

## Réflexions sur les études préliminaires à l'aménagement des chutes d'eau

(Suite).

### II. — Avec quelle précision peut-on connaître la puissance des chutes d'eau ?

#### 8° Précision du nivellement.

Le second facteur de la puissance d'une chute est, ainsi que le montre l'équation  $QH = K^2$ , la hauteur de la chute de l'eau débitée par le cours d'eau. Sa connaissance résulte de l'appréciation de la différence des niveaux entre la prise d'eau et l'emplacement de l'usine. Suivant les terrains, et suivant aussi les méthodes et les instruments employés, la précision de cette mesure sera plus ou moins grande.

Sans refaire ici la théorie du nivellement, voyons, comme nous l'avons vu pour le jaugeage, ce qu'il nous est permis d'espérer dans cet ordre d'idées.

Tout d'abord, deux modes de nivellement sont en présence entre lesquels il faut choisir : le nivellement par les visées horizontales et le nivellement par les pentes.

Le premier est essentiellement celui des petites différences de niveau en terrain peu accidenté, parce que, dès que les mouvements de terrain deviennent quelque peu accusés, l'emploi de cette méthode exigerait une telle multiplicité de stations que de très nombreuses chances d'accumuler des erreurs accidentelles s'en suivraient et qu'on perdrait ainsi tout le bénéfice de la précision des instruments.

Les principaux instruments-types propres à ce procédé sont le niveau d'eau, qui permet une approximation de  $\frac{1}{100}$  sur la dénivelée de deux points distants de 30 mètres entre eux, et le niveau à lunette, qui donne avec une approximation de  $\frac{1}{50000}$  à  $\frac{1}{100000}$  la dénivelée de deux points séparés par une étendue de 200 mètres.

Le second mode de nivellement, celui qui est dit : *par les pentes*, est le seul qui soit pratique en pays, même moyennement accidenté, dès que l'itinéraire à suivre le long du cours d'eau est quelque peu étendu. C'est le seul qui soit applicable en montagne, en dehors des parties presque horizontales.

Les instruments-types à l'aide desquels il se pratique sont :

La boussole à éclimètre et le tachéomètre qui permettent de contenir l'erreur relative entre  $\frac{1}{6000}$  et  $\frac{1}{10000}$ .

La règle à éclimètre du colonel Goulier (1) qui permet une approximation de  $\frac{1}{6000}$ .

L'alidade nivelatrice (à rallonge) (1) du même officier ; elle permet une approximation de  $\frac{1}{2500}$ .

(1) Consulter, dans l'Annuaire du Club alpin français de 1888, la notice de M. Vallot sur l'emploi de cet instrument et, dans l'Annuaire du même Club, pour l'année 1882, une note du colonel Goulier au sujet de la topographie des alpinistes.

Ces deux derniers instruments doivent être employés sur la planchette déclinée.

Ces approximations ne sont acquises que lorsqu'on combine l'emploi de ces instruments avec celui des stadias, ou qu'on exécute les chaînages avec le décamètre à ruban d'acier en s'entourant des précautions convenables.

Remarquons que, comme toujours, la répétition des opérations permet de réduire l'importance des erreurs accidentelles inévitables. Cette loi est générale, son application est relativement aisée dans les opérations topographiques où il n'y a pas de manœuvres matérielles longues ou difficiles.

Si nous rapprochons ces valeurs des erreurs topographiques de celles que nous avons trouvées comme s'appliquant aux jaugeages (voir numéro 7, page 188, valeurs de  $\frac{\Delta q}{q}$ ) des débits spécifiques, nous vérifions avec précision le bien fondé de l'opinion déjà émise que la précision du nivellement est, en pratique, plus grande que celle du jaugeage.

Un mot sur les propriétés propres des instruments de nivellement peut permettre de faire un choix judicieux en vue d'une application déterminée.

L'alidade nivelatrice et la règle à éclimètre s'emploient, avons-nous dit, sur la planchette déclinée. Or, celle-ci est, par excellence, l'instrument des reconnaissances, à cause de la rapidité et de la clarté qu'elle permet de mettre dans les opérations (1).

On se servira donc de l'un ou de l'autre de ces instruments de nivellement, sinon même parfois des deux au courant d'un même travail. Ils conviennent parfaitement pour les études d'ensemble et permettent déjà de traiter bien des détails.

