

Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 49 (1913)
Heft: 178

Artikel: Sur une particularité de l'écoulement du Rhin alpin
Autor: Horwitz, L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-269582>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SUR UNE PARTICULARITÉ DE L'ÉCOULEMENT DU RHIN ALPIN

(4 Tableaux, 1 Figure)

par

L. HORWITZ.

Dans un travail dont le résumé a paru récemment¹, j'ai essayé de démontrer par des chiffres :

a) Que les dimensions de la glaciation des bassins secondaires dans le bassin du Rhin alpin dépendent (à côté de leur altitude moyenne et de leur configuration) en première ligne de la quantité de précipitations que reçoivent ces bassins et de leur température moyenne.

b) Que le débit moyen, plus ou moins grand, des cours d'eau de ces bassins secondaires dépend de la quantité de précipitations qui y tombent.

En parlant de cette dernière relation, j'ai mentionné une particularité probable de l'écoulement du Rhin alpin, particularité que j'estime suffisamment intéressante pour la discuter plus en détail dans la note qui suit.

I

J'ai utilisé comme source de première importance un grand et beau mémoire sur l'écoulement du Rhin alpin aux stations limnimétriques principales, qui a été imprimé dans une des dernières publications du Bureau hydromé-

¹ L. Horwitz. *Quelques rapprochements entre le climat, la glaciation et l'écoulement dans le bassin du Rhin alpin*, dans ce Bulletin, vol. XLVIII, juin 1912. Procès-verbaux du 10 janvier 1912, p. II, Communications scientifiques.

trique fédéral (maintenant l'Hydrographie nationale suisse)¹.

Les cinq stations limnimétriques sont les suivantes : 1° Rhin antérieur à Ilanz ; 2° Glenner à Ilanz ; 3° Rhin postérieur à Rothenbrunnen ; 4° Rhin à Felsberg ; 5° Rhin à Mastrils (pont de Tardis). Les données publiées nous fournissent directement le débit des bassins suivants (ev. nous l'obtenons par une simple soustraction) :

	Abréviation dans cette note	Surface en km ²
1. Rhin antérieur jusqu'à Ilanz	AR	776
2. Glenner jusqu'à Ilanz	Gl	382
3. Rhin postérieur jusqu'à Rothen- brunnen	PR	1663
4. Rhin jusqu'à Felsberg	FR	3249
5. Rhin jusqu'à Mastrils	MR	4262
6. Région entre les 3 premières stations et la quatrième	F	428
7. Région entre les 3 premières stations et la cinquième	M	1441
8. Région entre la quatrième et cinquième station	FM	1013
9. Les trois premiers bassins (AR, Gl, PR) réunis	S	2821

Pour ce qui concerne les régions AR, Gl, PR et MR, nous connaissons leur débit pendant douze années (1894-1905). Quant au bassin FR, nous ne disposons malheureusement que d'une période de 6 ans (1900-1905)².

En nous servant du Tableau I, étudions d'abord les débits moyens annuels par seconde pour la période de 6 ans.

¹ *Régime des eaux en Suisse*. — Bassin du Rhin depuis ses sources jusqu'à l'embouchure de la Tamina. IV^{me} partie. Les débits minima et les forces hydrauliques minima des cours d'eau ainsi que leurs divers débits aux stations limnimétriques principales. Exécuté et publié par le Bureau hydrométrique fédéral, 1907. IV^{me} partie : Etude sur les débits aux cinq stations limnimétriques principales du bassin du Rhin dans le canton des Grisons.

² L. c. Planches I^d ; II^d ; III^d ; IV^e ; V^d.

TABLEAU I

**Débits moyens annuels par seconde des bassins secondaires
de la région rhénane alpine.**

Années.	1900	1901	1902	1903	1904	1905	Moyenne.
AR . .	33.7	38.3	36.2	33.3	28.6	31.9	33.7 m ³ .
Gl. . .	10.5	11.4	12.8	14.8	17.4	19.1	14.3 ,
PR . .	50.7	59.7	47.6	51.9	56.2	64.5	55.1 ,
FR . .	103.7	113.8	98.7	103.9	95.5	98.0	102.3 ,
S . . .	94.9	109.4	96.6	100.0	102.2	115.5	103.1 ,
F . . .	+8.8	+4.4	+2.1	+3.9	-6.7	-17.5	-0.8 ,
M . . .	61.2	72.2	65.5	49.4	22.4	19.6	48.1 ,
FM . .	52.4	67.8	63.4	45.5	29.1	37.1	48.8 ,

La première chose qui frappe, en examinant ce tableau, c'est l'étrange série de chiffres qui concerne la région F : son débit annuel moyen est négatif — 0,8 m³. En d'autres termes, *une surface de 428 km² non seulement ne fournit pas d'eau, mais en absorbe encore un peu*. Cependant cette région possède, à côté d'eaux courantes moins importantes, une rivière assez considérable, la Rabiusa ; d'autre part, le bassin Gl dont la surface est sensiblement plus petite que celle du bassin F (382 km²), fournit à la rivière maîtresse en moyenne 14,3 m³ d'eau. Nous pouvons donc conclure avec une grande probabilité que, dans la région F, a lieu une perte d'eau d'environ 15 m³ par sec. (14.3 + 0.8). (Si nous admettons que la quantité des précipitations qui tombe sur les régions F et Gl est à peu près la même, l'évaporation un peu plus grande de la région F, dont l'altitude moyenne est plus petite que celle de la région Gl, sera compensée par la surface plus grande de la première).

D'où vient donc cette perte énorme de 15 m³ par sec. en moyenne annuelle ? La première supposition à envisager est la suivante. La perte ne serait qu'apparente et elle

résulterait des erreurs, incluses dans la détermination des débits et spécialement dans le levé des profils en travers. En effet, « il faut compter avec cette circonstance fâcheuse que le profil en travers... reste très rarement pendant longtemps dans le même état » (l. c., Avant-propos, p. VII)¹. Une revision des profils en travers, fréquente, par exemple après chaque période des hautes eaux, paraît donc indispensable.

Il s'ensuit que dans notre cas nous sommes obligés d'envisager la possibilité de changements des profils en travers aux stations AR, Gl, PR et FR du Rhin. Et en effet ces changements ont eu lieu ; nous le savons, grâce aux levés soigneusement exécutés.

Quant aux stations AR, Gl et PR, leurs profils ont été contrôlés pendant la période de 12 ans (94-905) dans les années suivantes² : au printemps 94 (les 3 stations) ; en automne 97 (les stations AR et Gl) ; au printemps 97 (station PR) ; au printemps 99 (les 3 stations) ; en automne 05 (les 3 stations). Il est facile de comprendre que le fond subit ordinairement des modifications pendant une crue, donc, dans notre cas, en général en été. Il en résulte qu'un profil en travers levé en automne ou au printemps n'est strictement valable que pour le temps entre l'été précédent et le suivant.

Notre période commence en 1894 ; donc le premier levé n'est utilisable que pour le printemps de cette année. Par contre, les levés exécutés en 97, 99 et 1905 déterminent les profils pour les années 97 (96 pour la station PR), 98 et 1905.

¹ V. aussi *Le développement de l'hydrométrie en Suisse*. Elaboré et publié par le Bureau hydrométrique fédéral sur l'ordre du département fédéral de l'intérieur. Berne, 1909. P. 74. Débit des cours d'eau aux principales stations limnimétriques.

² V. *Le régime des eaux en Suisse*, etc., les planches Ia ; Ib ; IIa ; IIb ; IIIa ; IIIb. Nous prenons en considération surtout les profils de limnimètre (désignés comme profils A).

Les changements de hauteur du fond, constatés par les levés, ont été représentés dans les diagrammes et les changements supposés, pendant les 9 ans qui sont restés sans contrôle, ont été établis par interpolation. Pour notre but, cette méthode n'est cependant pas suffisante, et nous sommes obligés d'envisager la possibilité de l'existence, pendant ces 9 ans, de changements différents de ceux qui résultent de l'interpolation.

Pour expliquer la perte signalée de 15 m^3 , nous pouvons par conséquent admettre que pendant la période 900-905, sur les 3 stations AR, GI et PR, sur deux de ces stations ou enfin sur une d'elles avait lieu un *exhaussement* du fond, par rapport aux niveaux interpolés. Cet exhaussement du fond entraînerait un *gain* apparent du débit en amont de la station F. A son tour, le débit, à cette dernière station, produirait, après la soustraction du débit apparemment grossi de la région S, celui de la région F avec la perte signalée.

L'écoulement pendant l'année 1905 est déterminé en grande partie, grâce au levé exécuté en automne de cette même année. Nous sommes donc obligés de placer l'exhaussement du fond, admis par nous, dans les 5 ans, 900-904. L'exhaussement devrait être si considérable qu'il en résulterait, sur une moyenne de 6 ans, un gain apparent de 15 m^3 au moins par année.

