PROSPECTIONS HYDROLOGIQUES

Méthode d'investigation basée sur la mesure des résistivités des eaux courantes

Method of investigation based on measuring the resistivity of running water

PAR F. RAVIER

INGÉNIEUR HYDROLOGUE E.D.F.

La coloration de l'eau des gorges du Gave de Sainte-Engrâce, à la suite de déversements de fluorescéine au gouffre de la Peyre Saint-Martin en août 1952, permettait d'attribuer l'excédent des apports de ce gave, turbinés à l'usine de Licq-Athère, sur les débits déduits des données pluviométriques et de la superficie du bassin versant topographique, au drainage d'un massif karstique s'étalant sur l'Espagne et coupé de diaclases.

L'application de la méthode des résistivités, basée sur la relation entre les différents teneurs en minéraux dissous des eaux courantes et leur teneur en ions, a permis de localiser ces résurgences et d'évaluer leurs apports. Hydrospéléologie du Gave de Sainte-Engrâce : rivières souterraines Saint-Georges et Saint-Vincent s'écoulant tantôt librement, tantôt en charge; la première jusqu'alors inconnue et plus importante que la seconde, déjà explorée au Trou du Renard et au gouffre de la Peyre Saint-Martin. L'auteur étend la méthode d'investigation à l'hydrométrie de quelques cours d'eau pyrénéens par l'étude de corrélations entre les résistivités des eaux et les débits. Il définit l'indice minéralogique de solubilité et étudie la classification des bassins versants partiels suivant la nature minéralogique du sol.

L'auteur termine par un essai de détermination des conditions limites de vie des poissons dans les eaux douces. Loi d'adaptation progressive au milieu.

Water flowing from the Sainte-Engrâce Mountain torrent was dyed by fluoresceine injections into the Peyre St. Martin Swallow-hole in August 1952.

This process provided the explanation of the difference between the excess discharge of this torrent passing through the Licq-Athère power station and the discharges calculated from pluviometric data and from the area of the topographical watershed. It was found that the discrepancy is due to drainage from a karstic massif stretching towards Spain and cut by fissures.

The resistivity method, based on the relation between the mineral solution and the ion content in water currents, has been used to localize these springs and to estimate the amount of water they produce. Hydro-speological exploration of the Sainte-Engrâce torrent: the Saint-Georges and Saint-Vincent underground rivers sometimes flow freely and sometimes otherwise; previously unknown, the first and more important of the two rivers has already been investigated at the "Foxhole" and Peyre St. Martin swallow-hole.

The author extends the hydrometrical method of investigation of some pyrenean water courses by the study of correlation between the water resistivity and discharge. He defines the mineralogical index of solubility and studies the classification of partial watersheds in accordance with the mineralogical nature of the ground.

The author concludes by a study to determine the point at which conditions prevent the survival of fish in fresh water. Progressive law of adjustment.

PRINCIPE

La résistivité électrique des eaux de ruissellement obéit à des lois bien déterminées; mais, à notre connaissance, la documentation publiée, tant en France qu'à l'étranger, sur ce sujet, n'est pas très explicite (*).

(*) Toutefois, une étude due à Walton H. DUNUM, publiée en juin 1953 dans *Transactions, American Geophysical Union*, sur : « La relation entre les corps minéraux dissous et le débit de la rivière Saline, près Russell Kansas », montre que cette question est à l'ordre du jour en Amérique. L'auteur traite plus particulièrement des teneurs en substances minérales dissoutes dans un cours d'eau, en fonction des écoulements de surface et des apports d'eau de fond (sources salées). Il établit les relations existant entre les différents constituants dissous dans l'eau et la minéralisation totale exprimée par la valeur de la conductivité électrique.

Rappelons donc comment varie la résistivité des eaux courantes, reflet de leur minéralisation, et quelles sont les principales règles en la matière, que les mesures effectuées depuis ces dernières années nous ont permis de mettre en évidence.

1° Si l'on considère un cours d'eau théorique, sans apports intermédiaires entre sa source et son embouchure, comportant un lit fluvial de nature minéralogique homogène, on constate :

a) La teneur en sels dissous augmente de l'amont vers l'aval; par suite, la résistivité électrique d'une eau de ruissellement, qui est

l'inverse de sa conductivité, croît avec l'altitude; elle présente une valeur d'autant plus élevée qu'on se rapproche de la source.

b) Pour un régime déterminé d'un cours d'eau, la valeur de la résistivité d'échantillons d'eau, prélevés à une station donnée, est fonction :

- De la nature minéralogique du lit fluvial et de sa solubilité (nature des roches);
- De sa perméabilité et de la dimension des surfaces en contact avec l'eau (par exemple : lit alluvial ou radier rocheux) (état de division);
- De l'agressivité des rapports, qui dépend elle-même de leur degré de pureté et de leur teneur en CO_2 libre; exceptionnellement, en acide humique, nitrique ou sulfurique;
- De leur température et de leur turbidité.

d'eau et à la station d'échantillonnage, des valeurs différentes pour les résistivités.

Le résultat est le même s'il existe entre la source et la station d'échantillonnage des réserves d'eau importantes, naturelles ou artificielles, telles que lacs, barrages, dont la retenue peut modifier les lois de l'écoulement.

c) Pour des débits différents, la corrélation existant à une station déterminée entre les valeurs des résistivités et les débits est mise en évidence par le graphique (fig. 1), se rapportant aux mesures effectuées depuis 3 ans sur le gave de Pau en amont de Lourdes.

Théoriquement la valeur de la résistivité, à une station déterminée, croît en fonction du débit, suivant une expression complexe, qu'on peut, pour simplifier, admettre de la forme :

$$\rho \text{ à } 18^\circ \text{ en } \omega / \text{cm/cm}^2 = \rho_0 18^\circ + \alpha \cdot q$$

dans laquelle :

FIG. 1

Corrélations résistivités-débits du gave de Pau à la station de Geu-Pibeste

- Enfin, de la pente du lit à l'amont de la station et du périmètre mouillé, autrement dit, de la vitesse d'écoulement de l'eau et de sa durée de contact avec la roche.

Si l'on admet, à moins de modifications importantes du lit, que ces facteurs restent plus ou moins immuables ou ne varient que dans de faibles proportions, en fonction du temps, il résulte de ce qui précède que les valeurs des résistivités d'échantillons d'eau prélevés à une même station, pour un même débit, seront toujours sensiblement les mêmes.

En fait, l'origine des apports (fonte de neige, pluies, sources intermittentes) influe sur le facteur agressivité qui peut varier suivant la nature des précipitations et l'époque de l'année considérée; d'où la possibilité de trouver toutes choses égales d'ailleurs quant au débit du cours

$\rho \text{ à } 18^\circ$, représente la valeur de la résistivité correspondant aux conditions de l'échantillonnage, mesurée à la température de 18° centigrades;

α , un coefficient angulaire à déterminer;

q , le débit en litres/seconde du cours d'eau à la station;

$\rho_0 \text{ à } 18^\circ$, la valeur que prendrait la résistivité à la station pour un débit tendant vers zéro.

Nous avons choisi quelques exemples pour préciser comment cette formule, valable, en principe, pour un cours d'eau théorique, tel que défini ci-dessus, peut se trouver vérifiée dans la pratique.

Les points figurés sur les graphiques ci-contre (fig. 2) sont représentatifs des valeurs des résistivités en fonction des débits.

GRAPHIQUE A. — Se rapporte aux échantillons d'eau prélevés sur le gave d'Arrens à la station de Suyen (altitude 1.533 m), pour divers régimes, pendant la période comprise entre janvier 1951 et juin 1953. La station de jaugeage correspondante contrôle un bassin versant topographique de 24 km², d'altitude moyenne

FIG. 2

2.290 m, en majeure partie constitué par des granites. Il semble que la résistivité des eaux courantes à cette station varie suivant une loi simple, de la forme :

$$\rho = 27.800 + 6,9 \cdot q$$

Très approximativement, on pourrait donc déduire le débit du cours d'eau à cette station d'une simple mesure de résistivité :

$$q = \frac{\rho - 27.800}{6,9} \text{ litres/seconde.}$$

GRAPHIQUE B. — Se rapporte aux échantillons d'eau du gave d'Héas, à la station de Souarrou (altitude 1.306 m), pour la même période que précédemment. La station de jaugeage correspondante contrôle un bassin versant topographique de 56,6 km², d'altitude moyenne 2.120 m, en majeure partie constitué par des terrains métamorphiques : schistes primaires et migmatites. Loi de variation déduite du graphique :

$$\rho = 6.900 + 0,26 \cdot q$$

GRAPHIQUE C. — Se rapporte aux échantillons d'eau prélevés sur le gave de Pau à la station de Geu-Pibeste (altitude 394 m). Cette station con-

trôle un bassin versant topographique de 986 km², d'altitude moyenne 1.770 m, de nature minéralogique très hétérogène. Quoiqu'il en soit, si l'on s'en tient aux résistivités mesurées au cours du mois de mars, pendant deux années consécutives (1951 et 1952), leur valeur varie suivant une expression de la forme :

$$\rho = 5.600 + 0,0175 \cdot q$$

formule seulement valable pour les apports printaniers qui précèdent la fonte des neiges d'altitude.