Ensuite, mais seulement pour le dernier détail, on emploiera la boussole à éclimètre ou le tachéomètre. Ces deux instruments sont susceptibles de jouer au besoin le rôle du niveau à lunette, moyennant certaines précautions très simples de la part du constructeur.

Un exemple particulier éclairera les déductions qu'on peut tirer de ces faits.

Prenons le cas d'une chute d'un débit spécifique de 100 litres. D'après les formules (3) et (11) nous avons :

$$\frac{\Delta(k^2)}{k^2} = 0,02 + \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta H}{H} \quad (20)$$

et, dans le cas actuel :

$$\frac{\Delta(k^2)}{k^2} = 0,02 + 0,02745 + \frac{\Delta H}{H} = 0,04745 + \frac{\Delta H}{H}$$

Les diverses valeurs de  $\frac{\Delta H}{H}$  sont, d'après ce que nous venons de voir :

(1) Ainsi qu'on le verra par la lecture des notices du C. A. F. conseillée plus haut, on peut, avec ces instruments, *opérer seul* et rapporter, pour peu qu'on se soit donné la peine de s'exercer judicieusement, *des résultats excellents*, ainsi que le montre ce que nous venons de dire.

Si, pour une étude préalable à *grands traits*, on voulait un procédé pratique, il suffirait, comme l'indique le colonel Goulier dans la notice précitée, d'employer le carton à bretelles, le double pas et la boussole breloquée. Avec ce procédé on peut conclure la position relative de deux points distants de 2000 mètres et reliés entre eux par 20 stations de 100 mètres de portée chacune, à moins de 50 mètres en plan et à moins de 16 mètres en relief.

Avec tachéomètre ou éclimètre de 0,0001 à 0,000166.  
 Avec la règle à éclimètre..... 0,000166.  
 Avec l'alidade nivelatrice..... 0,0004.

Il en résulte que, suivant l'instrument employé, l'erreur relative commise sur la puissance apparaîtra à 0,04755 ou 0,04785.

La différence entre la plus grande et la plus petite de ces valeurs est  $\frac{3}{10^4}$ . Elle mesure l'importance relative qu'il y a à prendre tel ou tel instrument pour apprécier la hauteur de la chute.

Entre autres renseignements nous en retirons que, dans l'espèce, l'exécution du nivellement avec les instruments les plus simples ne peut faire tort de 3 chevaux sur 10000 : c'est une perspective rassurante (1). « L'étude de **H** ne doit donner aucun tracas » (Voir Aristide Bergès, brochure la *Houille Blanche*, page 8).

On voit donc qu'on peut pousser assez loin, avec des instruments simples, peu coûteux, d'un maniement rapide, facile, presque instinctif, l'approximation de la mesure. *En soi*, la simplification du travail dans ce sens est donc avantageuse (2).

Mais on doit aussi remarquer que, souvent, des circonstances connexes obligeront à ne pas se contenter d'approximations qui seraient suffisantes pour le problème mécanique. Les questions de relèvement de plan d'eau, d'écoulement, de tracé des tunnels, d'insertion des bassins de décantation, de chambres de machines, etc., etc., motiveront des nivellements très précis, là où la simple appréciation mécanique de la chute aurait été contentée à moins de frais.

Il ne faudrait pas non plus exagérer la simplification des instruments et des méthodes sans discernement, on aurait tôt fait de compromettre les résultats. Ainsi, nous voyons que le niveau d'eau, malgré son approximation de  $\frac{1}{100}$  est un instrument à ne jamais employer dans un tel travail, à cause du peu de longueur (30 m.) de ses portées extrêmes et des accumulations d'erreurs qu'il ferait réaliser comme à plaisir.

*A fortiori* faut-il se garder, même dans les reconnaissances préalables, de l'emploi du baromètre anéroïde de poche dit : *altimètre* et qui, soi-disant, donne les différences d'altitudes des points où on le porte successivement.

Cet instrument est affecté d'une hystérésis spéciale (paresse, retard de marche) qui peut occasionner, *quand on s'en sert sans précaution*, des erreurs considérables. Pour les petites altitudes, elles peuvent atteindre une valeur égale à celle qu'on veut évaluer. Alors qu'on aura cru s'élever de

(1) Toutes choses égales d'ailleurs.

