. Il faut d'ailleurs y veiller en limitant l'importance du chenal artificiel, de manière à éviter un abaissement considérable des eaux en amont. Ces travaux sont très aléatoires, car il n'est pas certain que l'on réalise dans la passe créée dans le seuil une profondeur suffisante et une vitesse assez faible, par suite des fortes pentes. On peut aussi craindre des dépôts en aval, cependant à une certaine distance de l'issue de la passe, par suite de la vitesse acquise, de sorte que le raccordement au chenal naturel d'aval peut être possible, si les circonstances sont favorables. On cite comme caractéristiques les travaux de la passe de Bingen, dans le Rhin, et des Portes de fer, dans le Danube. (Planche 17, fig. 2).

On peut aussi contourner les seuils par des dérivations navigables, éclusées ou non, comme dans les canalisations avec dérivations, les seuils faisant office de barrage déversoir. En cas de canalisation, les barrages s'établissent en général en aval des seuils ou sur ceux-ci.

3.- COUPURES

Les coupures, notamment rectilignes, étaient autrefois plus en honneur qu'actuellement. Par l'augmentation de pente et de vitesse qu'elles créent, elles troublent l'équilibre du cours d'eau, qui tend à réduire la pente,

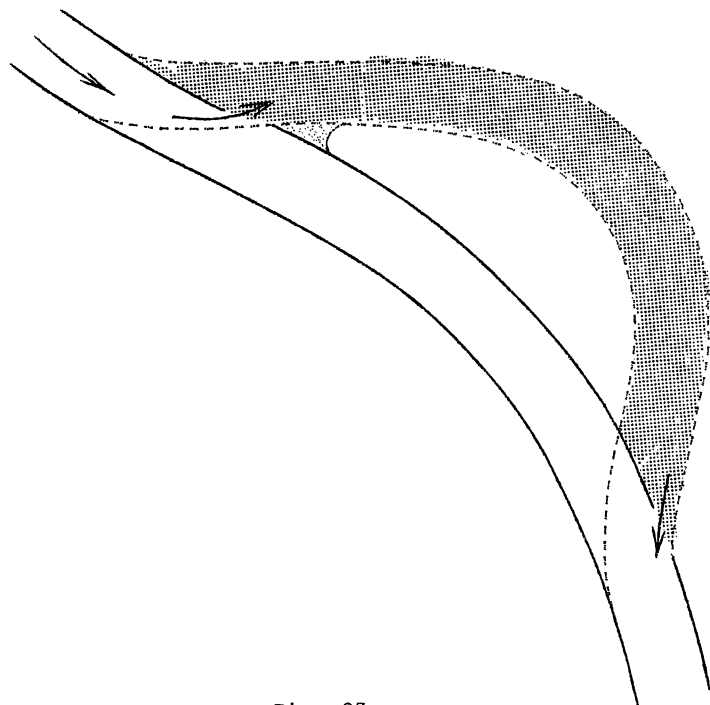


Fig. 23.

par abaissement en amont et exhaussement en aval. D'autre part, il est très difficile de maintenir un chenal régulier dans un lit rectiligne à fond mobile. Les dépôts s'y font sans l'action directrice qui existe dans les lits sinueux. (cfr chap. XIX, par. 5). Aussi les coupures s'établissent-elles actuellement d'après les règles de Fargue. Elles doivent être convenablement calibrées et consolidées. On les construit d'aval en amont, soit sous eau par dragage, après enlèvement à sec de la cunette superficielle et ouverture d'un chenal de dragage, ou à sec entre digues. Dans ce dernier cas, après creusement de la coupure, on perce d'abord complètement la digue d'aval,

puis on ouvre la digue d'amont; le courant même en emporte la majeure partie. On régularise ensuite à la drague. L'ouverture se fait de préférence en basses eaux. L'ancien lit est ou non barré en amont. S'il est barré, on laisse une ouverture pour le colmatage, comme pour la suppression des faux-bras. Une bonne disposition consiste à guider les eaux vers la coupure par une digue partant de la rive extérieure et interrompue avant d'arriver à l'ancienne rive intérieure (fig. 23).

4.- CONFLUENTS

Les confluent sont des points singuliers dont la configuration naturelle n'est pas toujours favorable et dont les effets en aval sont souvent mauvais.

D'une manière générale, les affluents ont un régime moins tranquille que le cours d'eau principal et lui apportent des matières solides dans une mesure dépassant son point de saturation. (cfr chap. XVI).

Il se forme donc des dépôts en aval, notamment des bancs très élevés de gravier immédiatement en aval du confluent, dont la formation est favorisée par l'élargissement qui y existe habituellement. Les dispositions les plus désavantageuses à ce point de vue, sont les dispositions tangentielles (fig. 24), à cause de la grande largeur, et la disposition normale (fig. 25), à cause du changement brusque de direction et des remous consé-

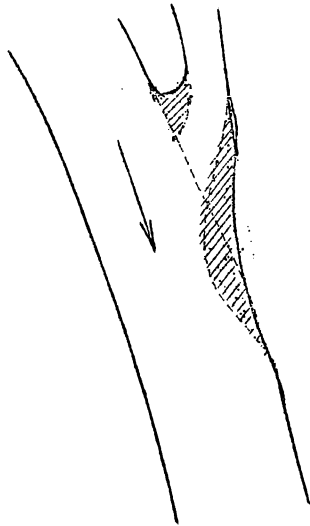


Fig. 24.

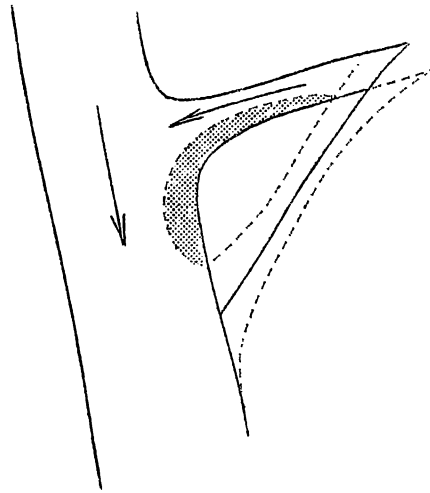


Fig. 25

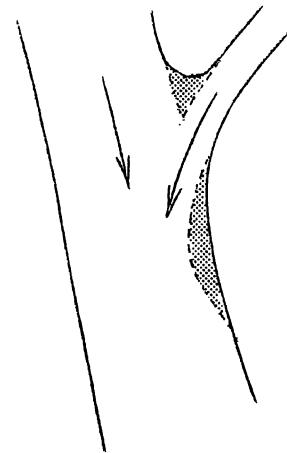


Fig. 26.

cutifs. La disposition la plus avantageuse est celle de la rencontre sous un angle aigu pas trop faible (fig. 26); elle permet un calibrage convenable du lit en aval. Il est utile, pour favoriser la réunion tranquille des deux courants et régulariser le dépôt d'alluvions à la pointe du confluent, d'y établir un ouvrage triangulaire plongeant, formant diffuseur; il doit être bien ancré à la pointe du confluent (fig. 26).

Mais des dépôts peuvent aussi se former dans l'affluent en amont du confluent, par suite du courant tourbillonnaire se développant par la réaction du courant du cours d'eau principal aux hautes eaux. La vitesse du courant affluent est donc réduite à la rive extérieure; il s'y forme un dépôt.

L'inverse se produit à la rive opposée. L'effet est d'autant plus marqué que l'angle des deux cours d'eau est plus grand et que les crues du cours d'eau principal sont plus importantes par rapport à celles de l'affluent. Car, dans ce cas, le cours d'eau principal en crue peut former un véritable barrage d'eau pour l'affluent.

Il peut donc y avoir intérêt à corriger une embouchure trop ou trop peu inclinée sur le cours d'eau principal. Le manque d'inclinaison peut se corriger facilement par des ouvrages noyés. L'excès d'inclinaison exige un détournement de l'embouchure vers l'aval. Il faut alors considérer soigneusement la question des pentes.

Outre ces effets locaux, que l'on peut corriger dans une certaine mesure, les affluents à grand débit solide exhausent le lit du cours d'eau principal sur une grande distance en aval. C'est le cas des dépôts de l'Ourthe dans la Meuse à la traversée de Liège. Ces seuils étendus peuvent être enlevés par des dragages, comme dans la Meuse à Liège. Ils doivent être renouvelés périodiquement si le débit solide de l'affluent est très important.

5.- CORRECTIONS ETENDUES

Les corrections étendues peuvent être considérées comme formées d'une succession de corrections locales du genre de celles qui ont été examinées dans les paragraphes précédents, exécutées d'une manière systématique successivement d'aval vers l'amont. Cette méthode satisfait au principe de progressivité exposé au chapitre précédent.

La grande difficulté est d'obtenir une profondeur suffisante sur les seuils fixes. Dans les premières tentatives d'amélioration, on a cru pouvoir atteindre ce résultat par le calibrage et le resserrement du lit. (Planche 17, fig. 3, a). Cette méthode consistait à calculer la section et la pente du cours d'eau par les formules ordinaires de l'hydraulique, comme pour un canal artificiel et de manière à obtenir une profondeur et une vitesse satisfaisantes. On réalisait ensuite ces sections par des endiguements longitudinaux submersibles ou non. Le plus souvent, cette méthode était accompagnée de coupures, construites suivant le profil calibré et destinées à augmenter et régulariser la pente. L'erreur du principe de cette méthode était de considérer le fleuve comme un canal à fond fixe et sans débit solide. Les conséquences déjà exposées de cette erreur se sont toujours produites et d'autant plus que le régime était plus torrentiel. (cfr chap. XIX, par. 4 et par. 5, Correction du Rhin entre Strasbourg et Bâle. Aussi planche 17, fig. 3, b, chenal de Miribel dans le Rhône).

L'emploi de digues basses submersibles a pu donner localement des résultats, surtout pour la fixation des rives concaves.

L'emploi d'épis, surtout plongeants, et de seuils de fond peut donner également des résultats satisfaisants dans certains cas. Ces constructions réalisent en somme la fixation du lit sur une certaine longueur. Cependant les premiers essais d'épis isolés et très distants ont été des échecs. Il est évident que la fixation du lit doit être continue; le principe de ce mode de correction est de fixer le lit autant que possible, sans modifier artificiellement les conditions d'écoulement. C'est le fleuve lui-même qui crée son nouveau lit fixé.

Cette dernière méthode a été mise au point surtout en Allemagne dans les cours d'eau très tranquilles; elle s'est révélée supérieure à la précédente, mais elle semble peu apte à créer des profondeurs. Elle réalise une certaine stabilité du lit, une régularisation progressive du cours par colmatage, qui fait récupérer sur le cours d'eau de grandes étendues de terrains bas, que l'on met en culture.

Il est apparent que les deux méthodes précédentes se complètent en quelque sorte et que les digues longitudinales doivent présenter moins d'inconvénients dans un lit artificiellement fixé par des épis. De là l'idée du système mixte, due principalement à Girardon (planche 16, fig.2). Il comporte essentiellement des digues basses longitudinales fixant les rives concaves et des épis fixant les rives convexes, ainsi que des seuils de fond dans les courbes et pour orienter convenablement les maigres près des points d'inflexion. Il sera basé sur les règles de Fargue, d'une manière qui convient au cours du fleuve et qui découle de l'observation.

Le tracé sinueux de Fargue permet par la détermination d'une longueur convenable du talweg un ajustement optimum de la pente, de la section, de la profondeur et des vitesses.

On peut de la sorte espérer fixer les seuils et y réaliser le plus grand mouillage possible, fixer et régulariser les rives, éventuellement provoquer des atterrissements. La réduction progressive de la pente est empêchée par la fixation du lit. Les profondeurs initiales sur les seuils sont éventuellement réalisées par dragages. Si des dépôts se produisent, il faut les enlever par des dragages périodiques d'entretien. Ces dépôts peuvent se produire du fait qu'une section à fond fixé joue par rapport à l'aval le rôle d'un seuil rocheux et entraîne donc une réduction de pente en amont et un engravement sur le seuil, tandis qu'en aval il y a éventuellement érosion.

Il convient de préciser le rôle des dragages dans les corrections. On considère parfois les dragages seuls comme une méthode de correction, employée sur de grands fleuves comme la Volga, le Mississippi, etc... Ces dragages permettent de créer un chenal dans des cours d'eau trop larges pour faire l'objet d'une correction proprement dite. Il est évident que les vitesses croîtront en ces régions de profondeur maximum, phénomène que l'on appelle assez arbitrairement une concentration de courant ou un appel d'eau.

Mais il en résulte nécessairement un accroissement d'érosion et des réactions transversales, dont l'effet ne peut être en général de maintenir les profondeurs créées par dragage, mais bien de les combler et éventuellement de réduire les pentes. D'ailleurs, en période de crue, où l'approfondissement n'exerce guère d'influence sur le mouvement des eaux, les dépôts encombreront nécessairement le chenal dragué. Le terme de correction est donc impropre pour les dragages.

Mais les travaux de dragage constituent des auxiliaires utiles et presque indispensables des corrections. Il est utile de créer les profondeurs initiales à la drague, laissant au cours d'eau corrigé le soin de les maintenir plutôt que de les créer lui-même. L'efficacité des dragages est donc soutenue par la correction. Ensuite, le dragage est nécessaire pour l'enlèvement des dépôts qui peuvent se produire, comme on l'a vu, dans le lit fixé.

On a indiqué au chapitre XIX, paragraphe 5, que les travaux de correction du Rhin entre Lauterbourg et Bâle, ayant produit un raccourcissement du cours de 14 % et une augmentation correspondante de la pente, une érosion intense s'est produite en amont, accompagnée de dépôts considérables et d'une mobilité très grande du chenal plus en aval.

L'Escaut moyen, entre la frontière franco-belge et Gand, a fait de 1880 à 1930, l'objet de travaux de régularisation et de canalisation, qui ont réduit sa longueur de 113 à 88 km (raccourcissement de 25 km ou 22,125 %). La pente moyenne est passée de 0,00011 à 0,00014. Selon M.L.J. Tison (Transport des matières solides et sédimentation dans la vallée de l'Escaut, Bruxelles, 1951), l'Escaut transporte beaucoup plus de matières solides à la frontière française (305.000 m³ par an environ) qu'à Gand

(185.000 m³/an environ). Il y a donc des dépôts qui s'effectuent dans le tronçon considéré.

On y enlève en moyenne 105.000 m³ par dragage annuel.

CHAPITRE XXI

PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS ET AMELIORATION
DE L'ECOULEMENT DES CRUES

1.- PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

La première idée qui est venue à l'esprit, et qui a été appliquée pour protéger des endroits menacés d'inondation, est la construction de digues insubmersibles. On en a indiqué les conséquences générales qui sont une réduction de la pente dans la région endiguée et un abaissement du fond à l'amont, ainsi qu'un relèvement du fond en aval. Le débit de crue est diminué et il se produit une aggravation de la montée de l'eau à l'amont de la zone endiguée. (Chap. XIX, par. 2, par. 4 et par. 7).

Mais il faut tenir compte encore de ce que la crue est un écoulement variable; la capacité d'emmagasinement du fleuve est réduite par l'endiguement et l'écoulement de la crue est ralenti; il en résulte une élévation du niveau maximum des crues. Les exemples fameux des digues du Pô, de la Theiss et de la Loire (planche 18, fig. 1 et 2 a, - planche 19, fig. 3 a), montrent l'obligation incessante dans laquelle on se trouve d'élever toujours davantage le couronnement des digues. Les conséquences d'une rupture deviennent toujours plus graves et il en est souvent résulté de grandes catastrophes.

2.- AMELIORATION DE L'ECOULEMENT DES CRUES

Au lieu de réduire l'écoulement des crues par des endiguements, on peut le favoriser par enlèvement des obstacles du lit : suppression des seuils naturels et artificiels (barrages), approfondissement du lit et régularisation de pente, élargissement du lit, suppression des sections rétrécies (ponts, barrages), redressement des courbes raides, etc...

Lorsqu'elle est économiquement applicable, cette méthode est considérablement supérieure. Cependant elle peut aggraver la situation en aval d'une manière inadmissible, surtout si le maximum de la crue ainsi accélérée coïncide davantage avec le maximum de crue d'un affluent d'aval. Il faut donc être circonspect et se baser sur les courbes de propagation et des débits des crues établies pendant de nombreuses années. Au point de vue de l'amélioration de l'écoulement des crues par le dragage du seuil de la Meuse dans la traversée de Liège, provenant des apports de l'Ourthe, la situation était favorable parce que sur un assez long cours à l'aval, il n'y a plus d'affluents importants.

3.- UTILISATION DE RESERVOIRS D'EMMAGASINEMENT POUR LA PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

D'une manière générale, l'onde de crue va en s'atténuant vers l'aval d'autant plus que la capacité d'emménagement du lit majeur est plus élevée, ainsi qu'il a été établi au chapitre XIV. Cette observation constitue le principe d'un autre système de protection contre les inondations : la création de capacités d'emménagement des crues par le moyen de barrages de réservoirs. Il faut que les réservoirs de crues soient vides aux époques de crues possibles, afin de présenter le maximum de capacité. Leur vidange doit même être éventuellement assez rapide afin qu'ils puissent fonctionner pour une seconde crue, suivant de près la première. Mais il faut de nouveau étudier attentivement les conséquences possibles du décalage des crues qui en résulte sur les inondations à l'aval, afin d'éviter des coïncidences de crues du cours d'eau principal et d'affluents.

L'étude de l'influence des réservoirs de crue, naturels ou artificiels, procède de l'étude des ondes de crue, de leur propagation et de leur emménagement (chap. XIV), ainsi qu'à l'étude du mouvement de l'eau dans les réservoirs, exposée dans des paragraphes suivants.

Une première catégorie de réservoirs de crue est celle à pertuis libre, dont le type est le barrage de Pinay sur la Loire (planche 19, fig. 3, b). Il barre une gorge d'une capacité naturelle de 93.000.000 m³ et l'augmente de 20.000.000 m³ lors des grandes crues; il réduit le débit immédiatement en aval d'un quart et retarde le maximum de 2 heures. C'est donc réellement une capacité d'emménagement libre, dont le débit de sortie dépend de la hauteur dans le réservoir et est réduit par l'étranglement que constitue le pertuis.

Soit ABC la courbe d'onde de crue en amont du barrage (fig. 27). Si la capacité est assez grande, l'onde de crue AB'C' en aval du barrage est donc étalée en aval et son maximum y est réduit. La capacité d'emménagement est proportionnelle à l'aire ABB' (fig. 27). Comme le débit

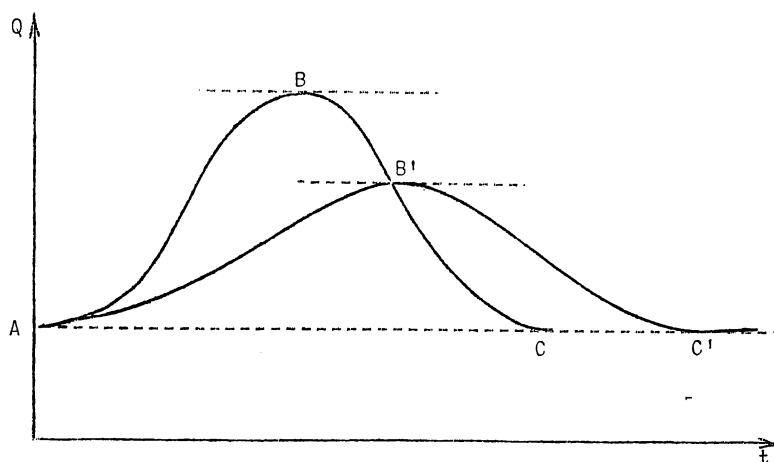


Fig. 27.

d'aval est maximum en même temps que la hauteur, ils correspondent tous deux au point B' de rencontre des 2 courbes d'onde immédiatement en amont et en aval du barrage.

Si la capacité du réservoir n'est pas suffisante, l'eau se déverse par dessus la crête du barrage. Dans ce cas (courbe AB'C'), l'action réductrice est moindre qu'elle le

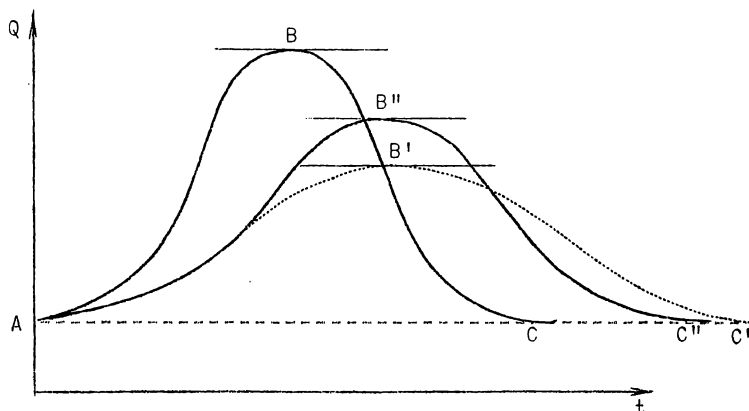


Fig. 28.

serait en absence de débordement (courbe $AB''C''$), conformément au second schéma de la figure 28.

Ces deux schémas sont tout-à-fait généraux. En partant d'une courbe connue des débits d'amont, il faut déterminer exactement la courbe des débits d'aval d'après les volumes du réservoir et les propriétés hydrauliques de pertuis.

Plus en aval encore, la courbe d'onde s'étendra davantage en général, le maximum de débit allant en décroissant par rapport à celui atteint dans le pertuis du réservoir.

Elle peut éventuellement présenter des maxima secondaires provenant du jeu de l'emmagasinement du réservoir et du lit majeur en aval. Des barrages de ce genre peuvent convenir dans les plaines basses; ce sont alors des tronçons de digues transversales destinées à accroître la capacité d'emmagasinement du lit d'inondation. Mais il faut évidemment qu'il n'en résulte pas de dommages aux terres riveraines. On peut les constituer sous formes de levées transversales pleines non étanches dans les endroits où les inondations peuvent s'étaler sans dommages. Cette solution ne peut être qu'occasionnellement avantageuse. Elle a été rejetée pour le Mississippi. (Rapport Jadwin, Engineering News Record, 15 décembre 1927).

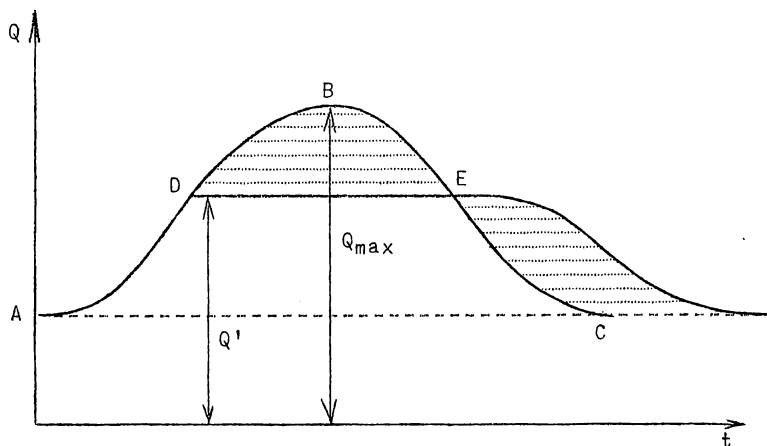


Fig. 29.

