

# **Colloquium Geographicum**

ISSN 0588-3253

Band 7

## **Influences de la perméabilité sur le régime des rivières**

von

**Maurice Pardé**

1965

Bonn

# Colloquium Geographicum

Vorträge des Bonner Geographischen Kolloquiums  
zum Gedächtnis an Ferdinand von Richthofen

herausgegeben vom Geographischen Institut der Universität Bonn  
durch Carl Troll

Schriftleitung: Hans Voigt

---

Band 7

Maurice Pardé

## Influences de la Perméabilité sur le Régime des Rivières



1965

---

In Kommission bei

Ferd. Dümmlers Verlag · Bonn

**M. Pardé, Influences de la Perméabilité sur le Régime des Rivières**

# Influences de la Perméabilité sur le Régime des Rivières

von

Maurice Pardé



In Kommission bei

Ferd. Dümmlers Verlag · Bonn

 **ümmlerbuch 7404**

**Gedruckt mit Unterstützung der Freunde und Förderer der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn**

**Alle Rechte vorbehalten**

**Druck: Richard Mayr, Würzburg**

## Vorwort des Herausgebers

Die Entwicklung der Hydrologie am Geographischen Institut  
der Universität Bonn

C. TROLL

Aus der Erkenntnis heraus, daß die weltweiten und lokalen Fragen der Hydrologie und des Wasserhaushaltes im Lehr- und Forschungsbetrieb der Geographie, aus der sie in früheren Jahrzehnten hervorgegangen sind, ungenügend gepflegt werden, hat das Geographische Institut der Universität Bonn seit dem Jahre 1947 diesen Fragen ein besonderes Augenmerk zugewandt. Die Aufgabe wurde im besonderen von Herrn Professor Reiner KELLER übernommen und durch seine eigenen Forschungen und die seiner Schüler sowie durch Zusammenarbeit mit Institutionen des Bundes und der Länder wirkungsvoll vorangetrieben. Er übernahm später auch die Leitung der Abteilung für Hydrologie und Klimatologie des Instituts. Nachdem nunmehr auf Anregung der UNESCO für die Jahre 1965 bis 1975 die weltweite hydrologische Forschung durch die International Hydrological Decade in Gang gekommen ist, sind nicht nur die hydrotechnischen Fächer, sondern ist auch die Geographie zur internationalen und interdisziplinären Zusammenarbeit auf diesen Gebieten aufgerufen. Herr Professor KELLER wurde anlässlich des XX. Internationalen Geographen-Kongresses in London 1964 zum Präsidenten der Kommission der International Geographical Union für diese Dekade gewählt. Zur Bewältigung der damit zusammenhängenden Aufgaben hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft eine Schwerpunkt-Kommission für hydrologische Forschung und die Bundesregierung ein National-Komitee für die Hydrologische Dekade aufgestellt, so daß nunmehr in der Bundesrepublik auch die Möglichkeit großzügiger Förderung dieser Aufgaben besteht.

Daß die hydrologische und Wasserhaushaltsforschung im Rahmen der Geographischen Wissenschaft — auch als Hydrogeographie bezeichnet — in Zukunft eine weit stärkere Rolle spielen muß, und zwar in der physischen, Kultur- und Wirtschaftsgeographie, ergibt sich allein schon aus der entscheidenden Rolle, die der Wasserkreislauf für fast alle Vorgänge in der Natur und für die verschiedenen Formen der menschlichen Aktivität auf der Erde spielt. Es handelt sich also keineswegs nur um die geographische Behandlung der festländischen Gewässer an sich, der Flüsse, Seen, Gletscher, Quellen und des Bodengewässers, sondern vor allem auch um die Funktion, die das Wasser schlechthin und der Wasserkreislauf im Rahmen des gesamten Landschaftshaushaltes (Klima, Bodenverwitterung, morphologische Vorgänge, Lebensvorgänge aller Art)

sowie auch der menschlichen Siedlung und Wirtschaft ausübt. Man vergleiche nur die zwei Seiten, die noch 1934 in der Darstellung der festländischen Hydrologie durch F. MACHATSCHEK in Band 1 der Grundzüge der Physischen Erdkunde von SUPAN-OBST den Fragen des Wasserkreislaufes und der Bilanz des Wasserkreislaufes gewidmet sind, mit den Kapiteln „Der Kreislauf des Wassers“, „Die Elemente des Wasserhaushalts“ und „Der Wasserhaushalt“ in R. KELLERS Lehrbuch „Gewässer- und Wasserhaushalt des Festlandes“ von 1962, in dem sie fast die Hälfte des Textes einnehmen.

Die Beherrschung der Wassertechnik und die davon ausgehenden gesellschaftsbildenden Vorgänge waren entscheidend bei der Entstehung der Hochkulturen in frühgeschichtlicher Zeit. In weiten Teilen der Erde hängt auch heute die Frage der Besiedelbarkeit und landwirtschaftlichen Nutzung in erster Linie von der Wasserbeschaffung ab. Die Entfaltung, das Wachstum und die Ausbreitung von Industrien in der Zukunft schließlich ist bei der schon weitgehenden Nutzung der natürlichen Wasserquellen eine Frage der Wasservorräte und ihrer hydrochemischen Beschaffenheit. Glücklicherweise sind die Begriffe Wasservorrat und Wasserschatz nicht ganz zutreffend, da es sich anders als bei Lagerstätten nicht um einen Verbrauch von vorhandenen Wassermengen handelt, sondern eben um den gesamten Wasserkreislauf und seine sinnvolle Nutzung für Pflanzen und Tiere in der Land- und Forstwirtschaft, für den Menschen als Trink- und Brauchwasser und für die gewerblich-industrielle Wirtschaft, schließlich auch um die Rückführung des gebrauchten Wassers in den Naturkreislauf in einem unschädlichen Zustand.

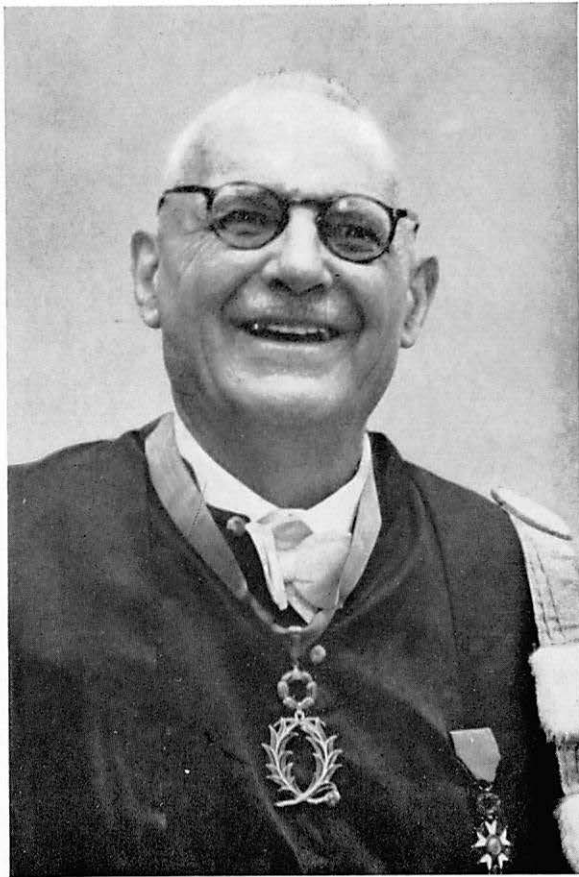
Das Geographische Institut Bonn hat sich bei seinem Bemühen um die Intensivierung der hydrologischen Forschung seit 1947, als der Unterzeichnete die erste persönliche Bekanntschaft mit Professor MAURICE PARDE in La Sarraz in der Schweiz machen durfte, dessen aneifernden Interesses und seiner Hilfe erfreut. Er hat schon 1954 eine wichtige hydrologische Arbeit in den Bonner Geographischen Abhandlungen veröffentlicht und hat Herrn Dr. F. LOCKERMANN für seine Arbeit über den Wasserhaushalt in verschiedenen Klimagebieten der Erde und das Regime der großen Ströme als Stipendiaten in Grenoble betreut.

Die Geographen der Universität Bonn sind daher ihrer Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät dankbar, daß sie im Sommer 1963 die Anregung aufnahm und beschloß, Herrn PARDE in Anerkennung seines Lebenswerkes auf dem Gebiet der Hydrologie, ganz besonders der Potamologie, und seiner Persönlichkeit als Forscher, Lehrer, Anreger der Jugend und Förderer der zwischenstaatlichen, menschlichen Kontakte die Ehrendoktorwürde zu verleihen.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
Vorwort des Herausgebers, C. Troll . . . . .	5
Ansprache des Dekans, Professor Dr. F. Hirzebruch . . . . .	9
Ansprache Maurice Pardé . . . . .	14
Influences de la perméabilité sur le régime des rivières	
Introduction . . . . .	21
A – Les terrains à perméabilité d'interstices et leurs eaux . . . . .	22
B – Perméabilité de fissures . . . . .	35
C – L'hydrologie karstique . . . . .	38
D – Quelques données sur les régimes influencés par la Karstification .	49
E – Hydrologie non karstifiée avec perméabilités remarquables . . . . .	57
F – Régimes influencés par les perméabilités d'interstices ou de fissures étroites . . . . .	62
G – Part des eaux souterraines dans les débits fluviaux . . . . .	80
Quelques remarques conclusives . . . . .	89
Appendice . . . . .	96
Bibliographie sommaire . . . . .	99





M. Pardi

## Ansprache

des Dekans der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Herrn Professor Dr. Friedrich H i r z e b r u c h , anlässlich der Verleihung der Ehrendoktorwürde an Herrn Professor Maurice P a r d é , Grenoble, am Samstag, dem 30. November 1963, im Hörsaal des Geogr. Instituts.

Magnifizienz, Herr Botschaftsrat, verehrter Herr PARDÉ!

Meine Damen und Herren!

Die Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn hat beschlossen, Herrn Professor Dr. MAURICE PARDÉ von der Universität Grenoble den Grad eines doctor rerum naturalium honoris causa zu verleihen. Es ist für die Fakultät eine besondere Freude, daß sie den akademischen Festakt nur wenige Tage vor dem 70. Geburtstag von Herrn PARDÉ veranstalten kann.

Die Universität Bonn hat heute viele Gäste in ihren Mauern. Ich begrüße den Botschaftsrat der Kulturabteilung der französischen Botschaft. Ich begrüße die Vertreter der Bundesministerien (es haben sich ja eigentlich alle Ministerien mit Wasserfragen zu beschäftigen). Ich begrüße den Herrn Direktor des Institut Français, den Vertreter der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die Herren der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz. Besonders herzlich heisse ich auch die auswärtigen Kollegen von Herrn PARDÉ willkommen, die ihm in freundschaftlicher Gesinnung verbunden sind und die Reise nicht gescheut haben, um heute bei diesem Festakt mit dabei zu sein.

Vor allem aber darf ich Sie selbst, hoch verehrter Herr PARDÉ, in unserer alma mater bonnensis herzlich willkommen heißen. Sie haben eine beschwerliche Reise hinter sich; wegen einer Erkrankung stand es bis vor wenigen Tagen nicht ganz fest, ob Sie kommen konnten. Umso grösser war mein Dank und meine Freude, als ich Sie gestern abend frisch und munter aus dem Zuge steigen sah. Es ist sehr schön, daß Ihr ältester Sohn, Herr JEAN PARDÉ aus Nancy auch an diesem Festakt teilnehmen kann. Ich rufe auch ihm, wie allen Gästen, mein herzliches Willkommen zu.