Il est à noter que, dans les exemples choisis, les écarts à la moyenne sont presque toujours inférieurs à 10 %, ce qui paraît satisfaisant dans l'ensemble; il faut tenir compte, en effet, non seulement de la disparité des apports, quant à leur origine et à leur indice d'agressivité au départ, mais encore des erreurs notables qui affectent les mesures des débits et des résistivités.

Pratiquement, à défaut de détermination graphique (si l'on ne dispose pas d'un nombre suffisant de points de mesures), la valeur ρ_0 peut se déterminer pour le débit d'étiage observé qui se rapproche le plus du débit d'étiage absolu.

REMARQUES. — Bien que la conductivité et par suite la teneur (évaluée en mmg par litre de corps dissous dans l'eau) varient en raison inverse du débit, le chiffre de transport en matériaux dissous, à une station, est fonction du rapport : $1/[(\rho_0/q) + \alpha]$ et croît avec le débit.

En hautes eaux, l'influence du débit solide en suspension favorise la dissolution des fines particules transportées; de sorte que les valeurs de la résistivité à une station peuvent avoir tendance à se stabiliser et, exceptionnellement même, à diminuer pour des débits continuant à croître; — auquel cas, les chiffres de transport en minéraux dissous peuvent devenir considérables.

d) Indice minéralogique de solubilité.

De la valeur ρ_0 , on déduit la notion d'indice minéralogique de solubilité, applicable à un bassin versant, à une station déterminée d'un cours d'eau.

Pour des raisons d'application pratiques, il est commode de chiffrer cet indice par l'expression :

$$i_{ms} = \frac{10^5}{\rho_0}$$

la résistivité ρ_0 étant exprimée en ohms/cm par cm², à la température de 18° centigrades.

La valeur de l'indice est d'autant plus élevée que, pour des agressivités comparables de l'eau, le terrain est plus riche en constituants minéraux solubles, finement divisés.

Il est évident que ce terme n'est représentatif

de la minéralogie d'ensemble d'un bassin versant situé à l'amont d'une station, que si les échantillons d'eau analysés à l'étiage correspondent bien à l'échantillon moyen des apports naturels, sans avoir été pollués par des venues d'eau usagées ou industrielles.

A titre d'exemples, voici les limites approximatives entre lesquelles varie l'indice minéralogique de solubilité, selon la composition des terrains rencontrés par l'eau, pour des bassins versants supposés homogènes.

TABLEAU I

Valeurs limites de l'indice $i_{ms} = \frac{10^5}{\varrho_0}$

Nature minéralogique des terrains rencontrés en surface	Valeurs de l'indice i_{ms}
Terrains granitiques, ophite, gneiss et grès vosgiens.....	de 2 à 7
Schistes primaires, cornéennes, grès permien et aptien. Sables siliceux du pliocène, calcite, marbre, calcaires compacts et peu solubles.....	de 5 à 15
Caleschistes et terrains calcaires moyennement solubles.....	de 10 à 20
Terrains calcaires particulièrement solubles, entre autres : Calcaires délités du gothlandien. Calcaires fissurés du dévonien moyen et supérieur..... Calcaires du dinantien..... Calcaires dolomitiques et liasiques..... Calcaires et craies du crétacé.. Flysch calcaire et tous calcaires fissurés d'aspect karstique.... Sources carbonatées et bicarbonatées	de 20 à 80
Muschelkalk du trias (conchylien)	de l'ordre de 100
Gypse du trias (keuper moyen) et de l'éocène (ludien) (sources sulfatées)	de 100 à 500
Gîtes salins, correspondant à des sources chlorurées, très minéralisées	de 500 à 2.000

N. B. — Sous cette forme, l'indice i_{ms} représente la conductance, exprimée en mhos, d'une couche d'eau, de section uniforme : 1 m², sur 1 mm d'épaisseur, pour l'étiage absolu.

2° Pour un régime déterminé d'un cours d'eau, le gradient de résistivité entre deux stations — (diminution de la valeur de la résistivité de l'eau par kilomètre parcouru d'amont vers l'aval) — est fonction de la nature minéralogique du thalweg, du charriage de fond et du débit solide en suspension, enfin de la température et de l'agressivité résiduelle des apports.

Si l'on effectue une représentation graphique, le profil en long des résistivités en fonction des distances à la source, présente l'allure d'une ligne brisée, comportant des pentes plus ou moins fortes, suivant la solubilité et la finesse des matériaux rencontrés, avec toutefois une nette tendance à s'atténuer vers l'aval; ce qui s'explique aisément, compte tenu de la saturation de l'eau en sels dissous et de son agressivité résiduelle décroissante (fig. 3).

Au voisinage de son embouchure dans la mer un cours d'eau présente généralement un gradient de résistivité beaucoup plus faible que dans son cours moyen ou supérieur.

Pour des échelles comparables, le gradient de résistivité est d'autant plus élevé que la pente du graphique est plus forte.

FIG. 3

3° En pratique, la nature minéralogique d'un bassin versant est rarement homogène et les apports, au lieu d'être groupés à la source, se trouvent le plus souvent répartis entre divers affluents, qui présentent chacun une alimentation différente, tant du point de vue de leur pureté que de leur agressivité résultante.

C'est ainsi que l'alimentation d'un cours d'eau peut provenir à la fois :

- Des pluies, par ruissellement direct;
- Des sources et exurgences;
- De la fusion nivale;
- De résurgences de pertes et courants souterrains;
- De sources filoniennes, plus ou moins thermominérales.

Il en résulte que la minéralisation des apports peut être très dissemblable; dans ces conditions, la détermination des valeurs de leur résistivité fournira des indications précieuses sur leur origine probable.

C'est ainsi qu'au pays basque, un affluent rive droite du gave de Saint-Engrâce est alimenté par des apports bien différents, dont les sources, distantes à peine de quelques centaines de mètres, présentent à l'étiage les résistivités suivantes :

Ruisseau Armarilla...	11.000 $\omega/\text{cm}/\text{cm}^2$ à 18°
Source Zuguaia,	720 $\omega/\text{cm}/\text{cm}^2$ à 18°

Vérifications faites, le premier ruisselle dans les schistes primaires et éboulis du massif

FIG. 4

d'Igunce; l'autre, située en bordure du massif, correspond à une source d'affleurement écoulant les eaux collectées dans les gypses du trias des terrains secondaires avoisinants. Dans le cas envisagé, une simple mesure de résistivité permet de mettre en évidence ce qu'une étude géologique de détails aurait pu seule déceler.

Pour en revenir au profil en long des valeurs de résistivités, on conçoit que, vu la multiplicité

des apports, le graphique représentatif prendra une allure différente de celle de la figure 3.

Schématiquement, on peut le représenter comme ci-contre (fig. 4) :

On remarquera que tous les apports, quelle que soit leur origine, sont ainsi mis en relief par un décrochement parfois très marqué entre

FIG. 5

Profil en long des valeurs de résistivité à différents régimes d'un cours d'eau

Présentation schématique

les valeurs de la résistivité du cours d'eau à l'amont du confluent et sa valeur à l'aval. Les différences sont d'autant plus nettes que le dé-

FIG. 6. — Profil en long des résistivités

Valeurs limites des résistivités : du gawe du Marcadau, du gawe de Cauterets,
du gawe de Pau

années 1951, 1952, 1953

bit de l'affluent est relativement plus important et que la minéralisation des apports en sels dissous est plus dissemblable entre l'affluent et le cours d'eau.

4° Si l'on étudie, pour un cours d'eau déterminé, à différents régimes, les profils en long des valeurs de résistivité en fonction des distances à la source, on obtient un faisceau de lignes brisées ayant l'allure schématisée représentée à la figure 5.