Une autre catégorie de réservoirs est celle des réservoirs à débit réglé par des pertuis commandés. En principe, on ouvre les vannes de telle sorte que le débit sortant soit constant et égal au débit maximum Q' admissible en aval. (fig. 29). La capacité du réservoir doit être $> DBE$ et présenter donc une marge de sécurité, sinon le débit d'aval devra être supérieur à Q' .

Lors de la décrue et au-delà du point E, on vide le volume DBE au temps qui est le plus favorable pour le cours d'aval.

Ce système a été appliqué au Fier, émissaire du lac d'Annecy, ainsi que sur des émissaires de certains lacs alpins italiens. Il ne peut guère donner de résultats appréciables que pour de petits cours d'eau torrentiels ou dans les cours supérieurs de grands cours d'eau. Dans les cours moyens et inférieurs des grands cours d'eau, il faut des capacités énormes (environ un demi milliard de m³ pour la Loire).

Le prix de construction par m³ emmagasiné varie de 0,30 à 0,60 fr or. Ces capacités d'emmagasinement ne se trouvent généralement que dans les vallées supérieures; leur effet sur le cours moyen et inférieur est fortement atténué par la distance et contrebalancé par la réduction de l'emmagasinement dans les plaines inondées d'aval.

La dépense d'établissement de telles capacités est hors de proportion avec les résultats obtenus et il semble qu'on pourrait éventuellement obtenir à moindre prix un résultat plus satisfaisant en rétablissant un lit majeur suffisant dans les passages rétrécis, même dans la traversée de certaines villes.

4.- DERIVATIONS DE CRUE

On peut aussi envisager, pour protéger une région déterminée, généralement une grande ville, et lorsque les circonstances sont favorables, de dériver en dehors du cours d'eau, une partie du débit des crues par une dérivation, qui peut être en même temps un canal de navigation ou de force motrice. On abaisse ainsi le niveau des crues dans le tronçon correspondant du cours d'eau. Ce dispositif très efficace convient aux cours d'eau de toutes importances. C'est ainsi que le canal de Charleroi à Bruxelles contribue à l'évacuation des têtes de crue de la Senne en aval de Lembeq. C'était la principale disposition prévue par le projet Jadwin (1927) pour l'abaissement des crues du Mississippi dans la région de Nouvelle Orléans. Des décharges successives étaient prévues dans les rivières Boeuf et Atchafalaya et aussi dans le lac Pontchartrain, en amont de Nouvelle-Orléans, par un déversoir maçonné d'une capacité de 7100 m³/". Pour la protection de Paris contre les inondations, on a aussi projeté une dérivation des eaux de la Marne aboutissant en Seine à l'aval de Paris. Elle servirait en même temps à la navigation et même de bassin d'accumulation par pompage pour la régularisation de la marche des centrales thermiques de la région parisienne.

5.- AUTRES MOYENS DE PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS

Les crues calamiteuses proviennent parfois de la coïncidence de crues du cours d'eau principal et d'affluents. On peut chercher, par des travaux, à accélérer l'écoulement de certains flots, de manière à éviter ces coïncidences. Ces dispositions dépendront des caractères des différents bassins et des observations séculaires; elles sont assez aléatoires.

On a envisagé parfois aussi, (projet Jadwin cité) de créer des tranchées absorbantes, afin d'accroître l'emmagasinement souterrain. Ces procédés sont

peu efficaces et peuvent donner lieu à des jaillissements et à des pollutions de nappes souterraines. Ils n'ont pas reçu d'applications importantes.

Le projet Jadwin relatif au Mississippi prévoyait aussi à certains endroits dans les digues des safety-plugs, c'est-à-dire des déversoirs préparés, disposés en des endroits où les submersions peuvent se produire avec les moindres inconvénients. Des déversoirs analogues existent dans les digues de la Loire (planche 19, fig. 3, a), et aux digues de certains canaux français dans la traversée des lits d'inondation (cfr Déversoirs de crue sur le Mississippi près de Cairo, E.-U. Le Génie Civil, 26-10-29).

6.- RESERVOIRS REGULATEURS DE DEBIT D'ETIAGE

On a indiqué précédemment (chapitre XIX, par. 5), que la navigabilité est parfois entravée par le manque de mouillage résultant d'une insuffisance de débit d'étiage. De là découle le principe de l'emmagasinement des excédents de débit des hautes eaux pour soutenir le débit d'étiage; on allonge en même temps théoriquement la durée des hautes eaux navigables. Le principe est pratiquement applicable quand le débit à ajouter est assez faible, notamment pour une navigation à faible tirant d'eau (de l'ordre de 1,40). On peut réduire le cube à emmagasiner en ne faisant débiter le réservoir qu'aux heures réglementaires de navigation, donc pendant 8 à 12 heures par jour, d'après les saisons. La navigation avalante est favorisée par l'onde de propagation du débit. Il faut alors évidemment qu'il existe à des intervalles convenables des refuges où les bateaux trouvent les profondeurs voulues en dehors des heures de navigation. Ce système n'est pas exempt d'aléas, notamment du danger d'interruption de navigation par avaries à la manoeuvre d'alimentation. Il faut donc des dispositifs très sûrs, comportant des pertuis de réserve. Il faut tenir compte des pertes du réservoir par évaporation et infiltration, qui peuvent être relativement fortes dans les années sèches. Ce système a reçu jusqu'à présent peu d'applications.

On lui préfère généralement la canalisation. Il a été appliqué à certains fleuves allemands pour la raison que l'amélioration du cours était insuffisante pour assurer un mouillage satisfaisant et qu'une canalisation était difficile à cause des terrains bas riverains. Le Wésér supérieur recevait du réservoir de Waldeck (202 millions de m³), qui emmagasine des eaux de l'Eder, sous-affluent du Wésér par la Fulda, un débit pouvant atteindre jusqu'à 35 m³/'' en période sèche.

On réalisait ainsi un mouillage minimum croissant de 1,10 à 1,55 de l'amont à l'aval; une puissance hydroélectrique atteignant jusqu'à 5000 CV, une protection efficace contre les pointes de crue, l'irrigation des cultures riveraines et l'alimentation du canal Rhin-Hanovre, qui croise le Wésér à Minden. Des réservoirs de capacité analogues ont été projetés pour l'Elbe et pour l'Oder, à la suite des résultats satisfaisants de l'expérience du Wésér. Les faibles pentes et le régime très tranquille de ces fleuves sont favorables à ce système, dont l'application à des cours d'eau à régime moins tranquille est moins appropriée. D'ailleurs, même pour les fleuves allemands, on a eu finalement recours à la canalisation.

7.- MOUVEMENT DE L'EAU DANS LES RESERVOIRS

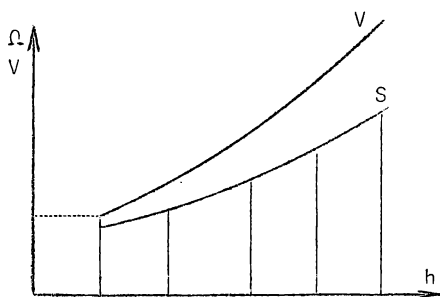


Fig. 30.

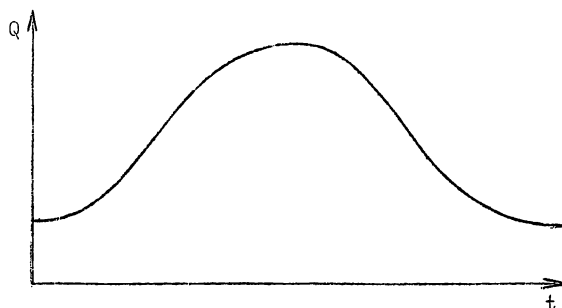


Fig. 31.

On connaît généralement :

1°) La loi d'accroissement du volume

$$V = \int_{h_0}^h S \cdot dh$$

du réservoir en fonction de la hauteur d'eau et la courbe

$$V = v(h)$$

qui la représente. S est la surface horizontale du plan d'eau au niveau h dans le réservoir (fig. 30).

2°) La loi des débits d'amont alimentant le réservoir

$$Q = q(t) \quad (\text{fig. 31}).$$

3°) La loi des débits d'aval sortant du réservoir, soit en fonction de h

$$Q' = q'(h) ,$$

si le pertuis est libre, ou en fonction du temps,

$$Q' = q'(t) ,$$

si le pertuis est manoeuvré.

Il faut déterminer la variation du niveau h en fonction du temps

$$h = f(t).$$

L'équation élémentaire de continuité s'écrit :

$$(Q - Q') \cdot dt = dV = S \cdot dh .$$

Donc

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q - Q'}{S}$$

est l'équation différentielle du mouvement de l'eau dans les réservoirs.

Cette équation n'est généralement pas intégrable, on procède par l'équation aux différences finies et de préférence par voie graphique.

A) On connaît la variation de Q' en fonction de h (fig. 32). On trace le diagramme $Q = q(t)$ par rapport à un axe des abscisses t et à un axe des ordonnées Q . Sur le même axe, on porte les ordonnées h de la courbe $S = f(h)$, dont l'axe des abscisses S est le prolongement négatif de l'axe des t . On connaît $Q' = q'(h)$. On part d'un état initial connu, dont les éléments donnés sont Q_0, Q'_0, h_0 et t_0 .

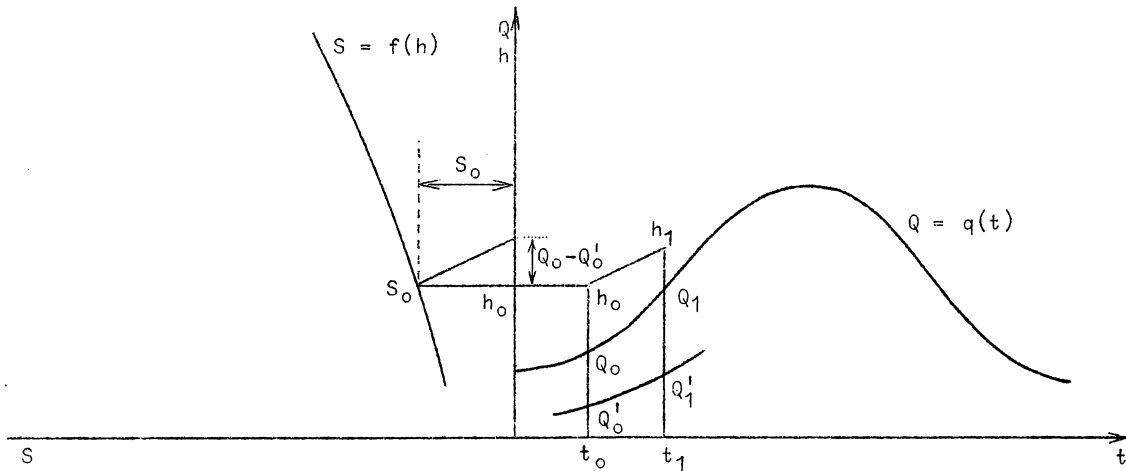


Fig. 32.

On connaît donc $Q_0 - Q'_0$ et S_0 . A partir du pied de l'abscisse S_0 , on porte vers le haut sur l'axe des Q la longueur $Q_0 - Q'_0$. La droite joignant le point S_0 à l'extrémité de ce segment définit

$$\left(\frac{dh}{dt}\right)_0 = \frac{Q_0 - Q'_0}{S_0}.$$

Elle détermine la direction de la tangente au point initial h_0 de la courbe $h = f(t)$. On confond la courbe avec cette tangente dans l'intervalle $t_1 - t_0$, ce qui donne

$$h_1 = h_0 + (t_1 - t_0) \cdot \left(\frac{dh}{dt}\right)_0.$$

D'où $Q'_1 = q'(h_1)$, et on opère de même de proche en proche. On peut se rendre compte que les erreurs peuvent être toujours modérées et tendent à se compenser. Car si, par exemple, h_1 est trop grand, Q'_1 est trop grand, $\left(\frac{dh}{dt}\right)_1$ trop petit et $h_2 - h_1$ trop petit. C'est l'inverse si Q_1 est trop petit. On voit que l'on obtient en même temps la courbe $Q' = q'(t)$.

On a

$$V = \int S \cdot dh = \int (Q - Q') \cdot dt$$

La différence des aires des courbes des débits représente le volume emmagasiné. On obtient la courbe des volumes en fonction de h par intégration de la courbe $S = f(h)$; la courbe des débits cumulés en fonction de t par l'intégration de la courbe $Q = q(t)$. La courbe des débits cumulés différentiels représente les volumes en fonction du temps. La correspondance entre ces 2 courbes intégrales définit aussi la relation $h = f(t)$.

B) Lorsque c'est $Q' = q'(t)$ qui est connu, on opère précisément par les courbes de V et de $\int (Q - Q').dt$, qu'on obtient par intégration des courbes $S = f(h)$ et $Q - Q' = q(t) - q'(t)$ tracées comme précédemment. Pour un temps donné t_1 , on a

$$\int_{t_0}^{t_1} (Q - Q').dt = V_1 = \int_{h_0}^{h_1} S.dh$$

on en déduit h_1 .

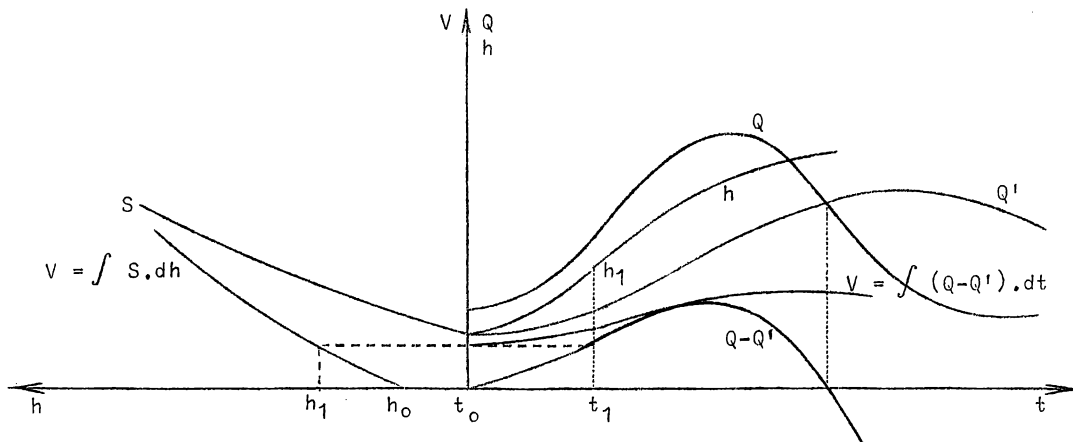


Fig. 33.

On peut donc tracer la courbe $h = f(t)$ (fig. 33). Il faut évidemment que les conditions initiales t_0, h_0 , etc..., soient concordantes.

Il peut arriver, notamment lors des crues, que Q soit l'élément inconnu. Des observations permettent de déterminer la loi $h = f(t)$, ainsi que $Q' = q'(t)$, car elle est connue si le barrage est manoeuvré, ou se déduit de $Q' = q'(h)$ s'il est libre. On doit opérer en sens inverse de ce qui précède et dériver au lieu d'intégrer.

On a
$$\frac{Q - Q'}{S} = \frac{dh}{dt} \quad \text{d'où} \quad Q = Q' + S \cdot \frac{dh}{dt}$$

On peut donc par l'observation limnimétrique d'un réservoir de barrage à orifice taré, déterminer les débits d'amont, sous réserve des pertes qui doivent être assimilées à un débit sortant.

C) L'étude d'un réservoir régulateur d'étiage doit se faire en se basant sur une courbe $Q = q(t)$ annuelle relevée pendant l'année d'observation la plus défavorable (année sèche). Dans les circonstances théoriques les plus simples, on peut supposer l'envoi en aval en période d'étiage d'un débit constant Q' . La courbe de Q' est une parallèle à l'axe des t , celle de $\int Q'.dt$ une droite inclinée (fig. 34).

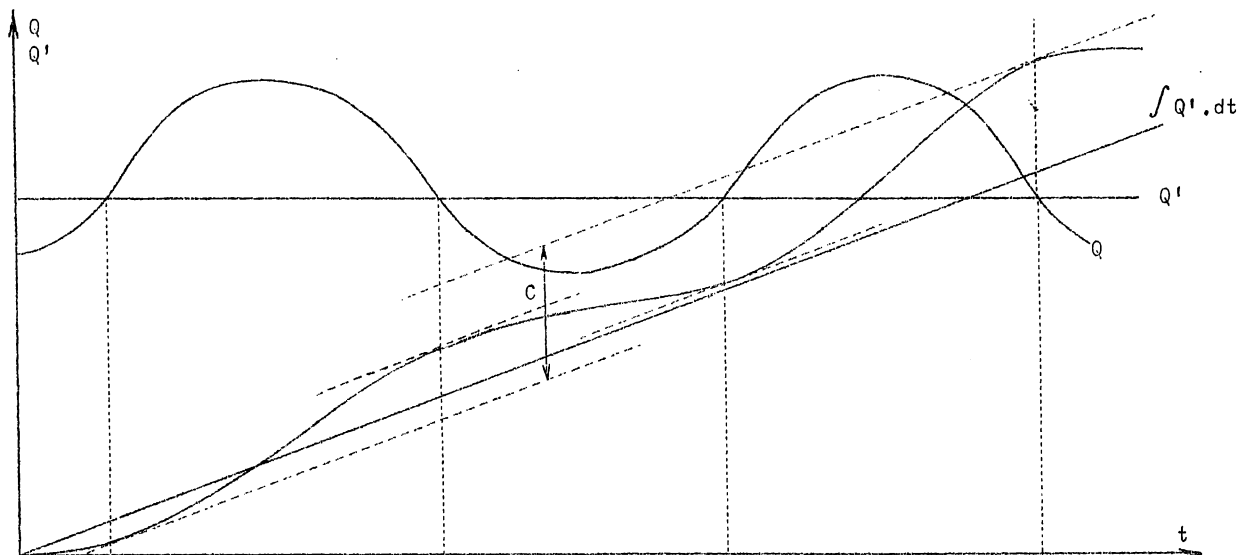


Fig. 34.

La différence $\int Q.dt - \int Q'.dt$ indique l'excès cumulé du débit entrant sur le débit sortant. La capacité maximum théoriquement nécessaire s'obtient en menant à l'intégrale de $Q.dt$ les tangentes parallèles à l'intégrale de $Q'.dt$. Elles correspondent aux points d'intersection des courbes Q et Q' . La capacité est représentée par l'ordonnée la plus grande interceptée entre les tangentes parallèles extrêmes.

On voit qu'on peut aussi considérer les tangentes parallèles à l'axe des abscisses à la courbe $\int Q.dt - \int Q'.dt$. On détermine encore la capacité par la plus grande ordonnée interceptée entre les deux tangentes extrêmes, donc entre le minimum le plus bas et le maximum le plus haut.

Sous cette forme, la conclusion peut être généralisée pour une loi de variation quelconque de Q' (fig. 35, page 44).

Il est prudent de prévoir une réserve supplémentaire dont il n'est d'ailleurs pas difficile de trouver un emploi fructueux, selon l'exemple du Wésér.

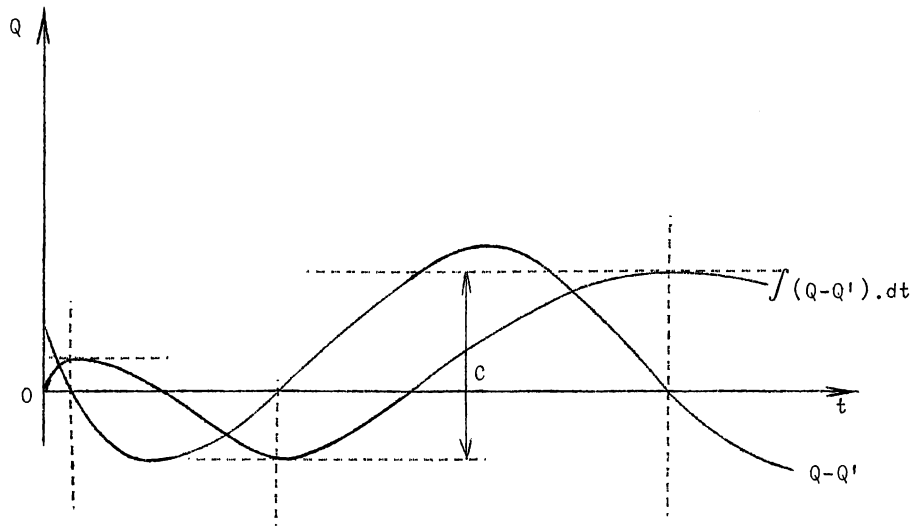


Fig. 35.

CHAPITRE XXII

CANALISATION DES COURS D'EAU

1.- GENERALITES

La canalisation des cours d'eau est le moyen le plus efficace pour assurer la navigabilité des cours d'eau qui ne sont pas naturellement navigables. Elle consiste à créer partout des profondeurs suffisantes pour la navigation d'une manière permanente et en dehors des périodes de hautes eaux, par le moyen d'ouvrages de retenue. Ces ouvrages, qui retiennent les eaux à un niveau déterminé en amont, divisent le cours d'eau en biefs séparés par des chutes, comme dans les canaux de navigation. Ces ouvrages doivent permettre l'écoulement du débit ainsi que le passage des bateaux.

Le système le plus simple de canalisation consiste à franchir un rapide par le moyen d'une dérivation éclusée, qui constitue en somme un élément de canal latéral (chapitre XX, par. 2). M. Lechallas avait proposé anciennement une canalisation par barrages de soutènement ou seuils de fond des cours d'eau à forte pente. Cela consistait à construire dans le lit des barrages noyés formant en quelque sorte des seuils rocheux artificiels. Ces barrages arrêtent l'érosion vers l'amont et provoquent la formation de véritables rapides, qui sont franchis par des dériva-tions éclusées. Entre ces barrages, la pente du lit se réduit et un état d'équilibre stable peut se créer. C'est en somme une extension de système de correction appliqué aux torrents. Le système ne semble pas avoir reçu d'applications intéressantes sous cette forme, mais la canalisation par barrages fixes émergents ou noyés, qui comporte souvent des dériva-tions éclusées, lui est en principe identique. Ce système convenait pour les petits cours d'eau à forte pente et pour une navigation à faible tonnage, tels que l'ancienne canalisation déclassée de l'Ourthe.

Un autre système rudimentaire était celui de la canalisation à navigation intermittente par éclusées ou lâchures ou bonds d'eau. Les biefs étaient séparés par des barrages contenant des pertuis de navigation. Pour le passage des bateaux, ces pertuis étaient ouverts. Le bateau franchissait le pertuis avec l'onde d'écoulement et navigait vers l'aval favorisé par l'onde de propagation du débit de lâchure. La remonte était rendue pénible par cette onde de propagation et le franchissement du pertuis contre le courant était très difficile. Les chutes devaient évidemment être très faibles. Malgré cela, le franchissement dangereux des pertuis n'était possible que pour des bateaux de faible tonnage. L'abaissement du plan d'eau d'amont lors de la lâchure pouvait faire échouer les bateaux. Ce système, qui a notamment été anciennement appliqué sur l'Yonne et sur la Seine supérieure, n'est plus employé que pour le flottage des bois, par exemple sur certaines rivières canalisées en Europe centrale.