Herr Professor PARDÉ, Sie haben viele Jahre in Grenoble an drei Fakultäten die Hydrologie fluviale oder die Potamologie (Flussgewässerkunde) vertreten. Ihr Vater, LEON PARDÉ, langjähriger Direktor einer Ecole Forestière und conservateur des eaux et forêts hat Ihnen die Liebe für die Natur und die Gewässerkunde mit in die Wiege gelegt. Er war ein führender Forstgelehrter Frankreichs, dem wir grundlegende Werke über die Wälder Frankreichs, über Laub-

und Nadelbäume, über die Forstpflge im allgemeinen und über die exotischen Holzarten Europas verdanken. Sie haben 1938 zusammen mit Ihrem Herrn Vater das schöne Büchlein „Arbres et Forêts“ herausgebracht; ihr ältester Sohn ist wieder ein bedeutender Forstmann geworden, der die Forstmessung und Forstzuwachslehre vervollkommnet. Es gibt also nicht nur ein ministère des eaux et forêts, es gibt auch eine famille des eaux et forêts, und diese Familie heisst PARDÉ. In dieser Familie wie auch in ganz Frankreich sind die Sorgen um Wald und Wasser eng miteinander gekoppelt.

Schon von Jugend an haben Sie die Flüsse und Ströme fasziniert, der gewaltige Mississippi, der besonders früh ihre Phantasie anregte, die wilde Alpen-Rhône, die Hochwasser der Donau und des Po. Mit 24 Jahren entdeckten Sie eine Unmenge von Unterlagen über die Rhône — hydrologische und meteorologische Messungen —, die ganz unbearbeitet dalagen. Sie stürzten sich kopfüber in diese Daten und nach 8 Jahren schwerster Arbeit lag 1925 Ihre Monographie von 2 Bänden und 1500 Seiten Umfang über das Flussregime der Rhône vor, das Ihren Ruf als Potamologe sofort verbreitete.

1925 war dieses große Werk fertig. Es folgten sofort neue Arbeiten über den Roten Fluß in China, über den Mississippi, die Garonne und Saône, den Amazonas, den Sankt Lorenz-Strom, den Yang-tse-kiang, die Flüsse Osteuropas usw. Vor allem aber regte Sie jedes Hochwasser großen Ausmaßes zu einer besonderen Studie an, die Hochwasser in Südwest-Frankreich von 1930 und 1952, die Rhônehochwasser von 1935, vom Winter 1944/45 und von 1951, die der Pyrenäenflüsse von 1940 und des Kansas River von 1951 usw. usw.

Dabei versuchten Sie immer Gesetzmäßigkeiten aufzufinden, die bei den betreffenden Flußgebieten die Grundlage für eine Voraussage von Hochwasserkatastrophen ermöglichten. Sie hatten 1954 in den Bonner Geographischen Abhandlungen gerade Ihr Büchlein über die „Beziehungen zwischen Niederschlag und Abfluss bei großen Sommerhochwassern“ veröffentlicht und darin auf die Gefahr noch wesentlich stärkerer Hochfluten der Alpenflüsse hingewiesen, als kurz darauf ein solches Hochwasser von nicht gekannter Stärke die Heimatstadt unseres Kollegen Peschl, Passau, heimsuchte.

Sie haben bei ihren vergleichenden Studien über die verschiedenen Flußgebiete der Erde mit genauer Berücksichtigung der meteorologischen Daten und der Abflußdaten die verschiedenen Flußregime erfaßt und darauf erstmals eine Typologie der Flüsse gegründet. Mit Ihrem Büchlein von 1933 „Fleuves et Rivières“ und mit Ihrem zweibändigen Werk „Cours de Potamologie“ von 1949 haben Sie die potamologische Disziplin in die vergleichende universale Geographie der Erde eingefügt. Die Universität Grenoble erkannte die Bedeutung Ihrer Arbeiten, errichtete einen ersten Lehrstuhl für „Hydrologie fluviale“, auf den Sie berufen wurden. Wer heute Angaben über irgend einen Fluß der Erde sucht, über Wasserführung, über Schwebstoff- und Geröllführung oder über schadenbringende Hochwasser, greift zuerst zu den Arbeiten von PARDÉ, dessen neues zusammenfassendes Werk über die Stärke der Hochwasser

in verschiedenen Teilen der Welt gerade in Spanien herausgekommen ist. Und schon arbeiten Sie an einem weiteren zusammenfassenden und grundsätzlichen Werk über die allgemeine Gewässerkunde, mit dem Sie Ihr Lebenswerk krönen wollen.

Herr PARDÉ! Die Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät will Ihr Lebenswerk und Ihre beispielhafte Ausdauer und Zielstrebigkeit zur Erreichung dieses Werkes ehren. Sie haben für diese weltumspannenden Studien von Anfang an internationale Beziehungen nach vielen Richtungen gepflegt, nach Italien und Spanien, nach den USA, den Donauländern, nach Kanada und China usw., im Laufe der Jahre nach allen Teilen der Welt, auch in Deutschland fanden Sie gute und beste Freunde und haben sie noch. Es gab einen deutschen PARDÉ, er hieß KARL FISCHER, musste sich aber auf die Potamologie Mitteleuropas beschränken. Sie haben mit ihm enge Freundschaft gehabt.

Verehrter Herr PARDÉ! Sie haben immer anderen Menschen geholfen und insbesondere Ihre Studenten in jeder Weise gefördert. Auch deutschen Studenten haben Sie großzügig Gastfreundschaft gewährt und wie ein Vater für sie gesorgt. Ihre Familie hat im letzten Krieg durch deutsche Schuld schwerste Opfer bringen müssen. Ihre menschliche Haltung und Ihre Aufgeschlossenheit für die übernationalen Beziehungen haben sich dadurch nicht geändert. Bald nach dem Kriege haben Sie als erster Vertreter der französischen Geographie die Freundeshand ausgestreckt, freundschaftliche Beziehungen erneuert und neue geknüpft. Ihre Kollegen an unserer Universität haben dies dankbar empfunden. Ein junger Bonner Hydrologe konnte ein ganzes Jahr in Grenoble Ihr Schüler sein, und die Pflege der Gewässerkunde in Bonn ist auf das stärkste von Ihnen beeinflusst worden. Ich erwähne, daß für die internationale Zusammenarbeit im nächsten Jahrzehnt auf dem Gebiete der Hydrologie, die von der UNESCO vorbereitet wird, die Intern. Geographen-Union Herrn Professor KELLER aus Bonn als Vertreter benannt hat. So keimt der Same, der in Grenoble gereift ist, jetzt auf rheinischem Boden.

Verehrter Herr PARDÉ! Sie gehören zu den Wissenschaftlern, die in ihrer Arbeit keine Ländergrenzen kennen und denen die Zusammenarbeit und das fachliche und freundschaftliche Gespräch mit Wissenschaftlern aller Länder innere Anliegen sind. Das gilt insbesondere für die Beziehungen zwischen französischen und deutschen Wissenschaftlern. So werden Sie sich mit uns besonders darüber freuen, daß sich nun auch die Staatsmänner und die hohen Beamten unserer beiden Nationen häufig besuchen, um in freundschaftlicher Verbundenheit und in gemeinsamer Arbeit ein gemeinsames Ziel zu erreichen.

Und nun darf ich Sie bitten, sehr verehrter Herr PARDÉ, die Urkunde in Empfang zu nehmen.

Im Namen der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn verleihe ich Ihnen Titel, Grad und Würde des doctor rerum naturalium honoris causa. Die über die Verleihung am heutigen Tage ausgefertigte Urkunde hat folgenden Wortlaut:

QVOD DEVS OPTIMVS MAXIMVS BONVM  
FELX FAVSTVMQVE ESSE JVBEAT  
VNIVERSITATIS  
FRIDERICIAE GVILEMIAE RHENANAE  
RECTORE MAGNIFICO  
GVILELMO DIRSCHERL  
DOCTORE MEDICINAE  
DOCTORE MACHINARIAE  
CHEMIAE PHYSIOLOGICAE  
PROFESSORE PVBLICO ORDINARIO  
IN VIRVM ORNATISSIMVM  
MAVRITIVM PARDE

SILVANECTENSEM DOCTOREM LITTERARVM ET SCIENTIARVM  
PROFESSOREM FACVLTATIS SCIENTIARVM  
ET SCHOLAE MACHINARIORVM  
HYDRAVLICORVM IN VNIVERSITATE GRATIANOPOLITANA  
PROFESOREM HONORARIVM FACVLTATIS LITTERAM  
IN EADEM VNIVERSITATE MVLтарVM SOCIETATVM  
GEOGRAPHICARVM SODALEM HONORARIVM

QVI IN REBVS NATVRALIBVS OBSERVANTIS ET INVESTIGANDIS  
RATIONEM PER SERIEM FAMILIAE HEREDITARIAM FELI-  
CITER CONTINAVIT ET PRAECIPVE AD AQVAS TOTIVS  
ORBIS CONVERTIT,

QVI ORDINEM QVENDAM IN VICISSITVDINIBVS CONDICTIONIS  
SINGVLORVM FLVVIORVM PERSPEXIT ET OMNIVM PRIMVS  
CERTA FLVMINVM GENERA DISTINXIT AQVARVM ALTITV-  
DINIBVS AC DEFLVVIORVM MENSVRIS ACCVRATE OBSER-  
VATIS,

QVI CVM MVLTI COMMENTATIONIBVS INSTANTER QVAESI-  
VISSET, QVIBVS DE CAVSIS VBIVIS TERRARVM AQVAE MAG-  
NAE AVT DEPRESSIORES ESSE SOLERENT, CERTA RATIONE  
VIAM PATEFECIT, QVA EO PERVENTVM EST, VT INVNDA-  
TIONVM PERICVLA PROVIDERI ET COERCERI POSSINT,

QVI STVDIIS TAM LVCVLENTIS MAGNI ILLIVS PROGRESSVS,  
QVEM SCIENTIA FLVMINVM PROXIMIS DECENNIIS FECIT,  
IN REBVS GRAVISSIMIS AUCTOR FVIT ATQVE HOC MODO  
ARTEM POTAMOLOGICAM GEOGRAPHIAE COMPARATIVAE  
VNIVERSAE TERRAE INSERVIT,

QVI SEMPER SVMMO STVDIO ENIXVS EST, VT OMNIVM NATIO-  
NVN HYDROLOGI OPERAM CONSOCIARENT, ATQVE SICVT  
IN MVLTIS EXTERORVM CIVITATIBVS FRVCTVS LABORVM  
SVORVM PVBLICI JVRIS FECIT, ITA CVM GERMANIS QVOQVE  
HYDROLOGIS GEOGRAPHISQVE ARTA NECESSITVDINE CON-  
JVNCTVS EST,

QVI QVAMVIS DVRI DOMI CALAMITATIBVS AFFLICTVS POST  
NOVISSIMVM BELLVM MENTE PRODIGA OMNISQVE AMBI-  
TIONIS EXPERTI CONTENDIT, VT FRANCOGALLI ET GER-  
MANI CONSORTIVM STVDIORVM REDINTEGRARENT, ET  
IPSE STVDENTES GERMANOS ADJVVIT COLLEGARVMQVE  
GERMANORVM AMICITIAM FIDELITER SERVAVIT,

QVI CVM PROPRIA ANIMI INDOLE ET ALACRITATE VERE FRAN-  
GOGALLICA EXCELLAT, GERMANORVM QVOQVE INGENII  
OPERA STVDIO PROPENSO ATQVE INTELLENTI AESTI-  
MAVIT EOQVE PRO SVA PARTE CONCORDIAE AMBARVM  
NATIONVM CONSVLVIT,

DOCTORIS RERVM NATVRALIVM  
NOMEN JVRA ET PRIVILEGIA

EX DECRETO FACVLTATIS MATHEMATICORVM ET PHYSICORVM  
HONORIS CAUSA

COLLATA ESSE TESTATVR  
FRIDERICVS HIRZEBRVCH

DOCTOR RERVM NATVRALIVM ET MATHEMATICAE  
PROFESSOR PVBLICVS ORDINARIVS  
MATHEMATICORVM ET PHYSICORVM FACVLTATIS  
H. A. DECANVS

ATQVE

HVJVS REI HASCE LITTERAS TESTES SIGILLO FACVLTATIS  
MATHEMATICORVM ET PHYSICORVM MVNIIT

DATVM BONNAE DIE XXX MENSIS NOVEMBRIS ANNI MCMLXIII

## Ansprache

von MAURICE PARDÉ anlässlich der Ehrenpromotion am 30. November 1963

Als die mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität beschloß, mich zum Ehrendoktor zu ernennen, hat sie mir eine Auszeichnung verliehen, die der größte Stolz meines Alters sein wird. Sie tat es vor allem aus wissenschaftlichen Gründen, als Beweis der Achtung vor den gedruckten Werken, die seit 45 Jahren von mir über „Sciences des rivières“ veröffentlicht wurden. Mein verehrter Freund und Kollege Prof. Dr. CARL TROLL kennt meine Methoden und Gedankengänge und hat sie Ihnen freundlicherweise beschrieben. Ich werde mich deshalb hier auf wenige Ergänzungen beschränken und Ihnen nur den psychologischen Ursprung, den Gegenstand und die Entwicklung meiner Arbeiten schildern.

