

de l'action; d'observer sans passion, de discuter les espèces si variées et les manières dont elles peuvent varier; de mettre en main de l'industriel tous les moyens qu'il peut souhaiter avoir pour réaliser les variations utiles. En un mot suivre la nature pour la diriger.

Commandant AUDEBRAND,  
Ingénieur,  
ancien élève de l'École Polytechnique.

## Essai de Recensement provisoire des principales Forces hydrauliques

Communication de M. DE LA BROSSE à l'Association Française pour l'avancement des Sciences. — Congrès de Grenoble 1904.

On ne pourra évaluer avec quelque exactitude l'importance des forces hydrauliques que lorsque des jaugeages, nombreux et prolongés, auront donné une connaissance à peu près juste du régime de nos cours d'eau et lorsque leurs rives auront été dotées de bons nivellements avec repères d'altitude.

Cependant, et sans attendre jusque-là, il peut sembler désirable de tenter au moins un aperçu de l'importance de ces forces, de chercher à savoir par exemple si les Alpes nous réservent quelques centaines de mille ou plusieurs millions de chevaux, car les essais de recensement faits jusqu'ici n'ont donné que des renseignements assez vagues à cet égard.

J'ai cherché, à défaut de mieux, dans les données statistiques des services hydrauliques des éléments qui permettent une évaluation provisoire au moins grossière de ces ressources, et peut-être ne sera-t-il pas sans intérêt d'en donner ici un premier aperçu pour la partie septentrionale des Alpes comprenant les départements de la Haute-Savoie, de la Savoie, de l'Isère et des Hautes-Alpes.

Un recensement sommaire a déjà eu lieu d'ailleurs pour la Savoie et les Hautes-Alpes par les soins des services locaux (1).

Il faut reconnaître que les débits indiqués par les statistiques anciennes, notamment par les tableaux dressés dans chaque département en exécution des circulaires ministérielles des 30 juillet 1861 et 4 juillet 1878, sont en général inexacts. Les minima y sont souvent exagérés par suite de l'insuffisance d'observations précises sur les basses eaux. Il est donc impossible de tirer de ces statistiques des résultats un peu sérieux. Aussi a-t-on dû recourir pour corriger les plus grosses erreurs à des renseignements directs pris auprès de certains industriels et des services locaux. D'ailleurs, ces renseignements eux-mêmes ne sont pas donnés comme certains, puisqu'il n'y a encore presque nulle part de bons jaugeages, mais ils rectifient du moins les erreurs les plus grossières des statistiques anciennes et ils peuvent, en attendant mieux, donner une idée plus ou moins approchée des débits de certains cours d'eau.

Il s'agit donc d'une approximation imparfaite : il importe de ne pas le perdre de vue. Toutefois, telle que nous sommes en mesure de l'établir et sous les réserves que l'on vient de dire, cette approximation peut déjà donner une idée de l'ordre de grandeur de nos puissances hydrauliques, en attendant que les jaugeages méthodiques en voie d'organisation apportent dans ces évaluations un peu plus d'exactitude.

Le département de la Haute-Savoie verse ses eaux dans le lac Léman et dans le Rhône par les bassins du Trient (Suisse), des Dranses, des Usses, du Fier et de l'Arve. Une

petite portion de ce département est tributaire du bassin de l'Isère par le cours supérieur de l'Arly. Le recensement provisoire, effectué avec les données plus ou moins imparfaites que l'on possède actuellement, donnerait pour la Haute-Savoie un total d'au moins 100 000 chevaux (2) d'étiage et 375 000 chevaux en eaux moyennes. J'ai de bonnes raisons pour croire que les nouveaux jaugeages plus précis augmenteront très notablement ces chiffres.

Le département de la Savoie verse ses eaux dans le Rhône et dans l'Isère par les bassins du Haut-Fier (Chéran), du lac du Bourget, du Flon, du Guiers, de l'Arly et de l'Arc. M. l'Ingénieur en chef Gotteland a fait, sur des bases un peu différentes des miennes, mais qui s'en rapprochent néanmoins suffisamment, un recensement des forces correspondantes qu'il a évaluées (en chiffres ronds) à 320 000 HP d'étiage et 650 000 HP en eaux moyennes.

Le département de l'Isère verse ses eaux dans le Rhône et l'Isère par les bassins du Guiers, de l'Hières, de la Bourbre, du Bréda, du Drac, de la Bourne, etc... Le recensement provisoire lui attribuerait environ 350 000 HP à l'étiage et 800 000 HP en eaux moyennes.