On remarque que dans la portion aval du cours d'eau, les droites ont tendance à se rapprocher, tandis qu'elles sont plus inclinées et plus écartées dans son cours supérieur.

Les profils les plus intéressants à préciser seraient ceux qui correspondent à l'étiage absolu et au débit maximum de crue. Ils délimitent en effet les courbes — enveloppes des résistivités, de telle sorte qu'à une station quelconque A, les valeurs mesurées seront toujours comprises entre a' et a'' (fig. 5).

En pratique, on se contentera de déterminer des séries de mesures pour les régimes les plus caractéristiques d'un cours d'eau, en ayant soin de préciser l'époque à laquelle furent effectués les échantillonnages.

C'est ainsi que nous avons représenté : figure 6, les graphiques correspondants du gave de Pau entre Lourdes et Pierrefitte et de ses affluents d'amont : le gave de Cauterets et le gave du Marcadau, pour deux régimes distincts : crue de printemps et étiage d'hiver.

L'influence des sous-affluents et la prépondérance de certains d'entre eux est mise en évidence sur le graphique.

5° Reprenons le cas d'un cours d'eau recevant un affluent.

Si l'on a soin de prélever, suffisamment à l'aval du confluent, un échantillon d'eau représentatif du mélange homogène des apports et si l'on représente (fig. 7) par :

$q_1 \cdot \rho_1$ débit et résistivité du cours d'eau, à l'amont du confluent, en l/s et en ω/cm^2 ;

$q_2 \cdot \rho_2$ débit et résistivité de l'affluent;

$q \cdot \rho$ débit et résistivité de l'ensemble des apports bien malaxés et homogènes,

FIG. 7

il est facile de démontrer que les relations existant entre ces valeurs sont les suivantes :

$$q = q_1 + q_2$$

et en admettant, comme dans la figure, $\rho_1 > \rho_2$

$$\frac{q_1}{q} = \frac{\rho_1 (\rho - \rho_2)}{\rho (\rho_1 - \rho_2)}$$

$$\frac{q_2}{q} = \frac{\rho_2 (\rho_1 - \rho)}{\rho (\rho_1 - \rho_2)}$$

APPLICATIONS

Il résulte des règles énoncées précédemment que l'on peut, par simples échantillonnages et mesures de résistivité :

- Déceler tout apport notable dans un cours d'eau ou dans une retenue;
- En localiser l'émergence, s'il s'agit d'un apport non apparent;
- Déterminer la valeur relative de son débit, sans avoir à effectuer de jaugeage.

De plus, des mesures effectuées en période d'étiage renseigneront très rapidement sur la solubilité des roches et, souvent même, sur la nature des couches géologiques lessivées par les apports.

Enfin, la détermination du profil en long des résistivités sur un cours d'eau permettra de mettre en relief le régime de ses affluents et d'expliquer des anomalies apparentes, qu'une étude hydrologique superficielle n'aurait pas permis de déceler.

Dans des conditions favorables (résistivités des apports suffisamment dissemblables) les débits relatifs peuvent être déterminés à quelques % près en plus ou en moins. Il est toutefois indispensable de prélever l'échantillon moyen des apports après brassage, suffisamment en aval du confluent et de vérifier, par un double échantillonnage, rive droite, rive gauche, l'homogénéité de l'eau dans le profil en travers correspondant.

**A. — Classification
des bassins versants partiels
suivant la nature minéralogique du sol**

Nous avons déterminé l'indice minéralogique de solubilité des bassins versants élémentaires constituant le bassin du gave de Pau, dans son cours supérieur, en amont de Lourdes.

C'est ainsi que par ordre croissant de solubilité, nous trouvons les valeurs figurant au tableau II.

Si l'on se reporte à la carte géologique de la

partie dans les schistes et calcaires du houiller ou du dévonien.

tandis que les autres bassins versants correspondent à des formations géologiques plus hétérogènes et de plus en plus riches en éléments minéraux solubles, notamment :

Les Nos (17) et (19) qui se développent partie dans les terrains métamorphiques (migmatites et schistes maclifères du silurien), partie dans les calcaires et calcschistes du dévonien.

TABLEAU II

Valeurs de l'indice (i_{ms}) à différentes stations

N°	DÉNOMINATION	ALTITUDE station : m	SUPERFICIE B.V. : km ²	ALTITUDE moyenne des B.V. m	i_{ms}
1	Gave de Badet à Culaüs.....	1.520	3,1	2.520	3
2	Gave d'Arrens à Suyen.....	1.533	24	2.290	3,6
3	Las Arrius à Noubasséoube.....	1.260	5,7	2.170	3,7
4	Gave d'Aygues-Cluses à Las-Puntous.....	1.700	10,5	2.310	4,5
5	Gave de Cestrède à la prise d'eau.....	1.865	10	2.450	5
6	Gave de Lutour à la Fruitière.....	1.340	34,2	2.310	5
7	Gave de Lutour à Estom.....	1.804	11,6	2.440	5,3
8	Gave de Marcadau au Refuge.....	1.854	15	2.380	5,6
9	Gave de Jerret au Pont d'Espagne.....	1.440	63,2	2.240	6
10	Gave de Cestrède à Bué.....	1.433	16,6	2.270	8
11	Gave de Gaube à l'exutoire du lac.....	1.710	16,1	2.330	8,5
12	Gave de Cauterets au Pont de Fanlou.....	886	137,5	2.145	9
13	Gave d'Estaing à las Councès.....	1.123	38,5	2.000	12,5
14	Gave de Bastan à Haut-Barèges.....	1.274	57	2.140	13
15	Gave de Camphasque au Plateau.....	1.240	18,6	1.990	13
16	Ruisseau de l'Oule à Bué.....	1.493	2,6	2.100	13
17	Gave d'Aguila au Plateau.....	1.885	6,3	2.370	13,5
18	Gave d'Arrens au Pont d'Arrens.....	893	76	2.040	13,5
19	Gave d'Héas à Souarrou.....	1.306	56,6	2.120	14,5
20	Gave d'Aussou à Couylarous.....	1.400	38,5	2.210	16
21	Gave d'Estaubé aux Gloriettes.....	1.690	18	2.210	16
22	Gave de Holle à la Pahule.....	1.815	4,8	2.180	17
23	Gave de Bergons au Plateau.....	394	21	1.240	18,5
24	Gave de Pau à Geu-Pibeste.....	900	986	1.770	19

région considérée (fig. 8), on se rend compte que les bassins versants présentant l'indice i_{ms} le plus faible, c'est-à-dire :

Les Nos (1) (2) (3) et (4) se développent dans le granite homogène des massifs de Cauterets et du Néouvielle.

Le N° (5) dans le granite du massif de Cauterets et les schistes du carbonifère métamorphisés au contact (schistes maclifères, cornéennes, peu solubles).

Les Nos (6) (7) (8) (9) (10) (11) et (12) partie dans le granite du massif de Cauterets,

Le N° (21) pour les deux tiers dans les calcaires et calcschistes du dévonien, pour un tiers environ dans les calcaires du crétacé.

Quant au dernier, dont l'indice i_{ms} atteint 19, — le N° (24) — il est, de par sa superficie, très hétérogène. On y trouve en plus du granite des massifs de Cauterets et du Néouvielle, des formations importantes de terrains primaires qui s'étendent du silurien au carbonifère, ainsi qu'une petite zone de terrains secondaires coiffant les sommets du cirque de Gavarnie.

FIG. 8. — Carte géologique du bassin du Gave de Pau, en amont de Lourdes.

B. — Prospection des émergences Le gave de Saint-Engrâce et ses apports souterrains

Si l'on veut étudier le régime d'un cours d'eau, il est indispensable de connaître le régime de chacun de ses affluents pris en particulier.

La méthode préconisée sera donc précieuse pour rechercher les apports plus ou moins clandestins alimentant un cours fluvial : sources et résurgences intéressant les berges ou le lit alluvionnaire. Elle s'applique également dans le cas d'une retenue, notamment lorsque celle-ci est envahie par des alluvions qui empêchent d'en déceler les courants de fond et les apports souterrains.

Or, dans les pays calcaires, notamment, les apports clandestins sont souvent plus importants qu'on ne saurait l'imaginer; il s'ensuit que le régime des cours d'eau est en général mal connu, donnant lieu à des anomalies apparentes, *a priori* inexplicables.