In erster Linie werde ich Ihnen sagen, in welchem Maße freundschaftliche Bande mit Geographen und anderen Spezialisten Ihres Landes dazu beigetragen haben, meine Kenntnisse der Potamologie zu erweitern. Neben den tiefen Gedanken, die mich stets in meinen Bemühungen geführt haben, will ich Ihnen noch Bekenntnisse enthüllen, die Sie zum Teil überraschen werden, die Sie aber sicherlich nicht als unnötig erachten.

Das Interesse für das Studium der Flüsse war keineswegs meine erste geistige Sorge. Sehr früh, als Knabe von 10 Jahren, war ich erfüllt von einer wahren Begeisterung für die Geschichte, hauptsächlich für die militärischen Ereignisse und die Heldentaten, zu denen jene Gelegenheit gaben. Ich wollte einerseits Offizier werden, andererseits Geschichtsschreiber; meine Phantasie ließ mich Schlachten miterleben, die ich nur aus der Lektüre kannte. Dann befahl mich im Alter von 13 Jahren ein Knochenleiden, das mich über 2 Jahre ans Bett fesselte und das mir jede Hoffnung nahm, jemals aktiv Militärdienst zu leisten. In den folgenden Jahren hatte ich keine bestimmten Berufspläne mehr, wenn ich auch zeitweilig an Journalismus und an Politik dachte.

Erst mit 18 oder 20 Jahren wurde ich optimistischer. Manchmal war ich überzeugt, daß ich Frankreich durch meine Feder und mein Wort retten könnte. Gleichzeitig war ich mir bewußt, daß ich niemals Professor werden wollte, aber ich träumte noch immer davon, Bücher über die bedeutendsten Kriege, vor allem über die Großen der Geschichte zu schreiben, wenn ich auch nicht ohne Enttäuschung immer mehr deren Irrtümer und Schlechtigkeiten erkannte.

Während der gleichen Jahre regten andere Gedanken, die bereits in früher Jugend zu keimen begannen, meinen Geist an. Es war eine tiefe Neugierde für alles, was mit Regen, Sturm, Gewitter und auch mit Bächen und Flüssen zusammenhing. Mit 7 oder 8 Jahren zeichnete ich mit Unterstützung meiner Großmutter und einiger Tanten im Garten eines Anwesens, auf dem ich alljährlich Ferien verbrachte, das Flußnetz des Mississippi und all seiner Nebenflüsse in den Sand. Die Existenz dieser Flüsse, die Länge, Breite und ganz ein-

fach ihre Namen erschienen mir als etwas Wunderbares. Oftmals träumte ich nachts von Hochwassern, von reißenden und schäumenden Flüssen, die mich mit beachtlichem Schrecken erfüllten, da ich sie im Traum auf schwankenden Brücken überqueren mußte. Nach dem Aufwachen wurde ich wieder tapfer und sagte mir, es müsse doch beglückend sein, die Ursachen von Überschwemmungen zu kennen, sie niederzuschreiben und zu erläutern. Als Sekundaner im Lycée von Beauvais war ich buchstäblich starr vor Staunen, wenn ich in den Zeitungen vom Seinehochwasser des Januar 1910 las, oder von Hochwassern anderer Flüsse in der Zeit zwischen Mai und Juli und ganz besonders während des Herbstes.

Wochenlang hielten mich diese Ereignisse in Aufregung, aber ich dachte, daß ihr Studium fähigere Köpfe als den meinigen verlangte.

Diese Furcht stimmte mich traurig, und das um so mehr, als mein ohnedies schon lebhaftes Interesse für die Flüsse bald von einer glühenden Leidenschaft für die Rhône abgelöst wurde. Von diesem Fluß hatte ich eine grandiose Vorstellung; ich hatte weder ihn noch seine Umgebung je gesehen, kannte aber Beschreibungen, Legenden und Photographien. An Imaginationskraft fehlte es mir damals nicht. Die Anziehung, die die Würde und die Macht der Rhône auf mich ausübten, war unendlich groß, als ich im August 1912 den Fluß von seinem Eintritt in den Jura bis nach Lyon sah. Bei seinem Anblick schien mir alles noch großartiger als ich es vorausgesehen hatte. Ja, ich wage zu sagen, daß mich meine Begeisterung gleich einem wohltuenden Schock radikal von einer schweren Krise befreite, unter der ich damals so sehr litt, daß ich in meiner Verzweiflung keine Zukunft mehr für mich sah. Das Poetische und Heroische des Flusses erfüllten mich für immer mit der sicheren Hoffnung auf einen reichen und befriedigenden Lebenslauf.

Diese magische Rettung hat schon eine zweite vorweggenommen, die mich 18 Jahre später plötzlich und unauslöschlich aus einer Zeit persönlicher Unzufriedenheit herausreißen sollte; dank der Musik auf Schallplatten entdeckte ich das, was ich ehrlich gesagt schon seit meiner Jugend ahnte: den Genius der Wagnerschen Musik. Ich besaß plötzlich in dieser Musik einen Schatz von unglaublicher Schönheit und gewann Freunde, die in meinem Geist und in meinem Herzen wirklicher waren als die negativen Helden so mancher zeitgenössischer Romane. Ich lernte Brunhilde kennen, aber auch Siegfried, Siegmund, Eva, Walter und die Töchter des Rheins, die sich so wenig um die Hydrologie des Flusses sorgten, aber doch der Poesie des Rheins verhaftet sind. Und dann die strafende Überschwemmung am Ende des Nibelungendramas, sie konnte mich nicht gleichgültig lassen, nicht wahr?

Sie können jetzt besser verstehen, warum ich überglücklich war, als ich 1917 erfuhr, daß in den Archiven der Hydrometrischen und Meteorologischen Stationen riesige Materialien über die Rhône schlummern, die den meisten Geographen unbekannt waren. Eine langwierige Sichtung begann, und das Endprodukt meiner Auswertung umfaßte 1500 Seiten. Es überstieg fast meine



Kräfte, aber dank der Hilfe meiner Frau und dem Vertrauen einiger großer Geographen hielt ich durch. Ich denke hier vor allem an die großen Meister Emmanuel DE MARTONNE und Albert DEMANGEON, ferner den glänzenden Professor Maurice ZIMMERMANN aus Lyon. Mein tatkräftigster Verteidiger, Anreger und Berater in jenen schweren Jahren war mein außerordentlicher Lehrer Raoul BLANCHARD, der einzige, der im Oktober 1963 von den vier Genannten noch lebt und dessen Lebenskraft, trotz seiner 86 Jahre, Sie alle erstaunen würde.

Trotz vieler Hindernisse und Kämpfe promovierte ich schließlich im April 1925 mit einer Arbeit über den Wasserhaushalt der Rhône zum Doktor der Philosophischen Fakultät Grenoble. Schon zu Beginn meiner hydrologischen Studien faßte ich den festen Vorsatz, nicht nur möglichst viel über die übrigen französischen Flüsse zu lernen, sondern auch über die Flüsse aller anderen Länder und Kontinente. Dies war lange Zeit für mich schwierig, ich war ein junger Gymnasiallehrer, Vater von 3 Kindern und ohne Mittel, die mir den Erwerb ausländischer Bücher oder gar Reisen an Rhein, Ebro oder Donau ermöglicht hätten. Großzügige Spender schickten mir jedoch Bücher und Sammlungen von Beobachtungsdaten, und deren Auswertungen erweiterten mein Blickfeld sehr. Das war vor allem im Frühjahr und Sommer 1920.

Der Chefingenieur des ‚Service Hydrométrique du Rhône‘ in Lyon ließ mir Duplikate von inhaltsreichen österreichischen Monographien über die Hochwasserkatastrophen von 1897 und 1899 zukommen. Meine älteste Schwester, die damals Professorin an einer amerikanischen Universität war, brachte mir einen umfangreichen Jahresbericht des Wetteramtes der USA über die Verwüstungen im Becken des Ohio im März 1913. Herr GIANDOTTI, Leiter des ‚Ufficio Idrografico del Po‘ schickte mir freundlicherweise alle seine Veröffentlichungen, von denen einige, wie z. B. die „Ephémérides“, Tagesquoten von 5 Flußstationen und über einen Zeitraum von mehreren Dekaden enthielten. Ich entdeckte Unterschiede, aber noch mehr Parallelen zwischen Po und Rhône. Der Erwerb dieser Bücher, in denen ich neben den Daten auch die Meßmethoden studierte, machte mich glücklicher als es die Erbschaft eines amerikanischen oder Ruhr-Milliardärs hätte tun können.

Das Nebeneinander von wissenschaftlicher Forschung einerseits und Schulunterricht andererseits ermüdete mich sehr in den 5 Jahren, die dem Abschluß meiner Doktorarbeit folgten; ich erkannte, daß meine zyklophenhafte und fieberhafte Arbeitsweise meine Kräfte verzehrten und ich nie ein aktiver Potamologe werden würde, wenn ich das Studium der Flüsse nicht hauptberuflich fortsetzen könnte. Meinem Wunsch wurde fast in extremis Genüge getan, als Ende 1929 ein großzügiger Mathematiker, der Dekan René GOSSE, eine Dozentur an der neuen ‚Ecole des Ingénieurs Hydrauliciens‘ innerhalb der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Grenoble anbot. Später unterstützte er meinen Lehrer Raoul BLANCHARD in dessen Bemühen, mir Vorlesungen in Physische Geographie, Klimatologie und Flußkunde anzutragen. Dies

geschah 1932, dem dann 1935 ein Lehrstuhl folgte. Im Jahre 1947 promovierte ich mit einer Arbeit über Probleme der Hydrologie der Flüsse zum Doktor der Naturwissenschaftlichen Fakultät Grenoble. Ungefähr gleichzeitig wurde ich auf den soeben errichteten ersten französischen Lehrstuhl für ‚Hydrologie fluviale‘ bei der Naturwissenschaftlichen Fakultät Grenoble berufen. Die folgenden Jahre standen ganz im Dienste der Lehre und Forschung, und bis 1961 hielt ich wenigstens noch eine Vorlesung über Hydrographie und Klimatologie, um den Lehrstuhl dann einem meiner besten Schüler, Herrn Jean LOUP, zu überlassen.

Seit meinem Eintritt ins Lehramt der Hochschule, das heißt seit 33 Jahren, und vor allem seit meinem Wechsel zur Naturwissenschaftlichen Fakultät, habe ich meine Forschungen immer mehr intensiviert und immer engere Bande zu ausländischen Kollegen, Geographen, Geologen und Technikern der Gewässerkundlichen Dienststellen geknüpft. Viele der letztgenannten besaßen in hohem Maße geographisches Verständnis, ohne das kein gültiges gewässerkundliches Werk geschrieben werden kann. Die Gewässerkunde ist im übrigen ein sehr wichtiger Zweig der Geographie. Mein Ziel war und wird immer sein, die verschiedensten Erscheinungen der Flüsse aller Länder besser zu verstehen.

An dieser Stelle muß ich Ihnen in einigen Worten die instinktiven und systematischen Richtlinien erläutern, die mich stets bei meinen Forschungen geführt haben.

Je größer meine Erfahrungen und je tiefer mein Wissen wurden, um so mehr kam ich zu der Überzeugung, daß allgemeine Ideen und aufgestellte Behauptungen über geophysikalische Phänomene nur sehr unzureichenden Wert besitzen und wegen der komplexen Wirklichkeit der Dinge zu schwerwiegenden Ungenauigkeiten führen, wenn sie sich nicht auf Beispiele gründen, die auf ihre Ursachen und Auswirkungen entsprechend untersucht sind. Was ich hier sage ist evident, aber ich tue es wohlüberlegt, denn ich habe manches Mal bei der Lektüre oder bei Diskussionen feststellen müssen, daß viele Autoren, bestrebt, um jeden Preis originell zu sein, zu übermäßiger Geltung gelangen, indem sie geistvolle Theorien als bewiesen hinstellen, für deren Erhärtung sie jedoch keine glaubwürdigen Beweise anführen können. Von Anfang an war es mein Bestreben, Feststellungen durch entsprechend beobachtete Phänomene zu unterbauen.