La considération du débit spécifique nous permet de faire abstraction, dans notre analyse, de l'influence des erreurs possibles sur la mesure de la largeur du cours d'eau et de considérer chacun des facteurs principaux de la puissance : débit et hauteur de chute, en ce qu'ils ont d'essentiel et de véritablement caractéristique.

(2) On se donnera aussi un précieux contrôle en rattachant, toutes les fois qu'on le pourra, ses opérations au nivellement général de la France, dont les cotes inscrites sur des objets de remarque vont en se multipliant journellement.

15 mètres, d'après le dire de l'appareil, on en aura escaladé 30, et si, ce faisant, on s'était proposé de stationner au niveau d'un point connu, on se serait mis à son insu, à 15 m. au-dessus de lui, trompé par les assurances mensongères de l'instrument (1).

Pour des différences de niveau plus considérables, cette erreur, à peu près constante, de 15 mètres, se produit toujours et a naturellement d'autant moins d'influence relative que la différence des altitudes franchies est plus grande.

Toutefois, surtout si on monte relativement vite, cette erreur de 15 mètres tend aussi à croître avec l'altitude.

Il faut donc opérer avec une sage lenteur et laisser à son instrument le temps (parfois fort long) de *repandre haleine* avant de lui demander un avis.

En observant religieusement cette précaution et quelques autres encore, parmi lesquelles se trouve la consultation, ou l'enregistrement automatique des indications, aux stations de départ et d'arrivée d'un (ou deux) baromètre (et d'un thermomètre) témoin aussi identique que possible au baromètre voyageur, etc., on a encore chance de commettre des erreurs. Leurs valeurs sont exprimables par la formule :

$$\Delta H = 3^m \pm \frac{5}{100} H \quad (21)$$

Si, par exemple, **H** = 300 m, altitude dont on s'élève couramment en une heure, sans se presser, et qu'on rencontre fréquemment dans la montagne sauvage pour un déplacement horizontal de 2000 mètres (cela fait une pente moyenne de 16 0/0) on a :

$$\Delta H = \left\{ \begin{array}{l} + 18^m \\ \text{à} \\ - 12^m \end{array} \right\} \text{incertitude totale } 30^m.$$

Nous avons vu, dans un renvoi précédent, que la *reconnaissance rudimentaire*, exécutée avec le carton à bretelles, la boussole breloque, le clisimètre improvisé, le pas étalonné et un peu de soin, donnait avec un manuel opératoire infiniment plus simple et aussi plus de promptitude en somme, des indications plus précises.

N'insistons pas. Aussi bien ce n'est pas ici le lieu d'exposer les précautions auxquelles il faut s'astreindre pour employer convenablement l'altimètre (2) : elles sont longues, minutieuses, souvent irréalisables et on n'est récompensé de ses soins que par une précision par trop grossière. Même avec les perfectionnements proposés par M. Labatut pour la construction des anéroïdes, la méthode conservera encore

(1) Consulter, au sujet de ces instruments :

Manuel de l'explorateur de MM. Blim et Rollet de l'Isle, chez Gauthier Villars, 1899, pages 29 et suiv., nos 23 à 28.

Annuaire du C. A. F., 1879 ; Notice du colonel Goulier.

Annuaire de la S. T. D., n° 24 de 1898 ; Notice de M. Labatut de la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.

(2) Le lecteur judicieux ne manquera pas de conclure qu'il est *vain* de prétendre corriger les cotes d'altitude de la carte d'état-major, par la simple lecture d'un baromètre qu'on porte avec soi. Bien des touristes sont enclins à cette illusion. Espérons les convertir ! Même en observant la séquelle des précautions voulues, il serait bien chanceux de contrôler des opérations géométriques avec le baromètre (même à mercure, type Fortin, dénué d'hystérésis), mais, sans précaution, cela présente autant de base scientifique que la chiromancie !

bon nombre de complications rédhibitoires. Par amour de la simplification il ne faut pas se jeter dans d'inextricables complications.

### 9° Approximation avec laquelle la puissance de la chute peut être évaluée

Admettons donc, pour fixer les idées, que le nivellement ait été fait avec la planchette déclinée et l'alidade nivelatrice à rallonge. Dans ce cas  $\frac{\Delta H}{H} = 0,0004$ .