L'un des exemples qui nous paraît le plus probant en la matière est celui du Saison supérieur, affluent rive gauche du gave d'Oloron. Formé par la réunion du gave de Larrau et du gave de Sainte-Engrâce, le Saison présente, en effet, un régime très particulier, dont les incidences vont s'atténuant vers l'aval, au fur et à mesure que s'accroît la superficie des bassins versants.

Il n'en est pas moins vrai qu'à Mauléon, le Saison présente un module spécifique de 61 l/s/km², incompatible avec l'altitude moyenne de son bassin versant. Le fait fut déjà signalé par FISCHER, dans son ouvrage magistral : *L'Adour et ses affluents*, paru en 1929; mais, l'auteur, faute peut-être d'une documentation suffisante, en cherchait l'explication dans « des précipitations moyennes d'autant plus copieuses que la perméabilité du sol est grande », en amont de cette station.

La mise en service de l'usine de Licq-Athérey, en 1917, permit de constater que cette hydraulicité abondante était imputable au gave de Sainte-Engrâce seul; il en résulte une anomalie d'autant plus singulière que le bassin versant capté est plus réduit. C'est ainsi qu'à la prise d'eau, pour un B.V. topographique de 61 km² seulement, le module annuel dépasse 9 m³/s; ce qui ferait ressortir un module spécifique de l'ordre de 150 l/s/km², tellement exceptionnel qu'il paraît inacceptable en France.

En fait, le gave de Sainte-Engrâce cache, sous des dehors modestes de surface, l'un des plus importants cours d'eau de tout le pays basque; aussi bien, n'est-ce pas sans raison que les habitants l'ont dénommé l'« Handi guci ibarra », le « ruisseau qui deviendra grand », car ce sont dans les 200 millions de m³ d'eau qu'il draine annuellement vers le Saison par des

galeries souterraines si bien dissimulées qu'elles avaient échappé jusqu'alors à la curiosité des hommes.

En 1952, la question du gave de Sainte-Engrâce peut se résumer comme suit :

— Apports importants mis en évidence par la production inespérée de la centrale de Licq.

— Débits naturels paraissant supérieurs aux débits de surface; la différence étant attribuée aux apports souterrains des résurgences de Kakouetta et de Bentia, depuis longtemps explorées par MARTEL. — En réalité, les apports de ces résurgences sont assez insignifiants; quant aux débits des cours d'eau superficiels en amont du barrage, ils sont beaucoup plus faibles que les estimations qui en avaient été faites.

Le problème reste donc entier et la découverte en août 1952 d'une rivière souterraine au fond du gouffre de la Peyre Saint-Martin, si elle excite la curiosité mondiale, n'apporte pas la solution cherchée puisque l'exsurgence n'en est point connue; ce qui conduit à admettre comme vraisemblable qu'une partie importante de son débit se perd en profondeur.

Une étude méthodique s'imposait donc; les recherches que nous entreprîmes, en décembre 1952, devaient permettre à nos chefs de se faire une idée plus précise des débits en jeu et de l'intérêt éventuel que ces apports pouvaient présenter du point de vue de l'équipement.

Notre premier objectif fut de déterminer la valeur des apports globaux à différents régimes, de mesurer avec exactitude les débits de surface correspondants et d'en déduire, par différence, la consistance des apports souterrains.

Les résultats obtenus, à la suite d'une campagne de jaugeages volants et les recoupements effectués au barrage permirent vite de se rendre compte de la prépondérance des apports souterrains sur les apports de surface, ceux-ci ne représentant, en moyenne, que 15 à 20 % des apports globaux à la retenue.

Pour aussi surprenante que soit, *a priori*, cette constatation, elle concorde assez bien avec la valeur des débits naturels qu'une étude de détail permet d'attribuer à chacun des b.v. constituifs du bassin topographique considéré.

Il fallait donc, en deuxième lieu, situer les zones d'aboutissement des courants souterrains, découvrir les résurgences inconnues et chiffrer, pour chacune d'elles, la valeur des débits relatifs par rapport à l'ensemble. C'est à cet effet que la méthode d'investigation, dont nous avons rappelé le principe, fut mise en œuvre, conduisant rapidement à des résultats positifs.

En vue d'établir le profil en long des valeurs

des résistivités et des températures de l'eau, en fonction des distances au barrage pour un même régime, des échantillons furent prélevés en divers points de la retenue et sur chaque affluent, en même temps que les températures étaient relevées, *in situ*, au dixième de degré près.

Dès l'examen des premiers graphiques obtenus, des anomalies flagrantes se firent jour, permettant de localiser sans hésitation les zones de résurgence :

- a) La plus importante, du moins à l'époque, se situait 130 mètres en aval du pont d'Enfer, rive gauche, dans une crique profonde dénommée localement « Llamina co Silour », le trou du sorcier;
- b) Un autre groupe correspondait au lit alluvial du gave, de part et d'autre de la grotte de Bentia, située rive droite. Les matériaux et alluvions qui encombrèrent la plaine de Benti-ibar et le lit du gave sur plusieurs mètres d'épaisseur forment un bouchon détritique au travers duquel s'infiltrèrent les eaux du courant souterrain; le déversoir de la grotte de Bentia ne jouant qu'un rôle de trop-plein;
- c) A signaler, enfin, une petite résurgence, 70 mètres en amont du pont d'Enfer, correspondant visiblement à un faible apport de la rive gauche. Pour ne pas avoir à y revenir, indiquons de suite que ce ruisseau souterrain se trouve sur le circuit d'un ancien puits, actuellement obstrué, qui fournissait, autrefois, de l'eau potable à la maison Rospide; la galerie souterraine en aurait été explorée par le propriétaire et conduisait à proximité immédiate du gave.

Nous nous attarderons plus longuement sur les résurgences (a) et (b), dont nous avons calculé les débits, déduits de nos mesures, à diverses époques de l'année; ceux-ci nous semblent caractéristiques du régime des apports à l'étiage comme en crue (tableau III).

OBSERVATIONS

Il est à noter :

1° Qu'en 1953, l'étiage d'été fut particulièrement sévère.

Qu'en crue, et toutes proportions gardées, l'accroissement des débits est plus important pour les rivières souterraines que pour les cours d'eau de surface.

2° Une corrélation remarquable existe entre les modules annuels du gave d'Aspe au pont d'Escot et ceux du gave de Sainte-Engrâce au barrage de l'usine de Licq; ce qui laisse supposer que les principaux apports de ces cours

TABLEAU III Gave de Sainte-Engrâce : Répartition des apports au barrage de l'usine de Licq (en l/seconde)

RÉPARTITION DES APPORTS	9-12 1952	20-2 1953	8-5 1953	9-5 1953 <small>matinée vers 2 h</small>	9-6 1953 <small>vers 2 h</small>	5-8 1953	18-8 1953	3-10 1953	10-10 1953	15-10 1953	4-11 1953 <small>vers 18 h</small>	11-11 1953
APPORTS DE SURFACE												
Uhaitxa et affluents rive droite.....	410	480	530	445	2.500	150	80	240	50	600	2.200	350
Gave de Kakouette.....	380	350	620	655	4.500	290	160	310	200	2.200	4.800	550
APPORTS SOUTERRAINS												
a) Rivière souterraine Saint-Georges.....	2.540	1.200	4.250	14.500	45.000	510	400	1.100	950	10.500	49.000	2.300
b) Rivière souterraine Saint-Vincent.....	860	700	1.650	3.200	20.000	620	450	700	400	6.000	20.000	1.000
Débit global au barrage.....	4.190	2.730	7.050	18.800	72.000	1.570	1.100	2.350	350	19.300	76.000	4.200
% des apports souterrains par rapport aux rapports globaux.....	81 %	70 %	84 %	94 %	90 %	72 %	77 %	77 %	79 %	85,5 %	91 %	79 %

FIG. 9

d'eau proviennent d'un même massif montagneux (massif d'Anie).

3° La rivière souterraine Saint-Georges semble drainer un bassin versant de plus grande superficie, mais d'altitude moyenne plus basse que la rivière souterraine Saint-Vincent.