Pour les Hautes-Alpes, M. Tavernier avait trouvé environ 300 000 et 500 000 chevaux. Les renseignements relatifs aux autres départements du sud-est ne sont pas encore assez nombreux pour étendre davantage cet aperçu. Quoi qu'il en soit, cette évaluation provisoire donnerait pour les quatre départements de la Haute-Savoie, de la Savoie, de l'Isère et des Hautes-Alpes, un total de 1 million de chevaux d'étiage, savoir :

DÉPARTEMENTS	SUPERFICIE	RECENSEMENT PROVISOIRE DES FORCES HYDRAULIQUES	
		d'étiage	en eaux moyennes
Haute-Savoie (*).....	459.801	100.000	375.000
Savoie.....	618.791	320.000	650.000
Isère.....	823.658	350.000	800.000
Hautes-Alpes.....	564.314	300.000	500.000
Ensemble pour les 4 départements considérés.....	2.466.561	1.070.000	2.325.000
Soit en chiffres ronds.....	.....	1.000.000	2.300.000

(\*) Chiffres vraisemblablement insuffisants.

Cette statistique sommaire est évidemment bien imparfaite. Ce n'est point par département qu'il y aurait lieu de procéder logiquement, mais par bassins. Toutefois ces chiffres n'ayant aucune prétention de rigueur et devant fournir simplement un aperçu de l'ordre de grandeur de nos ressources hydrauliques, il sera peut-être plus facile de les retenir sous cette forme. J'ai d'ailleurs tout lieu de penser qu'ils représentent des minima et que les études ultérieures conduiront à les majorer notablement. Dès maintenant, il semble que les quatre départements qui nous servent en ce moment d'exemple recèlent une puissance hydraulique d'au moins un million de chevaux aux plus basses eaux d'étiage et qui se maintient pendant six mois de l'année entre deux millions et deux millions et demi de chevaux, c'est-à-dire à près de 1 cheval par hectare de superficie moyenne. Ce sont là des chiffres dignes d'attention, surtout si l'on considère que, dans cette évaluation, n'est pas compris le Rhône qui constitue d'autre part, à lui seul, dans la même région, un important réservoir d'énergie.

(2) Nous prendrons toujours pour base de nos évaluations le poncelet (100 kilogrammes par seconde) équivalent, comme on le sait, au cheval net de 75 kilogrammètres sur l'arbre des moteurs quand on suppose à ceux-ci un rendement de 75 %. Cette unité tend de plus en plus à se généraliser dans toutes les branches des industries hydrauliques. Elle se marque par la notation HP.

(1) Pour le département de la Savoie l'évaluation a été faite par M. l'Ingénieur en chef Gotteland, en 1901.  
Pour celui des Hautes Alpes, voir les évaluations de M. R. Tavernier et la carte dressée par ses soins pour l'exposition universelle de 1900.

Ces quatre départements représentent à peu près 4,5 % de la superficie totale de la France; sans doute ils sont proportionnellement les mieux pourvus en forces hydrauliques grâce à leur relief considérable et à l'abondance de leurs eaux; cependant, les autres départements du sud-est jusqu'au littoral méditerranéen ont aussi de puissantes réserves dans les bassins du Var et de la Durance; la région des Pyrénées, le Plateau Central, les Vosges et le Jura en possèdent également.

Si l'on voulait tenter sur ces bases, malgré leur imperfection, un essai de recensement général, on pourrait réunir les divers départements en quatre groupes principaux :

Le premier groupe, comprenant les quatre départements cités plus haut, embrasse 24 666 kilomètres carrés et compte, comme on vient de le dire, environ un million de chevaux à l'étiage;

Le second groupe comprenant les autres départements du sud-est depuis la Drôme jusqu'aux Alpes-Maritimes et les six départements de la bordure pyrénéenne embrasse une superficie de 63 166 kilomètres carrés. En l'affectant par rapport au premier groupe du coefficient 1/2 on lui attribuerait 1 300 000 chevaux.

Le troisième groupe comprenant 12 départements du Centre et 6 de l'Est embrasse 91 000 kilomètres carrés; avec le coefficient 1/4, il aurait 900 000 chevaux;

Enfin le surplus du territoire formant le quatrième groupe, avec 357 000 kilomètres carrés et le coefficient 1/10 aurait 1 400 000 chevaux, ce qui donnerait pour la France entière un minimum de 4 millions et demi de chevaux d'étiage.