II

Un gain apparent si considérable ne tarderait pas à modifier d'une manière sensible le débit pendant la période 900-905 par rapport au débit des mêmes stations pendant d'autres périodes. A ce point de vue, il est donc intéressant de comparer les deux périodes dont nous disposons (94-99 et 900-905).

En poursuivant ce but, nous avons réuni dans le Tableau II : 1° en % de la moyenne, les débits et les quantités de

précipitations (moyennes des données pour 29 stations de la région entière du Rhin alpin), 2^o les écarts de la moyenne de la température annuelle et estivale, tout cela pour la période entière de 1894-1905. Cette période, quant à la quantité des précipitations, était un peu plus sèche que celle de 1864-1903¹. Pendant cette période de quarante ans, la quantité moyenne des précipitations pour les 29 stations rhénanes était de 1170 mm., tandis que pour la période de 1894-1905, elle n'était que de 1135 mm. (Nous obtenons à peu près la même différence en comparant les moyennes des 5 stations qui possèdent de longues séries sans lacunes : Platta, Bernardin, Splügen, Davos, Reichenau.)

En comparant donc les deux périodes de 6 ans, nous constatons tout d'abord, d'après une moyenne prise sur les 29 stations, que la période 94-99 était un peu plus sèche que la suivante, 900-905 ; si la quantité totale des précipitations pendant la période 1894-905 est représentée par le chiffre 12 000, 590,4 % sont tombés de 94-99 et 609,6 % de 900-905. Par contre, l'écoulement de la région entière MR pendant la période 94-99 était un peu plus grand (608,3 %) que celui de la période suivante (591,7 %).

La région S se comporte de la même manière : la première période y était plus sèche que la seconde ; en revanche, l'écoulement pendant la première était plus abondant que pendant la seconde. Les contrastes sont ici encore plus accentués que dans la région MR.

Par contre, le bassin M diffère des précédents ; nous discuterons cette anomalie apparente un peu plus bas. (Voir Tableau III A.)

Quant à la température, nous avons calculé les écarts de la température moyenne annuelle et estivale de onze stations de la région. Ensuite nous avons calculé les

¹ Maurer, Billwiller, Hess. *Das Klima der Schweiz*, 1909. Vol. I, p. 80.

TABLEAU II

Écarts de la température moyenne annuelle et estivale, précipitations (°/o) et débit (°/o) de la région alpine du Rhin.

Années	1894	1895	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902	1903	1904	1905	Variab.
Ecart annuel .	0.0	-0.3	-0.8	+0.4	+0.8	+0.5	+0.5	-0.6	-0.2	-0.2	+0.3	-0.6	-
Ecart estival .	+0.1	+0.8	-1.2	-0.1	+0.2	-0.2	+0.3	+0.3	-0.5	-0.8	+0.8	+0.4	-
AR.													
Précipitations .	81.1	78.9	136.9	99.7	113.9	81.5	103.4	109.7	101.2	111.1	76.0	106.6	13.8
Débit.	58.3	75.7	126.6	152.1	99.8	101.3	97.8	111.2	105.0	96.6	83.0	92.6	16.0
GL.													
Précipitations .	87.6	80.8	130.1	100.5	111.4	79.5	105.2	112.6	101.7	107.9	84.1	98.6	11.6
Débit.	76.1	71.9	145.4	168.0	72.7	76.1	71.9	78.2	87.8	101.5	119.4	131.0	27.5
PR.													
Précipitations .	87.0	81.1	124.4	86.2	113.1	78.3	100.5	120.3	102.7	109.7	88.0	108.7	13.1
Débit.	89.0	94.1	119.2	104.7	99.1	98.2	91.4	107.6	85.8	93.5	101.3	116.1	8.2
M.													
Précipitations .	95.6	90.6	123.2	100.9	101.3	91.3	96.6	107.9	102.8	98.7	87.6	103.5	6.5
Débit.	101.7	73.9	165.6	118.0	45.0	92.7	127.2	150.0	136.1	102.5	46.6	40.7	33.5
S.]													
Précipitations .	85.8	80.5	128.1	91.4	113.1	79.2	101.5	116.8	102.3	109.8	84.8	106.7	13.0
Débit.	77.1	85.0	125.3	129.1	95.7	96.1	90.8	104.6	92.4	95.7	97.8	110.4	11.6
MR.													
Précipitations .	90.4	84.9	126.0	96.5	108.6	84.0	99.5	111.9	100.8	104.6	86.3	106.5	9.7
Débit.	84.9	81.5	137.9	125.7	79.7	95.1	102.2	118.9	106.2	97.8	81.6	88.5	15.1

moyennes de ces écarts ; ces écarts moyens ont été considérés comme valables pour toute la région. Enfin, la variation des écarts étant sur les onze stations à peu près identique, ce fait nous a autorisé à considérer les moyennes des écarts des onze stations comme valables pour les bassins secondaires. C'est ainsi qu'ont été formées les colonnes du Tableau II, concernant la température.

Si nous comparons maintenant les écarts de la température pendant la première période avec ceux de la seconde, nous verrons que l'écart *annuel* de la première période était positif, celui de la seconde négatif ($+ 0,7^{\circ}$ et $- 0,7^{\circ}$) ; de même l'écart hivernal ($+ 1,85^{\circ}$ et $- 1,85^{\circ}$) ; par contre l'écart estival était négatif pendant la première période et positif pendant la seconde ($- 0,45^{\circ}$ et $+ 0,45^{\circ}$). En d'autres termes, pendant la première période, *l'année* et *l'hiver* moyens étaient plus chauds et *l'été* moyen plus froid qu'aux époques correspondantes de la seconde période¹. (Tableau III A.)

Dans le Tableau III (B, C et D), nous avons encore groupé : 1^o les écarts de la température annuelle, hivernale et estivale, les précipitations et le débit des bassins S,

¹ Il est peut-être à propos de signaler ici le fait curieux suivant : Nous avons vu plus haut que la période 1894-1905 était plus sèche que celle 1864-1903. Or cette dernière était aussi en moyenne un peu plus froide que la première. Cette constatation s'accorderait bien avec le recul constant des glaciers pendant la période 1894-1905, si nous ne connaissions pas le fait bizarre, que c'est l'hiver moyen qui était nettement plus chaud, tandis que l'été moyen, saison rendue, avec raison semble-t-il, responsable des changements des glaciers, était un peu plus froid que pendant la période normale 1864-1900 (37 ans). Voici ces différences entre les deux périodes pour les stations suivantes :

	Année	Été	Hiver
Altstätten	+ 0.1	- 0.1	+ 0.3
Bernardin	+ 0.2	- 0.1	+ 0.5
Julier	+ 0.1	- 0.3	+ 0.5
Platta	+ 0.1	0.0	+ 0.3
Reichenau	0.0	- 0.25	+ 0.25
Sargans	+ 0.05	0.0	+ 0.1
Zurich	+ 0.2	- 0.2	+ 0.5
Moyenne	+ 0.11	- 0.14	+ 0.35

TABLEAU III

Ecart de la température annuelle, hivernale et estivale, précipitations (°/°) et débit (°/°) de la région alpine du Rhin.									
A			B		C		D		
Période 1894-1899 1	Période 1900-1905 2	Années chaudes (6) 1	Années froides (6) 2	Années avec été chaud (7) 1	Années avec été froid (5) 2	Années avec hiver ch. (6) 1	Années avec hiver fr. (6) 2		
Ecart annuel . .	+ 0.7°	+ 2.6°	- 2.6°	+ 0.2°	- 0.2°	+ 1.9°	- 1.9°		
Ecart hivernal . .	+ 1.85°	+ 4.15°	- 4.15°	- 2.45°	+ 2.45°	+ 4.95°	- 4.95°		
Ecart estival . .	- 0.45°	+ 1.05°	- 1.05°	+ 2.85°	- 2.85°	- 1.15°	+ 1.15°		
Bassin S.									
Précipitations. .	578.1 %	621.9 %	555.8 %	644.2 %	689.2 %	510.8 %	602.7 %	597.3 %	
Débit	608.3 %	591.7 %	586.7 %	613.4 %	661.4 %	538.6 %	600.2 %	599.8 %	
Bassin M.									
Précipitations. .	602.9 %	597.1 %	573.3 %	626.7 %	683.1 %	516.9 %	591.6 %	608.4 %	
Débit	596.9 %	603.1 %	531.2 %	668.8 %	585.1 %	614.9 %	621.5 %	578.5 %	
Bassin MR.									
Précipitations. .	590.4 %	609.6 %	565.3 %	634.7 %	688.1 %	511.3 %	594.0 %	606.0 %	
Débit	604.8 %	595.2 %	569.2 %	630.8 %	637.3 %	562.7 %	606.7 %	593.3 %	

M et MR,¹ pour les deux groupes d'années : chaudes (6) et froides (6); 2° les mêmes données pour les deux groupes d'années, avec été chaud (7) et avec été froid (5); 3° les mêmes données pour les deux groupes d'années : avec hiver chaud (6) et hiver froid. L'examen de tous ces groupes révèle les faits suivants.