4° Les résurgences du groupe (a) : rivière souterraine Saint-Vincent et pertes de l'Uhaïtxa réunies, sont instables quant à leur lieu d'émergence qui se trouve influencé par divers paramètres. Pour des cotes du plan d'eau à la retenue inférieures à 443 mètres et des débits de moins de 1 m³/s à résurger, elles se situent, comme nous l'avons déjà indiqué, dans le lit alluvial du gave, de part et d'autre de la grotte de Bentia fonctionnant comme trop-plein. Pour une cote au barrage supérieure à 446, le débit souterrain résurge 350 mètres plus à l'amont, au fond des gorges de l'Uhaïtxa, au lieu dit : « Perte du gave. » Pour des cotes intermédiaires et suivant l'importance des apports de la rivière souterraine Saint-Vincent, les débits se répartissent plus ou moins entre ces deux zones d'émergence. Fluctuations et anomalies apparentes résultent de l'état d'équilibre qui s'établit obligatoirement entre les pressions d'amont variables, — (galeries souterraines fonctionnant comme des éléments de conduite forcée), le niveau dans la retenue et les siphons d'émergence, plus ou moins obstrués par des bouchons détritiques : galets, sable et gravier.

Ceci établi, il était souhaitable, enfin, de déterminer le tracé des rivières souterraines, leur profil en long et leur périmètre d'alimentation, la vitesse de progression des apports, les hauteurs de chute utilisables, ainsi que l'importance des réserves naturelles, s'il en existait. Pour mener à bien cette étude, des essais de coloration à la fluorescéine, des prospections spéléologiques et de nombreux échantillonnages d'eau dans un périmètre étendu s'imposaient donc.

La carte (fig. 9) Hydrographie de la région de Sainte-Engrâce, fournit un résumé des résultats acquis à ce jour :

a) RIVIÈRE SOUTERRAINE SAINT-GEORGES (31-12-52)

A diverses reprises, nous avons exploré les moindres recoins de la crique dénommée localement « Llamina co Silour », sans y rencontrer d'autres indices de résurgence que des courants ascendants et des fonds de 12 à 15 mètres d'eau. Le 31 décembre 1952, au cours d'une tournée de prises d'échantillons, nous eûmes la bonne fortune de déceler au pied de la falaise, sous la paroi rocheuse surplombante, une ouverture de forme ogivale de quelques dm² de

surface, au ras de l'eau. Le lendemain, premier janvier, le niveau dans la retenue ayant encore baissé, l'ouverture était suffisante pour laisser passer un canot pneumatique monoplace et constituait un porche d'accès à une rivière souterraine aux dimensions et aux débits impressionnants.

Description sommaire

Rivière de 2,5 à 4 mètres de largeur, circulant dans une diaclase sur des fonds de 3 à 12 mètres pour la cote 438 à la retenue. Vitesse pouvant varier de quelques centimètres à plus d'un mètre/seconde, suivant régime et hauteur d'eau à la retenue. — Voûtes de 10 à 30 mètres de hauteur.

Longueur en ligne droite du porche d'accès au premier siphon : 44 mètres. Débarcadère rive droite. — Galeries et grottes sèches, avec salles de grandes dimensions, permettant de rejoindre la rivière et de franchir un deuxième siphon.

Exploration effectuée début 1953 sur 150 à 200 mètres, au total. A noter qu'à partir de la cote 438,3 au plan d'eau, il y a danger de trouver le porche d'entrée noyé au retour.

Une exploration, avec scaphandres, effectuée le 5 août dernier, alors que la retenue était pratiquement à sec, permit aux éclairieurs lyonnais de passer deux autres siphons et de progresser d'une centaine de mètres plus à l'amont.

L'une des caractéristiques de la rivière est de se développer en plan, par décrochements successifs en baïonnette vers le sud à chaque siphon, l'orientation générale de la diaclase demeurant W.SW ou plus exactement : ouest, avec un décalage d'environ 18 grades au sud. Il est probable que plus à l'amont, à la faveur d'un champ de failles ou d'un nouveau système de diaclases, l'orientation générale se trouve modifiée et s'oriente franchement vers le sud-est.

Caractéristiques de l'eau et du bassin d'alimentation

B.V. — Bassin versant d'une superficie comprise entre 60 et 100 km²;

i_{ms} = voisin de 22 (calcaires et schistes).

EAU. — Température : 7°5 à 8°3 suivant débit et nature des apports;

La température descend exceptionnellement en dessous de 7°, pour des débits importants correspondant à une fonte de neige d'altitude;

Résistivités à 18° cg : varient entre 5.300 et 8.500 ω cm/cm², suivant débit et nature des apports;

p_h à 20° cg : de 7,7 à 8,1;

Alcalinité : de 50 à 90 mgr Ca 0 par litre.

PHOTO N° 1

La rivière souterraine Saint-Georges au débarcadère

PHOTO N° 2

La rivière souterraine Saint-Georges à 40 m de l'entrée

PHOTO N° 3

La rivière souterraine Saint-Georges à la crrique

DÉBITS. -- Les débits observés au cours des neuf premiers mois de 1953 ont varié entre : 0,35 et $\sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$;

Extrêmes probables : 0,25 étiage absolu à $120 \text{ m}^3/\text{s}$ crue centenaire;

Module annuel : de l'ordre de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Son tracé souterrain et son périmètre d'alimentation restent à préciser.

Toutefois, ce sont les hauts plateaux et les vals espagnols situés à l'ouest de la crête frontière du Pène Blanque au pic d'Ansabère, culminant à la pointe des Trois-Rois (2.484 m d'altitude) qui semblent être à l'origine des apports les plus abondants.

RÉGIME. -- Alimentée en partie par des bassins versants probablement arides en été, d'orientation générale sud-ouest, d'altitude moyenne inférieure à 1.800, cette rivière souterraine a un régime « nivo-pluvial » avec maximum en mai, et coefficients de débit plus élevés en avril qu'en juin.

L'étiage d'été se caractérise comme étant nettement plus sévère que l'étiage d'hiver.

b) RIVIÈRE SOUTERRAINE SAINT-VINCENT (18-4-53)

La première exploration du « trou du renard » (Hachei-Silour) remonte au 20 mars 1953. Ce n'est qu'à la huitième tentative, le 18 avril, que MM. GARCIA et RAVIER parvinrent à rejoindre la rivière souterraine, dont ils soup-

onnaient l'existence, vers la cote 460, soit environ 130 mètres en altitude plus bas que l'orifice d'entrée.

Description sommaire

L'accès à la rivière s'effectue par une crrique latérale, débouchant dans une galerie orientée du sud-est au nord-ouest. Le tunnel occupé par la rivière est large de 5 à 6 mètres et présente des fonds variant de quelques mètres à plus de 16 mètres au siphon d'amont. Les murailles latérales plongent au sud-ouest, avec des voûtes dominant le plan d'eau de 15 à 20 mètres. Ceci n'est vrai que pour de faibles débits inférieurs au $\text{m}^3/\text{seconde}$. La rivière subit, en effet, des variations de niveau considérables, les galeries souterraines se mettant en charge pour évacuer des débits plus importants. C'est ainsi qu'à diverses reprises, nous avons observé des variations du plan d'eau de plus de trois mètres à l'heure, se prolongeant sur plusieurs heures.

Entre le 7 et 9 juin 1953, le niveau de l'eau dans la crrique latérale et les puits d'accès à la rivière, monta de 55 mètres, atteignant la cote 525, délogeant échelles et canots pneumatiques de la plate-forme, où nous pensions les avoir mis en sûreté. Il est vrai que le 9 juin entre 0 et 3 heures du matin, la rivière souterraine Saint-Vincent eut à évacuer un débit de l'ordre de $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

D'après des renseignements qui paraissent di-

PHOTO N° 4
Une des salles d'accès à la rivière souterraine Saint-Vincent

PHOTO N° 5
La rivière Saint-Vincent au « trou du renard » (115 m en dessous du niveau du gave)

gnes de foi, un véritable torrent aurait brusquement surgi du « trou du renard » en novembre 1929, le phénomène dura près d'une journée, puis tout rentra dans l'ordre. S'il en est bien ainsi, la rivière Saint-Vincent se serait mise en charge sous plus de 130 mètres d'eau, ce qui paraît considérable; il est à noter qu'à la même date le débit estimé au barrage ne dépassa pas 80 m³/s, dont la moitié provenant de la rivière souterraine Saint-Vincent.

Tout se passe comme si, la pente de son lit étant insuffisante, la rivière souterraine devait se mettre en pression pour évacuer ses apports à travers les « étroitures » d'aval.

Ceci explique les brusques montées d'eau dans la retenue, les variations de débit se transmettant de façon presque instantanée, comme dans une conduite forcée, entre la chambre de mise en charge et les résurgences du groupe (a). Il en résulte que l'étalement des crues est peu considérable et ne correspond qu'au volume d'eau mis en réserve pendant la mise en pression, par remplissage des poches et grottes souterraines.