Cependant cette idée a trouvé plus récemment un regain de faveur en Allemagne, probablement tout théorique. Un projet de canalisation pour la Worra, petit cours d'eau à forte pente, a même été établi d'après ce principe. Il prévoyait une succession de biefs assez courts séparés par des portes. Les longueurs des biefs étaient telles que la navigation en descente aurait été presque continue, sans longs arrêts aux portes. Le bateau descendrait en somme de bief en bief avec l'éclusée. A la remonte, la navigation aurait été beaucoup plus difficile et le bateau aurait toujours été exposé à s'échouer en cas d'éclusée à l'aval. Il n'aurait pu franchir un bief qu'à la faveur d'une éclusée d'amont.

Dans le même ordre d'idées, en vue de supprimer la perte de temps due aux éclusages, on a proposé, également en Allemagne, d'appliquer le système précédent aux dériviations contournant les barrages des rivières canalisées. Toute la dérivation deviendrait en somme un grand sas fermé à l'amont et à l'aval par une porte simple. Le bateau descendant ou montant s'engagerait sans chute dans la dérivation. La porte franchie se fermerait derrière lui et celle vers laquelle il s'avance s'ouvrirait aussitôt. Le niveau s'établirait à celui du bief vers lequel le bateau s'avancerait, en créant un courant favorable en descente, mais défavorable en remonte. La longueur de la dérivation devrait être calculée de telle sorte que le changement de niveau se produise en un temps légèrement plus court que celui qui est nécessaire au bateau pour parcourir la dérivation à vitesse normale et sans qu'il se produise de courants excessifs. Il aurait fallu prévoir dans ces dériviations un moyen de traction spécial des bateaux, par exemple le halage funiculaire, qui pourrait être mû par de l'électricité produite par la chute.

Le système de canalisation moderne et perfectionné appliqué aux grandes voies d'eau comporte des biefs séparés par des barrages mobiles et réunis par des écluses de navigation à sas. Depuis une centaine d'années, ce système n'a cessé de se perfectionner (par l'augmentation des chutes) et de s'étendre. Il a encore reçu d'importantes applications récentes, sur le Rhin entre Brisach et Strasbourg et sur des fleuves et rivières allemands, sur lesquels des travaux d'amélioration et même de régulation du débit d'étiage par de grands réservoirs n'avaient pu assurer une navigabilité satisfaisante.

2.- ETABLISSEMENT D'UN PROJET DE CANALISATION

Des levés topographiques et hydrographiques fournissent les profils en long du talweg et des rives et les profils en travers. Les mesures hydrométriques établissent les courbes limnimétriques des débits et les courbes annuelles limnimétriques et de régime. A partir de l'origine aval 0 de la canalisation, on trace l'axe hydraulique correspondant au débit minimum et réalisant au droit du barrage d'aval la flottaison maximum (fig. 36). Cette flottaison est déterminée par la condition de laisser subsister une revanche suffisante des rives et de ne pas provoquer de relèvement de la nappe aquifère pouvant entraîner des submersions de terrains

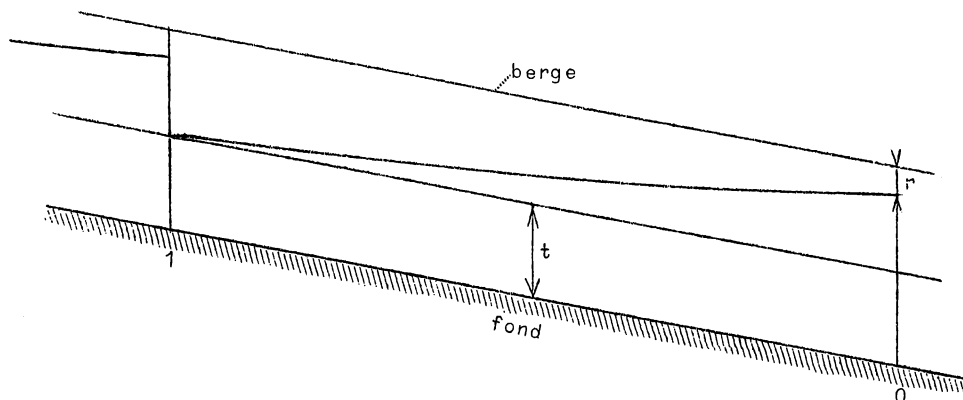


Fig. 36.

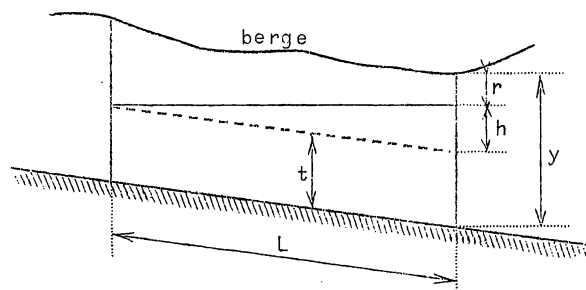


Fig. 37.

riverains. L'axe ainsi tracé assure un relèvement suffisant jusqu'au point en amont où la profondeur est égale au mouillage minimum t . En ce point 1, il faut établir un nouveau barrage, à partir duquel on recommence les mêmes opérations, et ainsi de suite de proche en proche en remontant le cours d'eau. En admettant pour les faibles débits que la ligne d'eau est horizontale (fig. 37), on a les relations :

$$h = L \cdot i \quad \text{et} \quad h = y - t - r ,$$

d'où
$$L = \frac{h}{i} = \frac{y - (t + r)}{i}$$

La longueur des biefs est donc inversement proportionnelle à la pente et croît avec la hauteur des rives au-dessus du fond du lit.

Il faut ensuite dans chaque bief tracer l'axe hydraulique pour le plus fort débit avant effacement complet du barrage et vérifier si la revanche par rapport aux rives est partout suffisante, car il peut y avoir des points bas. L'examen de l'effet éventuel de relèvement sur les nappes souterraines et les ruisseaux affluents doit se faire jusqu'à la limite de relèvement possible sur les deux rives.

Il résulte de ceci que les chutes dans la canalisation d'une rivière ne sont pas arbitraires. Elles sont limitées par la hauteur des rives et le danger d'immersion des terrains bas riverains; la longueur des biefs en découle.

Mais il y a évidemment intérêt pour la navigation, pour l'économie de construction et d'exploitation, ainsi que pour la récupération d'énergie hydroélectrique, d'adopter les plus fortes chutes et les plus longs biefs possibles. On peut selon les circonstances, modifier la répartition naturelle des biefs pour les allonger et augmenter la chute en approfondissant la rivière par dragage en amont et en élevant le plan d'eau au-dessus des rives en aval par le moyen de digues (fig. 38).

Ces dispositions sont cependant coûteuses et parfois aléatoires. Il faut envisager l'influence sur l'écoulement des crues et, en tous cas, drainer les terrains en contrebas des digues. La solution dépendra d'une étude comparative technique et économique dans chaque cas concret.

Ce système a été appliqué au bief de Liège de la Meuse canalisée.

Les travaux de canalisation s'accompagnent de calibrages et de régularisations. Les ouvrages d'art (barrages et ponts) doivent être établis de manière à produire le moindre remous possible lors de l'écoulement des crues.

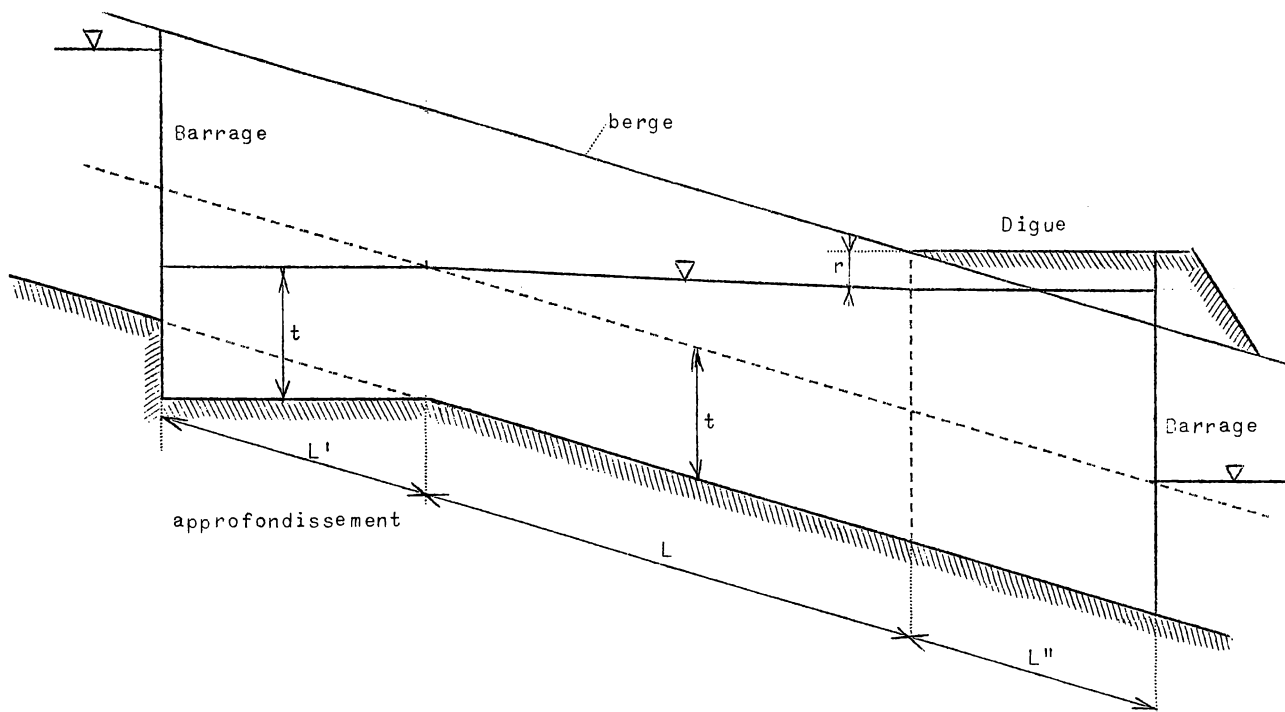


Fig. 38.

3.- EMPLACEMENT DES BARRAGES ET ECLUSES

Les emplacements à adopter pour les barrages découlent des considérations du paragraphe précédent, mais demandent des levés précis et une étude attentive, car il faut tenir compte des accidents du fond et des rives, dont les discontinuités locales gênantes peuvent être corrigées. Il y a intérêt à établir les barrages en aval des seuils, de manière à avoir une hauteur de rive avantageuse et une profondeur suffisante au-dessus des seuils. Les écluses sont accolées en rivière aux barrages ou bien placées dans des dérivations contournant les barrages.

Il faut tenir compte de la tendance au comblement derrière le barrage, surtout pour les barrages fixes. Pour les barrages mobiles, effacés en temps de crue, les dépôts peuvent ne pas être permanents.

On a vu (chapitre XVI) que la force de traction du cours d'eau par m² du lit peut s'exprimer par

$$T = \varepsilon \cdot \gamma_e \cdot h \cdot i \quad [\text{Chap. XVI, par. 2, form. (16)}]$$

Pour une profondeur h' et une pente i' , à débit égal

$$T' = \varepsilon \cdot \gamma_e \cdot h' \cdot i' .$$

Or, on sait que si la largeur du lit est peu variable et en admettant par approximation le mouvement uniforme dans les 2 cas :

$$\frac{h^3}{h'^3} = \frac{i'}{i} \quad (\text{chapitre X})$$

Donc

$$\frac{T}{T'} = \frac{h'^2}{h^2}$$

pour un lit rectangulaire.

Pour un lit parabolique

$$\frac{T}{T'} = \frac{h'^3}{h^3} \left. \vphantom{\frac{T}{T'}} \right\} \text{ par m}^2 \text{ du lit.}$$

Pour un lit triangulaire

$$\frac{T}{T'} = \frac{h'^4}{h^4}$$

Par mètre de longueur du cours d'eau, pour toute sa largeur, il faut considérer le rapport des puissances d'entraînement

$$\frac{\theta \cdot \gamma_e \cdot Q \cdot i}{\theta \cdot \gamma_e \cdot Q \cdot i'} = \frac{i}{i'} \quad (\text{chapitre XVI})$$

qui vaut, pour des lits de forme :

rectangulaire	parabolique	triangulaire
$\frac{h'^3}{h^3}$	$\frac{h'^4}{h^4}$	$\frac{h'^5}{h^5}$

La réduction de la puissance d'entraînement est la plus grande dans les premiers temps de la canalisation, à cause de la croissance de largeur avec h . Dans la suite, au fur et à mesure du comblement éventuel, la force d'entraînement varie par variation de h et de i avec tendance à un nouvel état d'équilibre du fond, si les dépôts ne sont pas enlevés par dragage, comme dans l'Escaut canalisé en amont de Gand.

4.- PASSES DE FLOTTAGE

Les passes de flottage servent au passage des trains de bois. Elles sont constituées par des canaux rectangulaires, généralement maçonnés, de faible largeur (12,00 m) et faible profondeur (0,60 m), formés généralement par une vanne lovante à l'amont. Une passe de flottage est toujours

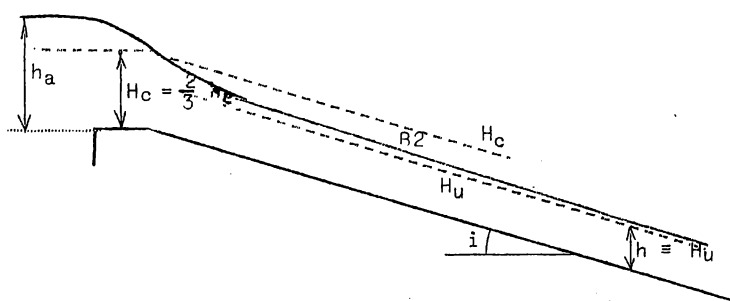


Fig. 39.

un canal à forte pente et généralement de section prismatique. D'après les exposés des chapitres X et XI, la ligne d'eau est un axe $B2$. En ne tenant pas compte de la vitesse d'amenée d'amont, négligeable près du barrage, et en ne considérant pas de contraction latérale (entrée profilée), le débit est : (fig. 39)

$$Q = \frac{2}{3} \cdot l \cdot h_a \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot g \cdot h_a = \sim 1,7 \cdot l \cdot h_a^{3/2}$$

La hauteur à l'entrée est $H_c = \frac{2}{3} \cdot h_a \cdot \sqrt{1 - i^2} = \sim \frac{2}{3} \cdot h_a$

et tend à l'aval vers $h \equiv H_u$.

Donc $Q = l \cdot h \cdot u$ et $u = C \cdot \sqrt{R \cdot i} = \sim C \cdot \sqrt{h \cdot i}$

d'où $Q = C \cdot l \cdot h \cdot \sqrt{h \cdot i} = C \cdot l \cdot h^{3/2} \cdot i^{1/2}$

On en déduit $h^{3/2} = \frac{1,7}{C \cdot i^{1/2}} \cdot h_a^{3/2}$

et $h_a = \frac{C^{2/3} \cdot i^{1/3}}{(1,7)^{2/3}} \cdot h = 0,7 \cdot C^{2/3} \cdot i^{1/3} \cdot h$

Pour réaliser la profondeur minimum requise h sans débit excessif, c'est-à-dire avec une valeur de h_a pas trop élevée, il faut réduire C , c'est-à-dire augmenter la rugosité du canal. Il y aurait aussi intérêt à réduire la pente i , mais pour une chute donnée entre les biefs, la longueur du canal est inversement proportionnelle à i . L'économie impose donc des pentes assez fortes. Mais il y a aussi une limite supérieure à cette pente, par exemple économique si l'on veut conserver le plus grand débit disponible pour une centrale hydroélectrique par exemple. Il y a d'ailleurs aussi une limite de vitesse pour le flottage des trains de bois.

Or $u = C \cdot h^{1/2} \cdot i^{1/2}$, d'où $i^{1/2} = \frac{u}{C \cdot h^{1/2}}$

Ceci détermine le maximum de $i = \frac{u^2}{C^2 \cdot h}$ si l'on limite le maximum de u et le minimum de h .

Comme i varie en sens inverse de C^2 , il y a intérêt économiquement à diminuer C , c'est-à-dire à augmenter la rugosité du canal, pour augmenter i et diminuer la longueur de l'ouvrage. Mais Q et h_a sont alors indépendants de i , car

$$Q = l \cdot h \cdot u \quad \text{et} \quad h_a = 0,7 \cdot \left(\frac{Q}{l}\right)^{2/3}$$

Si la chute est H , la longueur de la passe de flottage est $L \geq \frac{H - h_a + h}{i}$

A l'extrémité aval de la passe de flottage, on établira en général un canal divergent formant diffuseur, de manière à réaliser un raccordement de la ligne d'eau à la flottaison aval sans ressaut si possible. On peut aussi établir à l'extrémité aval de la passe de flottage des dispositifs destinés à dissiper l'énergie cinétique du courant rapide de la passe de flottage, par exemple des radeaux oscillants noyés. Mais il en résultera nécessairement une agitation analogue à celle d'un ressaut. Il est recommandable d'étudier les dispositions détaillées d'une passe de flottage sur toute son étendue sur des modèles à échelle réduite.

L'établissement du fond de la passe en gradins de pente moyenne i n'est pas efficace au point de vue de la majoration de la rugosité. D'après Engels, la pente fictive réduite correspondante est $\frac{i}{1+i}$. Il est possible d'obtenir des résultats plus sensibles en augmentant artificiellement la rugosité du fond et des parois, mais il faut prendre des précautions et établir éventuellement des dispositifs protecteurs, pour éviter que les trains de bois puissent être abîmés par ces parois rugueuses.

Sur les rivières scandinaves, aux barrages des usines hydroélectriques, qui très souvent ne comportent pas d'écluses de navigation, les passes de flottage sont des canaux en bois très

lisses, de section parabolique assez faible, dans lesquels l'eau s'écoule à très grande vitesse et les pièces de bois y descendent par grumes isolées.

5.- ECHELLES A POISSONS. CANAUX EXTRA-RUGUEUX

Les échelles à poissons ont pour but de permettre aux poissons de franchir les chutes des barrages, lorsqu'ils remontent les rivières canalisées à l'époque du frai.

On a recours à des dispositifs créant des petites chutes ou des vitesses assez faibles, qui soient franchissables par les poissons, et de dimensions strictement nécessaires pour ne pas écouler un trop grand débit et ne pas trop encombrer le lit. On emploie notamment des échelles formant de multiples petites cascades, des conduits divisés par des chicanes etc... Un système plus intéressant est basé sur une disposition dont des applications plus étendues ne paraissent pas impossibles et ont été envisagées. Il s'agit des canaux ultra-rugueux Denil.

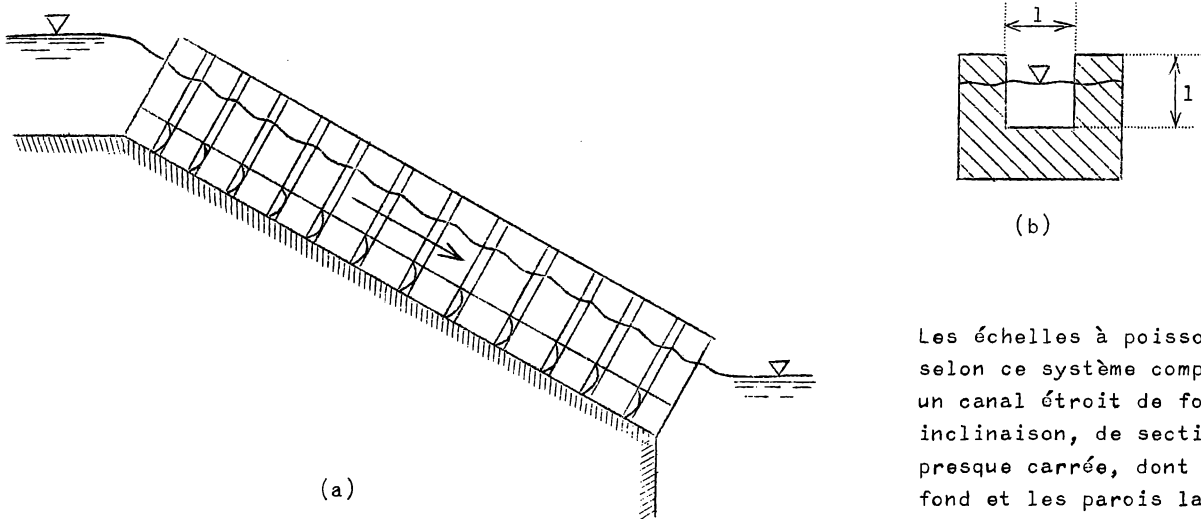


Fig. 40.

Les échelles à poissons selon ce système comportent un canal étroit de forte inclinaison, de section presque carrée, dont le fond et les parois latérales sont munis d'aubages profilés tournant leur concavité vers l'amont et

dont la forme optimum est déterminée par l'expérience [fig. 40, (a), (b)]. Cette disposition produit une grande agitation tourbillonnaire, comparable à celle qui résulterait d'une rugosité très considérable des parois. En même temps, il se forme une véritable émulsion d'air dans l'eau.

M. Denil propose l'emploi de la formule de Bazin
$$u = \frac{87\sqrt{R \cdot i}}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}$$

Il trouve pour γ la valeur $4,82 \sqrt{\frac{1}{0,60}}$ (en fonction du m.)

1 étant en mètres la dimension de la section libre carrée d'écoulement. Donc pour $1 = 0,60$, $\gamma = 4,82$ et cette valeur croît avec 1. Or, d'après Bazin, γ varie de 0,06 à 1,75 d'après la rugosité des parois des canaux ordinaires (ciment lissé à lit en terre encombré de gravier et d'herbes). L'efficacité des aubages Denil serait donc considérable.

Le principe des canaux Denil est d'un très grand intérêt théorique. Pratiquement il n'a reçu que peu d'applications sous forme d'échelles à poissons, dont l'efficacité est mise en doute par certains. Les canaux ultra-rugueux Denil n'ont pas fait l'objet d'un grand nombre d'études et constituent un domaine dans lequel des investigations restent à faire.

Pour le canal d'irrigation de Belen (Rio Grande District, U.S.A), on a utilisé pour une certaine prise un canal de section triangulaire, de 12 % de pente, rachetant une chute de 25 m. L'énergie à détruire pour réaliser un écoulement lent correspond à 4000 C.V. On a disposé tous les 12 m des barrages en V, de 1,80 m de hauteur, avec le sommet du V vers l'amont. La prise d'eau, à 6,25 m au-dessus du point le plus bas, se fait immédiatement en amont d'un des seuils. Le résultat est satisfaisant. Les sables et graviers franchissent les seuils latéralement. Des seuils en V avec les sommets vers l'aval donnaient les moins bons résultats. Des seuils droits n'étaient pas non plus satisfaisants. (Civil Engineering, novembre 1934). De tels dispositifs doivent être étudiés sur modèles à échelle réduite.

APPENDICE A LA 5^e SECTION

NOTE SUR LES
TRAVAUX DE PROTECTION DE LA REGION DE LIEGE
CONTRE LES INONDATIONS

1.- INTRODUCTION

Liège est arrosée par la Meuse à environ 600 km de sa source. Le cours du fleuve y présente une singularité importante : le confluent de l'Ourthe situé à la rive droite. Ceci a une grande influence sur les crues et sur les inondations de la région.