Außerdem muß ich sagen, daß ich entgegen einer heute weitverbreiteten Tendenz gar nicht zögere, geophysikalische Erscheinungen und ihre Ursachen einfach zu beschreiben. Es ist meine unumstößliche Meinung, daß man durch den Verzicht auf Beschreibung und der damit parallel verlaufenden Erläuterung, die wiederum ihrerseits die Generalisierung bedingt, häufig nur zeigt, daß man das Problem nicht darstellen kann, weil man es nicht genügend kennt. Nun beinhaltet Wissenschaft aber Wissen, und es will mir nicht einleuchten, daß man etwas, das man gar nicht oder kaum kennt, gut verstehen und zu einer glaubwürdigen Synthese verarbeiten kann, es sei denn, man besitze eine geistige

Souveränität und eine schöpferische Intuitionskraft ohnegleichen. Leider sind aber Männer wie NEWTON, LEIBNIZ und PASTEUR sehr dünn gesät. Die Manifestation lebendiger Naturvorgänge übt auf mich die gleiche Anziehung aus wie der Ablauf des Geschichtsdramas, und ich möchte, daß man sie mir anders als durch Abstraktionen darstellt.

Während ich bestrebt war, mich in bescheidenem Maße in Gewässerkunde zu bilden, wollte ich gleichzeitig andere an meinen Erkenntnissen teilhaben lassen. Bis heute sind von mir über 290 zum Teil umfangreiche Publikationen erschienen. In erster Linie sind meine Handbücher über den Mississippi und die sowjetischen Ströme zu nennen, ferner über die Hochwasser der Garonne von 1930 bis 1952. Hinzu kommen weniger detaillierte Arbeiten über die argentinischen, brasilianischen, britischen und italienischen Flüsse, über den Gelben Fluß und Euphrat und Tigris.

Drei meiner Werke sind in deutscher Sprache veröffentlicht worden, zwei davon durch die Geographischen Gesellschaften Wien und Berlin, das dritte, vielmehr zeitlich das erste und auch das wichtigste, nämlich „Beziehungen zwischen Niederschlag und Abfluß bei großen Sommerhochwassern“, in den Bonner Geographischen Abhandlungen 1954. Letzteres wurde in mühevoller Arbeit von meinem jungen Schüler und Freund Friedrich Wilhelm LOCKERMANN ins Deutsche übersetzt. Kürzlich hat auch die Spanische Forschungsgemeinschaft ein Buch von mir veröffentlicht, und wenn die Kräfte nicht versagen, werde ich in etwa 3 Jahren ein Werk von 2000 Seiten über Allgemeine Gewässerkunde beenden.

Bevor ich diese kurze Adresse beschließe, möchte ich zwei Themen anschnelden, die Ihnen hoffentlich nicht mißfallen.

Zu Beginn meiner hydrologischen Laufbahn litt ich sehr darunter, daß mir viele Beiträge verschiedener Gelehrter Ihres Landes zur Potamologie nicht zugänglich waren. Ich wußte vom Hören-Sagen, daß es sich um grundlegende Werke handelte, und aus der Entfernung hegte ich dafür eine fast abergläubische Bewunderung. In den 20er Jahren bekam ich zufällig einen Artikel von Prof. Dr. Karl FISCHER, Berlin, über die Sommerhochwasser der Oder zu Gesicht, und ich erlaubte mir, Ihrem Landsmann gleich zu schreiben, wie ich es schon früher mit den Italienern, Amerikanern und Schweizern tat. Ich teilte ihm meinen Wunsch mit, Artikel, Karten und Abflußzahlen zu bekommen. Er antwortete mir mit väterlicher Freundlichkeit und ließ mir durch das ‚Amt für Gewässerkunde Norddeutschlands‘ eine Reihe wertvoller Schriften schicken. In späteren Jahren empfand ich stets eine tiefe Freundschaft für ihn, einen Mann, dessen Geisteskraft und Rechtsempfinden ich immer mehr schätzen lernte.

Diesem Kontakt folgte später ein reger Schriftenaustausch mit deutschen Gewässerkundlern, mit Dr. FICKERT, mit Baurat TROSSBACH aus Stuttgart und mit Prof. WUNDT aus Freiburg, dem großen Meister dieser Wissenschaft. Im August 1934 lernte ich anlässlich eines Kongresses in Polen Herrn Professor

und Frau FISCHER persönlich kennen und machte auch die Bekanntschaft seines ersten Mitarbeiters, Herrn Dr. Wilhelm FRIEDRICH, heutiger Präsident der Internationalen Hydrologischen Vereinigung, mit dem ich mich sehr schnell befreundete. Im Anschluß an einen Besuch in Berlin beschenkte mich Prof. FISCHER in so einmalig großzügiger Weise, indem er mir sämtliche gewässerkundlichen Werke, die in den Dekaden um die Jahrhundertwende über alle deutschen Flüsse veröffentlicht worden waren, überließ, so daß ich heute meine Bibliothek als die eines hydrologischen Krösus betrachten kann.

Dann kam der zweite Weltkrieg, der meine Familie in grausamer Weise traf, der schließlich zur Katastrophe für Deutschland wurde und Europa und die ganze Welt in abgrundtiefe und schwer wieder zu heilende Verwirrung stürzte. Sofort nach Beendigung des Krieges kamen Briefe aus Deutschland mit der inständigen Bitte, daß doch unsere Verbindungen wieder aufgenommen werden würden; ich zögerte keinen Moment, diesen Wünschen zu entsprechen, wir schrieben uns wieder, und es war, als ob kein Strom des Blutes zwischen unseren Völkern vergossen worden sei.

Im Jahre 1947 hatte ich dann endlich Gelegenheit, einen deutschen Kollegen kennenzulernen, dessen Name ihre Universität und das geistige Leben Ihres Landes schon lange ehrte: Herrn Professor Dr. Carl TROLL, heute Präsident der Internationalen Geographen Union und kürzlich der Rektor Ihrer Universität. Wir trafen uns in der Schweiz, wo sich die Geographen vieler europäischer Länder zu ersten offiziellen Kontakten nach dem Kriege versammelt hatten. Das erfreulichste Ergebnis dieses Treffens war jedoch für mich — diese egoistische Bemerkung sei mir erlaubt — die herzliche Zuneigung, die sofort zwischen Prof. TROLL und mir entstand. Die Kraft und Klarheit seiner Gedanken, sein ungestümer und doch geordneter Geist, das enzyklopädische Wissen und die offensichtlichen moralischen Qualitäten meines Bonner Kollegen waren unwiderstehlich und beeindruckten mich zutiefst.

Einige Jahre später kam ein Schüler TROLLS, Herr Fr. Wilh. LOCKERMANN, zu mir nach Grenoble, um Hydrologie zu studieren; ich lernte seine Intelligenz und seinen Arbeitseifer schätzen und danke ihm für die Hilfe der Übersetzung eines meiner Werke. 1953 reiste ich nach Bonn, um Prof. TROLL wiederzusehen, aber hauptsächlich, um endlich Herrn Dr. Reiner KELLER kennenzulernen, der, obwohl noch jung, bereits ein Hydrologe von hoher Geltung war, und der — ich war sicher — eine bedeutende wissenschaftliche Zukunft und eine schnelle Universitätskarriere vor sich haben würde. Die hohe Meinung, die ich von seinen Kenntnissen hatte, fand ich nur bestätigt, sie sind im übrigen in seinen wichtigen Veröffentlichungen bezeugt. Sein kürzlich erschienenen Buch „Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes“ ist mir von größtem Nutzen. Ich bin fest davon überzeugt, daß der Ruf Professor KELLERS sich verbreiten wird; er ist heute schon eine bedeutende Persönlichkeit unter den Hydrologen.

Wenn ich auch nur von wissenschaftlichen Überlegungen einerseits und von Gefühlen der Freundschaft, der Achtung und des Dankes andererseits geleitet

würde, so könnte ich doch die hohe Ehre, die Sie mir zgedacht haben, nicht ohne tiefen und freudigen Stolz annehmen. Die Ehrung rührt mich zutiefst und erhebt mich vor meinen eigenen Augen, denn ich betrachte sie als ein Symbol. Sie läßt mich teilhaben an einer segensreichen Entwicklung, die bei weitem meine eigene Lebensgeschichte, mein Glück, meinen Schmerz und meine Trauer übersteigt und in Wahrheit einen meiner sehlichstn Wünsche erfüllt: die herzliche Freundschaft zwischen unseren beiden Völkern.

Wir wissen, daß sich diese Freundschaft nur sehr schwer und nach langen schmerzlichen Erfahrungen bilden konnte. In der Zeit nach dem ersten Weltkrieg war es mir und sicher auch vielen Deutschen noch keineswegs voll bewußt, in welchem Maße die Kriege zwischen Deutschland und Frankreich brudermörderischer Wahnsinn waren. Nur allmählich sah ich auch in den Kämpfern der anderen Seite heldenhafte Männer, denen ich im Geiste oftmals Anerkennung für ihre Tapferkeit zollte. Ich habe nie unbewegt das Lied vom guten Kameraden oder die ergreifenden Strophen von FREILIGRATS Gedicht die Trompete von Gravelotte gelesen. Als ich sah, daß erneut ein Konflikt aufzukommen drohte und das fieberhafte Geschrei von Rache und Unterwerfung triumphierte, als die Welt in Asche versank, waren die Verzweiflung und Angst um das Leben der Meinigen doch nicht stärker als mein Entsetzen vor der tödlichen Gegenüberstellung zweier Völker, die geschaffen sind, sich in mancher Hinsicht zu ergänzen, sich zu achten und zu vereinigen. Der Krieg kam, und es gab Monate, da ich nicht mehr an die Versöhnung glaubte, ja, sie gar nicht mehr wünschte.

Das Wunder der Versöhnung ist dennoch geschehen, und Sie wissen durch meine vorangegangenen Worte, daß ich mit meinen bescheidenen Kräften daran mitarbeitete, als einer der ersten in meinem Land und in meiner Familie. In gewissem Sinne überrascht das Wunder, obwohl es unserer beider Interessen entspricht und im Grunde eine Forderung des elementarsten gesunden Menschenverstandes ist, der leider im Laufe der Geschichte nur selten Staatsmänner und Massen geleitet hat. Was unseren Vorfahren unmöglich erschien, ist wahr geworden. Ich muß gestehen, daß mich von allen politischen Ereignissen der letzten 18 Jahre nur die Beendigung der deutsch-französischen Feindschaft als große Tat zufrieden stimmt. Sie ehrt beide Teile, und es ist meine Überzeugung, daß sie wenigstens teilweise die großen Fehler der Vergangenheit wiedergutmacht. Indem Deutsche und Franzosen Freunde geworden sind, vereinigen sie sich zu einer Ehrung ihrer Vorfahren, die ihr Leben opferten, aber doch nur das Unglück ihres Vaterlandes kauften, oder nur blutige Siege mit der einzigen Gewißheit neuer Kriege errangen. Heute wissen wir, daß ihre Opfer nicht vergebens gebracht wurden und daß wir das Beste zu ihrem Andenken tun können, wenn diese enge Freundschaft weiterhin blüht und unsere beiden Völker immer näher zueinander bringt.

Erfüllt von diesem festen Glauben entbiete ich der ruhmreichen Universität Bonn, die mich so hoch auszeichnet, indem sie mich künftig in die Reihe ihrer Ehrendoktoren aufnimmt, meinen herzlichsten Gruß.