Pour les bassins S et MR, c'est *l'écart hivernal* de la température qui règle en quelque sorte le débit par rapport aux précipitations; l'écart hivernal cumulé étant positif, le débit par rapport aux précipitations sera plus grand; le contraire aura lieu quand l'écart hivernal sera négatif. Par contre, le bassin M se comportera d'une manière différente : c'est l'écart estival cumulé de la température qui y sera décisif. Le groupe d'années avec été moyen chaud aura un débit moins abondant par rapport aux précipitations; l'inverse se produira pendant le groupe d'années avec été moyen froid. Pour le bassin MR, la règle énoncée se vérifie dans tous les quatre groupes (A, B, C, D); pour les bassins S et M, elle n'apparaît comme vraie que dans les trois groupes; cependant dans le quatrième, ici et là, (groupe D pour le bassin S, groupe A pour le bassin M) l'anomalie est insignifiante et les débits correspondent à peu près aux précipitations.

La raison de cette règle semble être simple : le bassin S, avec une altitude moyenne relativement élevée (2047 m.), présente en *été* le phénomène d'une compensation plus ou moins complète du débit; en été chaud, l'*excès* produit par la fonte des glaciers sera neutralisé par la perte due à l'évaporation plus grande; le contraire aura lieu pendant l'été froid. Aussi le débit pendant l'été suivra plus ou moins étroitement les précipitations; la température ne jouera qu'un rôle secondaire. Par contre elle jouera un rôle décisif pendant l'hiver, parce que l'évaporation pendant cette saison est relativement très restreinte; en hiver doux, les glaciers et la neige fondront davantage; le débit

sera plus grand. En somme, l'influence de la *température hivernale* s'exercera, quoique atténuée, pendant toute l'année.

Autre chose avec le bassin M, dont l'altitude moyenne est sensiblement plus petite (1704 m.). L'évaporation jouera ici un rôle beaucoup plus important; d'autre part, la surface couverte par les glaces étant plus petite que dans le bassin S, les apports des glaciers seront, *caeteris paribus*, nécessairement plus modestes. Il s'ensuit que pendant l'été moyen chaud, le débit par rapport aux précipitations sera moins abondant; l'inverse se produira pendant l'été moyen froid. En hiver, l'évaporation déjà assez sensible à cause de la température plus élevée, absorbera plus ou moins le surplus dû à la fonte plus énergique des glaciers et de la neige. Il s'y associera un autre facteur dont nous reparlerons plus bas. En somme, l'hiver, dans le cas du bassin M, sera aussi négligeable que l'été dans le cas du bassin S: c'est la *température estivale* qui déterminera le débit par rapport aux précipitations.

Enfin le bassin MR, puisqu'il est composé du *grand* bassin S et du *petit* M, se comportera comme le premier¹.

Mais, pour l'étude de la perte d'eau signalée, ce sont surtout les faits suivants qui sont importants. 1° Pendant la période 1900-1905, la région S (de même que les bassins secondaires AR, Gl, PR) non seulement n'a pas fourni plus d'eau que pendant la période 1894-1899, mais même un peu moins; donc il ne saurait guère être question pendant cette période d'un gain apparent causé par un exhaussement non enregistré du fond. 2° Le parallélisme des données aux stations indépendantes MR, AR, Gl et PR est

¹ Tout ce qui précède est à envisager provisoirement comme une série de simples règles. En effet, les relations indiquées devraient être vérifiées sur des périodes plus longues que celle de 12 ans; en outre, on devrait utiliser les années hydrologiques (d'octobre à octobre), ce qui, pour d'autres raisons, n'a pas été fait dans cette étude.

un argument contre la possibilité d'erreurs sensibles qui seraient occasionnées par des changements non enregistrés du fond.

Cependant on pourrait objecter que le gain admis par nous pendant la seconde période ne se révèle pas dans l'ensemble du débit de cette période, parce qu'il est balancé par un gain semblable pendant la première période. Sans vouloir écarter d'emblée cette idée, nous estimons cependant qu'elle est assez invraisemblable. En effet, il serait bien singulier si, précisément dans les années pendant lesquelles on n'a pas procédé aux revisions des profils, il s'était produit des exhaussements considérables du fond, qui se compenseraient à peu près dans les deux périodes, surtout si nous réfléchissons que, dans les autres années, on a constaté principalement des abaissements du fond.

En résumé, nous ne voulons pas exclure totalement l'explication de la perte d'eau à la station F par *l'exhaussement* du fond aux stations AR, Gl, PR; néanmoins nous pensons que cette explication est bien invraisemblable.

III

Il reste encore une autre possibilité pour expliquer la perte signalée comme une pure apparence due aux changements non enregistrés du fond, c'est *l'approfondissement* du fond à la station F.

En effet, envisageons encore une fois la période 1900-1905 pour la station F (Tableau I), et nous serons frappés par la diminution presque continue du débit annuel; depuis $+ 8,8 \text{ m}^3$ (année 1900) jusqu'à $- 17,5 \text{ m}^3$ (1905); on dirait que le fond *s'approfondit* de plus en plus.

Cependant, des levés du profil en travers ont été exécutés là aussi plusieurs fois, à savoir au printemps des

années 97, 99, 01 et 05¹. Les deux premiers levés ne nous regardent pas, parce que notre période ne commence qu'en 1900. Par contre, les revisions des années 01 et 05 fixent en grande partie les profils pour les années 00 et 04.

Or, la première objection contre l'hypothèse de l'approfondissement graduel du fond à la section F serait la suivante : les débits des années 00 et 04 (+ 8.8 m³; — 6.7 m³) doivent être considérés comme ayant subi peu de perte. Cela va encore pour l'année 00; par contre la valeur négative de — 6.7 m³ pour l'année 1904 ne peut pas être considérée comme normale, surtout à côté de la valeur négative de — 17,5 m³ pour l'année 1905. *Au moins pour cette année, il faut donc trouver un autre facteur pour expliquer cette perte évidente.*

Allons plus loin. La diminution presque continue du débit de la région F, signalée par nous plus haut, devient moins frappante si nous prenons en considération les deux faits suivants : D'abord une diminution du débit, au moins partielle, a lieu aussi dans la région AR (v. les tableaux I et II); ensuite, les quantités de précipitations des périodes 900-901, 02-03, 04-05 diminuent aussi continuellement, dans la région tout entière, de même que dans le bassin M :

	900-901	02-03	04-05
MR	211.4	205.4	192.8 ‰
M	204.5	201.5	191.1 ‰

En outre, il y a une autre conséquence qui découle de l'hypothèse admise. Chacune des quatre années, pendant lesquelles aurait lieu un approfondissement du fond, devrait amener une perte d'eau moyenne de 20 m². Avec un débit moyen 102.8 m³, cette perte apparente correspond à un *approfondissement moyen du fond, par rap-*

¹ *Régime des eaux en Suisse*. Bassin du Rhin depuis ses sources jusqu'à l'embouchure de la Tamina. 2^e partie : stations limnimétriques. 3^e partie : profils en long. Premier supplément 1907. Planche Ia.

port aux valeurs interpolées, de 0,14 m. Quoique assez haut, ce chiffre est encore admissible. Ce qui l'est beaucoup moins, c'est la forme dentelée de la courbe, qui représenterait les changements du fond à la station F pendant la période 99-905. (V. fig. 1.) Cette courbe serait