Mais on sait depuis longtemps que la richesse hydraulique d'un pays ne se mesure pas seulement à son minimum d'étiage et de nombreuses applications industrielles nous apprennent que l'on peut utilement profiter des eaux surabondantes des saisons favorables, représentées tout au moins par le régime moyen. C'est donc à 9 ou 10 millions de chevaux qu'il faut évaluer la richesse hydraulique efficace de notre territoire. Or c'est précisément la puissance totale nominale des machines à vapeur qui, d'après les dernières statistiques officielles de l'industrie minière, se décompose ainsi :

Etablissements industriels et agricoles.....	1 900 000 chevaux.
Chemins de fer et tramways.....	6 200 000
Batellerie et navigation fluviale.....	80 000
ENSEMBLE.....	8 180 000 chevaux.

Ainsi la puissance hydraulique de nos cours d'eau ne serait pas moindre que celle de tout notre outillage à vapeur. En réalité elle peut satisfaire un ensemble de besoins bien supérieur parce que l'utilisation en est beaucoup plus complète dans le temps.

Les statistiques de machines à vapeur comprennent en effet pour leur force nominale une foule d'appareils à marche discontinue, notamment pour les chemins de fer dont les locomotives, machines de secours et de réserve, etc... ne donnent leur pleine puissance qu'un très petit nombre d'heures par jour. Il en est de même dans beaucoup d'industries dont les moteurs thermiques font face à un service horaire discontinu.

Au contraire, les forces hydrauliques permettent d'assurer des services permanents de 24 heures par jour, toute l'année, pour les forces d'étiage, six mois par an pour les forces moyennes, ce qui leur donne un intérêt tout spécial, facile à faire ressortir par la considération des heures de service annuel.

Si l'on admet par exemple que les machines à vapeur recensées par les statistiques administratives travaillent en moyenne, savoir :

(A) Dans les établissements industriels et agricoles, 18 heures par jour;

(B) Dans les chemins de fer et tramways, 8 heures par jour;

(C) Dans la batellerie et navigation fluviale, 12 heures par jour.

On obtient pour l'année entière :

(A).....	18 <sup>h</sup> × 365j × 4 <sup>HP</sup> ,9 × 10 <sup>6</sup> = 12 312	} × 10 <sup>6</sup>
(B).....	8 × 365 × 6 2 × 10 <sup>6</sup> = 18 104	
(C).....	12 × 360 × 8 08 × 10 <sup>6</sup> = 346	
ENSEMBLE.....	30 762	× 10 <sup>6</sup>

Soit, en chiffre rond, 30.000 millions ou 30 milliards de chevaux-heures dans l'année.

Or l'aménagement intégral de nos forces hydrauliques, d'après les évaluations ci-dessus procurerait :

1° A l'étiage....	24 <sup>h</sup> × 365j × 4 <sup>HP</sup> ,5 × 10 <sup>6</sup> = 39 420	} × 10 <sup>6</sup>
2° Eaux moyennes	24 × 180 × 5 × 10 <sup>6</sup> = 21 600	
ENSEMBLE.....	61 020	× 10 <sup>6</sup>

Soit, en chiffre rond, 60.000 millions ou 60 milliards de chevaux-heures dans l'année, c'est-à-dire le double de ce que procure actuellement l'outillage à vapeur.

Sans doute, ces évaluations présentent une base contestable et reposent sur des données encore incertaines. Il n'en demeure pas moins évident que notre territoire possède dans son appareil hydraulique un admirable réservoir d'énergie dont la mise en valeur bien conduite augmentera dans une énorme proportion la richesse générale.

Je m'en tiendrai pour le moment à cette réconfortante constatation dont il m'a semblé utile de faire part à l'Association française pour l'avancement des Sciences au moment où, pour la seconde fois, elle vient tenir sa session au pays, qui fut le berceau de la houille blanche et qui demeure le principal théâtre de cette industrie.

R. DE LA BROSSE.  
Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

#### REMARQUE RELATIVE A LA STATISTIQUE PRÉCÉDENTE

A côté du charbon brûlé par l'outillage à vapeur, il y a lieu de considérer — ce que l'on ne fait pas souvent — le combustible employé dans les usines métallurgiques, de produits chimiques, d'éclairage par le gaz, les verreries, les chaufferies, etc., etc... Cette consommation est considérable et il serait instructif de comparer son importance à celle de la première. Or, la « houille blanche », comme nous le savons tous ici, n'a pas seulement son emploi dans les moteurs, mais encore et surtout dans les fours électriques et les appareils de production électrochimique, qui se substituent peu à peu aux engins de la vieille industrie. Or, si nos forces hydrauliques peuvent nous fournir le double de ce que procure l'outillage à vapeur, sont-elles cependant suffisantes pour remplacer, le cas échéant, tout le charbon brûlé dans nos hauts-fourneaux, nos fonderies, nos usines de produits chimiques, céramiques, etc. ? Il semblerait bien que oui, d'après le très intéressant travail de M. DE LA BROSSE.