## INFLUENCES DE LA PERMEABILITE SUR LE REGIME DES RIVIERES<sup>1)</sup>

### *Introduction — Influence des terrains sur l'écoulement*

Les eaux point évapotranspirées d'origine atmosphérique, avant de parvenir aux rivières s'écoulent, soit par ruissellement sur le sol, soit à travers celui-ci par infiltration ou percolation. «La percolation dit M. G. CASTANY, est la circulation à travers un volume poreux saturé, sans pertes qui correspondraient en chemin à la fixation de l'eau contre des particules. L'infiltration est la pénétration verticale de l'eau dans le sol.

Et celui-ci peut être regardé comme un ensemble complexe où existent le matériel solide, l'eau et des gaz (essentiellement de l'air et de la vapeur d'eau)».

Au cours de leur mouvement à travers le sol, les eaux subissent des captures, des incarcérations pour ainsi dire, par l'attraction qu'exercent les particules solides ou d'autres molécules liquides. En outre l'évaporation les attaque, directement à l'intérieur du sol; ensuite les racines les aspirent, les sucent, puis l'eau montant dans les plantes est en forte partie transpirée, c'est-à-dire abandonnée à l'air en état de vapeur. Ces derniers processus sont ceux que l'on désigne en bloc par le terme d'évapotranspiration.

Quant aux eaux gravifiques, c'est-à-dire- non immobilisées après leur infiltration et qui obéissent pour leurs mouvements à la gravité, elles aboutissent en profondeur à des nappes (ou plus rarement à des réseaux internes d'eaux courantes) et plus tard à des sources, c'est-à-dire aux rivières.

Les mêmes eaux infiltrées peuvent plus ou moins corroder chimiquement, par dissolution, les terrains à travers lesquels elles circulent. Et même en surface elles exercent des actions analogues, mais moins intenses pour une quantité d'eau donnée, à cause de plus de brièveté dans les contacts.

---

1) Le texte qui suit doit plus tard paraître non sans quelques modifications possibles dans un gros ouvrage que prépare l'auteur et qui sera consacré à la Potamologie (Flußkunde, Gewässerkunde). Le traité comprendra deux livres chacun divisé sans doute en deux tomes. Le premier livre s'appliquera à l'Hydrologie fluviale, et le second à la Dynamique fluviale. Celle-ci étudie des courants fluviaux, leur mesure, leurs caractéristiques (vitesses et turbulence) leurs forces érosives et tractrices, les transports solides effectués par les cours d'eau, puis les lits de ces derniers (types divers, formes et altérations naturelles).

L'hydrologie fluviale a pour objets les débits des rivières, leur détermination, leurs variations et les causes de ces phénomènes. Parmi ces facteurs le perméabilité des terrains joue un grand rôle. Ce sont les principales relations de causes à effets en ce domaine que dans le présent mémoire on s'efforce de définir.

Puis quand elles ont une force tractrice d'entraînement initial assez grande, en raison de leur abondance, des pentes, de la turbulence, etc. . . . et que les terrains superficiels sont assez fragiles, c'est-à-dire constitués d'éléments mobilisables par les courants susdits, les eaux, en ruisselant à même la campagne ou dans les lits fluviaux, arrachent, pour les transporter jusqu'aux embouchures ou les déposer en chemin, des matériaux solides.

Dans ce texte réservé aux influences de la nature du sol sur les eaux continentales nous n'examinerons ni la résistance des roches à l'érosion ni les transports solides effectués <sup>1)</sup> par les rivières. Nous traiterons seulement ici de ce qui regarde les mouvements de l'eau à travers les terrains, c'est-à-dire de la perméabilité <sup>2)</sup>.

## A - LES TERRAINS A PERMÉABILITÉ D'INTERSTICES ET LEURS EAUX

La perméabilité a pour cause l'existence dans les terrains de vides; nous désignons ainsi des espaces disponibles pour l'occupation par l'air, par la vapeur d'eau et par l'eau. Ils consistent soit en interstices, ou pores, soit en fissures (encore que celles-ci lorsqu'elles ont suffisamment d'étroitesse, puissent en bon langage, être aussi appelées interstices.

### 1 — Définition et désignation des terrains à perméabilité d'interstices

Les hydrogéologues emploient surtout le terme d'interstices ou de pores pour des espaces situés entre des éléments, des particules, des grains solides non cimentés entre eux, matériaux qui constituent les terrains meubles et notamment les accumulations alluviales d'argile, de limons ou silts, de sables, de graviers, cailloux et blocs. Les interstices sont en communication les uns avec les autres, sauf dans le cas des roches vacuolaires (comme les pierres ponces). En outre les grains ou les blocs de nombreuses roches contiennent des

2) Nous n'avons point besoin d'insister sur l'importance capitale de ces phénomènes dans le domaine propre de la Potamologie, comme pour l'explication de tout ce qui concerne le relief, c'est-à-dire les formes, le modelé des terrains, la topographie.

3) Sur tous les points traités dans la première moitié et surtout dans le premier tiers de ce chapitre, les traités d'hydrogéologie et notamment les deux excellents et riches manuels nouveaux (1962 et 1963) de MMrs. SCHOELLER et CASTANY, contiennent une documentation très grande et des explications variées.

4) Nous donnons ci-dessous des dimensions sur lesquelles un accord général manque entre les auteurs, mais que beaucoup d'entre eux et nous-mêmes retenons pour désigner les particules d'après leurs dimensions en millimètres

argiles: moins de 0,005	sables moyens: 0,2 à 0,5	galets: 20 à 250
silts (limons): 0,005 à 0,05	sables grossiers: 0,5 à 2	blocs: plus de 250
sables fins: 0,05 à 0,2	graviers: 2 à 20	

micropores dont le rôle est généralement insignifiant en ce qui concerne la perméabilité.

## 2 – Porosité totale

### a) Définitions, facteurs et valeurs

Ces interstices totalisent des volumes dont le quotient par le volume qu'occupe le complexe matières solides, air et eau, représente la porosité totale ou brute  $m$ , c'est-à-dire le pourcentage de l'espace où peuvent pénétrer l'air, la vapeur et se loger les eaux souterraines.

Si tous les grains avaient la même forme par exemple celle de sphères et s'entassaient (par superposition et juxtaposition) selon les mêmes arrangements, la porosité totale serait identique, pour n'importe quelle dimension des matériaux. Mais les formes, les arrangements, et d'ailleurs aussi les dimensions diffèrent soit d'un assortiment à l'autre, soit dans un assortiment donné, considéré sur quelques Kilomètres carrés d'étendue et plusieurs dizaines de mètres de profondeur, ou même sur des espaces beaucoup plus petits et moins épais. Et notamment les particules petites comme les sables et les limons peuvent s'insérer entre les particules plus grosses, comme les graviers et les cailloux; dispositions dont résultent une densité apparente accrue et une porosité diminuée. En outre le tassement dû au temps et encore plus à la compression en profondeur amoindrit la porosité. Pourtant d'une façon générale et toutes choses égales d'ailleurs, les assortiments qui présentent les granulations les plus fines ont, selon l'expérience, la porosité totale la plus grande.

On peut dire assez exactement, à condition de ne pas oublier l'immense variété des mélanges possibles et les gammes plus ou moins larges des exceptions, que  $m$  vaut souvent 44 % à 50 % dans les sols argileux, 35 % à 45 % dans les silts, 30 à 35 % dans les sables, 25 à 30 % dans les sables et graviers, ou dans les graviers.

Dans beaucoup de roches résistantes et cohérentes, après défalcation des fissures, la porosité d'interstices atteindrait au plus 2 ou 3 % et en général beaucoup moins (0,02 à 1,5 pour le granite, 0,10 à 0,60 pour les marbres 0,1 à 1 pour quantité de corps basaltiques schisteux et même calcaires). Elle vaudrait 2,5 à 5 dans certains gypses; 20 à 30 % assez fréquemment dans les tufs, et 3 à 20 % dans les grès, selon les arrangements des grains et les volumes occupés par des ciments naturels dans les interstices.

### b) Manque de concordance entre la porosité totale et la perméabilité

Un raisonnement simpliste induirait à croire que la perméabilité, définie par le débit qui peut s'infiltrer dans une unité de temps, verticalement à travers une surface donnée de terrain, varie dans le même sens que la porosité. Mais ces caractéristiques se réalisent de manière très différente, et grossièrement en



sens inverse l'une de l'autre. Et tout spécialement les terrains alluviaux les plus poreux, à savoir les argiles, offrent tant de résistance à la pénétration, à l'infiltration et à la percolation qu'on doit les qualifier d'imperméables par excellence; nous ne voulons point dire par ces vocables qu'ils ne contiennent point d'eau et nous nous expliquerons bientôt sur cette contradiction apparente. Son fait suffit à laisser entendre que l'imperméabilité de l'argile n'est point totale, dans l'absolu.

Soit en effet d'après M. SCHOELLER, des argiles entassées sous une couche d'eau, une charge hydrique énorme de 10 mètres. Selon les coefficients de perméabilité admis, ce terrain laissera filtrer de 0,01 à 0,1 litre à la seconde par kilomètre carré, quantité infime, mais point nulle.

Ou encore considérons d'après M. CASTANY en pourcentage, la porosité efficace, c'est-à-dire disponible pour l'infiltration en profondeur jusqu'aux nappes, dans des terrains variés. Elle atteint couramment 25 % dans les graviers, 20 % dans les mélanges de sable et de gravier, contre 25 à 35 % pour la porosité totale. Elle tombe à 10 ou 15 % dans les sables fins, et à 5 % dans les mélanges d'argile et de graviers, contre 35 à 40 % pour la porosité totale, et à 3 % dans les argiles presque pures, contre 40 à 50 %.

Ou encore d'après A. HAZEN cité par M. CASTANY en certains sols de granulations efficaces<sup>5)</sup> données  $d_{10}$  on a trouvé les valeurs qui suivent pour les porosités totales, les porosités efficaces, et donc pour la différence, qui est la capacité de rétention spécifique (terme que l'on va bientôt expliquer).

diamètre efficace d 10 en mm	porosité totale en %	porosité efficace en %	capacité de rétention spécifique en %
0,03	44	25	19
0,06	42	26	16
0,17	42	31	11
0,35	32,5	23	9,5
0,48	40	32,5	8
1,40	40	32	7,5
5	44	37	7

La figure 1 exprime avec une bonne approximation ces phénomènes.

### 3 - Porosité efficace et capacité de rétention spécifique

Tous ces chiffres, ou d'autres analogues et de même signification veulent dire ceci. Une partie des vides qui constituent la porosité totale ne peut servir à l'infiltration jusqu'aux nappes, des eaux de pluie ou dues à la fusion nivale, même si le terrain est aussi peu saturé que possible. La porosité efficace est,

5) Les hydrogéologues appellent diamètre efficace,  $d_{10}$ , une dimension telle que 10 % en poids du sédiment se composent de grains plus petits.

compte tenu de la vitesse d'infiltration une mesure de la perméabilité, donc de la capacité de transmission pour une surface réceptrice. Et elle est dans l'ensemble, pour des éléments moins volumineux que des sables grossiers, d'autant plus grande, toutes choses égales d'ailleurs que le matériel présente une granulation moins fine. Elle est misérable pour l'argile, encore médiocre pour les mélanges sablo-argileux ou limono-argileux trop riches en argile, mais imposante, supérieure à 20 et à 25 % dans les sables et les graviers. Elle redescend en même temps que la porosité totale, pour les graviers, et encore plus pour les gros cailloux et les blocs. Au milieu de ceux-ci elle ne dépasse guère 15 %.

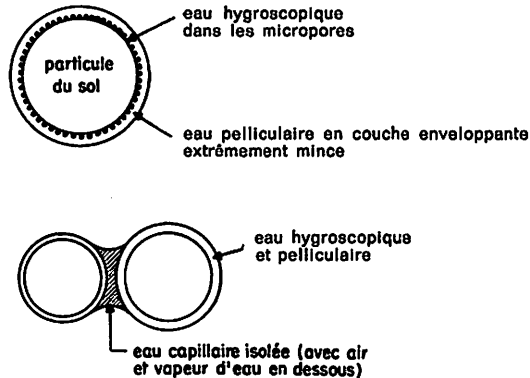
Donc, dans les matériaux modérément grossiers et surtout dans les sables et les graviers fins, 150 à 250 mm de pluie ou même plus peuvent s'infiltrer si la couche sèche au début de la précipitation a 1 mètre d'épaisseur. Et les eaux pluviales peuvent notamment s'emmagasiner de la sorte au-dessus de maintes roches cristallines ou métamorphiques en soi très imperméables, dans les cas très fréquents où ces formations portent de forts manteaux de décomposition (arènes cristallines) à condition que les argiles ne s'y intercalent pas en abondance.