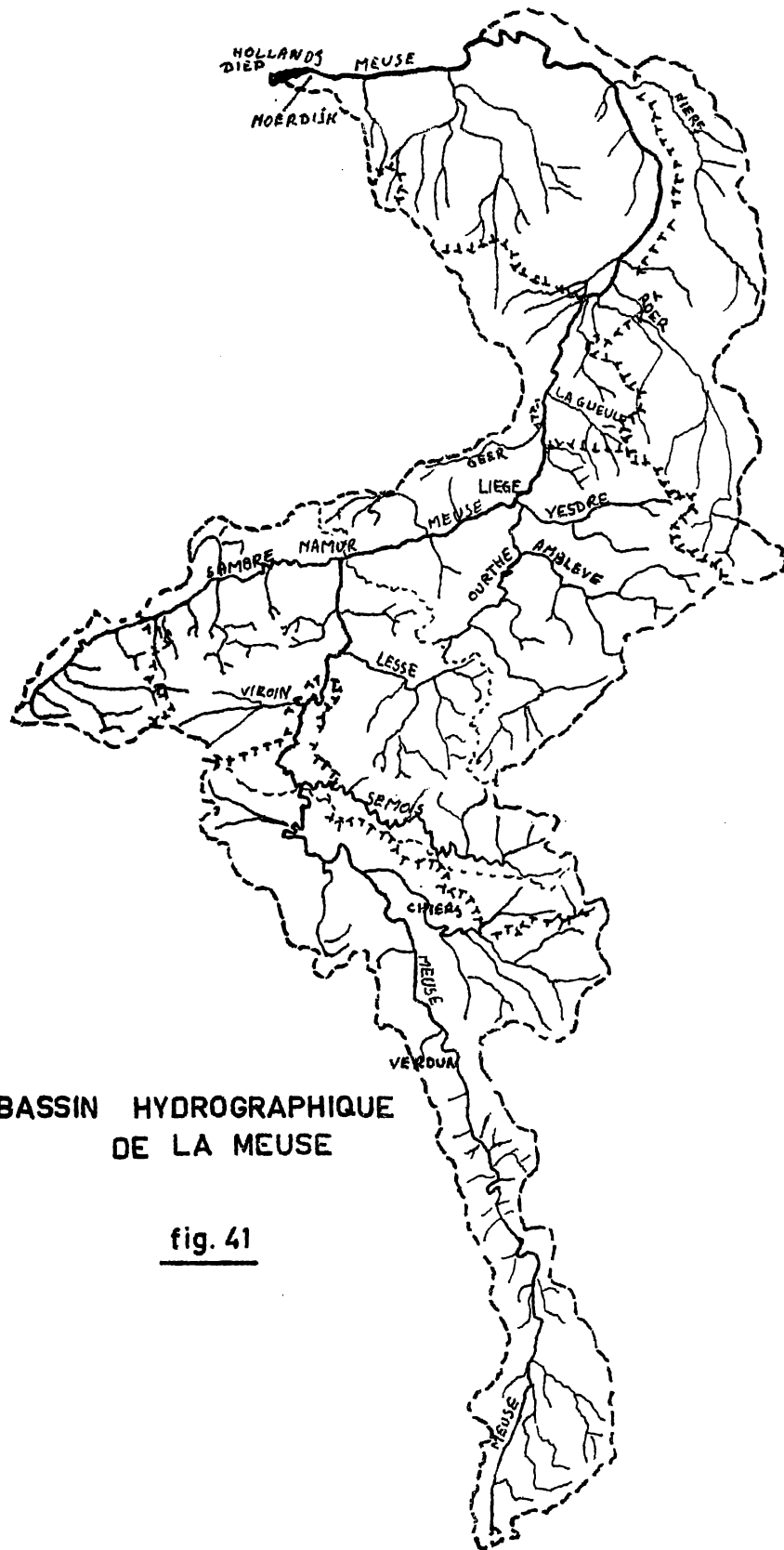
On voit sur la carte du bassin hydrographique de la Meuse (fig. 41), qu'il a une faible largeur moyenne en territoire français. Dans ce cours amont de 414 km, le fleuve draine un territoire d'environ 8800 km², ce qui correspond à une largeur moyenne de 21,2 km du bassin. Le bassin s'élargit en Belgique; il double de superficie de la frontière française à Namur, pour un cours de 119 km. La largeur moyenne du bassin y passe à 72,2 km. (fig. 42). Une succession d'affluents à bassins imperméables et à caractère torrentiel donne lieu à des crues soudaines dans la région de Namur, en avance sur les crues d'amont. C'est ainsi que lors de la dernière grande crue de 1925-1926, le niveau maximum a été atteint à Namur 40 heures avant qu'il se produisit à Mézières, situé à 144 km en amont. (1)

Cette situation se répercute sur les crues de la région liégeoise, d'autant plus que dans son cours entre Namur et Liège, la Meuse reçoit divers affluents, tous torrentiels, et qu'à Liège même, l'Ourthe lui apporte la contribution d'un bassin de 3400 km². Le diagramme des profils en long de la Meuse et de ses affluents met en évidence le caractère torrentiel de ceux-ci.

Le profil en long du fleuve est naturellement influencé par les affluents; c'est là un phénomène bien connu. C'est ainsi qu'au confluent de la Lesse, la pente de la Meuse passe brusquement à 0,60 m/km, pour redescendre lentement à 0,44 m/km à Namur. (fig. 43). En amont de Liège, la pente diminue par suite de l'exhaussement du lit dû au confluent de l'Ourthe; cet exhaussement produit nécessairement une augmentation de pente en aval de Liège. Ce seuil est nettement visible sur un profil en long de détail, il résulte du dépôt provenant du débit solide de l'affluent torrentiel, plus grand que celui du cours d'eau principal, qui se trouve ainsi sursaturé. (fig. 44).

L'Ourthe se jette dans la Meuse après avoir recueilli les eaux de divers affluents, dont l'Amblève et la Vesdre sont très importants. Dans la première moitié du 19^e siècle, elle formait encore à son confluent un véritable delta de gravier (fig. 45), dans lequel coulaient de nombreux bras naturels ou plus ou moins aménagés, sur lesquels étaient établis des moulins et des usines. (*)

(*) Cfr. fig. 1, 2 et 3, ch. XIX, par. 1.



**BASSIN HYDROGRAPHIQUE
DE LA MEUSE**

fig. 41

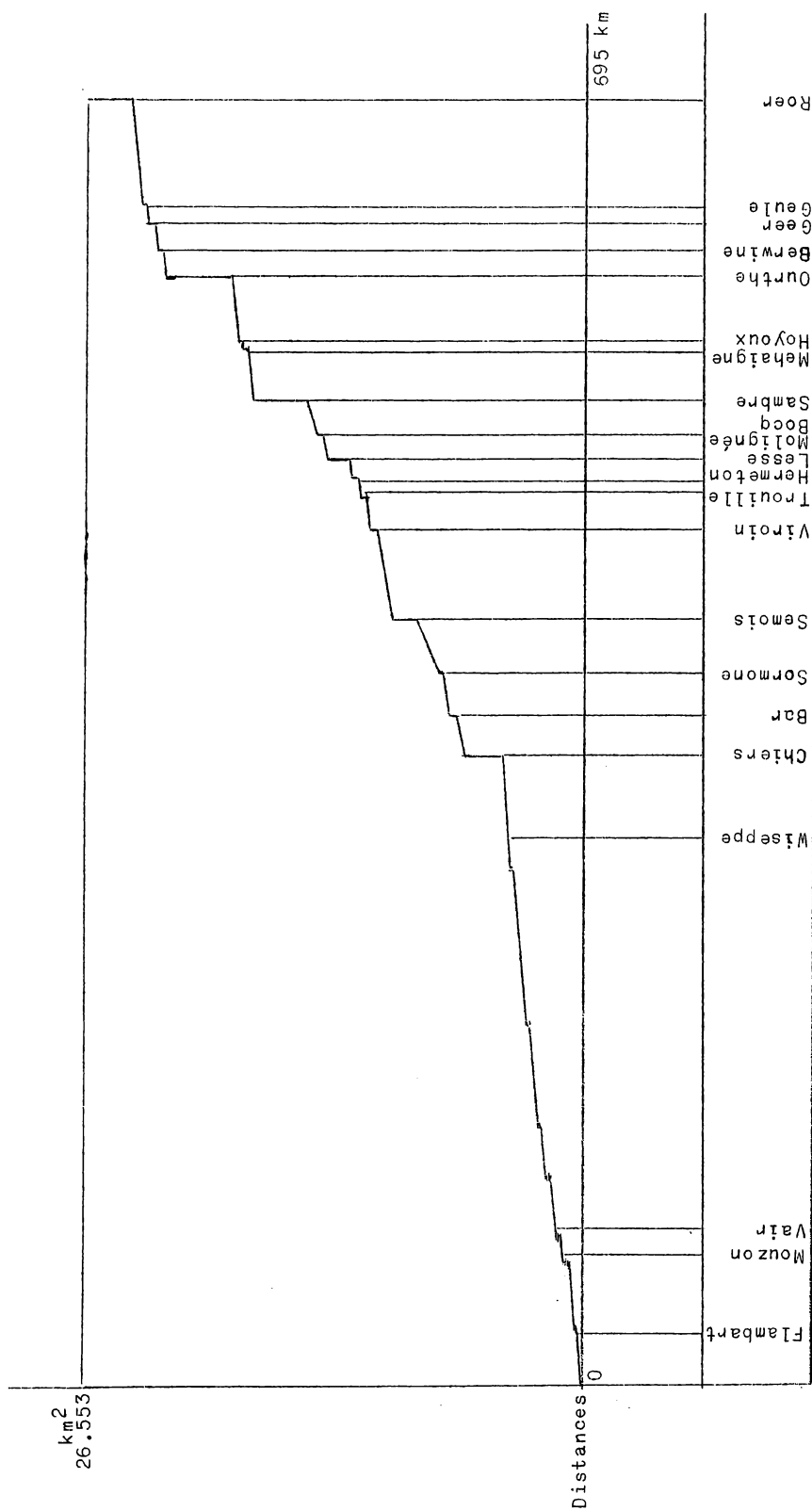


Fig. 42.- BASSINS VERSANTS.

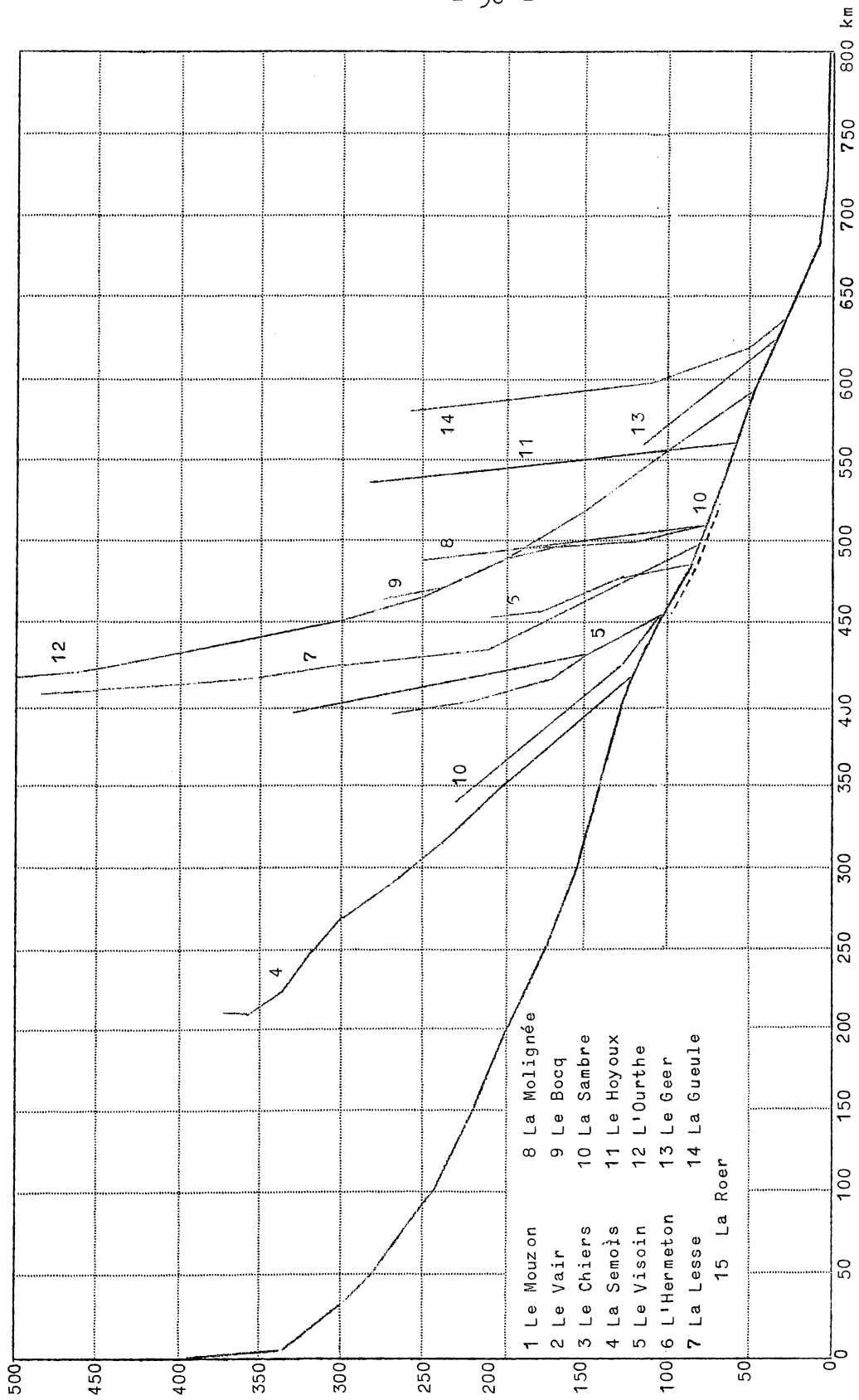
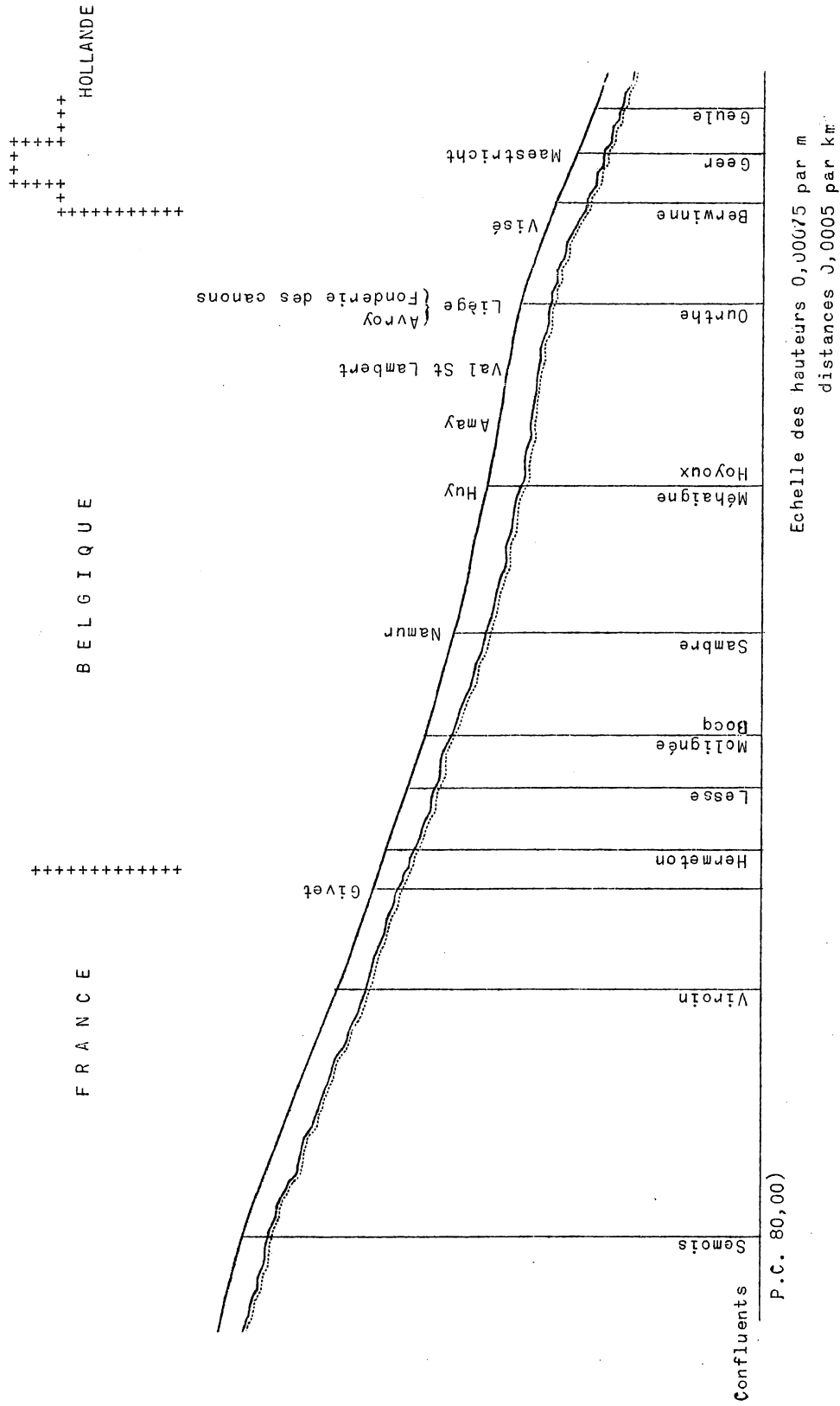


Fig. 43.- PROFILS EN LONG.



Le profil en long du fleuve présente au droit
 du confluent de l'Ourthe, une brisure en aval
 de laquelle la pente s'accroît.

Fig. 44.

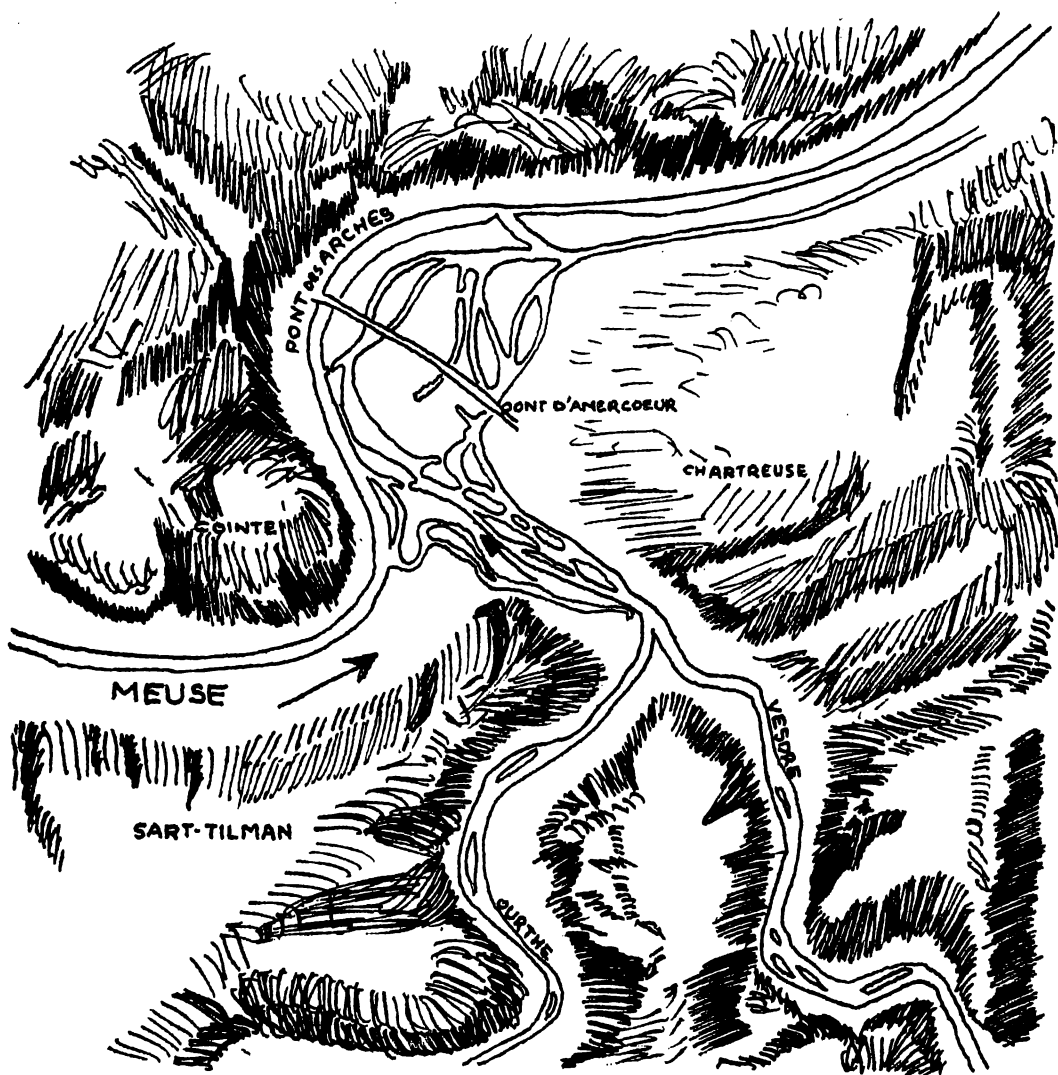
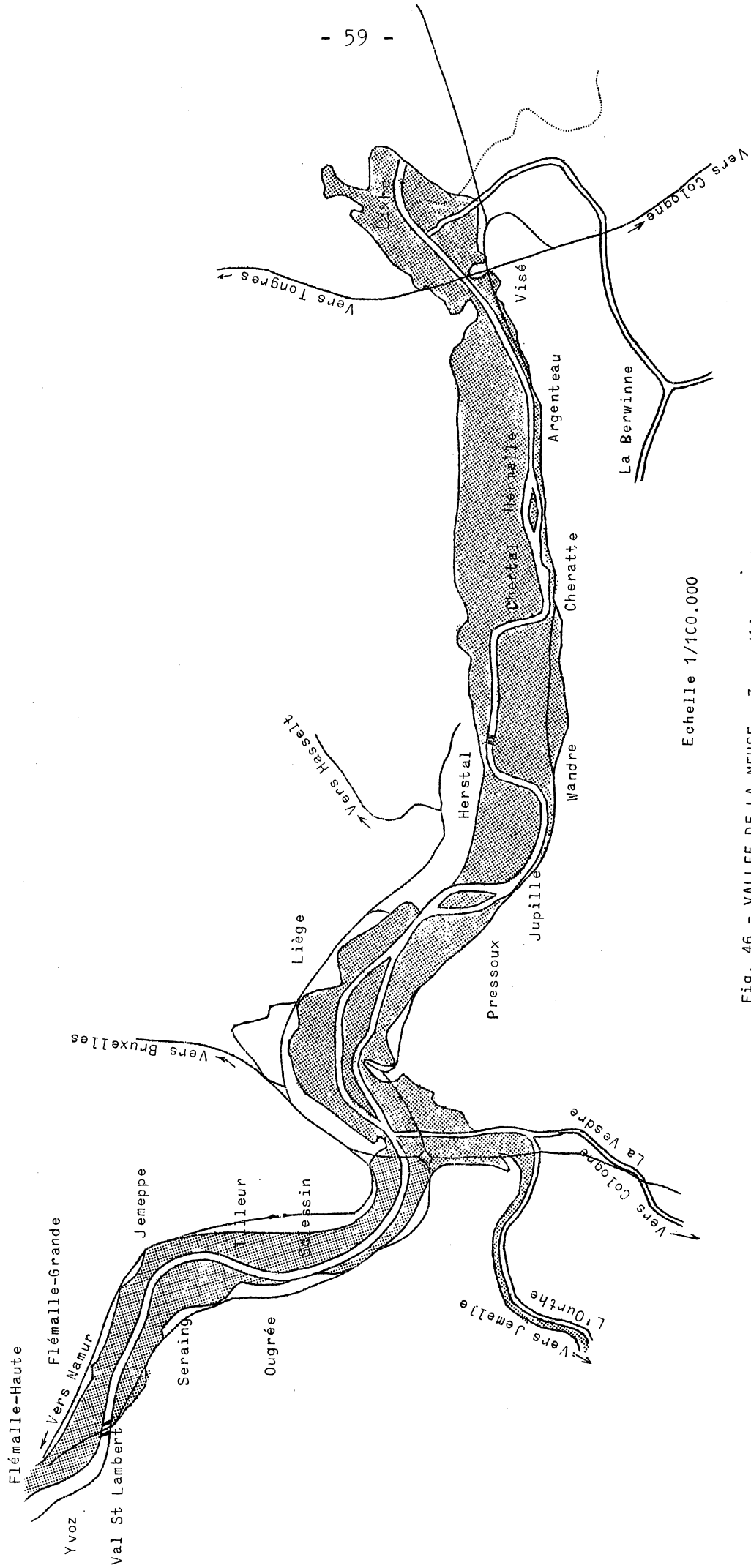