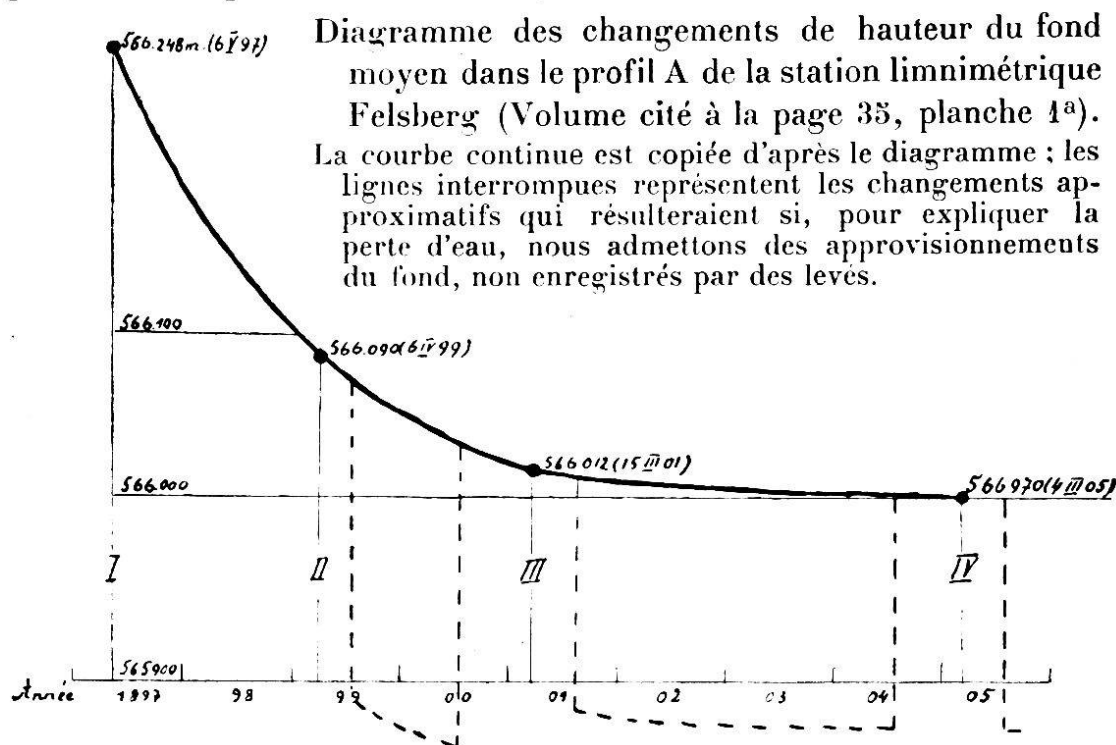


Fig. 1.

plus égale, si nous n'attribuons l'approfondissement du fond qu'aux années 1902, 3 et 5. Mais dans ce cas, surgiraient deux autres difficultés : le débit trop petit de l'année 1901 (4.4 m³ contre 11.4 m³ du bassin Gl), puis, l'approfondissement, maintenant considérable, pendant ces trois années, qui devrait amener une perte apparente annuelle de 30 m³.

Nous voyons donc que l'explication de la perte *exclusivement* par l'approfondissement du fond à la station F se heurte aux mêmes difficultés que l'explication de cette anomalie *uniquement* par l'exhaussement du fond aux stations de la région S. En revanche, une *combinaison* de ces deux facteurs (exhaussement en amont et approfondissement simultané en aval) serait déjà plus facile à admettre.

IV

Examinons maintenant les débits, non pas annuels, comme nous l'avons fait plus haut, mais semi-annuels, hivernaux et estivaux (tableau IV).

TABLEAU IV

Débits moyens hivernaux et estivaux par seconde des bassins secondaires de la région alpine du Rhin.

Bassin	Années	1894	1895	1896	1897	1898	1899	Moyenne	Les débits hivernaux en % des débits estivaux «corrigés».
								m ³ .	
S.	{ Hiver	31.0	33.7	55.4	40.3	32.7	36.8	38.3	22.1
	{ Eté	130.2	143.9	206.6	229.7	167.3	164.2	173.6	
M.	{ Hiver	33.1	25.5	31.9	14.4	9.7	15.4	21.7	29.2 20.8
	{ Eté	64.9	45.7	127.5	99.4	33.7	74.0	74.2	
MR.	{ Hiver	64.1	59.2	87.3	54.7	42.4	52.2	60.0	24.2 21.6
	{ Eté	195.1	189.6	334.1	329.1	201.0	238.2	247.8	
<hr/>									
	Années	1900	1901	1902	1903	1904	1905		
S.	{ Hiver	33.2	32.4	30.9	28.4	26.3	33.6	30.8	17.6
	{ Eté	156.6	186.4	162.3	171.6	178.1	197.4	175.4	
M.	{ Hiver	16.0	28.5	26.3	20.6	14.8	18.3	20.8	27.4 19.6
	{ Eté	106.4	115.9	104.7	78.2	30.0	20.9	76.0	
F.	{ Hiver	4.4	3.9	7.1	11.6	4.5	0.7	5.4	— —
	{ Eté	13.2	4.9	-2.9	-3.8	-17.9	-35.7	-7.0	
MR.	{ Hiver	49.2	60.9	57.2	49.0	41.1	51.9	51.6	20.5 18.3
	{ Eté	263.0	302.3	267.0	249.8	208.1	218.3	251.4	
FM.	{ Hiver	11.6	24.6	19.2	9.0	10.3	17.6	15.4	18.6
	{ Eté	93.2	111.0	107.6	82.0	47.9	56.6	83.0	
FR.	{ Hiver	37.6	36.3	38.0	40.0	30.8	34.3	36.2	21.5 —
	{ Eté	169.8	191.3	159.4	167.8	160.2	161.7	168.4	

La première conclusion qui s'en dégage est que le débit hivernal moyen par seconde des trois bassins S, M et MR était plus grand pendant la période 94-99 que pendant la période 900-905 (38.3 m³, 21.7, 60.0 contre 30.8 m³, 20.8, 51.6). La cause probable de ce fait nous est donnée

par la constatation que l'hiver moyen de la première période était beaucoup plus chaud que celui de la seconde (période 94-99 : écart moyen annuel = $+0.1$, — estival = -0.075 ; période 900-905 : écart moyen annuel = -0.1 , — estival = $+0.075$).

Les débits estivaux, par contre, se comportent d'une manière opposée. Ils sont plus petits dans la première période que dans la seconde (173.6 m³, 74.2, 247.8 contre 175.4, 76.0, 251.4).

Comme conséquence directe du fait que les débits hivernaux et estivaux se comportent dans les deux périodes d'une manière opposée, signalons que le rapport des débits des deux saisons était plus grand dans la première période que dans la seconde (pendant l'hiver moyen de la première se sont écoulés 22.1 ; 29.2 ; 24.2 % de la masse d'eau qui s'est écoulée pendant l'été moyen de cette période ; les mêmes rapports pour la seconde période sont : 17.6 ; 27.4 ; 20.5 %).

Ces relations, si régulières, prouvent que les débits des bassins secondaires du Rhin donnés par le mémoire cité sont dignes de confiance.

Revenant à notre problème direct, examinons à leur tour les débits hivernaux et estivaux de la région F (Tableau IV). La première chose qui frappe c'est qu'au débit hivernal relativement énorme de 5.4 m³ correspond un débit estival *négligeable* de -7.0 m³ ; on a l'impression que *la perte totale d'eau a lieu en été*. En effet, essayons de partager en hivernal et estival le débit idéal annuel de la région F, que nous avons évalué plus haut à 15 m³. Admettons que le débit hivernal constitue 25 % du débit estival, ce qui sûrement n'est pas trop peu, si nous réfléchissons que la même relation pour la région S, plus élevée, est de 17.6 % et que pour la région entière MR elle n'atteint que 20.5 %. Dans ce cas, le débit hivernal *idéal* serait de 6 m³ ; le débit estival *idéal* de 24 m³. Puis-

que en réalité il s'est écoulé pendant l'hiver moyen 5.4 m^3 d'eau par sec. et pendant l'été moyen -7 m^3 , il s'ensuit qu'à la perte estivale de $24 + 7.1 = 31.1 \text{ m}^3$ correspond celle d'hiver, plus que modeste, de 0.6 m^3 .

V

Si nous restons fidèle encore à notre hypothèse des remaniements du fond, non enregistrés par les levés du profil en travers, il est logique maintenant de nous demander quels effets produiront ces remaniements sur les débits hivernal et estival, pris isolément.

Dans un mémoire important, paru il y a quelques années¹, nous lisons (p. 22): « Aux états stationnaires de la même hauteur, constatée à une station limnimétrique à des époques diverses, ne correspondent presque jamais des hauteurs de limnimètre identiques entre elles, des stations en aval... parce que *le fond du lit du Rhin, partiellement mobile, subit des remaniements, qui sont naturellement plus sensibles pendant les basses eaux stationnaires que pendant les eaux moyennes et hautes.* » Et plus loin (p. 25): « Aux hauteurs limnimétriques supérieures, les corrections ne peuvent pas être appliquées, parce qu'on comprend facilement que *l'influence du remaniement du fond diminue considérablement avec la hauteur limnimétrique croissante*². »

Il nous semble cependant que cet avis ne peut pas avoir une portée générale. En effet, il faut avant tout tenir

¹ *Ergebnisse der Untersuchung der Hochwasserverhältnisse im deutschen Rheingebiet*. Bearbeitet und herausgegeben von dem Zentralbureau für Meteorologie und Hydrographie im Grossherzogtum Baden. — VIII Heft. Der Abflussvorgang im Rhein unter der wechselnden Wasserlieferung des Stromgebietes und die Vorherbestimmung der Rheinstände. Bearbeitet von Dr M. von Tein. Berlin 1908.