#### *4 – Eau de rétention, eau capillaire et eau gravifique*

Si la porosité efficace, c'est-à-dire le pouvoir de transmission jusqu'aux nappes et plus tard aux sources est inférieure, en force terrains de beaucoup, à la porosité brute, c'est qu'une partie du volume interstitiel est occupé par d'autres eaux que les eaux gravifiques, déplacées en vertu de leur seule pesanteur. Celles qui forment obstacle et accaparent une fraction, et dans les argiles qui se trouvent gorgées d'humidité la quasi-totalité de l'espace non solide sont celles de rétention ou eaux liées, adhésives (les *Haftwasser* des Allemands). Elles ne peuvent s'enfoncer ni se mouvoir dans le sens de la pente parce qu'elles sont attirées par d'autres molécules liquides, et surtout par les particules solides en vertu de forces de succion qui sont énormes, à proximité immédiate des grains; nulles cependant à l'encontre des eaux gravifiques dans les sols saturés; mais elles peuvent représenter jusqu'à 25 000 atmosphères dans un sol sec. Or les racines qui pourtant exercent une aspiration intense ne peuvent affecter à celle-ci plus de 7 à 8 atmosphères. En conséquence lorsque les films liquides qui entourent les particules sont devenus, par dessèchement, assez minces pour que les molécules d'eau ne puissent être attirées par moins de 9 à 10 atmosphères, ces eaux ne peuvent que rester collées aux éléments terreux; et les racines perdent toute possibilité de consommation hydrique nouvelle, malgré une humidité qui, dans le terrain très près d'elles, et surtout dans les éléments très fins, peut être encore notable. Le « seuil de flétrissement » est alors franchi, et les plantes meurent faute d'eau utilisable dans un milieu cependant encore point sec, à moins qu'on ait pu les irriguer à temps.

Les eaux de rétention ne concourent pas plus à l'alimentation des nappes. Puis même si les racines peuvent encore extirper à leur profit une certaine fraction du contingent hydrique retenu, le volume de celui-ci réduit la place laissée à l'infiltration des eaux gravifiques. Et les eaux adhésives, ainsi que l'ont montré les chiffres précédents, peuvent occuper jusqu'à 40 % du volume total complexe dans les argiles, mais seulement quelques centièmes dans les éléments grossiers.

Elles comprennent d'abord les eaux hygroscopiques et pelliculaires, adsorbées par les particules (fig. 1).



*Fig. 1:* Disposition des eaux de rétention autour des particules terreuses ou entre elles. D'après les figures 9—1 et 9—2 p. 125 de M. G. CASTANY (Traité pratique des eaux souterraines). Cf. pour la répartition générale dans le sol et le sous-sol, la figure 11—2 (p. 153) du même, ou la figure 222—1 de R. KELLER *Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes*.

Les eaux hygroscopiques pénètrent entre les micropores et les canalicules microscopiques de divers éléments. Les eaux pelliculaires forment tout autour de chaque élément un film continu, dont l'épaisseur ne dépasse jamais 0,1 micron et se trouve parfois bien moindre.

Et là où le diamètre des pores devient inférieur à  $2/10$  de  $\mu$  l'eau ne peut plus descendre par gravité. Mais l'eau de rétention peut ici être, en plus de l'eau hygroscopique et pelliculaire, la plus proprement adhésive, de l'eau capillaire isolée ou suspendue, c'est-à-dire privée de communication, par l'existence de vides à sa base, avec l'eau des nappes ou avec l'eau capillaire soutenue. Celle-ci forme une frange capillaire au-dessus des nappes et en contact avec elles. Les eaux capillaires montent à travers les matériaux solides, par l'effet de forces d'attraction spéciales, qu'entretiennent l'évapotranspiration et des phénomènes thermiques. Leur ascension est d'autant plus haute qu'elle s'effectue à travers des pores plus petits, à condition qu'il ne s'agisse pas d'argile. Sans quoi l'infinité excessive des ouvertures freine la montée. Mais celle-ci peut atteindre, à ce qu'il semble, 1,50 m. à 3,00 m. et plus, en 150 à 300 jours à peu près dans les silts, 0,50 m. à 1 m. dans les sables fins, quelques dizaines de centimètres dans les sables grossiers, 10 à 20 dans les graviers fins.

L'eau capillaire soutenue peut se comporter comme de l'eau gravifique par descente vers la nappe, lorsque celle-ci s'abaisse. Et c'est une rupture de la colonne descendante qui isole les eaux capillaires suspendues. Ces dernières, et d'ailleurs toutes les eaux de rétention ne peuvent être déplacées naturellement que par attractions non gravifiques, et par évaporation due à la pénétration des calories, sans infiltration susceptible de remplacer les provisions perdues.

*5 – Différentes zones hydriques superposées dans un terrain*

En conséquence de tous les phénomènes ci-dessus décrits, on voit dans les terrains à porosités d'interstices, et aussi dans les roches coupées de fissures étroites (moins de 3 et surtout de 2 millimètres) se succéder de bas en haut des zones bien déterminées en ce qui concerne leur occupation par l'eau, par l'air et par la vapeur (fig. 2).

Zone d'évapotranspiration	Eaux de rétention ( pelliculaires et hygroscopiques ) attaquées par l'évapotranspiration
Zone de rétention	Mêmes genres d'eau de rétention mais non attaquées par l'évaporation directe
Frange capillaire	Eaux de rétention y compris eaux capillaires isolées (suspendues) et eaux capillaires soutenues (ou continues )
Couche aquifère ou zone de saturation	Eaux de tous genres y compris les eaux gravifiques
Substratum imperméable	

Fig. 2: Zones superposées avec divers types d'eau dans le sol (d'après G. CASTANY, R. KELLER, etc. . . ).

Tout d'abord existe la zone de saturation dans une couche aquifère qui repose sur un substratum imperméable. C'est le domaine de la nappe, dont l'eau noie toutes les particules solides, en occupant donc toute la porosité efficace. Sa surface supérieure dite hydrostatique ou libre (terme défectueux) ou Water-table, ou niveau phréatique<sup>6)</sup> ou piézométrique, se trouve généralement

6) La nappe ne mérite vraiment le caractère de phréatique (c'est-à-dire utilisable pour les puits) que lorsque cette utilisation peut assez facilement se faire. Au-delà de certaines dénivellations entre la surface du sol et le niveau piézométrique la nappe est dite profonde. Souvent, et de façon critiquable selon nous, on réserve l'épithète de profondes à des eaux qui sont en outre captives (voir plus loin).

située, au-dessous de la surface du sol, à des profondeurs qui varient suivant les saisons. Elles peuvent atteindre, pour l'état moyen de la nappe quelques dizaines de centimètres à quelques décimètres ou même assez rarement cent mètres ou un peu plus dans les terrains d'interstices; et jusqu'à plusieurs centaines de mètres dans les roches à fissures. L'eau de la nappe circule dans le sens du gradient hydraulique c'est-à-dire conformément à la pente de la surface hydrostatique.

Avant de poursuivre notre inventaire des zones superposées nous rappellerons que les eaux des nappes retournent pour la plupart à l'air libre par des émergences ou exurgences ou exutoires, qui sont les sources. Ces dernières apparaissent là où la surface du sol coupe, le plus fréquemment en biais, une nappe descendante, en particulier sur les versants des collines ou des montagnes. Là où l'argile, les marnes ou les formations cristallines, etc. . . . soutiennent les basaltes, les grés, les calcaires, les sources peuvent s'échelonner tout au long d'une ligne d'affleurement. Il existe encore des remontées d'eau à la surface, le long de failles qui dressent un mur imperméable, en travers de la nappe et d'autres types d'émergences pour lesquelles nous renvoyons aux traités d'Hydrogéologie; Nous accorderons d'ailleurs un peu plus loin une mention spéciale aux sources vaclusiennes.

Revenons aux étages hydrogéologiques. Au-dessus de chaque nappe d'interstices ou de fissures suffisamment étroites, vient une frange capillaire qui a le plus communément quelques dizaines de centimètres dans les sables, et 3 à 4 mètres dans les limons. La saturation diminue peu à peu depuis le contact avec la nappe jusqu'à la limite de la zone supérieure, parce que de plus en plus vers le haut, des eaux capillaires isolées, suspendues, tendent à remplacer l'eau capillaire soutenue. Cette dernière monte et descend en relation avec les mouvements de la nappe. Et la frange peut être épaissie par l'eau d'infiltration dans le sol, à la suite des pluies.

Plus haut, dans la zone intermédiaire ou de rétention, les eaux sont toutes suspendues, sauf pour celles d'infiltration qui traversent la dite bande de terrain. Hormis ces apports transitoires, il s'agit ici d'eaux pelliculaires et hygroscopiques, et d'eaux capillaires isolées. Epaisseur 0,5 à 10 mètres et même bien plus.

Enfin se présente au sommet la zone d'évapotranspiration (1 à 3 mètres fréquemment et rarement plus). En dehors des épisodes d'infiltration elle ne contient encore outre l'air et la vapeur que des eaux adhésives: eaux capillaires suspendues si le niveau piézométrique est très élevé (mais alors il n'y a plus de zone intermédiaire); et surtout les eaux pelliculaires et hygroscopiques éventuellement atteintes par l'évaporation lors des grandes sécheresses qui cependant n'entament qu'en dernière instance les eaux hygroscopiques. Le degré de saturation dans cette zone est variable. Les consommations par les racines et par l'évaporation la réduisent. Au contraire l'apport d'eaux qui s'infiltrèrent l'accroît plus ou moins durablement.

Il va de soi que les limites de chaque zone dans le sens vertical peuvent varier selon les perméabilités, puis dans un terrain donné, selon la végétation et bien entendu dans le temps, selon les températures et autres facteurs d'évapotranspiration, selon les besoins des plantes, ou selon les vicissitudes de la pluviosité, donc des recharges par infiltration. Parfois en certains secteurs, la saturation devient totale jusqu'à la surface du sol. Et même on voit celle-ci dépassée et noyée par l'eau qui devient à la fois marécageuse et libre dans le sens complet du terme. Alors il n'y a plus qu'une seule zone hydrique, celle de la nappe.

5 – *Mouvements non capillaires de l'eau gravifique dans les terrains à perméabilité d'interstices*

a) Le coefficient de Darcy. Définition

Dans les assortiments suffisamment homogènes pour leur granulation, leur degré de tassement, puis dépourvus de toute stratification, l'infiltration verticale vers les nappes, et les déplacements par percolation des eaux de ces dernières, latéralement ou si l'on veut dans le sens longitudinal, celui de la pente hydrostatique, ces mouvements donc, paraissent, au moins en gros, obéir à la loi de Darcy. Ce savant a fait là-dessus des expériences célèbres en 1856.

Soit dans un cylindre de hauteur H une épaisseur e de sable sous une charge d'eau dont la profondeur est H—e; Q le débit = KSH/e, S étant la surface ou section terrestre mouillée traversée par l'eau, et K un coefficient en rapport avec le degré de perméabilité. Donc la vitesse  $V = Q/S$ . En vertu des mêmes mécanismes, soit une nappe dont la pente de gradient hydraulique  $J = (H1 - H2)/L$ , L étant la distance le sens du courant, puis H1 et H2, à l'amont et à l'aval, les hauteurs de la surface hydrostatique au-dessus d'un plan de référence (fig. 3).  $V = K j$ .