fig. 45

VUE PANORAMIQUE DU DELTA DE L'OURTHE
AU XVIII^e SIECLE



Echelle 1/100.000

Fig. 46.- VALLEE DE LA MEUSE - Zone d'inondation

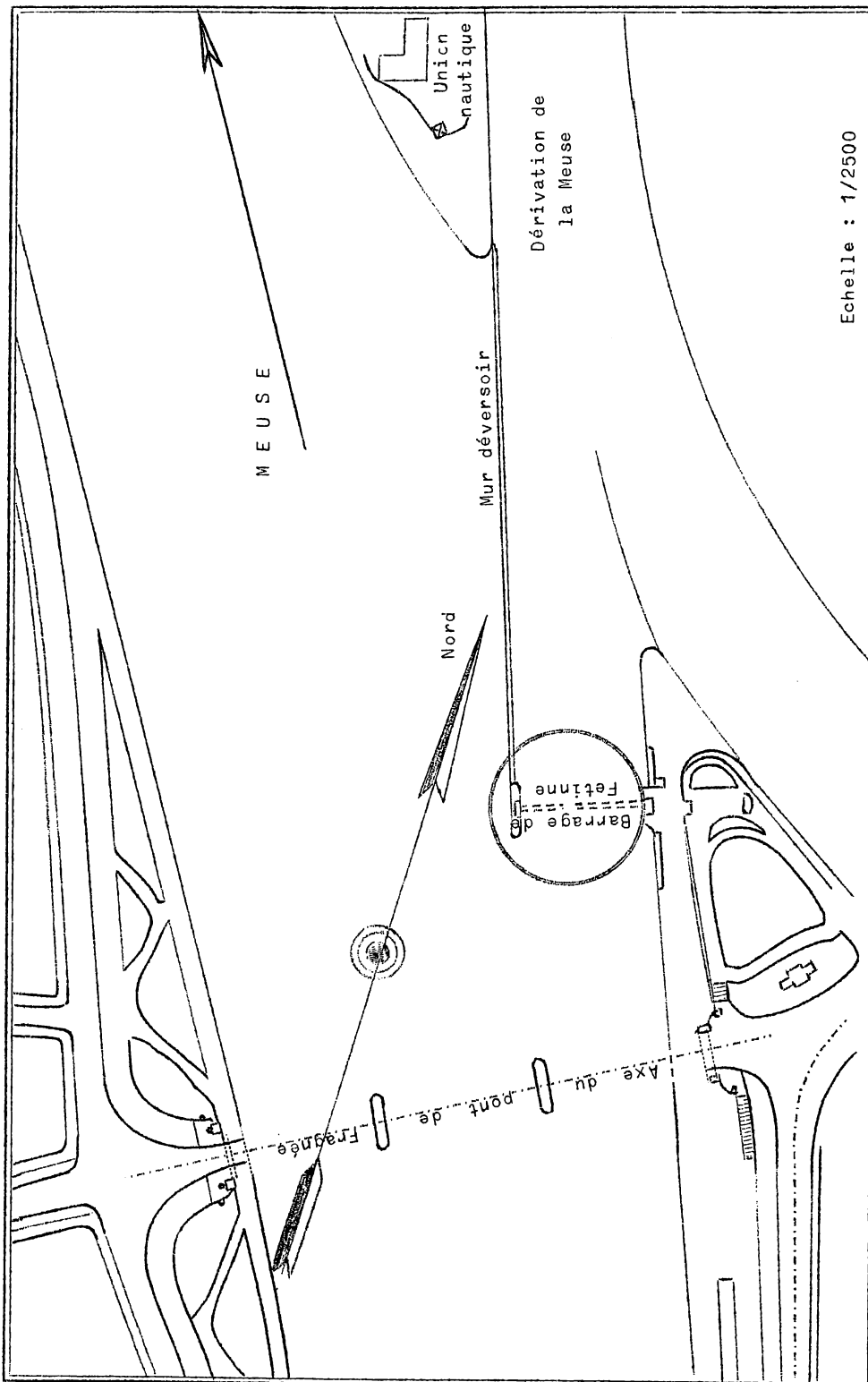


Fig. 47.

La plupart de ces bras ont été supprimés à partir de 1872; de nouveaux quartiers urbains y ont été établis. En 1930 existaient encore certains de ces bras abandonnés et asséchés, sur lesquels des boulevards ont été aménagés plus récemment. Depuis le confluent de la Vesdre et de l'Ourthe à Chênée, faubourg de Liège, l'Ourthe a été véritablement calibrée dans un large lit régulier bordé de murs. Ce lit atteint la Meuse à l'endroit appelé Fétinne et se poursuit par une dérivation qui traverse la ville d'amont en aval, en suivant certains anciens bras naturels aménagés, pour se jeter définitivement dans la Meuse à l'endroit appelé Coronmeuse. On reviendra plus tard sur le rôle et les dispositions de cette dérivation de l'Ourthe.

Les chroniques font état d'inondations à Liège par des crues de la Meuse depuis 1036. Des repères marqués sur une colonne de la Cathédrale Saint-Paul indiquent les niveaux atteints par les eaux à différentes époques.

Le plus ancien est relatif à la grande crue de 1571. Le niveau ancien le plus élevé est celui de 1643, il dépasse de 2 à 3 cm à peine celui de la dernière grande crue de 1925-1926.

Cette crue a été vraiment très considérable et tristement mémorable; elle a provoqué des inondations très étendues dans la ville et la région de Liège. La surface inondée entre Flémalle et Visé couvrait 2500 hectares. Dans les faubourgs seuls, plus de 6000 maisons furent inondées, dont plus d'un millier jusqu'au premier étage. A Liège, la plupart des édifices publics importants, dont l'Université, furent inondés. Les dommages globaux, directs et indirects dépassèrent certes un milliard de francs de l'époque. La région liégeoise en resta longtemps marquée d'un vrai caractère de région sinistrée, à tel point que l'on pouvait craindre son déclin économique. Des mesures importantes furent décidées, non pour indemniser les sinistrés, mais pour assurer une protection effective contre les inondations. Progressivement, la population reprit confiance et elle effectua par ses propres moyens le redressement économique nécessaire.

2.- LA CRUE EXCEPTIONNELLE DE 1925-1926

Elle se produisit à la fin de décembre 1925 et au début de janvier 1926. Il avait neigé abondamment dans tout le bassin et une fonte brusque des neiges fut causée par un réchauffement de température. Elle fut suivie de pluies intenses et prolongées.

La débit maximum de l'Ourthe au confluent fut de 1200 m³/sec le 31 décembre 1925. Le maximum de débit de la Meuse se produisit le lendemain 1er janvier 1926 et atteignit 2950 m³/sec, le débit de l'Ourthe au confluent étant alors de 900 m³/sec. Le débit maximum à Visé en aval de Liège atteignit 3000 m³/sec. L'inondation couvrit 2300 hectares (fig. 46).

Les inondations furent les plus graves en amont de Liège, à Seraing (rive droite) notamment, où se produisit une rupture de digue. Le niveau de la crue y était exhaussé en raison de divers obstacles à l'écoulement en aval, dont le principal était le seuil du confluent de l'Ourthe déjà mentionné. Mais d'autres obstacles nombreux s'y ajoutaient : les seuils

surélevés de trois barrages anciens, le pont du Val-Benoît et d'autres encore ayant de nombreuses piles en rivière et produisant d'importants remous, enfin une courbe très aiguë en aval de Liège, appelée coude de Chertal.

Après les grandes inondations de 1880, la plupart des quais de la ville de Liège avaient été surélevés approximativement au niveau de cette crue, mais ils furent submergés en 1925-1926.

Dans la majeure partie de la région liégeoise intervient au point de vue des inondations un élément très particulier. Une inondation résulte généralement de l'élévation du niveau de l'eau au-dessus du terrain, mais elle peut résulter aussi de l'abaissement du terrain sous le niveau de l'eau. Dans la région liégeoise, les deux causes se combinent, par les crues de la Meuse et les affaissements du sol dus à l'exploitation des charbonnages.

Les effets des affaissements s'additionnent pendant toute la durée de l'exploitation des mines, de telle sorte que de grandes étendues de terrain sur les deux rives de la Meuse se sont affaissées de plusieurs mètres. Il ne servirait de rien que le lit du fleuve s'affaisse avec le terrain voisin, car la fixité du niveau du cours situé plus en aval conduirait inévitablement à la formation d'un lac dans la région déhouillée. Seulement, la Meuse est canalisée dans la région liégeoise, comme dans toute l'étendue de son cours en Belgique. On y maintient invariable la flottaison des biefs par des interdictions d'extraire le charbon sous les barrages et sous les ponts. Les affaissements sont d'ailleurs moindres en général dans le fond de la vallée que sous les versants.

Il en résulte que, au cours des ans, certaines étendues de terrain sont descendues en permanence sous le niveau des eaux exhaussées par les barrages et seraient inondées en permanence sans précautions spéciales. C'est le cas notamment dans la région de Seraing, en amont de Liège. Après les inondations de 1880, d'importants travaux d'endiguement avaient été exécutés à Seraing (rive droite) et à Jemeppe (rive gauche), par des digues longitudinales.

Certaines constituent de véritables murs, comme au quai des Carmes à Jemeppe, murs derrière lesquels, à la flottaison normale, l'eau se trouve à certains endroits en permanence au-dessus du niveau de la voirie. C'est une de ces digues qui s'est rompue à Seraing en 1925-1926, sous la poussée des eaux surélevées par la crue à un niveau exceptionnel. La protection était complétée par quelques digues transversales, reliant les digues longitudinales aux collines.

L'inondation fut particulièrement désastreuse dans les régions les plus affaissées. Dans la rue Cockerill à Seraing, elle atteignit 5,50 m au-dessus de la voirie, largement au-dessus du premier étage des maisons.

Les digues construites après 1880 à Seraing s'étaient affaissées de 0,55 à 0,95 m en 15 ans, aussi avaient-elles été exhaussées de 1,00 m en 1910, puis encore de près de 2 m après la crue de 1920. En 1925-1926, ces endiguements mettaient la commune de Seraing à l'abri d'une crue telle que celle de 1920, mais le niveau de 1925-1926 lui était supérieur de plus d'un mètre. Cependant, si les travaux en cours avaient été terminés, la commune aurait

aussi été protégée contre cette crue. Mais une digue non renforcée se rompit.

Des travaux d'endiguement étaient en cours aussi sur la rive gauche vis-à-vis de Seraing, pour protéger les communes de Jemeppe et de Tilleur.

Dans la traversée de Liège même, des travaux destinés à améliorer la situation du confluent avaient été réalisés au cours des ans. On avait concentré en deux bras les eaux de l'Ourthe et de la Meuse en établissant ainsi au voisinage du lit proprement dit de la Meuse, un canal appelé "Dérivation de la Meuse", mais qui écoule normalement les eaux de l'Ourthe. Le lit de l'Ourthe en amont du confluent a été calibré d'une manière très large jusqu'à Chênée, au confluent de la Vesdre. La Dérivation a été réalisée de 1852 à 1864.

L'Ourthe se réunit à la Meuse en aval du Pont de Fragnée, mais en était toutefois séparée par un barrage qui, en 1925-1926 comportait un long déversoir longitudinal à crête fixe et une passe profonde, perpendiculaire au mur-déversoir entre son extrémité amont et la rive droite de la Meuse, obturée par un barrage amovible à fermettes et aiguilles. Le barrage avait été construit entre 1852 et 1857. (fig. 47).

Normalement fermé, il contenait les eaux de la Meuse dans son lit et dirigeait les eaux de l'Ourthe vers la Dérivation, dans laquelle elles s'écoulaient librement.

Pendant les crues de la Meuse, le barrage mobile était effacé et permettait aux eaux du fleuve de se déverser dans la Dérivation, qui contribuait ainsi à leur écoulement.

De même, lors des crues de l'Ourthe, dont le maximum au confluent précède généralement celui de la Meuse, les eaux de l'Ourthe se déversaient dans la Meuse, la Dérivation ne pouvant entièrement les évacuer. La Dérivation rejoint la Meuse environ 5 km en aval.

En 1925-1926, le dernier barrage de la canalisation de la Meuse se trouvait juste en amont de ce débouché, qui permettait donc l'écoulement libre dans la Dérivation. Le barrage nouveau de Monsin (1930) est situé en aval du débouché et les eaux de la Dérivation sont relevées à la même flottaison que celles de la Meuse.

Telle qu'elle était alors, cette Dérivation de la Meuse a certes contribué à l'écoulement des crues dans la ville de Liège, en évitant des inondations en certains cas et en atténuant celles qui se sont produites. Mais, constituée par la jonction progressive et plus ou moins aménagée d'anciens bras enserrés dans un quartier peuplé de la ville, elle n'était pas régulièrement calibrée et présentait certains rétrécissements notamment sous les ponts, dont la plupart comportaient des piles.

3.- TRAVAUX EXECUTES APRES LES INONDATIONS

L'Administration des Ponts et Chaussées avait établi, dès avant la première guerre mondiale, un programme de modernisation de l'aménagement de la Meuse. Il était en rapport avec les travaux d'une Commission hollando-

belge instituée en 1906 pour l'étude de la canalisation de la Meuse mi-toyenne. Ce programme avait reçu la sanction ministérielle en 1923, c'est-à-dire peu d'années avant la grande crue de 1925-1926. Il concernait principalement la navigation et, en ce qui regardait la protection contre les inondations, il comportait l'extension de certains endiguements. Il prévoyait cependant déjà un abaissement des crues dans la traversée de Liège, de 0,66 m par rapport au niveau atteint en 1880, mais uniquement par la normalisation de la Meuse en aval de Liège jusqu'à Visé. Il laissait subsister tous les obstacles à l'écoulement des crues en amont de cette région à normaliser.

La grande crue de 1925-1926 et les inondations calamiteuses qu'elle provoqua devaient nécessairement entraîner un réexamen approfondi de cette question, sans perdre de vue pour autant l'amélioration des conditions de navigation, d'autant plus qu'un intérêt de plus en plus vif s'affirmait pour une amélioration de la liaison par eau entre Anvers et Liège, dont la navigation sur la Meuse en amont de Liège constitue un prolongement naturel.

Monsieur L. VAN WETTER, ingénieur en chef-directeur du service de la Meuse à Liège, présenta un nouveau programme d'aménagement de la Meuse, qui prévoyait des progrès considérables pour la navigation sur ce fleuve dans le bassin industriel liégeois et en amont et qui devait assurer aussi des conditions particulièrement favorables pour une nouvelle liaison par voie d'eau avec Anvers. On ne considérera cependant ici que la solution efficace que ce projet apportait au difficile problème de la protection contre les inondations de la région de Liège, dans les circonstances particulières précédemment définies.

Jusque là on avait eu recours surtout à des endiguements, méthode pour ainsi dire traditionnelle et universelle. Sans doute, les inconvénients de cette méthode sont-ils maintenant trop connus pour encore y insister (cfr chapitre XXI). En supprimant les capacités d'emmagasinement des eaux de crue dans le lit apparent d'inondation ou lit majeur, les endiguements entravent en général l'écoulement des crues et en élèvent les niveaux. Abstraction faite des effets des affaissements des digues en raison de l'exploitation souterraine des mines de charbon, l'élévation du niveau des crues et la submersion des digues ont été effectives dans le bassin liégeois de la Meuse de 1880 à 1925-1926.

Le grand mérite du projet de M. VAN WETTER, établi en 1926-1927 était de prévoir une amélioration notable de l'écoulement des crues, devant entraîner un abaissement important de leur niveau maximum, de l'ordre de 1,80 m à Seraing et de 1,50 m au centre de la Ville de Liège.

Il est intéressant de noter combien ces idées étaient répandues dans les esprits vers cette époque. On les trouve développées dans le rapport de 1927 du Général JADWIN sur les crues du Mississippi et la protection de la ville de Nouvelle-Orléans (2).

Une commission française avait aussi en 1926 fait adopter un programme pour la protection de la région parisienne contre les inondations qui associait à des endiguements, en quelque sorte provisoires, des travaux d'amélioration de l'écoulement des crues dont on attendait des effets plus favo-

rables et plus durables, mais dont la réalisation demandait forcément plus de temps. (3)

Cette remarque ne diminue en rien le mérite du programme de M. VAN WETTER, qui réside dans son adaptation excellente et économique aux circonstances du cours de la Meuse dans la région liégeoise et qui à l'époque, il y a près de trente ans, dérogeait certes à la tradition. De plus, ce programme a été réalisé; ces travaux ont mis la région liégeoise définitivement à l'abri des inondations par la Meuse.

Au point de vue des endiguements, un certain nombre de digues nouvelles devaient être établies. En amont de Liège, sur la rive gauche, dans la région du pont d'Ougrée, avec une digue transversale rejoignant le versant de la vallée, près du remblai du nouveau chemin de fer de Kinkempois. Puis aux confins amont de la ville de Liège, sur les deux rives.

Dans la traversée de la ville, relèvement du couronnement des quais et construction de parapets pleins en béton, dont les solutions de continuité comportent des rainures pour des fermetures de secours en poutrelles. La réalisation et l'exhaussement de parapets pleins, arasés à 0,50 m au-dessus du niveau maximum de la crue de 1925-1926, ont d'ailleurs été généralisés partout où c'était possible et constituent une protection contre les inondations à la fois efficace et économique.

En aval de la ville, des digues assez importantes ont été réalisées à l'occasion des travaux de normalisation et de calibrage de la Meuse. Les digues longitudinales ont été partout où c'était possible complétées par des digues transversales, compartimentant la région inondable pour réduire les conséquences éventuelles d'une rupture de digue longitudinale.

L'essentiel du projet consistait cependant dans ce calibrage de la Meuse et de sa Dérivation et dans la suppression la plus complète possible des obstacles à l'écoulement des crues entre Seraing et Visé, dont il a été fait mention précédemment.

En procédant de l'aval vers l'amont, le projet maintenait naturellement la normalisation et le calibrage de la Meuse en aval de Liège jusqu'à Visé. Ceci avait pour objet la suppression des inondations en aval de Liège, dans une région aussi très industrielle (Herstal, Wandre, Jupille), par concentration du débit dans le lit mineur. Le lit assez irrégulier, sinueux et de largeur insuffisante de la Meuse devait être corrigé de manière à présenter un lit unique, régulier et d'un tracé favorable, avec une section largement calibrée. L'abaissement du niveau de crue le plus important à résulter de ce programme était situé en amont du coude très aigu de Chertal, qui a provoqué lors de la crue de 1925-1926 un remous d'environ 1 m sur une longueur de 300 m.

Une autre normalisation de tracé, très importante également, a été réalisée aux confins aval de la ville de Liège, à Monsin, entre le Pont de Wandre et l'entrée du canal latéral ancien de Liège à Maastricht. Comme ce tronçon est immédiatement voisin de la ville, ses effets sur l'abaissement des crues dans la traversée de Liège sont plus considérables que ceux du redressement du coude de Chertal, situé beaucoup plus en aval. En outre, cette normalisation créait des conditions favorables pour l'entrée du Canal Albert et l'établissement du port de Monsin.

L'ancienne canalisation comportait dans l'agglomération liégeoise quatre barrages mobiles à faible chute construits de 1852 à 1857 et s'échelonnant comme suit de l'aval vers l'amont :

Barrage de la Fonderie, flottaison amont (59,25)
Barrage d'Avroy, flottaison amont (60,65)
Barrage de Fétille, au confluent de l'Ourthe
Barrage de Jemeppe, flottaison amont (62,023).

Il s'agissait de barrages à fermettes mobiles et aiguilles, dont les radiers étaient en forte saillie sur le fond. Le radier du barrage de Jemeppe était d'ailleurs fortement dégradé par les effets des affaissements houillers.

Ce système de barrage était conçu pour permettre l'écoulement des crues assez rapides et fortes; il s'y prêtait cependant beaucoup moins bien que les barrages modernes à grands éléments et la manoeuvre en était précaire et dangereuse.

Déjà avant la première guerre mondiale, des projets d'amélioration de la canalisation de la Meuse avaient été établis, ainsi qu'il est indiqué plus haut. Notamment, il avait été décidé de reporter le barrage de la Fonderie plus en aval, à Monsin, de manière à supprimer une interruption de la canalisation de la Meuse qui existait entre le barrage de la Fonderie et le pont de Wandre. Ces travaux avaient été entrepris avant la guerre et le radier du nouveau barrage de Monsin avait été construit à la cote théorique de plafond 54,30. D'autre part, on avait construit après la guerre une nouvelle écluse de grande dimension à Ben-Ahin, en amont de Liège, dont le busc était à la cote 66,267. On décida de conserver ces deux ouvrages et de prévoir une pente uniforme du fond entre ces deux points, pente atteignant ainsi 0,281 m par km.

Cependant on se réservait de majorer ultérieurement la pente dans la partie amont (Ombret - Ben-Ahin), en conservant la pente de 0,281/1000 dans la partie moyenne (Flémalle-Ombret) et en la réduisant dans la partie aval (Monsin-Flémalle).

La nouvelle canalisation fixait la flottaison à la cote (60,00) de Monsin à Flémalle, ce qui permettait de supprimer les quatre anciens barrages de l'agglomération liégeoise. Comme le barrage de Monsin se situe à l'aval du débouché en Meuse de la Dérivation de la Meuse, celle-ci est en temps normal à la même cote (60,00). L'ancien barrage à aiguilles de Fétille a été remplacé à la jonction de l'Ourthe avec la Meuse et la Dérivation. Le déversoir fixe a été conservé, mais n'empêche pas la libre communication avec la Meuse de la Dérivation à son extrémité amont.