² M. H. Keller, dans une analyse du mémoire cité, se prononce dans le même sens (*Geographische Zeitschrift*, année 1909, *Untersuchungen der Hochwasserverhältnisse im deutschen Rheingebiete*, p. 158 et 159).

compte de la *façon de distribution* des remaniements du fond sur le périmètre mouillé total. Si le remaniement se cantonne principalement dans les parties *les plus profondes* du lit¹ — ce qui arrive peut-être le plus fréquemment — alors les changements des *hauteurs limnimétriques* aux basses et hautes eaux différeront sensiblement : ils seront beaucoup plus grands aux basses eaux qu'aux hautes. Mais tel ne sera pas le cas avec les *changements (apparents) de débit* qui en résultent : ils seront, au contraire, plus grands aux hautes eaux qu'aux basses. Nous reviendrons à cette question un peu plus loin.

Ensuite, si le remaniement a attaqué d'une manière à peu près *égale* tout le lit, les changements subis par les *hauteurs* limnimétriques seront dans tous les cas les mêmes, tandis que le *débit* aux hautes eaux, comparé avec le débit des basses eaux, variera d'une manière encore plus considérable que ce n'était le cas dans la première éventualité.

Enfin, il est encore imaginable que le lit soit remanié exclusivement ou principalement dans les parties extérieures, moins profondes. Même dans ce cas, les variations de la *hauteur* limnimétrique seront plus grandes aux hautes eaux ; davantage encore celles des débits.

Nous avons dit tout à l'heure que, si le remaniement attaque de préférence les parties les plus profondes du lit, l'écart (apparent) du *débit* sera plus considérable aux hautes eaux, qu'aux basses. Pour rapprocher la discussion de notre cas, admettons qu'il s'agisse d'un *approfondissement* du lit. Il y aurait donc à examiner l'influence (apparente) de cet approfondissement sur les débits, hivernal et estival.

¹Un exemple instructif de cette manière d'agir est fourni par le tableau (p. 25 l. c.) des approfondissements du lit du Rhin à Bâle pendant la période 1821-1905 ; entre autres, pendant les années 1901-1905, à la hauteur limnimétrique de 100 cm., l'approfondissement était de 71 cm., tandis qu'à la hauteur de 600 cm., il n'atteignit que 20 cm.

Tout d'abord, il est compréhensible qu'un approfondissement *identique*, en hiver et en été, enlèvera au profil en travers total du fleuve une partie, dont la surface *absolue* sera la même dans les deux cas. La vitesse estivale moyenne du Rhin à la station F. est environ 1.76 fois plus grande que la vitesse hivernale¹. Donc par le « profil d'approfondissement » passera en été une quantité d'eau qui sera 1.76 fois plus grande en moyenne que celle qui passera par le même profil en hiver : *la perte d'eau absolue apparente pendant l'été sera 1.76 fois plus grande que la perte d'hiver.*

Si l'approfondissement modifie le lit d'une manière sensiblement égale, le rapport entre les deux pertes sera encore plus grand. En effet les « profils d'approfondissement » d'hiver et d'été seront dans les mêmes relations que les périmètres mouillés hivernal et estival. D'après la planche IV^a de la publication hydrométrique citée (tableau des résultats des jaugeages), cette proportion est de 1 : 1,5, et, puisque par cette section 1,5 fois plus grande, l'eau passe en été avec une vitesse de 1,67 plus grande qu'en hiver, il en passera en été par « le profil d'approfondissement », somme toute, $1,5 \times 1,67 = 2,5$ fois plus d'eau que par le « profil d'approfondissement » d'hiver. *Donc dans le cas d'une répartition égale de l'approfondissement du lit, la perte apparente estivale sera 2,5 fois plus grande que la perte en hiver.*

Enfin la troisième possibilité est que l'approfondissement se cantonne principalement ou exclusivement dans les parties extérieures, moins profondes, du lit, qui ne sont pas mouillées par les eaux moyennes hivernales. Il est facile de comprendre que dans ce cas *la perte apparente estivale sera encore plus grande que la perte hivernale ; dans le cas extrême, cette dernière peut même être égale à 0.*

¹ Voir la publication *Régime des eaux en Suisse*, etc. Planche IV^b (Courbe des débits, courbes des vitesses moyennes et des vitesses maxima).

Plus haut, nous avons conclu que la perte hivernale moyenne de $0,6 \text{ m}^3$ correspond à la perte estivale de $31,1 \text{ m}^3$, très grande. Or, si nous voulons conserver l'hypothèse des remaniements du lit, nous sommes forcés d'admettre que ces remaniements ont attaqué surtout les parties extérieures du lit. Cette conclusion serait peut-être difficile à admettre, parce que les cas semblables sont plutôt rares. Cependant l'examen attentif du profil et de la planche L^a (station Felsberg), (Publication hydrométrique, premier supplément 1907), où se trouvent les résultats des levés, nous révèle que dans cet endroit le remaniement semble en effet préférer les parties extérieures, que n'atteignent pas les eaux moyennes.

Mais nous ignorons si cette préférence avait lieu aussi par rapport aux remaniements non enregistrés admis par nous, ou si elle aurait suffi pour expliquer la petite perte apparente subie par le débit hivernal.

Quoi qu'il en soit, la longue analyse que nous venons de faire montre que la répartition fort inégale de la perte entre les deux saisons, si étrange au premier coup d'œil, n'est pourtant pas tout à fait inconciliable avec l'hypothèse des remaniements du lit.

Arrêtons-nous encore un peu sur le débit hivernal de la région considérée, parce que sa provenance a été expliquée d'une manière contestable. En effet M. von Tein (l. c. p. 6) s'exprime à ce sujet de la manière suivante: « le Rhin à Reichenau transporte souvent pendant plusieurs semaines 35 à 40 m^3 d'eau par sec., qui proviennent probablement en grande partie des apports de suintement dans les vallées du Rhin antérieur, du bas Albula et du Domletschg »... Ceci nous paraît décidément exagéré. Déjà M. H. Keller (l. c. p. 158) a en une autre occasion exprimé l'avis que l'auteur du mémoire *Der Abflussvorgang im Rhein* attribue une importance trop grande à l'approvisionnement par la nappe phréatique.

Dans notre cas, nous pouvons le prouver par un raisonnement simple. On a établi pour la période 1900-1905 les moyennes des débits mensuels. Voici la moyenne de février qui est la plus faible :

AR	5,45 m ³	Gl	2,0 m ³
PR	13,1 m ³	FR	24,7 m ³
MR 33,6 m ³			

Le bassin Gl, contrairement aux bassins AR et PR, ne possède pas un sol alluvial quelque peu considérable¹. Par conséquent, nous sommes autorisés à conclure qu'il n'y a pas d'apports de la nappe phréatique. Ensuite, nous pouvons affirmer que, sans compter les approvisionnements par suintement, les bassins AR et PR fourniraient un débit de février relativement aussi grand que celui du bassin Gl. Les chiffres ainsi obtenus seraient pour le bassin AR 4 m³, pour le bassin PR 8,8 m³. L'apport par suintement serait donc pour le bassin AR égal à 1,45 m³ (débit total de février = 5,45 m³) ; pour le bassin PR — égal à 5,3 m³ (débit total de février = 13,1 m³).

En conséquence, dans le débit total de février de la région S, de 20,55 m³, il n'y a que 6,75 m³ (1,45 + 5,3) provenant de la nappe phréatique (à peine $\frac{1}{3}$ du débit total). Sur le parcours du Rhin plus en aval jusqu'à la station MR (où est située la localité Reichenau), cette quantité de 6,75 m³ ne peut guère grossir considérablement. En effet, dans la quantité totale du débit de février à la station MR (33,6 m³), à peine 11,2 m³ ($\frac{1}{3}$) peuvent provenir de la nappe phréatique. Nous disons « à peine », parce que la région M dont l'altitude moyenne est bien inférieure à celle de la région Gl, doit fournir un débit de février plus grand que cette dernière, même sans apport de la nappe phréatique.

Donc sans vouloir contester que, sur notre territoire,

¹ Voir la carte géologique de la Suisse en 1 : 100 000, Feuille XIV Altdorf-Coire.

les débits hivernaux soient alimentés par les apports de l'eau de suintement, nous croyons néanmoins, que cet approvisionnement ne dépasse pas $\frac{1}{3}$ de la quantité totale du débit. Par suite, même après la soustraction de l'eau provenant du suintement, le débit hivernal moyen de la région F, de $6,4 \text{ m}^3$ ne diminuerait pas considérablement. La remarque ci-dessus concernant la région M est naturellement aussi valable pour la région F.

Il reste ainsi établi que la perte constatée à la station F a affecté presque exclusivement le débit estival. Ce fait, comme nous l'avons démontré plus haut, ne contredit pas absolument l'hypothèse du remaniement du lit. Cependant le phénomène des apports d'eau par le suintement, discuté tout à l'heure, nous amène à une deuxième hypothèse pour expliquer la perte signalée. Nous allons l'analyser.