En regard de cette propagation rapide des accroissements de débit, il est intéressant de mettre en parallèle le temps nécessaire à l'eau pour franchir le même parcours, soit 2 km 3 environ entre trou du renard et exsurgence d'Uhaïtxa, en période de hautes eaux :

7 h 30, d'où une vitesse moyenne de 8,5 cm/s. (Essai fluorescéine nuit du 1^{er} au 2 juin 1953, débit de l'ordre de 15 m³/s.)

Caractéristiques de l'eau et du bassin d'alimentation

B.V. — Bassin versant d'une superficie probable de l'ordre de 40 km²;

i_{ms} = voisin de 22 (calcaires du crétacé et schistes).

EAU. — Température : 8° à 9° 8 suivant débit et nature des apports;

Résistivités à 18° cg : varient entre 5 400 et 8 000 suivant régime;

p_h à 20° cg : de 7,8 à 8,0;

Alcalinité : de 50 à 90 mgr Ca O par litre.

Ces chiffres se rapportent à des échantillons prélevés au « trou du renard ».

Pour un même régime d'étiage, des échantillons prélevés à divers endroits le long de la rivière souterraine ont donné respectivement les valeurs suivantes de résistivité :

A la Peyre-Saint-Martin :

Au droit de la « salle Marcel
Loubens » 6 480 ohms/cm/cm²

A la Peyre-Saint-Martin :

Au droit de la « salle de La
Verna » 6 170 ohms/cm/cm²

Rivière Saint-Vincent :

Au « trou du renard » ... 5 530 ohms/cm/cm²

Rivière Saint-Vincent :

A la résurgence de Bentia. 4 200 ohms/cm/cm²

Il est à noter, enfin, que les propriétés physiques de l'eau, pour la rivière Saint-Vincent, au « trou du renard » sont assez voisines de celles de la rivière Saint-Georges à la résurgence du « trou du sorcier ». Toutefois, les températures de la première sont plus élevées, ce qui laisse supposer un séjour sous terre prolongé. On peut admettre aussi que l'élévation de température due aux chutes d'eau n'est pas négligeable.

Tracé souterrain et périmètre d'alimentation

A la suite de la dernière expédition de la Peyre-Saint-Martin et des découvertes effectuées par l'équipe de pointe, le tracé en plan de la rivière souterraine est à peu près connu sur les 2,500 km que jalonnent les salles parcourues par les spéléologues. L'orientation générale d'amont vers l'aval est nord-ouest, avec décrochements, tantôt au nord, tantôt vers l'ouest, pour aboutir, en définitive, à la salle de La Verna où l'eau se perd à une cote voisine de 960 m à l'étiage.

Dans la partie aval, le cours de la rivière souterraine est suffisamment jalonné également, sur 2,700 km environ, par :

— Le trou du renard, situé rive gauche, vis-à-vis et un peu en aval de l'église Sainte-Engrâce;

— Un puits d'absorption, situé rive droite, face à la « Maison Ardoy »;

— La perte du gave, au fond des gorges de l'Uhaïtxa.

Enfin :

— La grotte de Bentia.

Il est à noter que la rivière souterraine de Saint-Vincent traverse le gave de Sainte-Engrâce, 110 mètres environ en dessous du thalweg, entre le pont d'Hachei-Silour et la « maison Constantin ». Sa direction est alors nord-ouest; à partir de là, cet affluent, né rive gauche, développe son cours souterrain rive droite; c'est vraisemblablement le synclinal d'un pli couché et le contact avec les schistes du houiller qui l'obligent à obliquer sa route vers l'ouest pour venir marier, au droit d'une diaclase, ses eaux profondes avec les apports de surface de l'Uhaïtxa.

Reste à explorer la portion intermédiaire du tracé souterrain, située entre le « trou du renard » et la « salle de La Verna »; soit, en plan, 2 km, comportant une chute de 500 mètres environ en altitude. C'est dans cette zone qu'à la

suite des essais à la fluorescéine effectués cet été, se situerait une réserve d'eau, dont on peut évaluer le volume à plus de 500 000 m³. La réserve est sans doute plus importante, car tout concorde pour faire estimer le chiffre précédent comme un minimum.

Quant à son cours supérieur, on peut estimer que la rivière souterraine, à l'amont du gouffre Lepineux, prend naissance dans le massif d'Anie et draine de nombreux apports, tant français qu'espagnols; son périmètre d'alimentation s'étend, en effet, de part et d'autre de la crête frontière, au sud du pic d'Arlas, sur les Arres de Camp-Long et d'Anie en France, sur les « Grandes Vallées » (Llano Carreras et Puerlos d'Arlas) en Espagne.

DÉBITS. — Les débits observés depuis mai 1953 ont varié entre : 0,3 m³/s (étiage) et ~ 20 m³/s (crue);

Module annuel probable : de l'ordre de 2 m³/s.

RÉGIME. — Alimentée par des bassins versants d'altitude moyenne relativement élevée, de l'ordre de 2 000 mètres, cette rivière souterraine présente un régime du type « nival de transition », avec maximum en mai et coefficients de débit plus forts en juin qu'en avril.

Pour compléter les données hydrologiques relatives à ces deux rivières, il paraît utile de donner un aperçu géologique des régions où se développe leur cours souterrain.

Nous emprunterons à M. le professeur CASTERAS, de la Faculté des Sciences de Toulouse et à son collègue espagnol, M. le professeur LLOPIS LLADO, directeur de l'Institut de géologie de l'Université d'Oviedo, une part importante des renseignements qui vont suivre.

Alors que le massif granitique affleure en forêts d'Issarbe et de Benho et que les terrains anciens du paléozoïque se trouvent recouverts sur la rive droite du gave de Sainte-Engrâce par des lambeaux discontinus de marnes et de gypse du trias, la rive gauche est occupée, presque entièrement, par un important massif calcaire crétacé qui s'étale largement sur l'Espagne (Haute-Navarre et Aragon).

Toutefois, les affleurements d'un « lambeau exotique silurien » au signal de Lacoura et au nord-est d'Hiscondisse, laissent supposer que le massif granitique, enraciné au nord de Sainte-Engrâce, se poursuit sous la rive gauche du gave en direction des granites des Eaux-Chaudes.

Les schistes du Carbonifère qui le recouvrent apparaissent nettement au sud du pic d'Anie, depuis le col d'Anaye jusqu'au col du lac d'Ansabe; on les retrouve également à la salle de La Verna, formant le lit de la rivière souterraine et, plus à l'ouest, à basse altitude, dans le bassin du gave de Kakouetta.

Ils sont masqués, en surface, dans toute la région médiane, par le puissant massif du crétacé supérieur, dont les calcaires et les flysch calcaires, lapiazés et diaclasés à grande profondeur, s'étendent, tant en France qu'en Espagne, sur un périmètre étendu : Bracas de Guillers, Arres de Léas-Athas, de Camplong et d'Anie, grandes vallées frontalières, Rincon de Belagua, Bichitos et Sierra-Longa forment un vaste quadrilatère de plus de 70 km² de superficie, dominé à l'est par des pics relativement élevés, depuis le Soum-Couy (2 302) et le pic d'Anie (2 504) au nord, jusqu'à la pointe des Trois-Rois (2 484) et le pic de l'Acherito (2 312) au sud. C'est sur ce rideau montagneux, tendu en travers de leur progression, que les systèmes nuageux, venus de l'Atlantique, déversent d'abondantes précipitations atmosphériques.

Si l'on observe que tout le bassin de réception correspondant est constitué par des terrains perméables en grand, qui plongent en direction nord-ouest et reposent en discordance sur les schistes dinantiens du carbonifère, de même inclinaison, mais parfaitement imperméables et collecteurs naturels des eaux engouffrées en surface, il est normal de penser que toutes les eaux recueillies à la base du massif calcaire sont drainées vers la France, le gave de Sainte-Engrâce en devenant le principal bénéficiaire. La pente générale étant fixée, diaclases et failles facilitent, en effet, le rassemblement des eaux qui s'écoulent dans les gouttières naturelles des plis de terrain.

Avant de terminer ce chapitre, il nous faut insister sur le travail intense de désagrégation, par corrosion chimique et érosion, qu'effectuent les eaux en profondeur. Provenant de la fonte des neiges en altitude, ces eaux sont pures, chargées en gaz carbonique libre et par suite agressives; elles trouvent dans les calcaires un matériau de choix à attaquer, qu'à la longue elles dissolvent comme du sucre; le seul résidu est cette argile de décomposition qui se rassemble au fond des gouffres, pour former, avec sables et graviers entraînés par les eaux, de véritables bouchons détritiques.