Le barrage de Jemeppe étant supprimé, le barrage qui le remplace a pu être reporté jusqu'à Yvoz-Ramet (Flémalle), en dehors de la zone affectée par les affaissements miniers. Pour permettre la navigation à la cote (60,00) il a fallu toutefois approfondir le fond de la Meuse en aval du barrage. D'autre part, immédiatement en amont du barrage de Monsin, la flottaison à la cote (60,00) se trouve par endroit au-dessus du niveau du sol. Les eaux

ont été contenues dans le fleuve à la flottaison normale par des endiguements appropriés.

Ce programme de régularisation en plan et en profil en long permettait de réaliser un calibrage des lits avec une augmentation considérable des sections pour permettre l'écoulement des débits des crues les plus fortes.

En aval de Liège, les largeurs au plafond qui dans le cours naturel descendaient en-dessous de 100 m, ont été portées en règle générale à 175 m. Les largeurs de la Meuse dans la traversée de Liège variaient de 95 à 150 m; celles de la Dérivation de 40 à 64. Or, la largeur moyenne de la Meuse en amont du confluent est de 140 m et celle de l'Ourthe de 60 m.

La suppression des anciens barrages et de leurs écluses a permis de prolonger la largeur de 140 m de l'amont du confluent jusqu'au delà de l'ancien barrage d'Avroy. Le minimum de 95 m a pu être porté à 110 m au centre de la ville et plus en aval on a pu réaliser 125 m. On a pour cela supprimé les quais et certains ports bas, dont l'utilisation ne présentait d'ailleurs plus d'intérêt.

Dans la Dérivation, on a pu porter la largeur à 65 m dans les parties amont et aval. Ailleurs on a pu atteindre 60 m, en réalisant une partie de la voirie en encorbellement sur les murs de quai et dans la section la plus étroite, la suppression des quais bas a permis d'élargir de 40 à 48 m.

Ces travaux ont pu être exécutés sans expropriation, mais au prix de la construction de près de 5 km de nouveaux murs de quai et de multiples perrés.

En amont de Liège, jusqu'à Flémalle, les largeurs variaient de 110 à 170 m; on a réalisé un calibrage à 130 ou 140 m, en évitant des expropriations trop onéreuses. Des rives endiguées ont été redressées et de nombreuses îles supprimées.

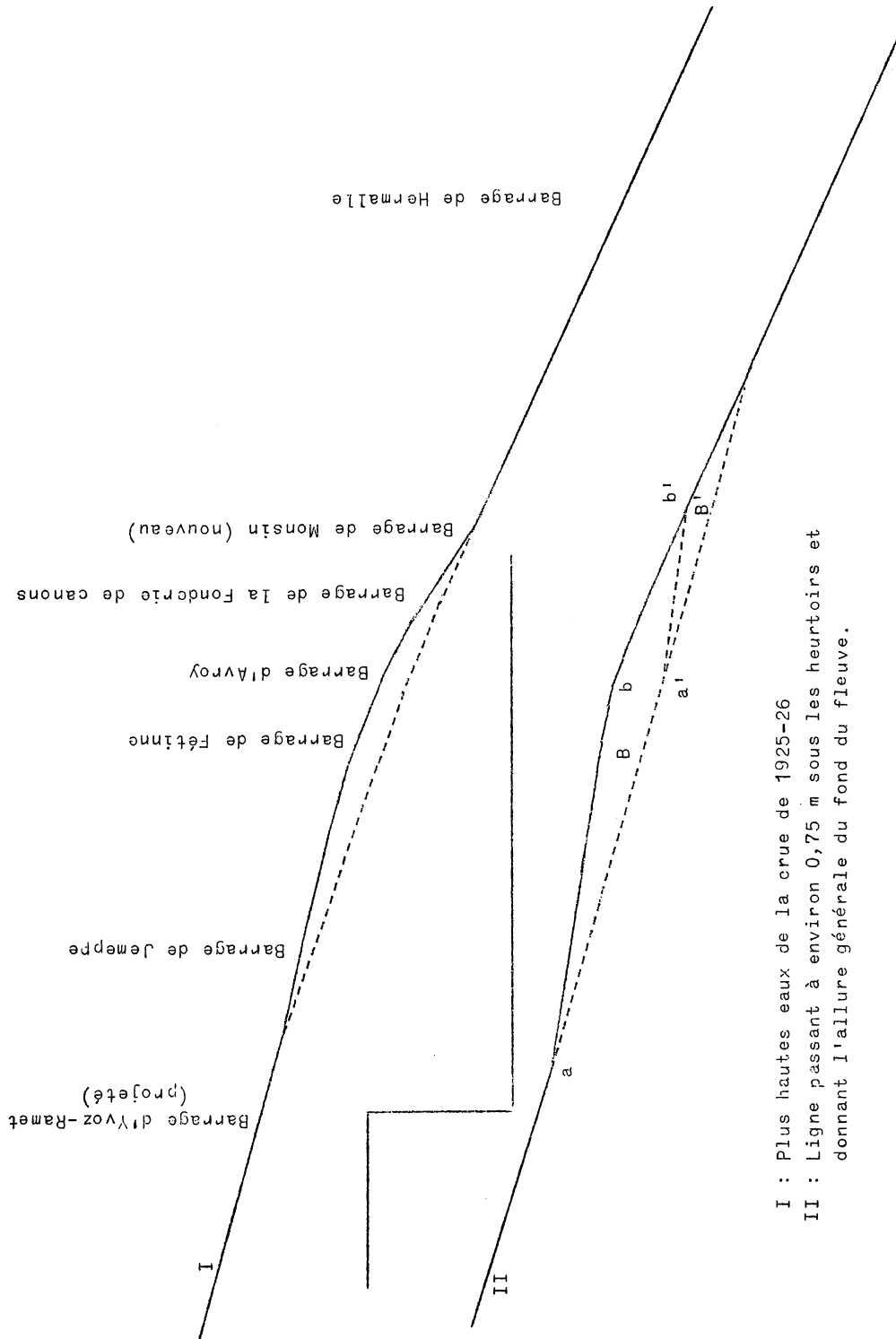
Le fond de la Meuse présente aussi des irrégularités considérables et fréquentes, surtout si l'on se rapporte au talweg.

Mais si l'on considère le fond moyen et si notamment l'on se guide sur les niveaux des heurtoirs des anciens barrages, établis en suivant l'étiage naturel du fleuve, en faisant passer une ligne à environ 0,75 m sous ces heurtoirs, on trouve selon M. VAN WETTER le résultat suivant. La ligne de pente moyenne entre Namur et Seraing recoupait la ligne de pente moyenne entre Liège et Visé en aval du pont de Wandre.

Cette dernière ligne de pente est supérieure de 50 % à la précédente. Entre les ponts du Val-St-Lambert et de Wandre on constatait l'exhaussement dû aux dépôts de l'Ourthe. Le sommet de cet exhaussement se trouvait sensiblement au droit de l'ancien barrage d'Avroy, un peu en aval du confluent, en B (fig. 48).

En faisant abstraction de tout autre effet, on peut voir sur la ligne d'eau de la crue de 1925-1926 que cet exhaussement a agi comme un déversoir produisant un relèvement en amont. D'ailleurs les fortes crues de l'Ourthe, en absence de crue de la Meuse, se font sentir en amont jusqu'à Seraing.

On peut admettre cependant que le régime de l'Ourthe est devenu moins



I : Plus hautes eaux de la crue de 1925-26
II : Ligne passant à environ 0,75 m sous les heurtoirs et donnant l'allure générale du fond du fleuve.

Fig.48.- PROFIL EN LONG DE LA MEUSE montrant le relèvement du flot de crue à Liège et dans le bassin de Seraing par suite de l'existence de la bosse B au plafond et du rétrécissement de la section d'écoulement dans la traversée de Liège.

violent qu'à l'époque déjà ancienne où elle avait formé le delta dont il a été question précédemment et sur lequel elle s'écoulait par de nombreux bras. On a donc pu envisager d'enlever par dragages le seuil formé dans la Meuse, sans crainte de le voir se reformer. La construction ultérieure probable de grands barrages sur l'Ourthe et ses affluents, dont il sera question plus loin, ne pourra d'ailleurs qu'atténuer les crues de l'Ourthe dans l'avenir.

Le sommet du radier déjà réalisé avant 1914 du nouveau barrage de Monsin se situant en B' (fig. 48), on a envisagé l'enlèvement du seuil de l'Ourthe de telle sorte que le sommet passe de B en B', ce qui entraînait un abaissement de 1,50 m du haut fond, avec un effet d'abaissement évident sur la ligne d'eau. Outre cela, on a prévu et généralement réalisé un approfondissement général supplémentaire de 1 m depuis Flémalle en amont jusqu'à Hermalle en aval. Il en résulte un abaissement supplémentaire du niveau des crues.

Pour réduire le coût des travaux d'appropriation des murs de quai et des perrés, l'approfondissement ne s'étend pas sur toute la largeur, mais jusqu'à 30 m seulement des pieds des murs de quai, perrés ou berges. Dans la Dérivation, cette distance est réduite à 15,00 m.

De nombreux murs de quai et perrés étaient d'ailleurs à reconstruire dans la région de Seraing, à cause des dégâts dus aux affaissements miniers. Il a été indiqué précédemment qu'en toute hypothèse, environ 5 km de murs de quai étaient à reconstruire pour raisons d'élargissement.

Cet approfondissement comportait l'arasement des radiers des anciens barrages, en forte saillie sur le fond.

Quant aux ponts, la plupart d'entre eux avaient été détruits lors de la première guerre mondiale et devaient être reconstruits.

En 1925-1926, seuls le pont-rail du Val-Benoît sur la Meuse, avec un débouché linéaire total de 92,00 m, et le pont des Venues sur la Dérivation, avec un débouché linéaire total de 49,00 m, constituaient de sérieux rétrécissements. Il y avait encore une demi-douzaine d'autres ponts sur la Meuse et la Dérivation, assez vétustes, qui entravaient quelque peu l'écoulement. La plupart d'entre eux avaient été reconstruits avant la deuxième guerre mondiale, mais après celle-ci, ils étaient presque tous détruits. Leur reconstruction s'est opérée en respectant le nouveau calibrage de la Meuse et en réduisant autant que possible le nombre des piles. C'est ainsi que le nouveau pont du Commerce sur la Meuse a une travée unique de 125 m. Les nouveaux ponts sur la Dérivation sont presque tous aussi à travée unique.

Seul le pont le plus défavorable sur la Dérivation, celui des Venues à 49,00 m de débouché linéaire, est resté inchangé. Il a d'ailleurs subi un accident au cours des dernières années, la partie amont de la pile centrale unique s'est affaissée à la suite d'affouillements, sans rupture du pont d'ailleurs. Cet ouvrage devra nécessairement être remplacé.

Dans l'ensemble, le programme a été réalisé et ses effets se sont montrés conformes à l'attente. On n'a pas envisagé d'autres dispositions, telles que des tranchées absorbantes et des digues transversales d'accumulation dans le lit majeur. Le projet JADWIN les considérait comme impropres

pour le Mississippi, (2) mais dans la vallée étroite, populeuse et industrielle de la Meuse, elles ne pouvaient même pas retenir l'attention. Par contre, un grand et même assez vif débat a eu lieu en 1927 au sujet de l'opportunité de construire des barrages de réservoir sur l'Ourthe et ses affluents et sur d'autres affluents de la Meuse. Il y avait en 1927 un fort parti d'adeptes de barrages de réservoir, qui en attendaient surtout la production de courant à bon marché. Mais comme l'entreprise était peu rentable en soi dans un pays peu accidenté qui n'est pas très propice à l'énergie hydro-électrique, l'effort des protagonistes tendait à trouver à la construction des barrages d'autres justifications, telles que l'atténuation des crues et l'alimentation des canaux, afin d'en faire supporter la dépense par les pouvoirs intéressés à ces fonctions. Dès lors, les investissements propres à la production d'énergie auraient été dégrevés de la dépense prépondérante de construction des barrages.

L'utilité des barrages pour l'atténuation des crues de la Meuse dans la région de Liège a été contestée avec beaucoup de pertinence. Tous ces barrages auraient été situés sur le cours amont des affluents, donc à grande distance de Liège et en des points où les débits maxima sont peu élevés. L'effet de la retenue de ces débits maxima est fortement réduit par l'étalement qu'en l'absence de barrages ils auraient subi par emmagasinement dans le lit majeur inondé. Donc la réduction du débit de crue est inférieure au débit maximum retenu. D'autre part, le maximum de l'affluent arrive au confluent avant le maximum de la Meuse. Donc, dans la crue maximum de la Meuse n'intervient à nouveau qu'une part réduite de l'effet des débits retenus par le réservoir de barrage. Enfin, tous ces barrages devaient être établis sur des affluents échelonnés, donnant lieu à des décalages des débits maxima sur les divers affluents. Ces maxima ne peuvent donc s'additionner sans réduction au maximum de la crue de la Meuse, mais doivent en outre être fortement réduits, par suite des débordements mêmes de la Meuse. Enfin, les dispositions efficaces prises contre ces débordements doivent accélérer l'écoulement des crues de la Meuse et en augmenter le débit maximum. Ce dernier effet viendrait évidemment en déduction de ceux produits par les barrages.

Les conclusions de ces débats ont été les suivantes :

1°) La construction de barrages de réservoirs dans les vallées supérieures des affluents auraient certes été favorable pour réduire les inondations de ces affluents en aval des barrages. Mais il n'y a pas de localités importantes à protéger dans ces régions.

2°) En raison de l'éloignement de ces barrages de la région liégeoise à protéger, leurs effets sur les inondations du bassin de Liège seraient peu importants et ne justifieraient pas la dépense de construction des barrages.

Le seul barrage existant en 1925-1926 était le barrage de la Gileppe, d'une capacité de 13,3 millions de m³. Les 30 et 31 décembre 1925, au plus fort de la crue à Liège, il a emmagasiné 200.000 m³, soit le volume écoulé en une minute à Liège le 1er janvier 1926. Le barrage de la Gileppe a réduit le débit maximum de la Meuse de 1 m³/sec, soit 1/3000^e.

Or, le 31 décembre 1925, à 10 heures, la digue de Seraing s'est rompue. A la suite de cette rupture et du déversement de l'eau de la Meuse dans la région inondée, le niveau de la Meuse a cessé de monter à Liège pendant quelques heures. Or, le volume de l'inondation de Seraing était à peu près égal à la capacité du réservoir de la Gileppe. Il correspond environ à deux heures du débit de la Meuse à l'endroit de la rupture (une heure et demie à l'aval du confluent de l'Ourthe). Ceci illustre bien l'effet des capacités rapprochées par rapport à celles qui sont éloignées.

En tenant compte de tous ces éléments, de la diminution d'emmagasinement dans les lits d'inondation à attendre des travaux effectués dans la Meuse en amont de la région liégeoise et de l'improbabilité de la construction de tous les barrages projetés, M. L. VAN WETTER avait conclu que l'on ne pouvait attendre des barrages qu'une réduction du débit maximum de crue d'environ 250 m³/sec. Mais il considérait que le débit de la crue de 1925-1926 de la Meuse devait être majoré de 150 m³/sec en raison de la réduction des surfaces inondées et de l'accélération générale du ruissellement. Cela conduit au tableau suivant :

	<u>Crue de</u> <u>1925-1926</u>	<u>Crues à prévoir ultérieurement</u>	
		Sans barrages de réservoirs :	Avec barrages de réservoirs :
Débit de la Meuse :	2050	2200	2200
Débit de l'Ourthe :	900	1000	750
Débit en aval du confluent:	2950	3200	2950

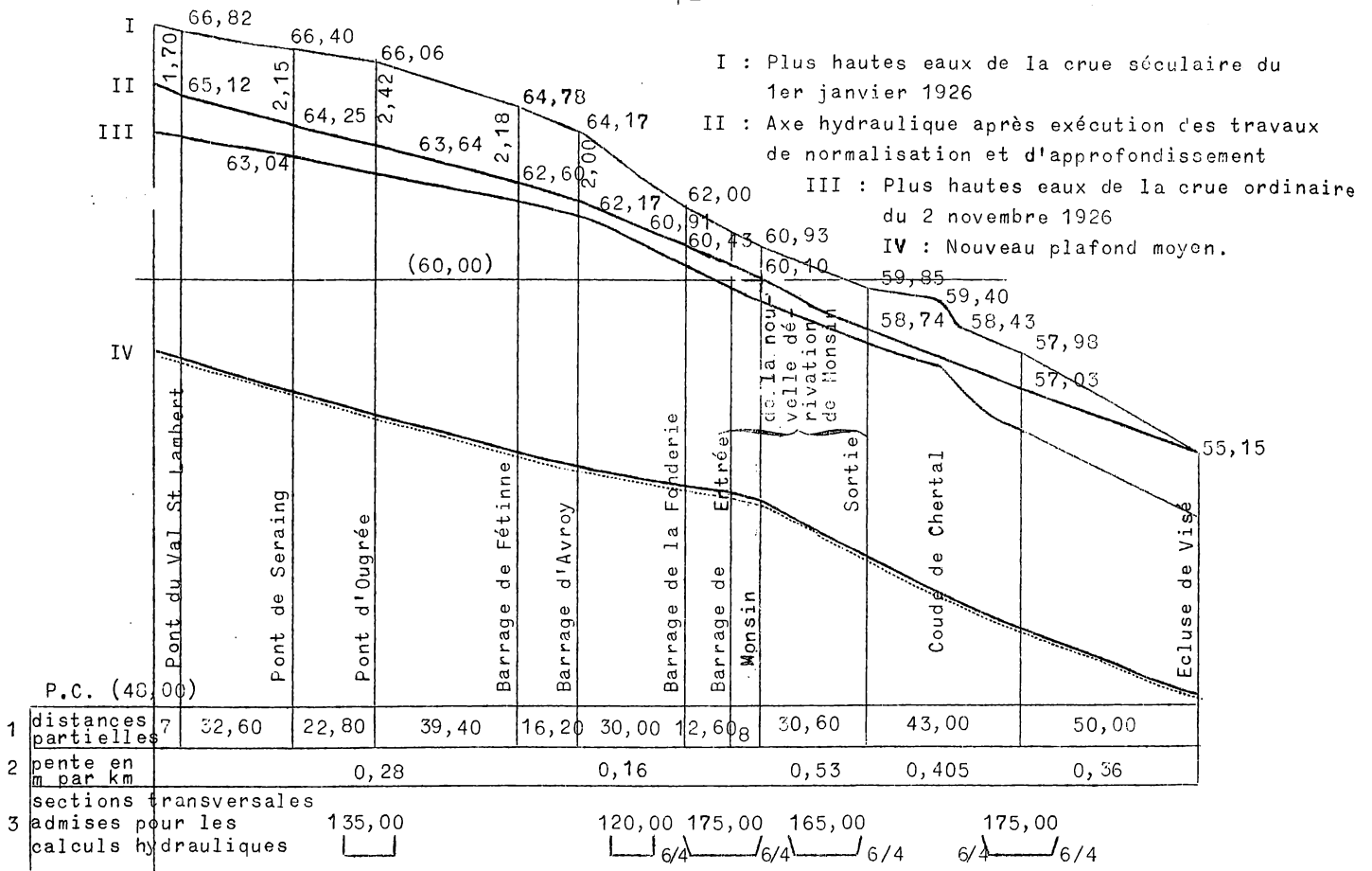
D'après cela, l'effet des barrages aurait tout juste compensé celui de la réduction des inondations et de l'accélération de l'écoulement des crues.

Depuis 1925-1926, trois barrages de réservoirs ont été construits, à Buttgenbach et à Robertville sur la Warche, à Eupen sur la Vesdre. Ils sont à grande distance de Liège et on ne leur assigne pas d'effets notables sur les crues de la Meuse. Par contre, la barrage d'Eupen avec celui de la Gileppe a eu des conséquences heureuses sur les crues de la Vesdre, par une manoeuvre appropriée des barrages.

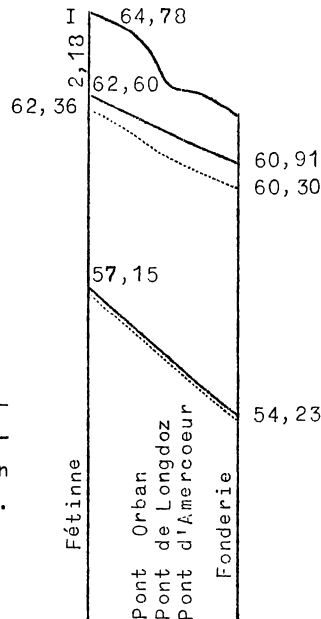
D'après cela, tous les calculs hydrauliques, les projets et les prévisions ont été basés sur une crue future de 3200 m³/sec en aval du confluent de l'Ourthe.

Par rapport à la crue de 1925-1926, l'abaissement du niveau des eaux est de 1,75 m à l'ancien coude de Chertal. Il varie de 1,00 à 2,00 m selon les endroits dans la traversée de Liège et atteint près de 2,50 m dans la région de Seraing (pont d'Ougrée) pour redescendre à 1,70 m au pont du Val-Saint-Lambert (amont de Seraing). Le niveau de la crue maximum future au barrage de Monsin est (60,10), soit à peu de chose près la cote de la retenue normale. (fig. 49, a et b).

Quant aux crues ordinaires, elles sont rabattues aux environs des anciennes flottaisons normales en amont des anciens barrages. On ne peut même ouvrir complètement le barrage de Monsin sans abaisser le niveau d'amont en-dessous de la cote (60,00).



PROFIL EN LONG DE LA MEUSE



PROFIL EN LONG DE LA DERIVATION

PROFIL EN LONG DE LA MEUSE ET DE LA DERIVATION montrant l'abaissement du niveau des crues séculaires résultant de la normalisation et de l'approfondissement du lit.

1	39,00
2	0,80
3	60,00

Fig. 49.

Par la suppression du seuil de l'Ourthe, ces travaux protègent non seulement Liège efficacement des inondations, mais avec encore plus d'ampleur la région affaissée de Seraing, où les inondations étaient les plus graves. Enfin ils font sentir leurs effets encore plus en amont et permettent une extension future des travaux destinés à supprimer les inondations.

Ces travaux ont été réalisés d'une manière ininterrompue jusqu'à leur achèvement. Ensuite ils ont été prolongés à l'amont d'Yvoz-Ramet par la construction du nouveau barrage éclusé de Neuville-sous-Huy, mis en service en 1958.

Exécutés conformément au programme général, ces travaux ont eu les effets bienfaisants qu'on en attendait. Ils ont assuré la survivance d'une importante région industrielle et économique; ils ont même permis son expansion par un progrès considérable des liaisons par eau, inséparable des travaux d'aménagement de la Meuse. Egalement par une amélioration des voies terrestres, par la création de nouvelles routes le long du fleuve, rendues possibles par les travaux de rectification et d'endiguement, alors que l'encombrement des bâtisses et des établissements industriels congestionne le trafic routier et empêche toute extension ou amélioration de la voirie.