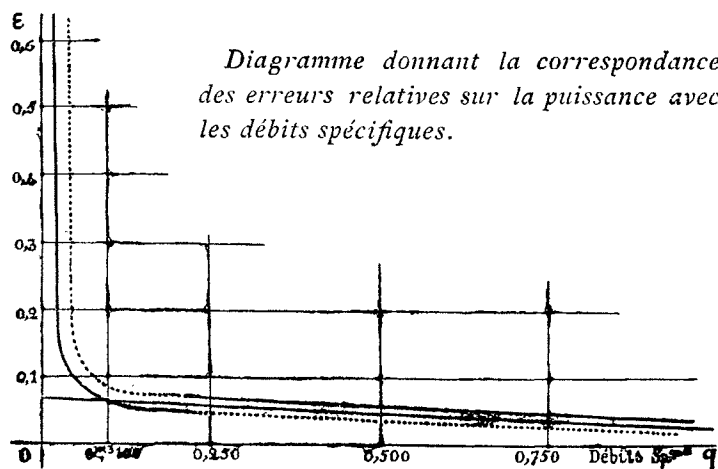
Nous avons alors, d'après la formule (20) :

$$\frac{\Delta(K^2)}{K^2} = 0,02 + 0,0004 + \frac{\Delta q}{q} \quad (22)$$

et nous dresserons, en nous reportant aux valeurs déjà établies pour  $\frac{\Delta q}{q}$  en raison de la précision de nos jaugeages, la liste suivante :

q	$\frac{\Delta(K^2)}{K^2} = \epsilon$
0 <sup>m3</sup> 001	0,64637
0 <sup>m3</sup> 010	0,14637
0 <sup>m3</sup> 100	0,04785
0 <sup>m3</sup> 250	0,04999
0 <sup>m3</sup> 500	0,03939
0 <sup>m3</sup> 750	0,03513

Traduisons ces résultats sur un diagramme dont les abscisses soient les débits spécifiques et les ordonnées les erreurs  $\epsilon$  à craindre sur la puissance.



La forme générale de la courbe représentative de la variation de  $\epsilon$  et de  $q$  est celle d'une hyperbole équilatère ayant les axes coordonnés pour asymptotes.

Il y a, toutefois, lieu de remarquer qu'un jarret existe dans la courbe vers l'abscisse 0<sup>m3</sup>250. Cela tient à ce que, dans notre évaluation de  $\frac{\Delta q}{q}$  nous avons admis que, dès que le débit atteint cette valeur, on ne peut plus facilement observer le  $\frac{1}{4}$  de centimètre sur un tube ou sur une échelle graduée. Si on pouvait évaluer cette fraction de centimètre, la valeur de  $\epsilon$  serait 0,04345 ; elle diffère, en somme, assez peu de celle

que nous avons trouvée et le jarret de la courbe est peu marqué.

Ce diagramme nous montre aussi qu'on pourrait, sans erreur appréciable, remplacer, à partir de l'abscisse 0<sup>m3</sup>100 la branche de la courbe  $\epsilon = f(q)$ , qui est asymptote à l'axe des abscisses par, une droite dont l'équation :

$$\epsilon = 0,06248 - 0,0195 \cdot q \quad (23)$$

est très facile à établir en appliquant les propriétés des lignes proportionnelles aux abscisses 0<sup>m3</sup>100 et 0<sup>m3</sup>750 et aux  $\epsilon$  correspondants.

En gros, entre ces limites, l'erreur relative moyenne que l'on peut craindre sur la puissance apparaît à 4,3 %. L'erreur à craindre est donc moyennement moindre que 1/20 de la puissance de la chute, excepté pour les chutes à petit débit spécifique où elle peut atteindre des valeurs considérables, si on ne s'entoure pas des précautions les plus minutieuses (1).

Nous voyons que, dès que le débit spécifique descend en dessous de 100 litres, la courbe des  $\epsilon$  s'écarte très rapidement de la droite (23). Cela montre clairement aux ingénieurs que leur devoir est de mettre en œuvre tous les procédés qu'ils pourront pour ramener la courbe des  $\epsilon$  à se rapprocher le plus possible de la droite représentative des erreurs. En parlant du jaugeage des petits débits, nous avons donné quelques indications qu'il peut être bon de méditer pour sortir de cet embarras.