Favorisé par des champs de failles et de diaclases, le travail de perforation s'effectue par étages et des lits successifs d'un même cours d'eau souterrain, crevés les uns après les autres, ont été creusés au cours des âges; d'où un extraordinaire dédale de grottes, de salles, de puits et de galeries sèches, avant de parvenir au lit définitif installé au contact des calcaires avec les roches imperméables sous-jacentes. Encore le contact n'est-il pas toujours franc : conglomérats à galets et débris dérivés du substratum s'accumulent dans les étroitures et obligent la rivière à filtrer au travers, provoquant, lors des

crues, des mises en charge et des montées d'eau subites noyant les salles supérieures.

C'est une œuvre géante qui s'accomplit en profondeur. L'abbé GAURIER, le savant limnologue pyrénéen, rappelle dans un de ses ouvrages, que le poète a justement glorifié, cette « goutte d'eau »

*Qui fait sa volonté dans la montagne, et va,
Vient, soumettant le marbre à ses lois triomphantes,
Et passe entre deux plans, et glisse entre deux fentes
Et démolit, et sculpte, infatigable main.
Urne hier, aujourd'hui réservoir, lac demain
L'œuvre augmente et s'enfonce, et l'œil qui veut la suivre
Croit voir un trou qu'un ver fait aux pages d'un livre.*

Ce livre où nous essayons de lire quelque chose, c'est l'écorce terrestre et Victor Hugo a su rendre, par une saisissante image, cet enfouissement progressif et inévitable des eaux dans les feuillets du sol.

Quant aux émergences, le poète ne s'en soucie pas ! C'est sans doute qu'il ignorait les techniques modernes, conséquences des découvertes de MARTEL, et la méthode de prospection, objet de notre étude, basée sur les mesures de résistivité des eaux courantes.

C. — Conditions limites de vie des poissons dans les eaux douces

LOI D'ADAPTATION PROGRESSIVE AU MILIEU

1° Le problème n'est point de notre ressort ; il est plutôt du domaine de l'Administration des Eaux et Forêts.

Il nous paraît, toutefois, intéressant de signaler la corrélation certaine qui existe entre l'absence totale de poissons dans certains lacs de montagne et les valeurs élevées atteintes par la résistivité des eaux qui s'en écoulent.

En d'autres termes, il semble que les poissons ne puissent vivre dans des eaux trop pures. M. VIBERT, ingénieur des Eaux et Forêts à Oloron, me signalait dernièrement que, d'après une étude américaine, « on ne trouvait pas de poisson lorsque la conductibilité électrique était inférieure à 50 mhos 10^{-6} à 25° ».

Cette assertion semble être en désaccord avec les observations que j'ai pu faire dans les massifs granitiques des Pyrénées françaises.

C'est ainsi que le gave du Marcadau, au droit du refuge, vers la cote 1850, et le gave d'Arrens, au lac de Suyen, sont très poissonneux.

Il en est de même du lac d'Arratille (alt. 2 252 m), des lacs d'Estom (alt. 1 804 m) et des Oulètes d'Estom-Soubiran (alt. 2 452 m), du lac de Cestrède (alt. 1 962 m) et des lacs d'Aygues-

Cluses qui s'étagent entre 2 196 m et 2 312 m d'altitude.

Pourtant, la conductivité de leurs eaux, sauf peut-être à l'étiage, est presque toujours inférieure à 50 mhos 10^{-6} à 25° eg ; valeur qui correspond à une résistivité de l'ordre de :

$$23\,250\ \omega/\text{cm par cm}^2 \text{ à } 18^{\circ} \text{ eg.}$$

Il semble donc que la conductivité limite soit inférieure au chiffre annoncé. Pour essayer d'en fixer la valeur, nous citerons maintenant les lacs, dépourvus de poisson, dont la pureté des eaux est telle qu'ils nous paraissent susceptibles de faire échec à tout essai d'empoissonnement.

Ce sont :

Dans le massif d'Ardiden : le lac Badet (alt. 2 569 m) ; les lacs de Bastampe (alt. 2 021 m) ; le lac d'Antarrouyes (alt. 2 009 m) ; et le lac Noir de Cestrède (alt. 2 330 m).

Dans le massif du Balaïtous : le lac de Migoëlou (alt. 2 256 m) ; et le lac de Bat-Crabère (alt. 2 180 m).

Les considérations d'altitude et de rigueur du gel en hiver ne paraissent pas jouer ici un rôle prépondérant. C'est ainsi que le lac de Litouèse (alt. 2 079 m), qui se trouve encadré sur le terrain par les lacs d'Antarrouyes (alt. 2 009 m) et de Bastampe (alt. 2 027 m), est poissonneux, bien que situé dans un vallon particulièrement enneigé et glacial en hiver, à plus haute altitude que ses deux voisins.

Si l'on se réfère aux exemples déjà cités et aux mesures de résistivités effectuées à différents régimes des apports dans ces lacs, il semble que les conditions limites de vie pour les poissons se situent entre 30 000 et 60 000 $\omega/\text{cm par cm}^2$, suivant qu'il s'agit de débits d'étiage ou de crue.

En eaux moyennes, nous ne connaissons pas d'exemple de lac poissonneux, dont la résistivité dépasse 40 000 $\omega/\text{cm par cm}^2$ à 18° eg.

Ces chiffres sont assez éloignés de ceux publiés en Amérique.

Toutefois, il semble logique de penser que certaines variétés de poissons résistent mieux que d'autres dans les eaux pures et qu'une adaptation progressive des alevins dans ces eaux pourrait constituer une des conditions de succès.

C'est pourquoi l'époque de peuplement peut-elle jouer un rôle déterminant. *A priori*, il semble que la période la meilleure, du moins pour les lacs et les cours d'eau qui se trouvent au voisinage des valeurs de conductivité limites, serait celle qui correspond à l'étiage d'été. Au contraire, il y aurait intérêt à éviter les mois de fonte nivale, au cours desquels les résistivités ont tendance à croître, car ils placent de suite

les alevins dans des conditions de vie trop sévères, auxquelles ils n'ont pas le temps de s'adapter.

Il semble, en particulier, que les alevins de truites, tant qu'ils n'ont pas résorbé leur vésicule, soient particulièrement sensibles à l'action d'eaux très pures provenant de la fonte des neiges; soit que leurs organes trop fragiles résistent mal à l'agressivité accrue des eaux, soit qu'ils succombent à une déminéralisation excessive du fait qu'ils n'ont pas encore acquis un pouvoir d'absorption suffisamment actif vis-à-vis des ions indispensables à leur croissance.

2° Sur un autre plan, cette loi d'adaptation progressive au milieu pourrait jouer également un certain rôle dans les migrations de poissons qui, à l'époque précédant le frai, remontent de la mer dans les eaux douces. Nous pensons plus particulièrement aux saumons et à leur migration de montée dans les gaves pyrénéens.

Si l'on considère qu'ils parcourent une centaine de kilomètres depuis la mer, avant d'atteindre leur but, on peut se demander, en effet, quels sont les facteurs physico-chimiques qui peuvent jouer le rôle de guide pour conduire ces poissons toujours aux mêmes zones de frayères.

Une étude qui m'a été communiquée, il y a quelques mois, due à la collaboration de M. FONTAINE, professeur de Physiologie au Muséum, et de M. VIBERT, ingénieur au Service des Recherches Piscicoles de la Direction des Eaux et Forêts, m'a paru suggestive à ce sujet et leurs mesures relatives au gradient de salinité dans les gaves fréquentés par les saumons, risquent, pour autant qu'elles soient poursuivies, d'être riches en observations intéressantes.

Toujours est-il que teneur en oxygène accrue, fraîcheur et salinité modérée semblent être les facteurs vivifiants que recherchent les saumons au moment du frai; mais le bon sens laisse supposer que leurs organes ont besoin de s'adapter progressivement à ces nouvelles conditions de vie, bien différentes de celles du milieu qu'ils ont quitté.