VII

Les stations AR, Gl et PR se trouvent dans les endroits où la physionomie de la vallée du Rhin subit des modifications profondes. En amont, les vallées relativement étroites, creusées dans des roches imperméables sont à peine recouvertes par-ci, par-là d'une mince nappe alluviale. En aval, la vallée devient large, la roche en place disparaît entièrement sous d'épaisses masses presque partout perméables (éboulements, moraines, alluvions)¹. La station F, où avait lieu la perte signalée, est située sur la plaine alluviale de cette dernière partie de la vallée du Rhin, et les grandes masses d'éboulements et de moraines se trouvent en amont, d'un côté jusqu'à la localité Ilanz (stations AR et Gl), de l'autre, presque jusqu'à la localité Rothenbrunnen (station PR). Les deux cours d'eau, AR

¹ Pour les détails concernant les formations quaternaires de cette région, consulter un mémoire récent de W. Staub *Die Tomalandschaften im Rheintal von Reichenau bis Chur*, ein Beitrag zur Kenntniss der Bergsturzablagerungen im Rheintal, Berne 1910.

et Gl réunis, parcourent ainsi presque 20 km. sur un sol perméable, de même le PR parcourt environ 7 km. sur un sol semblable ; enfin ces trois cours d'eau réunis passent 7 km. environ jusqu'à la station F, dans les conditions analogues. Or, nous nous figurons que *ces rivières pendant leur descente, perdent une partie de leur eau au profit du sol environnant*¹. L'eau absorbée se réunit peu à peu en un courant de la nappe phréatique, qui, à travers la plaine alluviale, accompagne le cours d'eau extérieur. L'imbibition graduelle est en outre favorisée ici par le fait que les cours d'eau (AR et PR) descendent sur un long parcours (20 et 7 km.) séparément ; la masse d'eau absorbée par le sol perméable devient ainsi relativement beaucoup plus grande.

Eh bien, nous croyons, et c'est la *deuxième hypothèse imaginable*, que *la perte signalée peut être expliquée justement par cette absorption graduelle de l'eau par le sol perméable*. Il faudrait donc s'imaginer qu'une artère d'eau souterraine, avec un débit moyen annuel de 15 m^3 par seconde, passe par la station F, où le cours d'eau superficiel accuse un débit analogue de 102 m^3 . Ainsi la quantité d'eau en mouvement dans les alluvions au-dessous de la station F serait égale en moyenne à $\frac{1}{8}$ de la quantité d'eau superficielle passant cette station.

Voyons maintenant si les faits dont nous disposons sont en harmonie avec cette hypothèse de l'absorption.

La largeur de la vallée à la station F est de 1800 m. environ. Admettons que l'épaisseur du sol alluvial y soit de 100 m. et que la même largeur existe aussi à cette profondeur. Il en résulterait un profil en travers de la nappe d'eau mouvante² de $18\,000 \text{ m}^2$. Or, puisque par ce

¹ « En contribuant à la formation des courants de la nappe phréatique, fréquents dans les régions semblables » (Remarque de M. Ing. O. Lütshg).

² Les Américains appellent *underflows* ces nappes d'eau mouvantes, qui dans l'intérieur de la plaine alluviale accompagnent les cours d'eau superficiels. V. *The motions of underground waters*, by Ch. S. Slichter. United States Geological Survey, 1902 (Water Supply and Irrigation Papers, N° 67), p. 38.

profil passe en moyenne 15 m³ d'eau par seconde, il s'en suit que la vitesse de cette nappe mouvante serait $\frac{15}{180\,000} \text{ m.} = \frac{1}{12} \text{ mm.}$ par seconde. Comparée à la vitesse moyenne du courant superficiel, de 1.42 m., elle serait 17 040 fois plus petite.

Cette vitesse de $\frac{1}{2}$ mm. par seconde de la nappe souterraine se range sans difficulté parmi les données obtenues ou directement ou expérimentalement¹, surtout si nous prenons en considération que le sable de la plaine alluviale d'un fleuve de la haute montagne, — c'est le cas du Rhin alpin à l'endroit F — ne peut pas avoir un grain très fin. Ce sont les dimensions du grain qui à côté de la pente moyenne de la vallée, constituent le facteur le plus important de la vitesse de la nappe d'eau souterraine.

L'hypothèse de l'infiltration semble bien expliquer la répartition si inégale de la perte d'eau en hiver et en été. De nombreux auteurs sont d'avis ², que peu à peu les

¹ Slichter, l.c., p. 26. D'après Darton la vitesse de la nappe d'eau souterraine dans les sables de la formation de Dakota ne dépasse pas 1-2 milles anglais par an (dans notre cas $1 \frac{1}{2}$ mille). Rogers écrit que les évaluations américaines concordent bien avec les études soignées et approfondies des ingénieurs français; d'après ces derniers, la vitesse moyenne dans les sables est de 1 mille environ (donc $1 \frac{1}{2}$ fois plus petite que chez nous). — En Arizona cette vitesse a été trouvée de $\frac{5}{48}$ à $\frac{5}{36}$ mm. par seconde; à proximité du fleuve Arkansas même de $\frac{5}{32}$ mm. (chez nous $\frac{1}{12}$ mm).

D'après le tableau, p. 29, Slichter, l. c., pour une porosité assez petite, de 32% (la porosité du sable de quartz est de 30-40 %, p. 17) et pour une pente moyenne de 10 pieds sur un mille — ce qui correspond à peu près à notre cas — la vitesse calculée par nous serait celle dans l'intérieur d'un fin gravier, avec un grain d'un diamètre un peu plus grand que 2 mm. Ce chiffre nous paraît parfaitement admissible pour la plaine alluviale du Rhin, aux environs de la station Felsberg. — Quant à la vitesse des *underflows*, consulter encore p. 42 du mémoire cité.

² Par ex. J. Soyka, *Schwankungen des Grundwassers*, Geographische Abhandlungen, vol. II, fasc. 3, p. 56; cependant l'auteur ne parle que de cours d'eau de ruissellement (oberflächliche Gerinne). Il y a pourtant des auteurs qui semblent être d'un avis contraire; v. K. Kastner, *Einfluss offener Gewässer auf das Grundwasser*, Mitth. der k. k. geographischen Gesellschaft in Wien, p. 523-565. Année 1906.

parties les plus profondes du lit d'un fleuve (ou d'un canal), creusé dans le matériel perméable, deviennent imperméables grâce au dépôt d'un limon très fin. Appliquons cette constatation à notre cas et joignons-y une autre, à savoir que même en admettant une perméabilité égale, le périmètre mouillé moyen en été est 1.76 fois plus grand que celui d'hiver, donc la surface d'infiltration est d'autant plus grande, — et nous n'éprouverons aucune difficulté à comprendre qu'aux basses eaux, en hiver, l'infiltration sera insignifiante ou même nulle ¹, tandis qu'elle sera considérable en été, aux eaux hautes. En d'autres mots à la perte sensible de l'été correspondrait, en hiver, une perte minuscule, — et cette particularité est précisément celle que nous avons constatée plus haut.

VIII

Dans les chapitres précédents nous avons eu plusieurs fois recours aux données de débit à la station M, afin de les comparer avec celles des autres stations. Or, les données pour cette station, située immédiatement en aval de l'embouchure de la Landquart, un affluent important et turbulent (catastrophe de l'année 1910), ne semblent pas d'emblée présenter une garantie suffisante, surtout en ce qui concerne les changements du fond du lit.

¹ Nous avons vu plus haut (ch. VI), qu'en hiver, au contraire, le fleuve s'enrichit au dépens de la nappe phréatique. — M. von Tein, l. c. p. 22, décrit les actions réciproques entre le fleuve et les eaux souterraines dans la région du Rhin *extraalpin* de la manière suivante : « Aux hauteurs limnimétriques très basses d'environ 100 cm. (limnimètre à Waldshut) le cours d'eau souterrain fournit au fleuve 70 à 80 m³, aux eaux plus hautes — si les autres conditions restent les mêmes — cet apport diminue. En effet le fleuve barre alors la nappe phréatique, qui n'atteint le Rhin que lentement. Enfin aux hauteurs limnimétriques de l'eau dépassant la hauteur moyenne estivale et le niveau de la nappe phréatique, le Rhin perd probablement de l'eau au profit de ses berges perméables. »

De même chez A. Daubrée : *Les eaux souterraines à l'époque actuelle*, 2 vol. Paris 1887, I, p. 22 : « La rivière qui a creusé son lit dans le gravier, contribue aussi pour sa part à alimenter la même nappe d'eau (souterraine) par des infiltrations latérales, particulièrement au moment des crues. »

Cependant ici aussi les profils en travers ont été levés plusieurs fois, et même plus souvent (cinq fois) qu'aux stations supérieures (trois fois).