Il en résulte aussi que, plus les chutes seront nourries, moins chère aussi en sera l'étude et que celle des chutes à débits maigres sera toujours laborieuse, délicate et onéreuse (2).

C'est un point qui nous semble devoir fixer l'attention au moment où l'on pense sérieusement, dans notre pays, à mettre en valeur nos richesses hydrauliques.

### 10° Conclusions

Dans son ensemble, la méthode à suivre pour l'étude des chutes, ne diffère pas de celle qui est de mise pour tous les grands travaux industriels.

On prend d'abord une vue d'ensemble de l'organisation projetée et les considérations d'ordre économique et commercial sont alors celles qui priment les autres.

Cette vue est ensuite analysée au point de vue technique et, après des reconnaissances plus ou moins étendues, plus ou moins répétées, plus ou moins détaillées, on procède à la rédaction d'un avant-projet qui doit renseigner sur

(1) Abstraction faite de l'influence des erreurs possibles sur l'évaluation de la largeur du cours d'eau. Cette simplification est des plus légitimes et, s'il restait quelque doute à cet égard il suffirait de remarquer que l'erreur relative sur la largeur pouvant être  $\frac{25}{10^5}$  (§ 3, page 187) et l'erreur relative totale estimée sans tenir compte de la largeur étant  $\frac{4309}{10^5}$  le rapport des deux est  $\frac{25}{4309} = \frac{1}{172}$ . L'influence de la largeur est donc évidemment négligeable. Ce rapprochement justifie notre assertion.

(2) On sait, d'autre part, que le prix d'installation des chutes est relativement d'autant plus cher qu'elles ont un moindre débit. La conclusion va de soi, c'est aux gros débits qu'on tendra par la force des choses et tant mieux s'ils s'associent à une plus grande hauteur.

l'ensemble des agencements nécessaires et sur leur coût possible.

Les industriels avisés ne se hâtent pas dans cette partie de l'œuvre. Elle est capitale. C'est là qu'il y a place pour leur *experimentum crucis*, après lequel la décision de faire ou de ne pas faire doit devenir irrémissible. Il sera donc sage de ne marchander aux ingénieurs chargés de cette importante besogne, ni le temps, ni les moyens. Il vaut mieux dépenser quelques billets de mille de plus en études préalables que d'aventurer quelques centaines de mille francs de plus dans les frais de premier établissement ou d'exploitation.

Analysé à son tour l'avant-projet, qui a souvent mis en avant plusieurs solutions, aboutit au choix précis d'une organisation en vue de laquelle se poursuivent les reconnaissances du dernier détail et la rédaction des projets d'exécution.

Au courant d'une telle étude, l'occasion d'appliquer les remarques que nous venons de faire se présente fréquemment, pour ne pas dire à chaque instant, puisque la nécessité de rester maître de la précision de son travail domine perpétuellement l'ingénieur. Le lecteur s'en rendra compte s'il veut bien reprendre, dans cet ordre d'idées, les exemples concrets (projets, installations, etc.), connus de lui. Il verra avec satisfaction son jugement se préciser et se motiver à leur endroit d'une façon intéressante. Nous n'avons pas cru que l'examen critique d'un tel exemple pût utilement trouver place ici. Nous préférons laisser chacun diriger à sa guise l'application de nos remarques. Les bons guides, au surplus, ne manquent pas pour l'ordre à mettre dans les investigations; qu'il nous suffise, à ce propos, de rappeler l'exposé si clair que M. Aristide Bergès a fait dans sa brochure *La Houille blanche*, des idées qui l'ont dirigé dans l'aménagement des torrents de Lancey et de Vorz.

Qu'on nous permette cependant encore une remarque. Les reconnaissances ne doivent pas être bornées uniquement aux points de vue étroit du jaugeage et du nivellement: il va de soi que les possibilités économiques de la région, son réseau de communication, etc., doivent être l'objet d'investigations minutieuses destinées à compléter, avec la plus grande précision, les renseignements donnés par la carte d'état-major et les statistiques officielles. Il ne suffira donc pas, si on veut bien y réfléchir, de lever, avec avarice de travail et d'argent, l'étroite bande de terrain sur laquelle serpenteront probablement les conduites d'eau: il y faudra joindre quelque chose de plus.