C'est pourquoi serions-nous assez enclin à penser qu'au confluent de deux rivières, suivant en cela l'exemple de la nature — (*natura non fecit saltus*) — le saumon, qui remonte le courant, suit d'instinct le cours d'eau dont les caractéristiques physico-chimiques ne sont pas trop différentes de celles qu'il quitte, tout en se rapprochant, par quelques données (température, salinité ou autre) de celles vers lesquelles il tend. Autrement dit, à condition que les différences

ne soient pas trop marquées, son choix à la montée se portera, de préférence, sur les eaux les plus fraîches et les plus oxygénées présentant une minéralisation progressivement décroissante d'aval en amont; et ce, jusqu'à une salinité optimale correspondant à une résistivité de l'ordre de 5 600 à 6 000 $\omega/\text{cm}/\text{cm}^2$ en période de frai.

Les caractéristiques physico-chimiques pouvant changer, suivant le régime des apports, au confluent de deux cours d'eau, c'est peut-être ce qui explique le caractère un peu variable des migrations d'une année sur l'autre, bien qu'en général, les zones de frayères les plus fréquentées restent pratiquement les mêmes pendant de longues périodes d'observations.

Enfin, d'autres paramètres variables : teneur privilégiée en certains cations, taux d'acide carbonique, indice d'agressivité, turbidité des eaux en période de crue, peuvent influencer sur le choix des saumons, au moment d'opter entre deux courants; mais rien n'indique que ces facteurs aient une action prépondérante et correspondent aux impératifs biologiques qui déterminent de façon inéluctable la montée des saumons.

L'hypothèse que nous avons faite précédemment mériterait donc d'être contrôlée. Aussi, du moins en ce qui concerne les cours d'eau bénéficiant de migrations annuelles, serait-il intéressant d'établir des profils en long relatifs aux valeurs des températures, des résistivités et des teneurs en oxygène des eaux, en fonction des distances à la mer. Les mesures seraient à effectuer pour les régimes les plus caractéristiques d'hiver et de printemps, en prenant soin de noter, pour chaque série d'observations, les débits relatifs des cours d'eau à chaque confluent.

Il est probable que l'examen des graphiques obtenus permettrait de se faire une idée plus exacte des facteurs-guides qui conditionnent la montée annuelle des saumons dans les fleuves jusqu'aux zones de frayères.

Conclusion

Pour conclure cet exposé, les mesures de résistivité des eaux nous ont conduits dans des domaines bien différents, passant tour à tour de la minéralogie à l'hydrographie souterraine, de la limnologie à la pisciculture. On ne saurait s'en étonner : l'Hydrologie est une science complexe qui ne saurait se contenter d'horizons trop étroits; car l'Eau, objet de son étude, est un élément primordial, toujours en activité, source universelle de vie et cause d'incessantes modifications dans la nature.

DISCUSSION

Président : M. HUPNER

M. le Président remercie et félicite M. RAVIER de son intéressante conférence et du rôle actif et particulièrement brillant qu'il joue dans le domaine de la recherche spéléologique où il y a beaucoup à faire, pour la S.H.F. au point de vue de l'hydrologie.

Sur sa demande, M. RAVIER indique :

1° Qu'en ce qui concerne les mesures de débit, l'emplacement où on prélève l'échantillon d'eau doit être choisi avec soin, car de lui dépend la précision du jaugeage : à l'amont des confluent, où les eaux sont brassées depuis longtemps, la résistivité est très homogène, tandis qu'à l'aval des confluent, il faut se placer à une certaine distance qui est fonction du brassage et donc du débit estimé : pour les cours d'eau pyrénéens, et des débits de 1 à 10 m³/s, la distance optima est de l'ordre de cent cinquante mètres à l'aval du confluent. D'une manière générale, il faut s'éloigner des dérivation et éviter les zones d'eau morte, comme dans la méthode chimique. Une simple mesure des résistivités en quelques points d'un profil en travers permet de se rendre compte, sur place, si le brassage est suffisant.

Ces précautions n'échappent pas à un ingénieur expérimenté, et quand elles sont prises, le coefficient cherché peut être déterminé à quelques pour-cent près.

2° En pays granitiques notamment, les décrochements que présentent aux confluent les graphiques de résistivité sont toujours importants et ne sauraient être confondus avec l'erreur d'échantillonnage : les résistivités en jeu étant de l'ordre de 15 000 à 50 000 ohms, les gradients relatifs aux variations de débit sont de l'ordre de 7 000 à 8 000 ohms, et apparaissent donc très nettement.

3° A la source du cours d'eau, en terrain granitique la résistivité est très élevée et se rapproche du maximum de l'ordre de 100 000 ohms/cm/cm² correspondant à l'eau distillée (lacs Badet et Migouélou dans les Pyrénées). D'amont en aval, la résistivité décroît lentement en terrains granitiques (gaves de Cestrède et d'Antarrouy en amont de la prise) et brusquement dès que le cours d'eau pénètre en terrain calcaire (gave de Cestrède en aval de la perte).

Il en résulte que les pertes, résurgences et les captages artificiels apparaissent très nettement sur le graphique.

Répondant à une question de M. Christian BEAU sur la mesure des débits absolus, M. RAVIER précise que la méthode de résistivité permet de mesurer, d'une part les débits relatifs des cours d'eau, comme indiqué dans le mémoire, d'autre part les débits absolus connaissant le débit d'un affluent qui, d'ailleurs, peut être constitué artificiellement par une solution saline injectée à débit constant dans la rivière ; ce dernier procédé, appliqué au Gave de Pau, a donné des résultats exacts à 7 % près.

D'autre part, M. Christian BEAU demande si, dans l'étude du développement des races de poisson en fonction de la résistivité on a pu déceler simplement l'influence de la minéralisation ou si d'autres causes ont pu être distinguées telles que l'oxygénation de l'eau, ou son ionisation par la lumière du jour.

M. RAVIER avoue que son incompetence en physiologie ne lui permet pas de répondre à cette question : toute-

fois, le fait que certaines rivières souterraines sont peuplées de quantités d'animalcules et même de tritons, sangsues et poissons, semble prouver que la lumière du jour n'est pas indispensable à la vie animale.

M. le Président rappelle que les poissons sont aussi très sensibles au champ électrostatique, ce qui permet de les écarter des prises d'eau d'usines (en Allemagne) ou de les attirer pour la pêche.

Sur la demande de M. SCHLAG, M. RAVIER précise que l'appareil employé pour la mesure de la résistivité est du type Philips, modifié par l'adjonction de résistances-étalons s'étageant entre 500 et 50 000 ohms, et additionnables, de manière à obtenir une sensibilité variable. Les électrodes sont conservées dans l'eau distillée, de façon à éviter tout dépôt calcaire.

M. LANGLOIS pense que la mesure indirecte des débits absolus par résistivité permet notamment de mesurer les débits des résurgences auxquelles il n'est pas possible d'appliquer d'autres méthodes de jaugeage.

M. RAVIER confirme le point de vue de M. LANGLOIS et précise qu'en ce qui concerne le Gave de Sainte-Engrâce les résultats ainsi obtenus sont recoupés avec les débits des affluents de surface qui sont très nombreux sur la rive droite du gave étudié. La constance des résistivités, et des pH de ces affluents pour un régime donné, est vérifiée à moins de 1 % près.

M. LANGLOIS dit qu'on constate, dans les eaux de mer, des migrations de certaines espèces de poissons en rapport avec la température et la salinité des eaux, toutes choses liées à la résistance. D'autre part, le plancton, nourriture du poisson, ne vit que dans certaines eaux.

M. RAVIER précise que, d'après un article de M. FONTAINE, professeur au Muséum, ces migrations sont dues à de véritables impératifs biologiques et liées au pouvoir de fixation en ions, qu'ont certaines espèces à certaines époques de leur vie.

M. BONNIN signale que le Service des Etudes et Recherches hydrauliques de l'Electricité de France étudie un appareil de mesure de résistivité environ 10 fois plus précis que ceux existant actuellement. Cet appareil, en cours de mise au point, sera mis à la disposition de M. RAVIER dans quelques mois.

M. RAVIER remercie M. BONNIN de ce concours qui permettra une extension de la méthode de jaugeage par mesure de la résistivité, susceptible, parallèlement à la méthode chimique, de suppléer les jaugeages au moulinet dans les cours d'eau de montagne.

Sur la demande de M. le Président, M. RAVIER indique qu'à la Pierre-Saint-Martin, le débit venant d'Espagne est, en fait, beaucoup moins important qu'on aurait pu le supposer d'après les informations de presse : la plupart des affluents de cette rivière souterraine prenant leur source en France, dans les arres d'Anie et de Camplong.

M. le Président souligne l'intérêt que donne à l'exposé le nombre des questions posées et souhaite que d'autres communications soient présentées par M. RAVIER.