L'énergie de nos forces hydrauliques peut être transportée électriquement à très grande distance des lieux de génération; mais le transport de cette énergie s'arrête aux points où elle produite par la houille noire revient meilleur marché. Les positions respectives de nos mines, de nos centres de ravitaillement en charbon et de nos chutes d'eaux sont telles qu'en un grand nombre de points de notre territoire, la force motrice à vapeur restera longtemps encore meilleur marché que l'énergie hydro-électrique, par conséquent, tout le travail mécanique, actuellement dû à la combustion du charbon ne pourra sans doute jamais être remplacé par nos forces hydrauliques : la plupart des industries mécaniques ne peuvent se déplacer et la houille blanche ne pourra pas aller assez économiquement jusqu'à elles. Admettons donc que nos forces hydrauliques remplacent seulement la moitié — ce qui est déjà beaucoup — de notre outillage à vapeur et sur ses 30 milliards de chevaux-heure lui en fournissent 15. Il restera à la disposition de nos forges, fonderies, usines de produits chimiques, verreries et autres usines de même espèce : 60 — 15 = 45 milliards de chevaux-heure.

Ces usines, où le *four* alimenté par la houille est l'organe vital, vont se déplacer le jour où elles trouveront de l'énergie calorifique à meilleur marché et se transporter au pied des chutes, quand la science et le progrès économique leur procureront l'énergie hydro-électrique à meilleur compte que l'effet calorifique dû à l'emploi de la houille noire. Or, ces 45 milliards de chevaux-heures, correspondent-ils à ce que peut donner le charbon brûlé par elles ?

On sait que 1 cheval-heure correspond à :  $3.600 \times \frac{75}{425}$  calories.

La puissance qui nous occupe représente donc :

$$3.600 \times \frac{75}{425} \times 45 \times 10^9 = 28.588.000.000.000 \text{ calories.}$$

La combustion de 1 kilogramme de houille moyenne qualité donne 7.000 calories ; mais, étant donné le faible rendement des fours et appareils de chauffage en général, on peut admettre pour fixer les idées — et non pour faire un calcul rigoureux — que la fusion, cuisson ou réaction qui nécessite 10.000 calories dans l'un de ces appareils, exige la combustion de 10 kilogs de houille au moins. Le nombre de calories trouvé précédemment correspondrait à la combustion de :

$$\frac{28\ 588 \times 10^9}{10^3} = 28 \text{ à } 29 \text{ millions de tonnes de charbons.}$$

Mettons 25 millions pour tenir compte aussi du rendement des appareils électrothermiques. C'est plus de la moitié de ce que nous brûlons annuellement en France dans l'ensemble des machines et appareils de toutes nos industries ; mécanique, métallurgie, transports, chauffage, chimie, gaz, etc.

Il semblerait donc à peu près certain que nous avons assez de forces hydrauliques pour remplacer le charbon dans toutes les branches de nos industries que les progrès de la science mettront à même de pouvoir économiquement s'alimenter en houille blanche. Les conclusions du travail de M. DE LA BROUSSE concordent d'ailleurs parfaitement avec celles que M. le commandant AUBRAND a fait ressortir dans son étude sur la même question « La Houille blanche en France », parue dans les *Annales de Géographie*, n° de janvier 1904.

E.-F. COTE.

## ÉTUDE SUR LES BARRAGES EN MAÇONNERIE et Murs de Réservoirs (suite)

**Profil triangulaire.** — La méthode de M. Maurice Lévy, appliquée au triangle à parement amont vertical, donne :

$$\begin{aligned} P &= \left( K - \frac{1}{\text{tg}^2 \beta} \right) y & Q &= \left( \frac{2}{\text{tg}^2 \beta} - K \right) \frac{1}{\text{tg} \beta} \\ P' &= K - \frac{1}{\text{tg}^2 \beta} & Q' &= 0 \\ P'' &= 0 & Q'' &= 0 \end{aligned}$$

Il en résulte pour  $n$ ,  $t$  et  $n_1$ , les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} n &= \left( K - \frac{1}{\text{tg}^2 \beta} \right) y + \left( \frac{2}{\text{tg}^2 \beta} - K \right) \frac{x}{\text{tg} \beta} \\ t &= \frac{x}{\text{tg}^2 \beta} & n_1 &= y \end{aligned}$$

La condition de non soufflure au parement aval, ( $n_1 \geq 0$ ), est toujours satisfaite puisque  $n_1$ , est toujours égal à  $y$  quel que soit l'angle au sommet  $\beta$ .