Puis rappelons-nous du beau parallélisme entre les phénomènes de débit des régions S et MR, qui peut à peine être attribué au hasard, — et nous serons portés à croire, que les débits, évalués pour la station M, ont une valeur plus grande que celle déduite des apparences.

Nous les utilisons donc encore une fois. Comparons en effet la variation du débit du bassin F d'une année à l'autre avec celle du débit des bassins AR, M et FM. Nous avons vu plus haut (p. 35) que le débit des bassins F et AR diminue continuellement; un phénomène semblable est révélé par le débit des bassins FM et M (pour ce dernier c'est naturel, parce qu'il se compose entièrement de deux autres) (V. le tableau I).

Pendant les trois couples d'années les bassins F, FM et AR ont fourni :

	900-1	2-3	4-5
F	13.2	6.0	— 24.2 m ³
FM	120.2	108.9	66.2 »
AR	72.0	69.5	60.5 »

Joignons à cela les faits suivants : 1^o la variation analogue des précipitations que nous avons signalée plus haut (p. 35); 2^o la température estivale extrêmement élevée des années 1904 et 1905 ¹ (Tableau II : écarts de la moyenne de 12 ans = + 0,8^o et + 0,4^o; donc forte évaporation), et le phénomène de la diminution continue du débit

¹ Ce phénomène semble avoir été général. Le directeur de l'Institut Météorologique central de la Suisse, M. Jules Maurer, s'exprime ainsi : « Les années 1904-1907 se sont distinguées par des périodes prolongées de temps estival chaud, sec et fréquemment clair (dans le Bas-Valais)... Par exemple en 1904 de mi-juillet jusqu'à mi-août il n'y eut que deux jours de pluie ; le mois de juillet 1905 était très chaud et clair... (*Einige Ergebnisse aus Schneemessungen in Schweizer Hochalpen u. s. w.*, p. 295, Meteorologische Zeitschrift, 1910, fasc. VII).

de la région F, si étrange à première vue, ne nous apparaîtra que comme une conséquence directe d'une variation analogue du climat.

En voulant par contre maintenir l'hypothèse des remaniements du fond, nous serions obligés : 1° d'admettre un remaniement du fond à la station M, dont la variation pendant la période 1900-1905 serait analogue à celle du remaniement du fond à la station F, mais qui se produirait sur une échelle plus grande ; 2° d'admettre un remaniement du fond à la station M pendant la période 1894-99, qui serait analogue et de même grandeur que celle de la période 1900-05, parce que le débit total est à peu près le même pendant les deux périodes (596.9 ‰ contre 603.1 ‰). — Voilà deux conditions dont chacune est difficile à admettre séparément, à plus forte raison encore les deux ensemble.

Ici encore il y a lieu d'expliquer une particularité de la région M, à laquelle nous avons fait allusion plus haut (voir p. 28) : Le débit total annuel de la région S est nettement plus grand dans la première période que dans la seconde. (708.3 ‰ et 591.7 ‰) ; par contre la région M a fourni davantage d'eau dans la seconde que dans la première (596.9 et 603.1 ‰). Or, il n'y a aucune différence quant au débit estival entre les deux régions ; ici et là l'été moyen de la première période a fourni moins d'eau que l'été de la seconde (173.6 m³ et 74.2 pour 175.4 et 76,0). Par contre, l'hiver moyen de la première période étant plus chaud que celui de la seconde, le débit hivernal moyen était plus grand dans la première que dans la seconde période. Mais tandis que la différence entre le débit hivernal de la région S pendant la première et la seconde période est relativement considérable (7.5 m³), elle n'est que de 0.9 m³ pour la région M. De là, après addition, résulte le déficit du débit annuel de la région M pendant la première période, comparé au même débit pendant la

seconde période, et l'apparente anomalie de cette région, signalée plus haut (p. 28) s'explique.

Quant à la *cause* de cet accroissement si petit (0.9 m^3) du débit hivernal de la région M dans la première période comparée à la seconde, elle doit être cherchée surtout dans *l'influence régulatrice de l'infiltration*, combinée avec celle de l'évaporation (voir p. 32). En effet, pendant l'hiver moyen plus chaud de la première période, la hauteur limnimétrique moyenne était plus grande, l'eau du fleuve mouillait les couches supérieures, relativement plus perméables; il s'infiltrait relativement plus d'eau que pendant l'été moyen plus froid de la seconde période quand la hauteur limnimétrique moyenne était plus petite. Pour rester en harmonie avec notre conclusion (p. 43), que les débits hivernaux dans notre territoire sont alimentés par les apports de la nappe phréatique, nous pouvons dire aussi que ces apports, grâce à la hauteur limnimétrique plus grande, étaient moins abondants dans la première période que dans la seconde.

Ainsi la différence entre les débits hivernaux des régions S et M pendant les deux périodes (1894-99 et 1900-05) fournirait un nouvel argument pour l'hypothèse de l'infiltration.

IX

Le courant d'eau souterrain, que nous devons admettre d'après cette hypothèse, diminuera probablement vers l'aval peu à peu au profit des eaux superficielles. Cependant, à la station M une grande partie de cet « underflow » semble encore exister intacte, comme le prouve le raisonnement suivant.

Le débit moyen hivernal de la région S pendant la période 1900-1905 constitue le 17.6 % du débit estival; le chiffre analogue pour la région M est de 27.4 %. Ce dernier chiffre, même si nous prenons en considération

l'altitude moyenne plus basse de la région M, est décidément trop élevé. Il s'explique précisément par la perte, aussi presque exclusivement estivale, dans la région M.

Ajoutons donc au débit estival de cette région 30 m^3 (15×2), et le rapport analysé (rapport entre le débit hivernal et le débit estival) $\times 100$ serait égal à 19.6 %, chiffre qui paraît beaucoup plus plausible, de même que le chiffre analogue, de 18.3 %, pour la région MR¹.

En outre il y a à considérer ceci : Tout à l'heure nous avons dit qu'une grande partie de la nappe souterraine est encore conservée sous la station M. Il s'en suit que, sur le parcours du fleuve entre les deux stations F et M, il y a peu de perte, et en effet, le rapport des débits, hivernal et estival, de la région FM redevient normal (18.6 %), un peu plus grand que le chiffre analogue pour le bassin S (17.6 %) plus élevé.

Enfin le fait que la région FR (somme de la *grande* région S et de la *petite* F) a un débit hivernal égal à 21.5 % du débit estival, chiffre décidément trop élevé, constitue un autre argument pour l'hypothèse d'une infiltration.

X

Comparons maintenant les débits des bassins secondaires de notre territoire d'une manière différente : calculons les écarts de la moyenne annuelle du débit, et la moyenne de tous ces écarts nous donne *la variabilité annuelle du débit*, par analogie avec la variabilité des précipitations. Les chiffres de la dernière colonne du tableau II (« variabilité ») indiquent cette grandeur en pour cent du débit.

Comme premier résultat de la comparaison de ces va-

¹ Par contre, le même procédé appliqué aux rapports analogues pour les régions M et MR ne donne pas un résultat probant. En effet, les chiffres « corrigés » (20,8 et 21,6) sont plus petits que celui pour la région S, ce qui est impossible. Cause probable : l'influence régulatrice de l'infiltration signalée plus haut.

riabilités entre elles, signalons le parallélisme remarquable entre les variabilités du débit des bassins AR, Gl et PR d'un côté et les surfaces de ces derniers de l'autre. A une surface plus grande correspond une variabilité plus petite. La région la plus grande AR fournit de l'eau de la manière la plus constante. La région la plus petite, Gl, possède le débit le plus variable. Enfin la région intermédiaire PR occupe aussi, quant à la variabilité du débit, une position intermédiaire entre les deux autres régions.

La cause de ce phénomène est évidente. « On aurait une variabilité du facteur de l'écoulement d'autant plus petite, que la région de l'écoulement est plus grande. Cela paraît probable. Plus le bassin d'un fleuve est grand, mieux se compensent les irrégularités de la distribution des précipitations ¹. »

La régularité signalée contraste fortement avec la variabilité du débit de la région M, extrêmement haute. Elle est plus grande que celle de la région PR, un peu plus que quatre fois, quoique la région M ne soit que de 200 km² plus petite que la région PR; le débit de la région AR est deux fois moins variable que le débit de la région M qui est deux fois plus grande. D'où provient cette variabilité de la région M, si anormalement élevée ?

XI²

La *variabilité des précipitations*, qui est dans ces questions le point de départ, subit de la part de la *température* une influence double, de signe contraire. D'abord, dans les années sèches (qui en moyenne sont aussi plus chaudes), l'*évaporation* est relativement (pas absolument) plus grande que dans les années humides (en même temps

¹ A. Penck. *Untersuchungen über Verdunstung und Abfluss von grösseren Landflächen* (Geographische Abhandlungen. Vol. V, fasc. 5, p. 480).