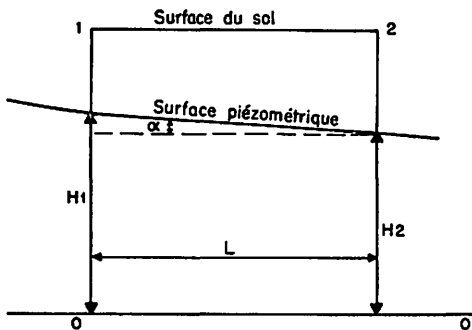


Fig. 3: La surface piézométrique et sa pente, 0, plan horizontal de référence, L, longueur horizontale, H1 et H2 niveaux piézométriques au-dessus de plan de référence de la nappe à l'origine et à la fin de L.

$$\text{La pente } J = \frac{H1 - H2}{L}$$

On fera tout de suite ressortir la simplicité de cette formule en rappelant que, pour l'écoulement à l'air libre, en rivières, la vitesse moyenne  $V_m$  dans une section mouillée égale  $K R^n J^n$ ,  $R$  ou rayon hydraulique étant une expression combinée de la profondeur et de la largeur. Dans un terrain à perméabilité d'interstices ( $\gamma$  compris, semble-t-il certains assortiments de graviers) le coefficient  $K$  de Darcy représente en somme la rugosité ou plutôt l'inverse de la rugosité qui réduit la vitesse. Et il a, pour plus de précision, comme facteurs fixes les causes et les caractéristiques pédologiques de la porosité efficace (granulation, formes et arrangements des particules, etc. . . .). Son seul facteur purement hydraulique, outre la viscosité du liquide fort influencée par les températures est la pente. Donc la profondeur et les variations du débit total qui la conditionnent n'influencent en rien la vitesse<sup>7</sup>. Cet élément serait une constante uniforme de haut en bas et sur toute la largeur, dans un assortiment homogène, quelle que soit l'abondance, au rebours de ce qui se passe dans les chenaux à surface libre. Plus exactement les changements de débits n'agissent sur la vitesse souterraine que s'il en résulte des modifications de la pente. Amodiations concevables si la nappe s'exhausse plus ou moins, pendant une certaine phase, à l'amont qu'à l'aval. La formule est rendue encore plus simple par le fait que l'inclinaison  $J$  n'y est point affectée d'un exposant (comme  $1/2$  dans les chenaux ouverts).

Cependant M. SCHOELLER cite des auteurs selon lesquels  $J$  devrait avoir un exposant d'autant plus gros que le matériel aurait de plus larges interstices<sup>8</sup>. Exhortons-nous à croire qu'il n'en est rien et (nouvel acte de foi) que le coefficient  $K$  est bien réellement invariable dans une nappe donnée.

Ce coefficient a les dimensions d'une vitesse. Dans le système C.G.S. il est égal à la vitesse, exprimée en cm. sec., avec laquelle l'eau ayant une certaine viscosité (en général 1 centipoise, sous 20° 20 degrés centigrades) et la densité correspondante, circule sous un gradient hydraulique égal à 1. C'est encore le nombre de centimètres cubes d'eau par seconde qui s'écoule à travers une section de 2 cm<sup>2</sup> dans les mêmes conditions. Et l'on doit retenir que les différences de la température en rendant les eaux plus ou moins visqueuses, ralentissent ou accélèrent les vitesses d'écoulement souterrain.

Il existe encore un coefficient de perméabilité intrinsèque ou géométrique désigné par  $K = K_i \gamma / \nu$ ,  $\gamma$  étant le poids spécifique du liquide, et  $\nu$  la viscosité cinématique<sup>9</sup>.

7) Et ainsi le débit total ne peut s'accroître que par augmentation de la section mouillée. Le débit unitaire par centimètre carré ou mètre carré ne change point quel que soit le débit total.

8) Pourtant point, ce nous semble, si la partie supérieure de la nappe, au cours des variations de celle-ci occupe ou abandonne un assortiment granulaire différent de celui que les eaux saturantes imprègnent plus bas et qui conditionne une certaine valeur de  $K$ .

9) Dans le mode laminaire ou visqueux d'écoulement, extrêmement rare pour les eaux courantes même très lentes, mais très normal pour l'infiltration et la percolation interstitielles, les particules du liquide se déplacent parallèlement les unes aux

Le coefficient de Darcy caractérise en gros de façon très imprécise à priori pour chaque sol, mais frappante, la perméabilité de différents terrains.

On donne pour lui les valeurs suivantes en cm. sec.: graviers, cailloux, gros sables  $10^{-3}$ , c'est-à-dire, notons le bien, 0,001 à 10 centimètres par seconde

sables fins  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$

Silts  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$

argiles  $10^{-6}$  à  $10^{-9}$

Ou encore plus de 10 cms pour les formations «très perméables»,  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  pour les assortiments «perméables»,  $10^{-7}$  à  $10^{-4}$  pour les terrains «peu perméables», et moins de  $10^{-7}$  pour les milieux imperméables.

## b) Remarques diverses

Le lecteur ne peut pas ne pas avoir remarqué la grandeur des écarts qui séparent les chiffres extrêmes envisagés pour chaque catégorie de terrains. Les coefficients K respectivement catalogués pour chacune d'elles varient comme de 1 à 10, à 100 et même à 1000. Et l'on doit rappeler pour comparaison que les chiffres vérifiés dans les rivières pour les coefficients C de Chézy ou  $1/n$  de Manning, différent au plus dans une même espèce comme de 1 à 1,50 ou plutôt à 1,20. D'où malgré les meilleurs raisonnements possibles fondés par voie d'analogie sur des expériences définies ci-dessous, et faites en d'autres nappes, le risque d'erreurs bien plus graves que dans les calculs relatifs aux débits fluviaux, lorsque l'on choisit à priori un coefficient K de Darcy d'après ce qu'on a pu savoir ou deviner sur la granulation, la densité et les autres caractéristiques du terrain. Et de nombreuses formules qui veulent déterminer K d'après ses facteurs: porosités totales ou efficaces, dimensions-types des particules, degré de saturation préalable, poids spécifique, températures et viscosité du liquide (cf. SCHOELLER p. 106—11) ne paraissent encore fournir que des approximations incomplètement vérifiées et incertaines.

---

autres, dans les sens qui continuent les lignes de courant précédemment suivies.

Dans le mode turbulent adopté par les eaux fluviales presque partout et par les eaux infiltrées dans les fissures assez spacieuses, les molécules liquides s'écartent irrégulièrement, en désordre, puis se rapprochent de l'axe général suivi par l'écoulement. Ainsi naissent des tourbillons dont une quantité, invisibles à l'oeil nu ont des diamètres minuscules. La vitesse est une cause très importante de la turbulence, qui d'autre part la réduit. Chaque fluide possède un coefficient moléculaire ou dynamique  $\mu$  de viscosité; puis un coefficient de viscosité cinématique  $\nu = \mu / \rho$  étant la masse spécifique de l'eau.

La turbulence se manifeste quand un nombre dit de Reynolds Re dépasse certaines valeurs sur lesquelles les spécialistes ne sont point entièrement d'accord.

$$Re = V_m R / \nu.$$

Dans cette expression  $\nu$  est la viscosité cinématique en stokes,  $V_m$  la vitesse du liquide et R le rayon hydraulique, expression combinée de la largeur et de la profondeur.



Par contre on peut obtenir grâce à des observations locales pour les coefficients respectifs  $K$  de nappes déterminées et bien explorées, des valeurs à peu près exactes, dans un secteur d'autant plus grand autour du point central des relevés que les terrains en profondeur sont plus homogènes sur une plus ample superficie périphérique. En bref on procède comme il suit (les expériences, et les calculs fondés sur elles sont la spécialité, souvent le triomphe des hydrogéologues).

On pompe des débits, uniformes ou variables et que l'on connaît parfaitement dans un puits. Le niveau de celui-ci s'abaisse, se « rabat », on règle le pompage de manière que la surface en question devienne stable, alors que le prélèvement d'eau continue. Le débit inchangé en fonction duquel cette stabilité piézométrique se manifeste est celui de la nappe à l'amont, ou plus exactement celui qu'elle peut fournir dans des conditions climatologiques semblables à celles qui ont prévalu durant l'expérience sans que la réserve phréatique diminue<sup>10)</sup>.

D'autre part les niveaux hydrostatiques de la nappe se rabattent eux aussi tout autour de puits, de manière à former un cône renversé, avec génératrices bombées vers le haut (fig. 4 et 4 bis) et dont la pointe ou plutôt la section

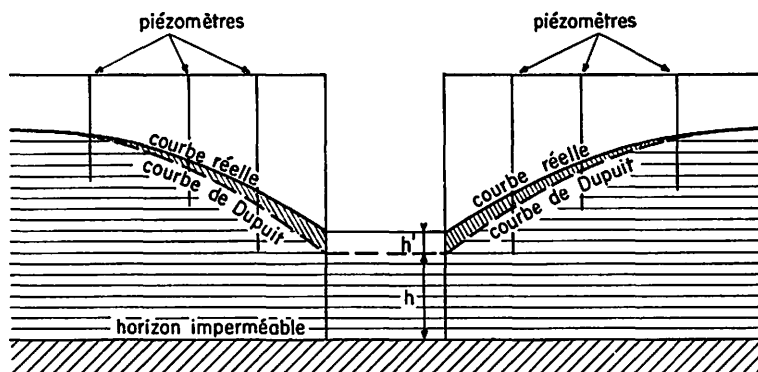


Fig. 4: Effets sur les niveaux piézométriques d'un pompage pratiqué dans un puits. La surface piézométrique réelle est plus haute que selon les équations classiques de Dupuit. Entre elle et le niveau de l'eau dans le puits il existe une surface de suintement. D'après diverses figures incluses dans les traités d'Hydrogéologie (CASTANY, SCHOELLER, etc.).

circulaire de base, affleure dans les parois du puits, à une certaine hauteur dite de suintement, au dessus du niveau libre au contact de l'air. Si l'on a foré d'assez nombreux puits secondaires ou piézomètres (de petits diamètres pour des raisons de prix), à des distances croissantes à partir du puits central, en les espaçant par exemple sur deux droites qui se croisent à l'emplacement du puits (fig. 4 bis) on peut dans ces trous, mesurer les niveaux simultanés de la nappe

10) Mais à l'aval le débit de la nappe diminue, et aussi celui de la rivière à laquelle aboutissent les eaux phréatiques.

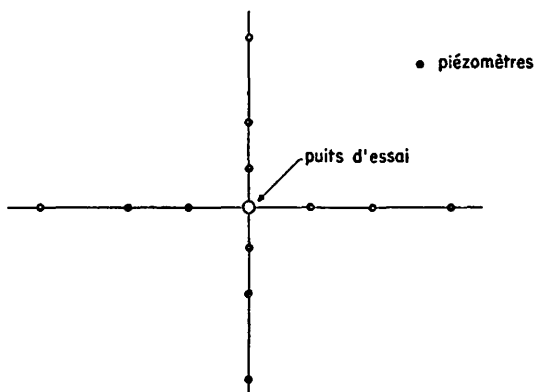


Fig. 4 bis: Puits où l'on pratique des pompages et piézomètres installés au voisinage.

rabattue en cône; et aussi de la même surface hydrostatique là où le pompage n'a pas eu d'influence régressive sur son altitude. Et du coup on détermine les pentes de cette surface, dans le cône et tout autour de lui. Dès lors, connaissant la pente et le débit on trouve le coefficient  $K$  local. Et l'on a de fortes chances de ne point se tromper en l'employant pour tous les niveaux à envisager (par suite de pompages ou de causes naturelles) dans la même couche aquifère sur une certaine étendue.

#### 6 – Faiblesses extrêmes et grandes inégalités des vitesses d'infiltration et des percolations vers l'aval

Les chiffres admis ou trouvés expérimentalement pour  $K$  ne laissent aucun doute sur une caractéristique essentielle des mouvements de l'eau à travers le sol. C'est leur lenteur qui varie d'ailleurs à l'infini, selon les terrains, et les charges, les gradients hydrauliques.

L'infiltration verticale peut atteindre les nappes peu profondes quelques dizaines de minutes ou quelques heures après la pluie responsable, dans les gros sables et plus vite dans les graviers. Dans les limons et les formations argileuses ou sablo-argileuses et sablo-limoneuses, il lui faut beaucoup plus de temps, des jours, des semaines, des mois pour effectuer la descente. Et là où la capacité de rétention efficace n'est pas atteinte au début de l'infiltration, celle-ci est non seulement ralentie mais encore amoindrie, souvent dans de très fortes proportions, ou même supprimée au dessous de certaines profondeurs, par les exigences prioritaires du sol, en eaux adhésives.