Il ne s'agit pas, évidemment, de refaire la carte du pays! Qu'on ne nous prête pas une telle absurdité! Mais nous savons, par expérience certaine, qu'on n'a jamais assez de renseignements sur le terrain pour les études et qu'il est *plus court et moins cher* de les recueillir abondants dans les reconnaissances du début, que d'avoir à y revenir ensuite.

Parmi ces renseignements, il en est d'un ordre tout particulier sans lesquels l'étude topographique est incomplète et peut, malgré une exactitude géométrique parfaite, conduire à de graves mécomptes. Nous voulons parler de la constitution géologique du sol. Son influence est tellement évidente, qu'on a scrupule et presque mauvaise grâce à y insister. Il est bien évident, par exemple, qu'un tunnel à

eau, percé dans le gypse, n'aura aucune solidité et, qu'au contraire, celui qui traversera des calcaires compacts pourra donner toutes satisfactions. Il faut bien reconnaître cependant que, trop souvent, on a négligé de s'enquérir à ce sujet; il y en a des exemples et, à ce propos, qu'il nous soit permis de renvoyer le lecteur à la note de la page 97 de la *Géologie pratique* de M. de Launay, professeur à l'École supérieure des Mines (1) (tout le chapitre... tout le livre est à lire du reste!), il sera édifié. La prospérité ou la ruine d'une affaire peuvent dépendre d'un pareil détail, et qu'on ne se récrie pas que l'oubli en pareil cas est impossible, nous le répétons, il y a des exemples du contraire trop nombreux et en tous pays.

Après ces réflexions, la mise en valeur d'une chute (et, à *fortiori*, d'un ensemble de chutes) apparaît comme une œuvre complexe qui exige beaucoup de science et beaucoup d'esprit critique de la part de ceux qui s'en chargent. Il ne faut pas leur mesurer le temps et les moyens et ils ne doivent pas épargner leurs peines. Il ne faudrait pas s'imaginer que, parce qu'on voit l'eau couler tous les jours, l'œuvre de son captage s'improvise et se règle d'un coup d'œil, fût-il celui de l'aigle!

Nous tenions à mettre cette circonstance à l'actif des intermédiaires entre les propriétaires du sol et les industriels dont parle M. R. Tavernier (2) et auxquels il semble ne reconnaître que la posture d'hommes d'affaires. Leur compétence ne nous semble pas aussi limitée; sans doute, pour les cas les plus simples et qui se sont offerts les premiers au début de l'essor de la mise en valeur des forces hydrauliques, le côté affaires a pu, avec juste raison, prédominer seul. Mais il est à prévoir qu'il n'en ira plus tout à fait de même à l'avenir, alors que la concurrence deviendra plus âpre. Les bénéficiaires iront aux mieux avertis et à ceux-là seuls. Son travail technique devra procurer à l'intermédiaire honneur et juste rémunération, à un titre au moins égal à celui que lui procureront ses soins contentieux.

Commandant AUDEBRAND,

Ingénieur.

Ancien élève de l'École Polytechnique,

**Errata.** — Deux erreurs, que le lecteur aura sans doute rectifiées déjà de lui-même, se sont glissées dans la composition du dernier article de M. le Commandant Audebrand (RÉFLEXIONS SUR LES ÉTUDES, etc...). Nous en signalons la rectification pour le bon ordre. — Toutes les deux sont à la page 191.

**Colonne 1**, ligne 6, en remontant :

au lieu de  $\Delta c = \Delta b - \Delta a$

lire  $\Delta c = \Delta b = \Delta a$

**Colonne 2**, dans la figure, l'axe de rotation du tambour à inscription doit être vertical et non horizontal.

(1) L. DE LAUNAY. — *Géologie pratique*, chez Armand-Colin, 1901.

(2) « Les intermédiaires... (et il ne faut pas méconnaître leur rôle très utile...) se hâtaient de céder, moyennant un bénéfice bien mérité pour leurs efforts et leur initiative..., etc. », page 106 de : *Les Forces hydrauliques des Alpes*, par R. Tavernier, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Dunod 1900.