² Comparez ce qui suit avec les pages 32-33.

en moyenne plus froides). En revanche, dans les années sèches et chaudes, *les glaciers fondent* davantage que dans les années humides et froides.

Il s'en suit que dans les régions basses, possédant une surface glacée modeste, l'évaporation jouera un rôle plus grand que dans les régions plus hautes, plus riches en glaciers : la variabilité des précipitations, se transformant en celle du débit, s'accroît dans les régions basses, s'atténue par contre dans les régions hautes ; *l'évaporation augmente la variabilité du débit, les glaciers la diminuent* (naturellement, seulement lorsque les autres facteurs, surtout *la répartition* annuelle des précipitations et de la température restent ici et là à peu près les mêmes, ce qui semble être le cas dans notre région, relativement si petite).

Or, la région M possède en effet une altitude moyenne plus petite que les trois autres (l'alt. m. de M = 1704 m., de S = 2047 m.), et sa surface glacée est relativement plus restreinte (1.6 % contre 7.8, 6.1, 3.5). Nous devons donc à priori conclure que la variabilité du débit sera relativement plus grande dans la région M que dans les trois autres. Le chiffre 33.5 % cependant (à côté de 27.5, 16.0, 8.2) semble être décidément trop haut pour être expliqué *exclusivement* de cette façon.

Considérons en effet *la variabilité des précipitations* dans notre territoire, laquelle, comme nous l'avons dit plus haut, sert de point de départ pour la variabilité des débits.

Nous trouvons que la variabilité des précipitations des sept stations pluviométriques de la région M oscille dans la période 1894-1905 entre 6.7 % et 9.5 %. La même grandeur pour les dix-huit stations de la région S est par contre contenue entre des limites nettement plus larges : 9.0 % et 18.1 %. Le nombre de ces stations est malheureusement petit, et, ce qui est compréhensible mais regrettable, elles se trouvent surtout à des altitudes moins éle-

vées. Les surfaces les plus étendues de notre territoire, situées entre 1500 m. et 2700 m., sont à peine représentées par des stations. Néanmoins il semble que les dates existantes sont suffisantes pour affirmer avec un certain degré de probabilité que *la variabilité de la masse totale des précipitations qui tombent sur le territoire extérieur du Rhin alpin (région M) est plus petite que celle du territoire intérieur (région S)*¹. En conséquence, la variabilité du débit de la région M, si élevée, devient d'autant plus frappante.

Mais en adoptant l'hypothèse de *l'infiltration*, nous introduisons un facteur qui *agrandit la variabilité*. Admettons en effet, ce qui paraît plausible, que dans les années sèches et chaudes il s'infiltré *relativement* plus d'eau que dans les années humides et froides, et l'infiltration aurait la même influence que si l'évaporation devenait plus grande. De fait, nous avons vu plus haut que cette dernière rend le débit plus variable.

RÉSUMÉ

1. Dans la vallée du Rhin alpin, à la station limnimétrique Felsberg, a été constatée, comme moyenne de 6 ans, une perte du débit par rapport à celui d'amont ; cette perte a été évaluée à $15 m^3$ en moyenne annuelle par seconde, tandis que le débit total annuel à la station Felsberg est de $102 m^3$.

2. Pour expliquer cette perte, l'hypothèse la plus facile à faire est qu'elle n'est qu'apparente et due aux *remaniements du fond*, non enregistrés par les levés. Cependant cette hypothèse se heurte à des difficultés. La principale est évidemment la grandeur considérable de la perte, puis

¹ Une loi analogue semble exister sur tout le territoire des Alpes suisses, probablement même sur le territoire des Alpes entières. (Comp. L. Horwitz, *Sur la variabilité des précipitations en Suisse*. Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 178, vol. XLVIII. 1912.)

la répartition fort inégale de la perte entre l'hiver et l'été; ensuite, le fait que pour plusieurs années une revision soignée des profils en travers a été exécutée. Enfin à l'hypothèse *exclusive* des remaniements du fond semble s'opposer une série de régularités concernant les débits, les quantités de précipitations et la température des diverses régions de notre territoire.

3. Une autre explication de la particularité signalée serait à chercher dans l'*infiltration*. En effet, bien loin en amont de la station Felsberg, le sol de la vallée du Rhin, presque partout imperméable, est remplacé par de grandes masses perméables (éboulements, moraines, alluvions), qui facilitent énormément l'infiltration.

4. L'hypothèse de l'infiltration *continue* entraîne comme conséquence l'existence en amont et en aval de Felsberg, dans les alluvions de la vallée, d'une nappe d'eau, descendant vers l'aval (« underflow » des Américains). La vitesse de cet « underflow », en admettant que la surface du profil en travers des masses alluviales soit de $1800 \times 100 = 18\,000\text{ m}^2$, et, en prenant en considération la pente peu considérable de la vallée, ne serait que d'un douzième de millimètre par seconde. Ce chiffre est de même grandeur que ceux établis ailleurs, directement ou par expériences.

5. L'hypothèse de l'infiltration semble bien s'accorder avec le fait, mentionné plus haut, que la perte avait lieu principalement en été : on comprend facilement que l'infiltration agit plus efficacement en été qu'en hiver. Il s'y associe une autre constatation, à savoir que le rapport entre le débit hivernal et estival à la station Mastrils, où l'« underflow » passe probablement avec un débit presque aussi grand que celui de la station Felsberg, est anormalement élevé.

6. *La variabilité du débit* de la région Mastrils est relativement très grande en comparaison de celle du débit

des régions du Rhin antérieur, du Rhin postérieur, et du Glenner (33.5 % et 27.5, 16.0, 8.2). Elle ne peut pas s'expliquer entièrement par l'influence atténuante des glaciers, qui s'exerce davantage sur les régions AR, PR et Gl, relativement plus riches en glaciers.

7. En effet *la variabilité des précipitations* est probablement plus petite dans la région Mastrils, extérieure, que dans les régions intérieures AR, PR et Gl. Si donc la *variabilité du débit* y est beaucoup plus grande, on doit en rendre responsable outre *l'évaporation*, qui exagère la variabilité, aussi *l'infiltration* qui agit dans le même sens.

8. L'hypothèse exclusive de l'infiltration présente cependant aussi quelques difficultés. D'abord la quantité des précipitations qui en résulte pour la région M est assez grande (1900 mm. par an contre 1600 mm. pour la région S)¹. Cependant elle est encore admissible, vu la position extérieure de la région M ; du reste, elle deviendra plus petite, si nous admettons que le débit de l'« underflow » à la station M est déjà plus petit que 15 m³. Ensuite la profondeur de 100 m. pour la nappe d'eau souterraine est peut-être aussi exagérée.

9. Nous constatons ainsi que des deux hypothèses (remaniements du fond et infiltration), *aucune, appliquée isolément*, n'est entièrement satisfaisante². Par conséquent il est *tout à fait possible que les deux facteurs aient agi ensemble*.

10. L'anomalie intéressante du débit du Rhin alpin à la station Felsberg ne peut pas donc être expliquée com-

¹ Pour calculer la quantité des précipitations, j'ai utilisé l'équation de Keller
 $y = 0.942 x - 405$ (y = débit ; x = précipitations).

(H. Keller. *Die Abflussscheinungen in Mittel-Europa*. Geographische Zeitschrift, 1906, p. 611.)

² La perte par l'évaporation directe au-dessus de la surface du fleuve est dans notre cas probablement bien *plus petite qu'un mètre cube* ; donc elle peut être négligée. (Comp. J. Maurer, *Die Verdunstung auf den Seen am Nordfuss der Alpen während der grossen Hitze- und Dürrezeit 1911*. Meteorologische Zeitschrift, 1911, XII ; surtout alinéa 3, p. 545.)

plètement pour le moment, à cause des données insuffisantes. La station Felsberg, située sur un sol alluvial, épais et perméable, se prête singulièrement bien à une constatation exacte d'une perte éventuelle par l'infiltration, et des levés du profil en travers, exécutés encore plus fréquemment, si possible, après chaque période de hautes eaux, parviendraient à éliminer totalement l'influence (apparente) des remaniements du fond sur le débit.

Je m'acquitte d'un devoir particulièrement agréable, en remerciant chaudement ici les chefs très distingués de l'Hydrographie nationale suisse, M. le directeur Dr L.-W. Collet et M. l'ingénieur adjoint O. Lüschg pour leur grande amabilité. Sans les documents et les livres qui ont été laissés à ma disposition, et surtout sans les discussions réitérées avec ces messieurs, pendant lesquelles ont été analysés tous les points importants du problème, il est certain que ce travail n'aurait pas été exécuté.

Lausanne, septembre-décembre 1912.



ERRATA

Page 36, ligne 8, au lieu de : *planche 1^e*, lire : *planche L^e*.

Page 36, ligne 12, au lieu de : *approvisionnement*s, lire : *approfondissement*.