La figure 50 représente la nouvelle canalisation de la Meuse entre Huy et Visé et l'effet attendu de ces aménagements sur l'écoulement des crues.

4.- L'ASSAINISSEMENT DES REGIONS INONDABLES

La protection contre les inondations par l'endiguement exige comme complément des travaux d'assainissement. Dans la région de Liège, ils sont rendus plus importants et plus difficiles par les affaissements miniers. Ceux-ci se manifestent avec une activité variable et plus ou moins continue depuis l'origine de l'exploitation charbonnière. Ils se sont amplifiés au cours des temps, en raison du rythme plus rapide de l'exploitation.

En amont, la rue principale de Seraing s'est affaissée de 4,75 m depuis 1870 et l'église de Tilleur de 3,00 m depuis 1880. Actuellement, l'affaissement est en moyenne de 0,05 à 0,10 m par an. Mais il peut être beaucoup plus grand par endroits. C'est ainsi qu'en aval, à Wandre, on a enregistré en 3 ans un affaissement de 1,40 m. Les prévisions d'affaissements indiquent des descentes futures pouvant y atteindre 7,50 m. En général, les affaissements futurs prévus n'atteignent pas des valeurs aussi exceptionnelles; néanmoins il est probable qu'ils dépasseront trois mètres en beaucoup d'endroits.

Ainsi qu'il a été dit précédemment, le barrage de Monsin maintient une flottaison fixe à la cote (60,00) du bief canalisé. Les berges et les terrains riverains du fleuve descendent donc progressivement et sans discontinuer sous le niveau normal des eaux et sous le niveau des crues. Par exemple, la rue principale de Seraing qui s'élevait en 1870 à 5,75 m au-dessus des basses eaux n'a plus actuellement qu'une revanche de 1,00 m. Un peu plus en amont, un quartier de Seraing est déjà en permanence sous la flottaison normale et de semblables situations existent et se développent en amont et en aval de Liège. A Wandre, une importante partie du territoire de la commune

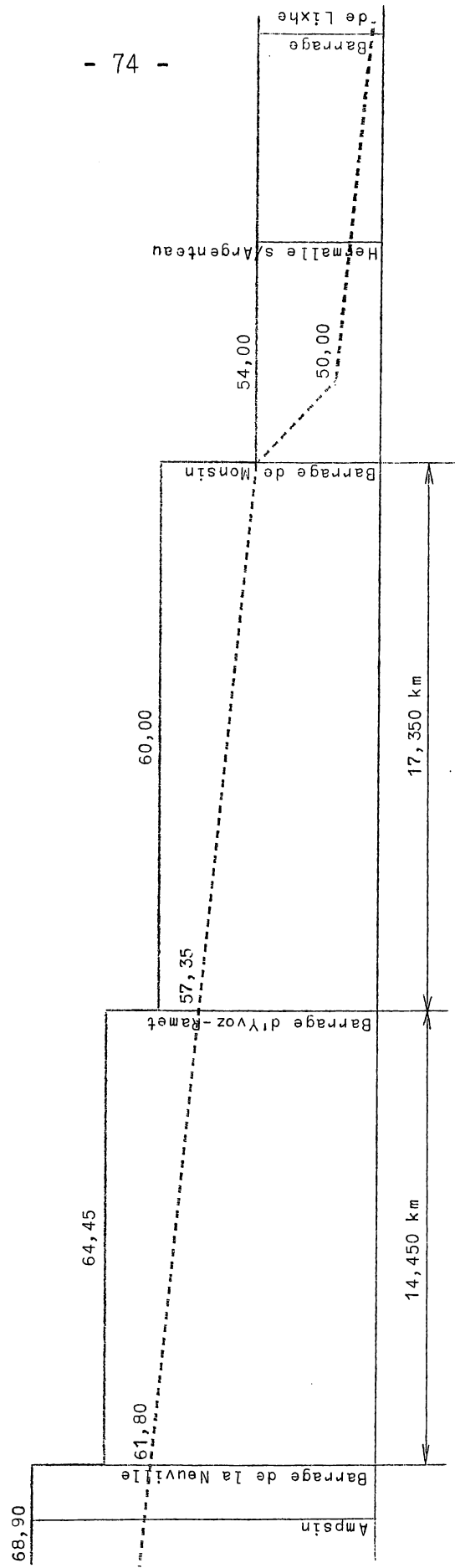


Fig. 50.

se trouve déjà en permanence sous le niveau du fleuve. Elle est peu bâtie, mais le centre de la commune, où se concentre 95 % de la population, se trouvera dans un avenir prochain sous le niveau d'étiage du fleuve d'une hauteur variant de 2,50 m à 4,50 m.

L'affaissement des terrains contribue donc fortement au danger d'inondation directe. Même là où la flottaison normale ne dépasse pas encore le niveau du sol, la nappe phréatique s'en rapproche cependant. Il y correspond un développement de régions d'inondations possibles de caves, sensiblement plus étendues que les régions d'inondations possibles de voirie. Enfin, l'inégalité des affaissements peut affecter l'écoulement naturel des eaux au point de l'empêcher. C'est ainsi qu'aux confins de Sclessin et de Tilleur, en amont de Liège sur la rive gauche, un petit affluent de la Meuse, le Beaumont Fossé, a subi un renversement de pente, à cause des affaissements plus considérables sous les hauteurs que sous le fond de la plaine. L'écoulement étant ainsi rendu impossible, un marécage s'était formé.

Partout où le niveau de l'eau dans la Meuse s'élève au-dessus du sol, temporairement en temps de crue ou même en permanence, un danger d'inondation indirecte est créé par l'empêchement d'évacuation des eaux météoriques, des eaux industrielles et des eaux usées. A ce sujet aussi, il y a lieu non seulement de considérer les inondations de voirie, mais aussi les inondations de caves. Les régions protégées de l'invasion directe des eaux par les digues doivent donc être mises à l'abri des inondations indirectes par l'évacuation des eaux météoriques, des eaux industrielles et usées et des eaux d'infiltration des caves, au moyen de dispositifs d'assainissement et de drainage comportant des installations de refoulement auxquels on a donné dans la région le nom de système de "démergement". C'est un mot français d'ailleurs correct mais peu employé.

Ces travaux, très importants en raison de l'étendue de terrain à protéger, sont exécutés par une Association intercommunale, groupant toutes les communes intéressées et disposant d'un service technique d'études et de surveillance. Les travaux sont subventionnés à concurrence de 75 % par le Ministère des Travaux Publics et de 12,5 % par la Province. Il reste donc 12,5 % à charge des communes. Pour supporter cette part, elles ont été autorisées à prélever une taxe spéciale sur le charbon extrait de leur sous-sol. En vue de simplifier et d'accélérer les formalités administratives, le contrôle supérieur des travaux a été confié par les pouvoirs subsidiaires à un Comité spécial nommé par le Roi.

Ces travaux de démergement sont établis suivant des principes classiques mais comportent des dispositions particulières ayant un caractère propre résultant des circonstances.

Remarquons d'abord qu'il faut évacuer non seulement les eaux de la partie inondable de la vallée, mais aussi celles qui y descendent des hauteurs. Donc les bassins à assainir ont une superficie beaucoup plus considérable que leurs parties inondables (*). Pour réduire au minimum le travail de re-

(*) Les limites de ces bassins ne sont pas confondues avec celles des communes; d'où le grand avantage de confier les études et les travaux à une intercommunale.

foulement, les eaux des hauteurs sont recueillies à un niveau suffisant par des égoûts peu profonds, appelés collecteurs de ceinture, de telle sorte qu'elles puissent être évacuées à toute époque par la gravité, compte tenu des affaissements totaux prévus et des prévisions sur les cotes des crues futures. On se rend compte que l'établissement des émissaires des collecteurs de ceinture, appelés exutoires, demande dans ce cas, outre une appréciation convenable des débits et des pertes de charge, une considération attentive des prévisions d'affaissements et de crue.

Les exutoires sont des canalisations étanches enterrées à faible profondeur sous la surface du sol et ne recevant pas de raccordements, dont la partie attenante au fleuve doit nécessairement fonctionner en siphon et ce sur une longueur de plus en plus grande au fur et à mesure du progrès des affaissements. Cette longueur susceptible d'être mise en charge est déterminée avec exactitude et la canalisation est divisée sur cette longueur en deux conduites peu distantes, capables d'écouler chacune le débit maximum. Ces canalisations sont capables de résister à la pression interne maximum prévue après tous affaissements. Des vannages établis aux extrémités des canalisations dédoublées permettent de les isoler en vue de l'entretien et de l'inspection. L'une d'elles est normalement en service. Les débits de ces exutoires sont parfois considérables; souvent ils reprennent les eaux de ruisseaux dans le talweg desquels ils sont disposés. Par exemple, l'exutoire qui reprend les eaux du bassin du ruisseau de Hollogne à Jemeppe a été établi en vue d'un débit maximum de $22 \text{ m}^3/\text{sec}$. Il a été constaté depuis lors que le débit peut s'élever à $35 \text{ m}^3/\text{sec}$ environ. Ces exutoires sont réalisés en tuyaux circulaires ou ovales en béton armé; leur diamètre atteint jusqu'à 2,50 m. Sous les hauteurs, dans les endroits déclifs, les branches amont et même parfois les branches aval dédoublées des exutoires ont été réalisées en galeries souterraines. Ils ont alors une section carrée à angles chanfreinés et sont revêtus de béton armé.

Les exutoires débouchent dans la Meuse suivant une inclinaison de 45° vers l'aval. Les niveaux sont établis de telle sorte que, à la flottaison normale, l'écoulement soit visible et le restera en général ou à peu de chose près après tous affaissements (*).

Ainsi qu'il a été dit, ces exutoires sont généralement sous le sol. Exceptionnellement, le tronçon aval dédoublé d'un exutoire a été construit au-dessus du sol et couvert d'un remblai limité par un mur de soutènement et sur lequel on a établi une voirie.

Les pentes des exutoires sont généralement assez importantes, puisqu'ils viennent des hauteurs. Cependant, il y a lieu de tenir compte du fait que les affaissements sont généralement plus grands sous les hauteurs que dans la vallée. En tenant compte des prévisions détaillées des affaissements, on majore les pentes initiales de tous les tronçons des exutoires de telle sorte que, après tous affaissements, il subsiste partout une pente suffisante et qu'il ne produise pas de contrepentes, c'est-à-dire des points bas.

(*) Seul l'exutoire du ruisseau de Tilleur sera noyé à la partie inférieure. Il a été construit avec un supplément de hauteur qui permettra de bétonner la partie inférieure jusqu'au dessus du niveau de la flottaison normale.

L'évacuation des eaux de la plaine, bien que concernant des débits plus faibles, constitue un problème difficile, à cause des faibles pentes disponibles et du danger de renversement de pente par les effets des affaissements.

Dans toute la mesure du possible des suppléments de pente sont donnés initialement aux conduites, en vue de conserver les pentes de grandeur et de sens convenable après tous affaissements. On ne peut cependant avoir la certitude que, sous l'effet très variable des affaissements, il ne se produira pas temporairement et localement des renversements de pentes. Pour en réduire les conséquences, toutes les canalisations sont autant que possible reliées entre elles à tous leurs points de croisement.

Mais le problème principal est celui du refoulement, qui est coûteux et susceptible d'avaries. Il faut le rendre économique et sûr. La question a donné lieu à beaucoup de discussions, même de controverses avant 1927. Le succès des travaux réalisés y a mis fin. On avait notamment proposé de remblayer toute la vallée inondable au-dessus du niveau des crues. Or, elle est occupée par deux cent mille habitants et de très nombreuses usines de première importance. Le remblai n'a été possible que très localement. On l'envisage par exemple à l'aval de Liège pour la partie déjà inondée actuellement en permanence et presque inoccupée de la commune de Wandre. Le remblayage pourra être fait par des déblais de mine de deux charbonnages voisins, dont les exploitations sont sous les hauteurs.

Pour réduire le refoulement, il y a intérêt à placer les canalisations le plus près possible de la surface du sol. Mais alors il faut abandonner les caves aux inondations, qui, comme il a été dit, se produisent dans un territoire beaucoup plus étendu que celui exposé aux submersions de voirie. On a proposé de rabattre la nappe phréatique sous le niveau des caves, ce qui aurait entraîné la construction d'un réseau complet de drains profonds et aurait exigé un travail de refoulement important. Une solution plus économique et satisfaisante a été proposée par feu M. BIEFNOT, ancien directeur des travaux de la ville de Seraing et auteur du projet initial de démergement. Il consiste à drainer toutes les caves par des conduites recueillant les eaux d'infiltrations qui sont réunies dans un petit puisard établi en contrebas du pavement de la cave. Ces raccordements de caves sont branchés sur un égoût profond qui ne reçoit que ces eaux d'infiltration des caves. Ces égouts profonds conduisent les eaux vers des stations de pompes profondes, appelées stations secondaires. Ces stations sont automatiques et refoulent les eaux dans le réseau supérieur peu profond. Ce réseau supérieur recueille toutes les eaux météoriques et usées. Son effluent s'écoule par la gravité dans la Meuse lorsque les niveaux le permettent. Lorsque les débouchés sont noyés, en temps de crue ou en permanence par suite des affaissements, les eaux sont refoulées dans la Meuse par des stations de pompage dites stations principales. On comprend que ce dispositif, qui est en somme un système séparatif spécial, réduit réellement le travail de refoulement au minimum. Le débit du réseau inférieur est faible. Des dispositions sont prises pour éviter toute possibilité de refoulement d'eau par les caves, en cas de dérangement.

A l'origine, il y avait dans chaque cave un clapet anti-refouleur. Actuellement, on branche les raccordements de caves sur des tronçons de

conduites collectrices dont la jonction avec l'égoût profond comporte un clapet anti-refouleur.

Les stations secondaires sont constituées par des cuves étanches profondes en béton armé, comportant à la partie inférieure un double puisard étanche mis en charge.

Les deux compartiments communiquent entre eux mais peuvent être séparés. (fig. 51)

L'amorçage des pompes est donc assuré, elles n'aspirent pas initialement. Le démarrage est automatique. Il y a toujours deux pompes (de 100 à 300 litres par seconde) et le démarreur automatique est tel que si la première pompe ne démarre pas, la deuxième démarre ensuite. Les pannes de démarrage sont signalées électriquement à une station principale gardée voisine. Des inspections périodiques fréquentes assurent toute sécurité. Il y a plusieurs arrivées de courant, pour éviter les effets des interruptions de courant accidentelles.

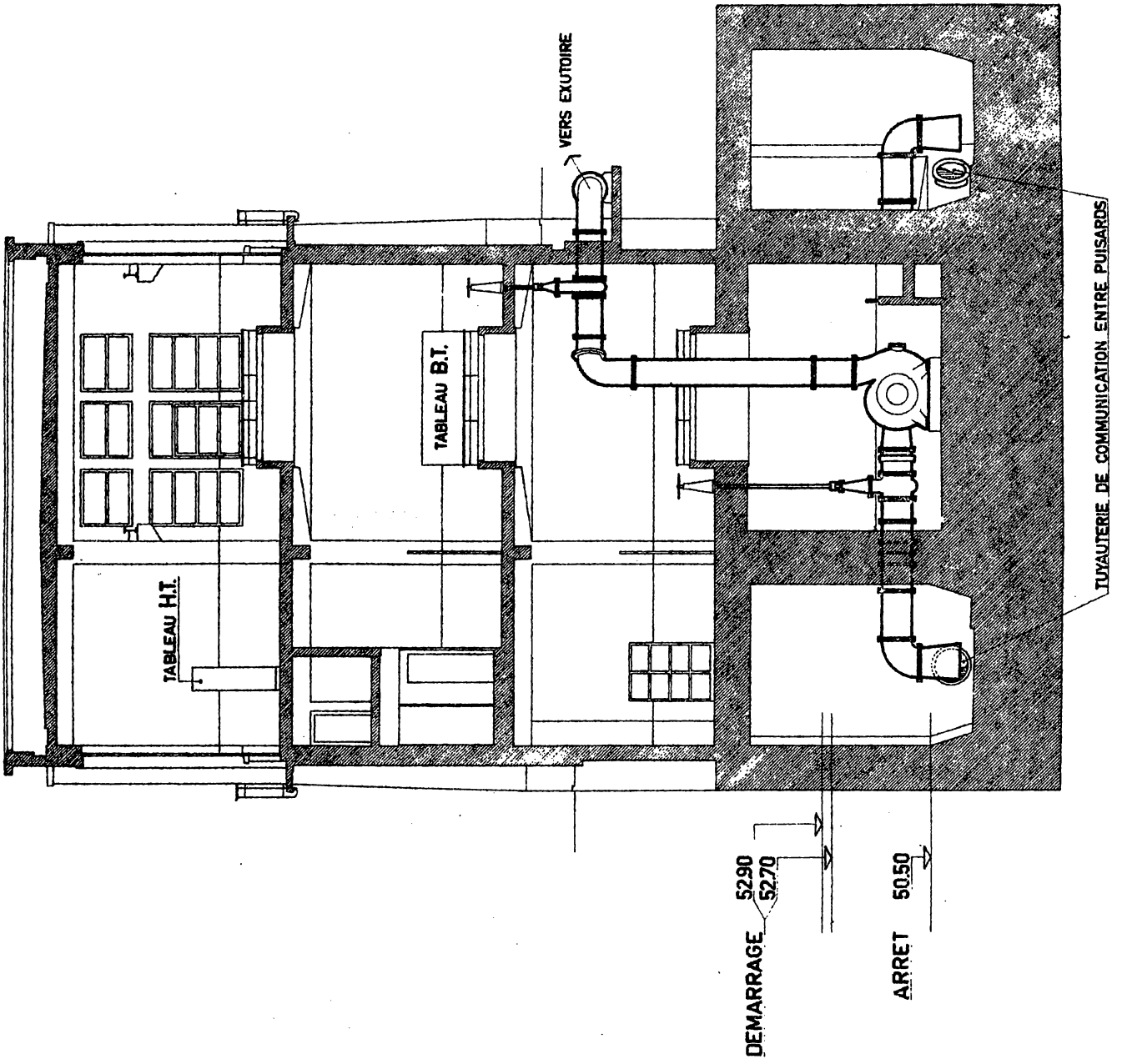
Les stations principales ont aussi deux puisards, à niveau libre, communiquant entre eux et pouvant être séparés. Ils sont accessibles pour l'entretien et l'inspection. Chaque station compte au moins trois pompes, dont une de réserve. Leur capacité varie de 300 à 1500 litres/sec, le plus souvent 800. Elles refoulent dans la Meuse par des conduites en siphon, dont le point haut doit rester au-dessus du niveau des plus hautes crues, après tous affaissements, ceci pour éviter toute possibilité d'inondation par les pompes en cas d'avarie. Le démarrage d'une des pompes est automatique. (fig. 52)

Lorsque le débit à évacuer dépasse en permanence celui d'une pompe, on met en marche commandée le nombre de pompes nécessaires, cependant que la pompe à démarrage automatique assure l'ajustement. Les plus anciennes stations de pompage ont les pompes au-dessus du plafond des puisards libres; elles aspirent donc au démarrage. Leur amorçage est assuré par une pompe à vide, qui se branche sur la conduite de refoulement au point haut. Le débouché de la conduite de refoulement doit donc être noyé.

Pour éviter l'aspiration d'eau, la conduite du vide s'élève à plus de 10,33 m au-dessus du niveau maximum de l'eau, après tous affaissements. Cela ne suffit pas pour éviter l'aspiration non seulement d'une émulsion d'eau et d'air, mais même de petits objets (allumettes, clous, boutons, etc.). Pour protéger les pompes à vide à piston, on dispose sur les conduites du vide des filtres remplis de copeaux de bronze. Les pompes à vide sont doubles, l'une servant de réserve; le maintien de l'amorçage est automatique pour la pompe à démarrage automatique. Cet amorçage fonctionne bien; il est cependant coûteux et délicat.

Les pompes sont centrifuges à axe horizontal, d'entretien facile et très robustes. Dans quelques stations, pour éviter l'amorçage par le vide, on a utilisé à titre d'essai des pompes immergées à axe vertical. Cet essai n'a cependant pas été concluant. Dans des stations plus récentes, on a accolé les deux puisards libres latéralement à la salle des pompes. Celles-ci sont ainsi amorcées naturellement. (fig. 53). L'économie de prix d'établissement, d'exploitation et d'entretien du vide entraîne un supplément de

Fig. 51.



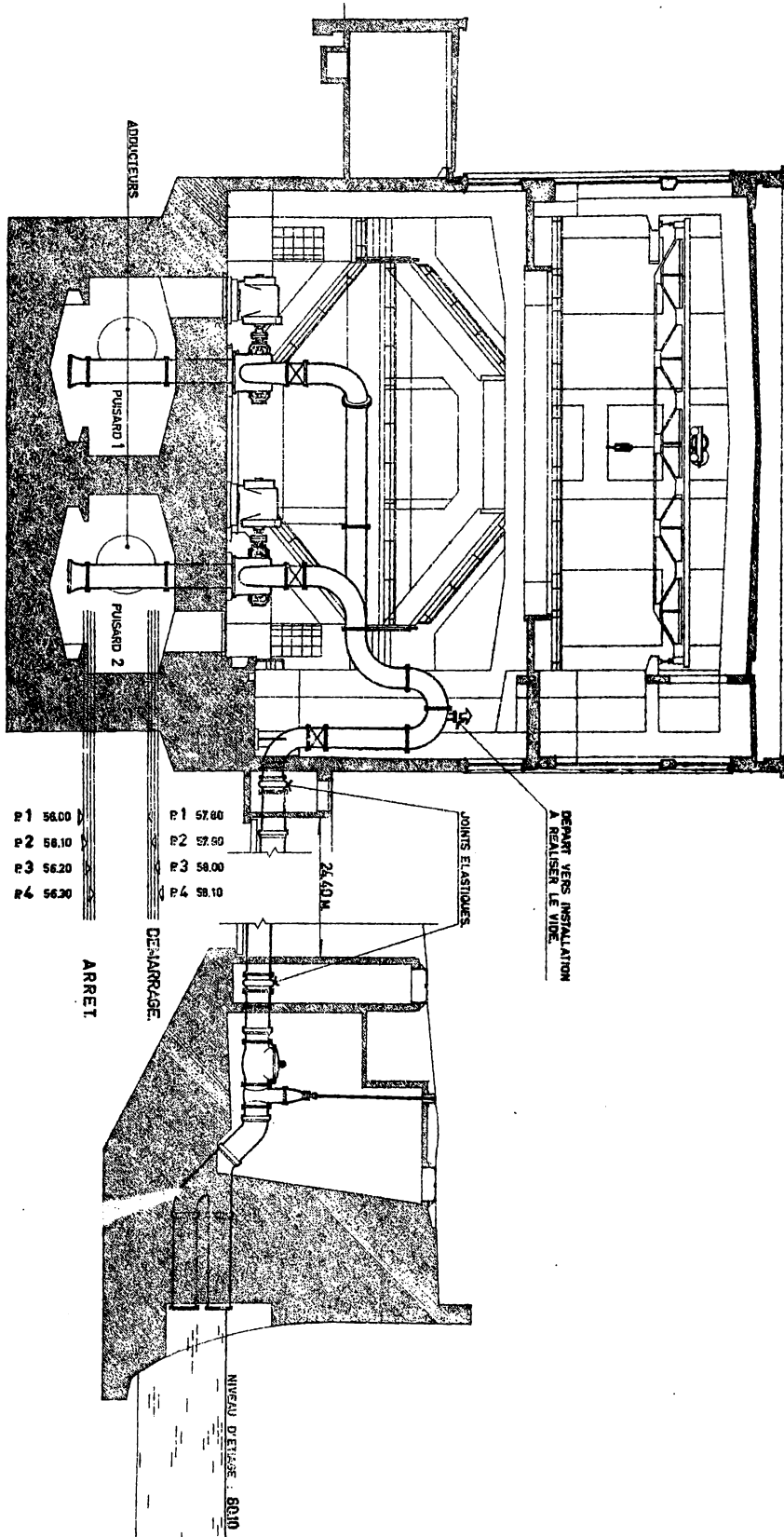


Fig. 52.