La composante tangentielle  $t$  de la pression totale sur un élément horizontal, n'est pas autre chose que la composante de la poussée  $F$ , au point considéré d'abscisse  $x$ . Cette composante  $t$  croît proportionnellement à  $x$  : nulle

au parement amont, elle est maxima au parement aval et y a pour valeur :

$$t = \frac{e}{\text{tg}^2 \beta} = \frac{y}{\text{tg} \beta} = n' \text{ tg} \beta$$

Si l'on fait la somme des forces  $t$  réparties sur le joint on retrouve bien la poussée  $F$  :

$$\int_0^e \frac{x \, dx}{\text{tg}^2 \beta} = \frac{e^2}{2 \text{tg}^2 \beta} = \frac{y^2}{2} = F$$

Si l'on calcule le rapport  $\frac{t}{n}$ , qui n'est pas autre chose que la valeur de la tangente de l'angle que fait la composante normale  $n$  avec la pression totale exercée en un point d'un élément horizontal, on trouve que ce rapport, nul au parement amont, croît avec  $x$  et est précisément égal à  $\text{tg} \beta$  sur le parement aval, ce qui confirme que la pression totale au parement aval est bien parallèle à ce parement.

Si l'on applique le raisonnement de M. Bouvier, non plus à la résultante  $R$  des forces appliquées au mur au-dessus d'un joint, mais bien à la pression totale s'exerçant en chaque point, on voit que la méthode Bouvier, ainsi modifiée, conduit au même résultat que la méthode Lévy, puisque sur le parement aval on a  $\text{tg} \alpha = \text{tg} \beta$ .

La compression maxima  $A$  a pour expression :

$$A = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\left[ \left( K - 1 - \frac{1}{\text{tg}^2 \beta} \right) y + \left( \frac{2}{\text{tg}^2 \beta} - K \right) \frac{x}{\text{tg} \beta} \right]^2 + 4 \frac{x^2}{\text{tg}^4 \beta}} \right\}$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$A = \frac{\lambda + \theta x}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\lambda + \theta x)^2 + \gamma^2 x^2} \quad (38)$$

Si  $\theta \geq 0$ , la fonction  $A$  est croissante et est par suite maxima sur le parement aval. Ceci a lieu lorsque  $\text{tg}^2 \beta \leq \frac{2}{K}$ . Or, avec les maçonneries, on a toujours  $K > \frac{1}{K-1}$ , et comme l'on cherche toujours à réaliser le minimum de maçonneries,  $\text{tg}^2 \beta$  sera toujours dans le voisinage de  $\frac{1}{K-1}$  et  $A$  sera pratiquement toujours maximum au parement aval.

Si l'on avait  $\theta < 0$ , ce qui serait le cas de profils exagérés,  $A$  serait d'abord décroissant, pour croître ensuite, et, si le profil était tout à fait exagéré, il pourrait arriver que la fonction  $A$  fut continuellement décroissante, le maximum de  $A$  se trouvant alors sur le parement amont. Lorsque  $\text{tg}^2 \beta$  devient très grand, la valeur maxima de  $A_0$  tend vers la valeur  $Ky$ , qui est précisément la valeur de la pression à vide sur le parement amont. Ce résultat pouvait se prévoir *a priori*, car alors la poussée devient négligeable devant le poids de la maçonnerie.

Au fur et à mesure que le réservoir se vide, le profil devient de plus en plus exagéré et la valeur de  $A$  cesse d'être maxima au parement aval pour le devenir sur le parement amont.

Sur le parement amont,  $x = 0$  et  $t = 0$  de sorte que l'on a, tant que  $n' \geq y$ , c'est-à-dire  $\lambda' \geq 0$ .

$$A_0 = n_0 = n' = \left( K - \frac{1}{\text{tg}^2 \beta} \right) y$$

Lorsque  $\lambda' < 0$ , le radical tend vers  $\lambda'$ , compté en valeur