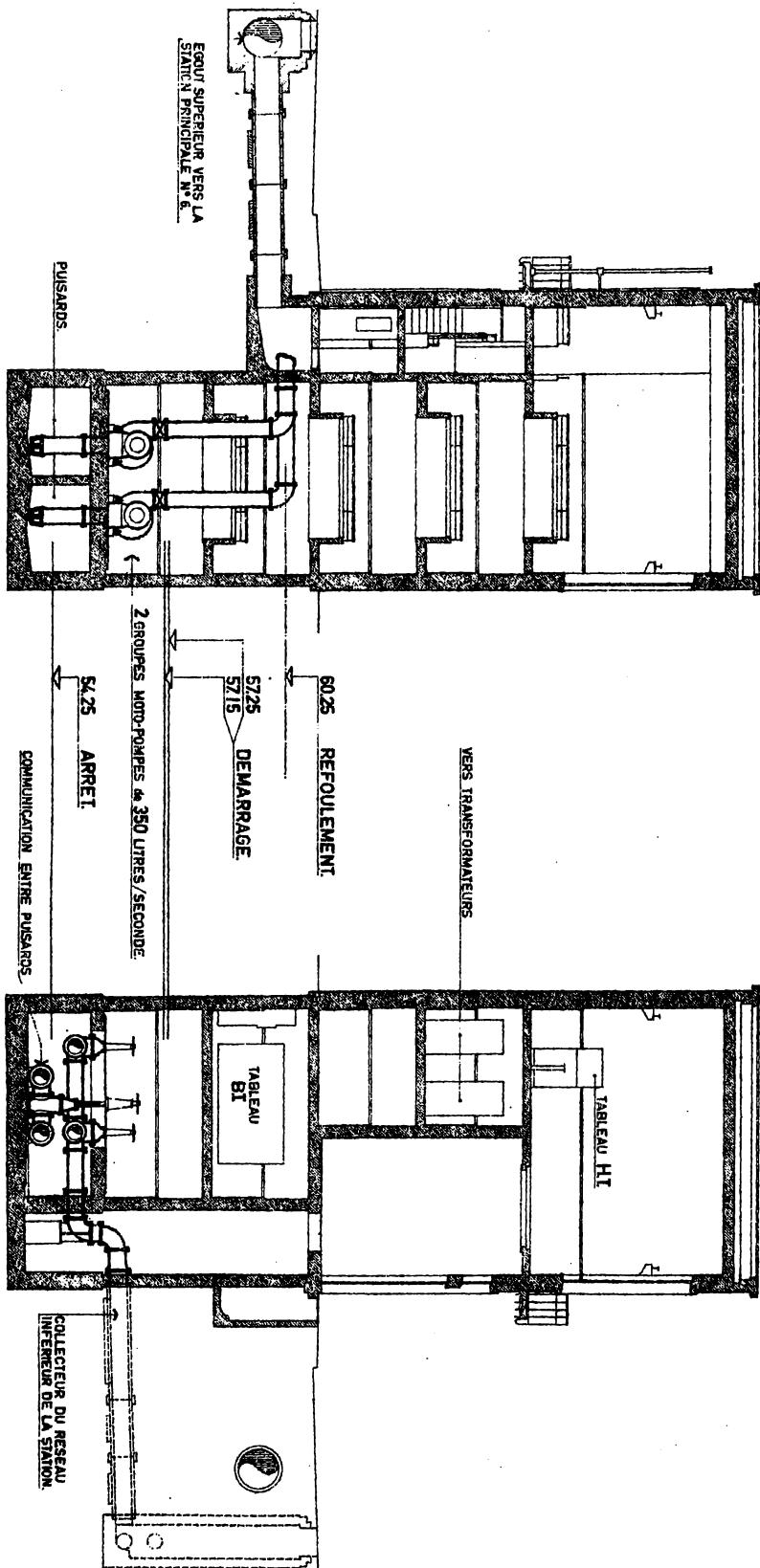


Fig. 53.

dépense important de construction de la station de pompage, à cause des sujétions dues aux affaissements miniers. Sans cette dernière circonstance, la dernière solution serait certainement plus économique. Elle sera d'ailleurs appliquées pour les dernières stations de pompage restant à construire.

Les stations principales et secondaires sont en béton armé monolithique et construites de manière à résister à toutes les sollicitations pouvant résulter des affaissements miniers et d'une inondation au niveau maximum. Elles sont absolument étanches jusqu'au-dessus de ce niveau maximum, compte tenu de tous les affaissements possibles. Leurs accès sont donc surélevés.

Le problème du refoulement doit tenir compte des débits variables et des hauteurs de refoulement variables. Pour cette raison, on utilisait des moteurs à courant continu pour les premières stations de pompage, de manière à pouvoir faire varier la vitesse en vue du rendement maximum en toutes circonstances.

Le courant à haute tension était abaissé par des transformateurs et la basse tension entraînait des commutatrices produisant le courant continu. Ces dernières machines étaient encombrantes, coûteuses et délicates. On les a abandonnées et on a renoncé au réglage de la vitesse, eu égard à la marche intermittente à démarrage automatique. On a employé des moteurs asynchrones à basse tension, celle-ci étant abaissée par des transformateurs. Dans les dernières stations, les pompes sont directement entraînées par des moteurs à haute tension lorsque la puissance est suffisante. Les transformateurs ne servent plus qu'à l'éclairage et aux auxiliaires.

Les stations principales sont reliées entre elles par un réseau double et bouclé de câbles à haute tension appartenant à l'Association intercommunale de démergement. Ce réseau est relié à diverses sources de courant, pour éviter les effets des interruptions accidentelles de fourniture de courant. Les stations secondaires sont toutes reliées à des stations principales voisines. Les signalisations électriques sont très développées; le contrôle périodique fréquent assure la plus grande sécurité de fonctionnement.

Le réseau supérieur est raccordé aux puisards des stations de pompage principales près des débouchés à la Meuse. L'écoulement se fait par la gravité lorsqu'il est possible. Lorsqu'il n'est plus possible, les vannes sont fermées pour isoler les débouchés dans le fleuve et les eaux sont envoyées aux puisards. Comme ceux des exutoires, les débouchés par gravité des égoûts supérieurs sont situés au-dessus de la flottaison normale de la Meuse. Ils sont donc découverts, jusqu'aux environs de l'époque à laquelle le refoulement doit devenir permanent. Les débouchés des conduites de refoulement dans la Meuse se font à 45° vers l'aval et sont noyés. En raison des affaissements prévus, des dispositions sont prises éventuellement à l'avance pour faire varier le niveau du refoulement au fur et à mesure des affaissements. Dans quelques cas, il en est résulté des difficultés d'assurer un refoulement noyé en tous temps. On a alors interposé entre le fleuve et les pompes des cuves de refoulement de capacité suffisante et convenablement disposées pour assurer le noyage des conduites de refoulement et permettre l'amorçage par le vide. Elles sont superflues avec la nouvelle disposition des puisards latéraux.

Pour assurer le curage des puisards, on se sert de pompes à boue, primitivement fixes, actuellement mobiles. Elles permettent aussi de produire dans les deux puisards un courant tourbillonnaire en circuit fermé. Les pompes principales sont réparties sur les deux puisards, de manière à les faire servir indifféremment. Des grilles dégrossisseuses empêchent l'arrivée dans les puisards d'objets entraînés volumineux. Néanmoins, les pompes doivent être très robustes et à larges ouïes, car, en raison du caractère industriel du bassin, les eaux pompées contiennent toutes sortes d'objets métalliques, boulons, écrous, etc..., jusqu'à des outils, tels que des marteaux, des clefs anglaises, des planches, etc...

Les stations de pompage sont d'une exécution difficile à cause de leur profondeur considérable sous le niveau de la nappe phréatique.

Il en est de même de la construction des égoûts profonds et même des égoûts superficiels de la plaine et des exutoires, notamment en raison des grandes sections. De grandes difficultés proviennent de la construction de ces égoûts dans des rues peu larges, bordées d'immeubles importants de part et d'autre, parcourues par des voies de tramways et connaissant un trafic lourd et intense. Leur sous-sol est rempli de canalisations de toutes espèces : eau, gaz, électricité, téléphone, égoûts, etc... et de toutes sortes de vestiges d'anciennes constructions et exploitations. Les immeubles voisins sont souvent endommagés par les travaux miniers et les contestations sont fréquentes en cas de nouveaux dégâts. On comprend que des précautions spéciales de blindage soient prises, surtout pour les égoûts profonds, et que les blindages soient souvent abandonnés dans la fouille, si le terrain est peu sûr.

L'irrégularité des affaissements doit faire craindre la dislocation des canalisations enterrées. Pour l'éviter, on les a rendues déformables. En règle générale, elles sont formées de tronçons de 3,00 m en béton armé, cylindriques, avec joints à manchons rendus étanches par un mastic spécial de bitume (fig. 54). Ces joints sont difficiles à confectionner et sont faits par des spécialistes. L'expérience des conduites les plus anciennes, posées depuis 25 ans, est concluante. Les conduites en galeries, de section carrée, sont aussi en tronçons courts à joints étanches. Rarement on a employé des sections surhaussées de grande hauteur (2,50 m). Les sections de grand diamètre sont, comme les grandes sections surhaussées, faites en tronçons de 1 m à joints à manchons.

Ces conduites, enfouies à faible distance sous le sol, doivent supporter le passage de lourdes charges (voies ferrées, tramways, camions lourds, etc...). Ces conditions excèdent celles auxquelles peuvent résister les conduites préfabriquées du commerce. On les a donc calculées spécialement et elles ont été fabriquées en régie par l'Association intercommunale de démergement.

A noter encore que, à l'aval de certains bassins supérieurs, lorsqu'il manque de profondeur pour enfouir les conduites ou par raison d'économie, les conduites ont été calculées pour un débit inférieur au maximum d'orage. Pour éviter les submersions, on a établi à l'amont de l'égoût un bassin, appelé réservoir d'orage, de capacité suffisante pour contenir l'excédent des apports sur l'évacuation pendant la durée d'un orage (fig. 55). Le

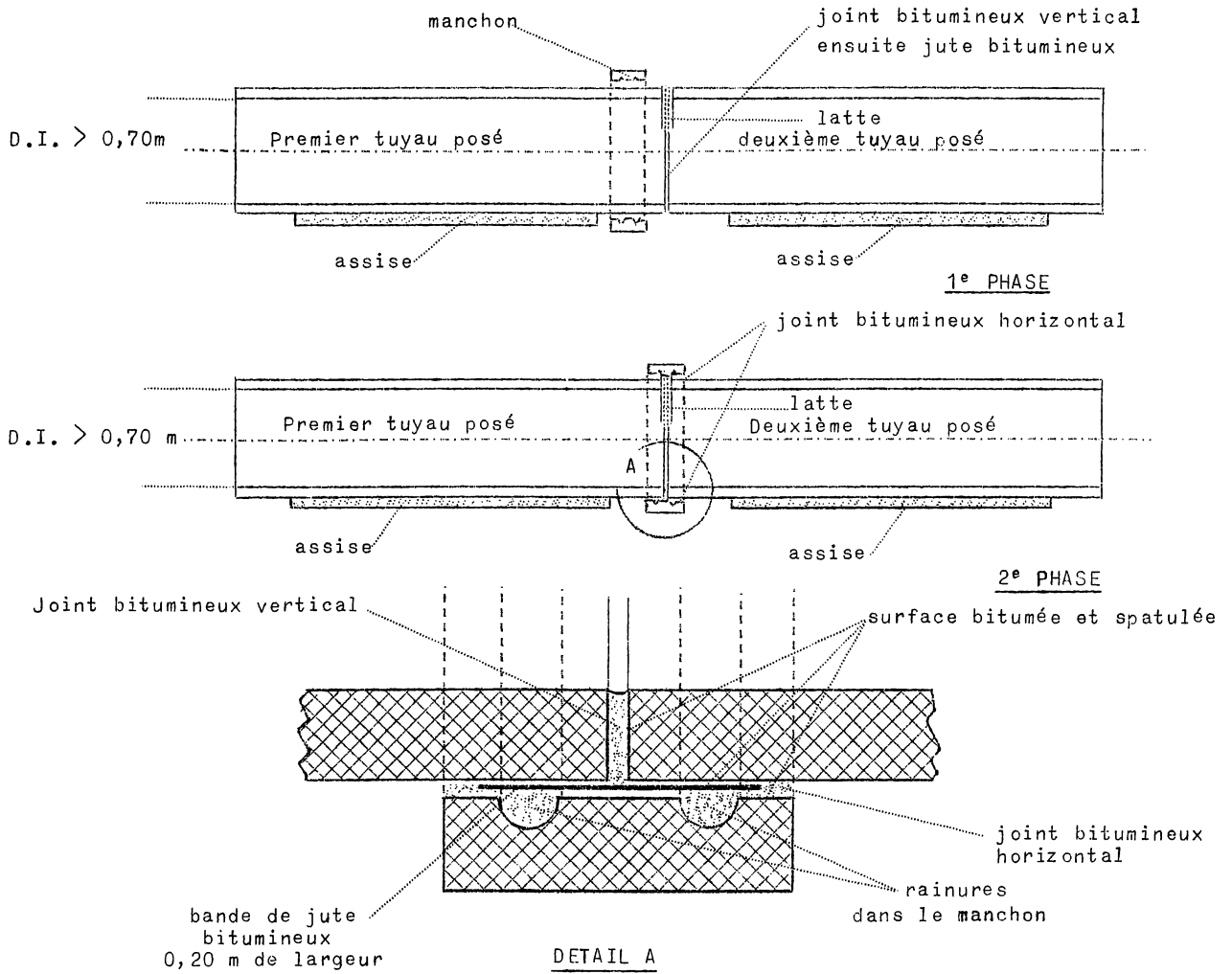
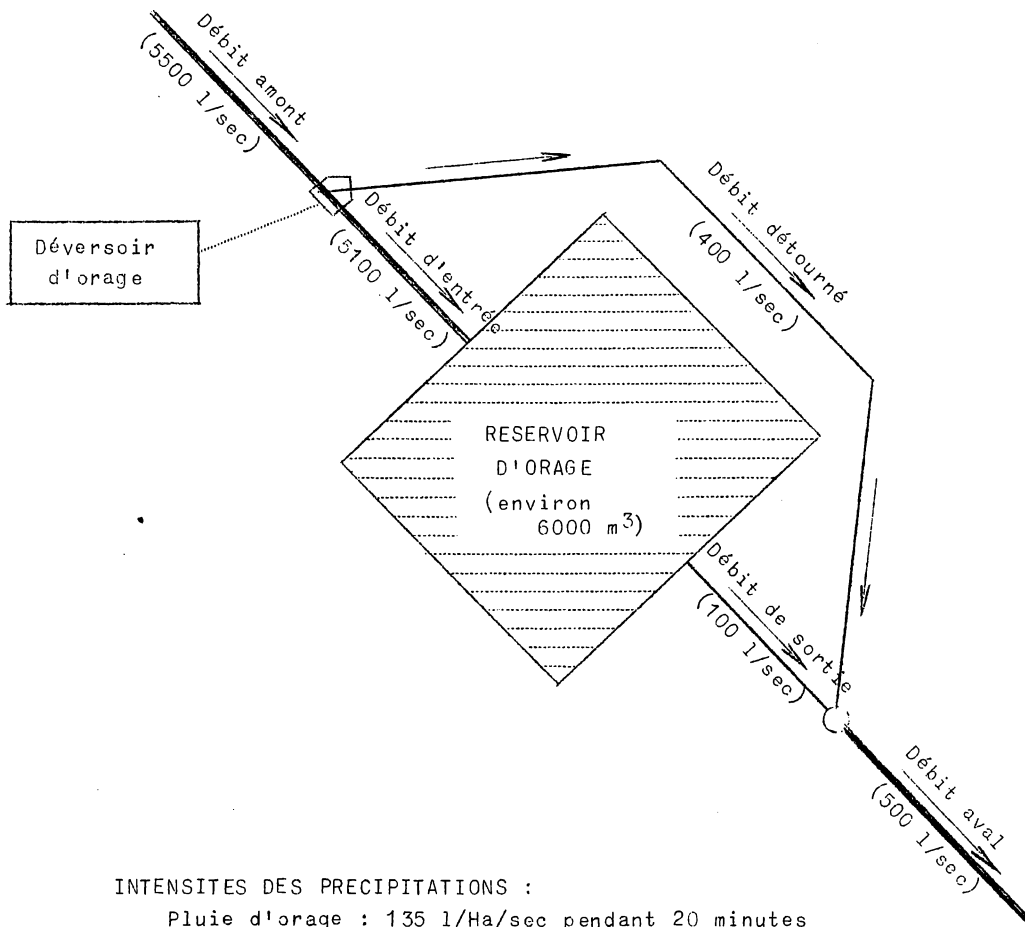


Fig. 54.



INTENSITES DES PRECIPITATIONS :

Pluie d'orage : 135 l/Ha/sec pendant 20 minutes

Pluie d'hiver : 100 mm en 24 heures, durée illimitée.

CAPACITE DU RESERVOIR D'ORAGE :

$$C = \int_0^{1200 \text{ sec}} (\text{Débit amont} - \text{Débit aval}) . dt$$

Débit max. amont = débit correspondant à la pluie d'orage.

Débit détourné = débit correspondant à la pluie d'hiver.

Débit de sortie du Réservoir d'orage = réduit au maximum.

Fig. 55.

résultat a été satisfaisant. Il y a plusieurs réservoirs d'orage en service. Pour les stations principales de pompage les plus récentes, on a déterminé les débits maxima à refouler en tenant compte de la capacité d'emmagasinement d'eau du réseau de canalisations. Cela a conduit à de sérieuses économies.

5.- RESULTATS

Les travaux d'endiguement et d'amélioration de la Meuse sont pratiquement terminés. Les travaux de démergement ont malheureusement été ralentis plusieurs fois par des difficultés financières et par la guerre. A l'amont de Liège ils sont presque terminés. Grâce à eux, on a évité plus d'une centaine d'inondations de voirie jusqu'en 1961, dont certaines auraient atteint 3 m au-dessus du sol. Quant aux caves, beaucoup seraient inondées en permanence; le nombre d'inondations évitées est inchiffrable.

Une région qui en 1930 présentait les signes précurseurs d'une décadence prochaine, témoigne maintenant d'une confiance et d'une prospérité étonnantes. La plus-value immobilière est inestimable; la résurrection économique est certaine. Ce résultat éclatant et reconnu correspond au programme initial de l'Association intercommunale, qui ne concernait que l'amont de Liège. Il a décidé plus récemment les communes d'aval à s'y joindre; leur situation n'est devenue menaçante que depuis les dernières années. Les travaux y sont vigoureusement menés. Entre ces deux groupes de communes, la Ville de Liège, qui n'est pas membre de l'Association intercommunale de démergement, a ses propres installations de refoulement.

Les premières tractations datent de 1927. L'intercommunale a été fondée en 1928; les travaux commencés en 1930.

La dépense totale pour les travaux de démergement, en francs de diverses époques, atteint trois quarts de milliard. On estime qu'il en faudra encore un demi pour terminer. L'Association qui étudie et fait exécuter les travaux, en assure ensuite l'exploitation et l'entretien.

Dans l'hiver de 1944, après la libération, et pendant les crues de la Meuse, la population des communes riveraines de la Meuse en amont de Liège, qui travaillait à plein rendement pour les armées alliées, a pu s'abriter dans les caves pendant que les bombes volantes harcelaient la région. Ces caves n'étaient pas inondées grâce au démergement. S'ils avaient été dans l'impossibilité de s'abriter, chassés de leur demeure par l'eau et le feu, les habitants les auraient peut-être quittées sans retour. Ils y sont maintenant en sécurité.

6.- BIBLIOGRAPHIE DE L'APPENDICE A LA 5^e SECTION.

- (1) Journées de la Navigation Mosane - Liège 1954.
Rapports de la section technique. Edition provisoire.
- (2) Rapport du Général Jadwin sur le Mississippi.
Engineering News Record 1927 (15 décembre).
De Ingenieur, 14 avril 1928.

- (3) M. LEKENNE.- Protection de la Ville de Paris et de la banlieue contre les inondations.
Rapport de mission.
A.T.P.B. 1927 n° 3 (juin).

TABLE DES MATIERES

5^e SECTION : REGULARISATION ET AMENAGEMENT DES PARTIES
SUPERIEURES ET MOYENNES DES COURS D'EAU NATURELS

CHAPITRE XIX.- ETUDE GENERALE DES EFFETS DES TRAVAUX AUX COURS D'EAU NATURELS

1.- Objets et natures des travaux.	5
2.- Effets généraux des régularisations.	9
3.- Effets des régularisations locales	12
4.- Effets de la mobilité du lit et du débit solide.	14
5.- Navigabilité	15
6.- Fixité du lit.	17
7.- Amélioration de l'écoulement des crues et protection contre les inondations.	20
8.- Effets accessoires des corrections	21
9.- Remarques générales au sujet des corrections	22

CHAPITRE XX.- TRAVAUX ET METHODES DE CORRECTION ET D'AMENAGEMENT

1.- Régularisations ou corrections locales	25
2.- Enlèvement des écueils et correction des seuils.	28
3.- Coupures	29
4.- Confluents	30
5.- Corrections étendues	32

CHAPITRE XXI.- PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS ET AMELIORATION DE L'ECOULEMENT DES
CRUES

1.- Protection contre les inondations.	35
2.- Amélioration de l'écoulement des crues	35
3.- Utilisation de réservoirs d'emmagasinement pour la protection contre les inondations.	36
4.- Dérivations de crue.	38
5.- Autres moyens de protection contre les inondations	38
6.- Réservoirs régulateurs de débit d'étiage	39
7.- Mouvement de l'eau dans les réservoirs	40

CHAPITRE XXII.- CANALISATION DES COURS D'EAU

1.- Généralités.	45
2.- Etablissement d'un projet de canalisation.	46
3.- Emplacement des barrages et écluses.	48
4.- Passes de flottage	49
5.- Echelles à poissons. Canaux extra-rugueux.	51

APPENDICE A LA 5^e SECTION : Note sur les travaux de protection de la région de Liège
contre les inondations.

1.- Introduction	53
2.- La crue exxceptionnelle de 1925-1926	61
3.- Travaux exécutés après les inondations	63
4.- L'assainissement des régions inondables.	73
5.- Résultats.	86
6.- Bibliographie de l'appendice de la 5 ^e section.	86