Quant à l'écoulement subhorizontal des nappes, on appréciera l'infinité de ses vitesses d'après quelques chiffres, acceptables en gros et parfaitement révélateurs, quelles que soient les inexactitudes possibles pour chaque cas particuliers.

Cependant avant de fournir ces indications nous devons préciser les significations respectives de diverses vitesses envisagées par les hydrogéologues.

La vitesse apparente VA est le quotient de la distance de cheminement par le temps de parcours. La vitesse moyenne réelle Vm, elle aussi seulement apparente à vrai dire, et plus grande que Va, est le quotient du débit trouvé par la section mouillée interstitielle, correspondant à la porosité totale m. Mais une partie de cette section est occupée par l'eau «liée», adhésive, donc immobile. La vitesse réelle effective Ve supérieure à Vm est calculée d'après la porosité effective c'est-à-dire d'après la section disponible pour les mouvements des eaux gravifiques une fois que les besoins de la rétention spécifique sont satisfaits.

Donc, d'après M. CASTANY la vitesse-type réelle effective avec un gradient de 1 ou de 100 mètres pour 100) avoisine dans les argiles 0,01 mètre par jour, et 0,02 dans les mélanges de silts et de sables fins. Dans les sables ou grès (décomposés selon notre interprétation) à grains moyens la valeur-type serait 2 mètres par jour, et 9 mètres à travers les graviers moyens, 20 à 25 mètres peut-être dans les gros graviers.

Et M. SCHOELLER indique avec les gradients respectifs de 100 % et de 5 pour 1000 les vitesses effectives suivantes en mètres.

	j = 100 %	j = 5. P. 1000
Sable des dunes	50 par jour	0,25 par jour
Sable de rivages	20 à 48	0,10 à 22
Sable grossier	2,5 à 500	0,0125 à 2,50
sable fin	0,25 à 75	0,00125 à 0,375
gravier	2,5 à 2500	0,0125 à 12,5

Dans les argiles, les vitesses effectives ne dépasseraient point 0,1 à 10 mm par an avec un gradient de 100 %, ni 0,0005 à 0,05 mm par an avec un gradient de 5 ‰. Ces derniers chiffres impliquent pratiquement la suppression de tout mouvement dans le sens latéral à travers les argiles.

D'autres tableaux présentent des chiffres différents de ceux qui précèdent, quant aux vitesses réalisées dans les sables et les graviers. SCHOELLER indique pour la Suisse, d'après HUG, sans précision sur les pentes, 1 à quelques dizaines de mètres par jour dans les alluvions «ordinaires» (?), 350 m dans les alluvions grossières et jusqu'à 1200 mètres dans les alluvions riches en gros éléments et en sables des vallées alpines. Monsieur Marc HENRY indique 5 à 10 centimètres par seconde dans les alluvions graveleuses de la vallée du Rhône près de Lyon. Au sud du confluent avec l'Isère, la part plus grande des sables réduit cette vitesse à 3 millimètres par seconde. Dans le détail le déplacement peut atteindre dans les alluvions rhodaniennes 10 centimètres sec. à travers les graviers sans sable, et tomber à 0,1 mm sec. à travers des «masses plus sableuses».

Inutile d'insister sur l'immensité des différences ainsi constatées ou supputées d'une catégorie à l'autre et à l'intérieur d'une même espèce de terrains.

Nous avons dit plus haut les conséquences à tirer pour les exactitudes possibles des coefficients K choisis à priori.

Puis le lecteur aura du premier coup pressenti à quel point la lenteur des cheminements dans le sol peut différencier de l'Hydrologie superficielle, les régimes, c'est-à-dire les variations des nappes et des sources en niveaux et en débits.

Nous préciserons plus loin les effets retardateurs et modérateurs de cette léthargie qui affecte les infiltrations et les percolations et nous montrerons quelles interférences perturbatrices, quels embrouillements, quels embarras quant aux dates des causes pluviales en résultent pour les régimes des eaux souterraines. En outre dès maintenant on retiendra que le quasi-blocage des mouvements à travers les argiles ne pondère pour ainsi dire en rien les moeurs des cours d'eau. Car malgré la grandeur de la porosité totale, l'insignifiance de la porosité efficace rend presque infinitésimales dans ces terrains, par rapport aux débits pluviaux et ruisselants les circulations d'eaux gravifiques infiltrées.

## B - PERMÉABILITÉ DE FISSURES

### 1 - Définition des fissures

Les roches compactes d'origine non alluviale peuvent avoir les porosités d'interstices que nous avons signalées après celles des terrains meubles et qui atteignent 20 à 30 % pour certains tufs, et des chiffres encore élevés pour divers calcaires.

Mais la perméabilité que possèdent maintes roches compactes en soi tient surtout à l'existence de fissures, c'est-à-dire d'espaces verticaux, ou obliques par rapport aux joints de stratification, ou horizontaux. Ces fentes incomparablement plus longues que les pores interstitiels séparent des corps solides pratiquement imperméables plus ou moins volumineux (larges par exemple de plusieurs dizaines de centimètres à quelques dizaines de mètres). Les vides en question correspondent à des joints de stratification, à des diaclases ou à des failles. Certaines fissures dues à la pression exercée lors des efforts tectoniques sont dites de schistosité, d'autres ont pour cause les retraits par contraction. C'est le cas dans maintes roches éruptives récentes et notamment pour les prismes des basaltes. On distingue les fissures capillaires fines (moins de 0,5 mm) ou capillaires larges (0,5 à 3 mm) et les fissures de plus de 3 mm. On peut appeler béantes celles qui ont des spaciosités de l'ordre de 5 à 10 centimètres. Elles sont rares dans les roches autres que les calcaires.

### 2 - Roches fissurées plus ou moins perméables

Mais à l'intérieur de ces derniers, la fissuration est élargie à l'extrême, en quantité de strates et après des évolutions assez longues, par la dissolution

chimique. D'où les configurations internes dites Karstiques et sur lesquelles on s'étendra bientôt.

A moins de karstification avancée, la porosité totale de fissures peut ne pas atteindre 5 % ni même 2 ou 3 % dans les calcaires. Elle peut être encore soit aussi peu considérable, soit très grande pour les gypses et pour d'autres formations comme les grès et de nombreuses roches volcaniques récentes, notamment pour les basaltes.

Nous venons ici d'énoncer une vérité des plus importantes et qu'il ne faut jamais perdre de vue, afin de ne point concevoir des appréciations précises, fermes et qui risquent d'être fausses sur la perméabilité à la seule vue des cartes géologiques, ou après une exploration rapide des terrains. Cette réalité capitale, la voici. Des roches de même nom et de mêmes compositions chimiques, à peu de chose près ou à la lettre, peuvent avoir dans les différentes régions, sous-régions et aux diverses profondeurs, des perméabilités très inégales, surtout selon le nombre et la spaciosité des fissures, et aussi selon la fraîcheur du matériel et son taux plus ou moins avancé de décomposition.

### 3 – *Roches imperméables*

Donc en certains endroits les grès et les roches volcaniques peuvent être perméables, à un degré naguère mal connu et sur lequel nous insisterons plus loin. Et ces roches, en d'autres lieux, laissent très peu s'infiltrer et se mouvoir à leur intérieur les eaux pluviales.

Quant aux roches cristallines et cristallophyliennes elles n'ont point partout l'imperméabilité absolue que l'opinion classique leur attribue encore souvent. Elles paraissent en certains secteurs si hachées de failles et d'autres fentes, que, même formant des montagnes où la raideur des pentes nuit à l'infiltration, elles absorberaient des contingents aqueux appréciables, et que les crues venant de ces reliefs seraient nettement atténuées.

Par exemple M. P. VEYRET estime que la plus puissante montagne cristalline d'Europe, le Mont-Blanc, se comporterait de la sorte: facteur d'où résulterait l'abondance assez remarquable conservée à Chamonix par les étiages de l'Arve supérieure. En rapport avec ces faits ou ces opinions, on doit citer les fortes venues d'eau qui ont troublé les percements à travers les massifs cristallins de plusieurs tunnels alpestres. Les grandes failles entre les lèvres desquelles se logent des roches broyées ou mylonites, en ensembles poreux, doivent jouer ici un rôle très important. Les eaux pluviales ou de fonte ainsi introduites dans les corps des granites, gneiss et autres formations cristallines y produisent des altérations chimiques et cela amplifie les volumes des détritiques pourris et absorbants. Mais nous manquons gravement de données numériques précises sur ces infiltrations, sur les percolations consécutives et d'abord sur les sources auxquelles elles donnent lieu.

Dans la très grande majorité des cas, à ce qu'il semble, les roches ici en question, granites et granulites, amphibolites, serpentines, gabbros, variolites, quartzites, etc. . . . sont, abstraction faite des couvertures, très rebelles aux infiltrations. Il en est de même à moins de failles nombreuses et de grand style pour les schistes, les marnes en général, et les conglomérats. Mais les marnocalcaires peuvent plus que les marnes présenter des exceptions favorables à la pénétration assez active de l'eau.

#### *4 – Manteaux superficiels perméables de décomposition en maints cas sur des roches imperméables*

Cependant même sur des pentes assez vives, et à bien plus forte raison, là où l'inclinaison est faible ou nulle, ce qui restreint ou empêche les décapages par le ruissellement érosif ou par les éboulis et les glissements, la plupart des roches compactes peuvent porter des produits de désagrégation et de décomposition chimique et mécanique. Ce sont des éléments venus de plus haut par le fait des phénomènes que l'on vient d'indiquer, ou transportés par l'oeuvre des vents, ou par celle des glaciers. Ou bien il s'agit de matelas non cohérents formés sur place par altération de la roche sous-jacente ou roche mère.

Sur les calcaires, les couvertures se composent généralement de terra rossa, c'est-à-dire d'argile rougeâtre, dûe à la décomposition chimique. Mais ces sols imperméables en soi ne peuvent point ou guère obstruer les grosses fissures de roches mères. Et donc en général, elles n'empêchent point les calcaires d'absorber beaucoup d'eau, à moins de fortes pentes et de grande étroitesse pour les fentes.

Au contraire, au-dessus des roches cristallines, le manteau superficiel décomposé ou «gore», ou arène granitique est très perméable et il peut absorber beaucoup d'eau gravifique ainsi qu'on l'a vu, pour peu que son épaisseur dépasse 80 centimètres à 1 mètre, cas très répandus. Puis en haute montagne sur les pentes très raides, les éléments désagrégés demeurent difficilement sur place et la gravité, souvent aidée par le ruissellement, les entraîne en abondance aux pieds des versants, où ils constituent des cônes et des talus souvent très épais d'éboulis. L'infiltration à travers ces débris inconsistants peut-être intense, et former sous eux des nappes souterraines qui aboutissent à des sources. D'où la perméabilité et le pouvoir amortisseur hostile aux crues de maints reliefs cristallins, considérés naguère comme des lieux d'imperméabilité presque absolue.

#### *5 – Mouvements des eaux dans les roches à perméabilité de fissures*

Si les fentes sont très étroites, des phénomènes capillaires sont possibles et même inévitables dans les roches fissurées, et la loi de Darcy a des chances d'y

caractériser, d'autant moins mal que la fissuration est moins large, la circulation des eaux intérieures gravifiques. Mais là où les fissures sont assez amples, il n'y plus ni ascension capillaire ni mécanismes bien conformes à la loi de Darcy, valable seulement pour les écoulements laminaires; tandis que dans les espaces point resserrés les eaux acquièrent des vitesses qui suffisent à les rendre turbulentes <sup>11)</sup>).

D'après M. SCHOELLER, on a trouvé, dans les calcaires fissurés des vitesses de cheminement atteignant 1000 à 10 000 et même 20 000 à 25 000 mètres par jour et plus. Or 2400 et 24 000 mètres en 24 heures font respectivement 100 et 1000 mètres à l'heure soit 0,0276 m. et 0,276 m par seconde. Ce dernier chiffre représente une vélocité analogue à celle de bien des rivières en étiages.

## C - L'HYDROGEOLOGIE KARSTIQUE

### 1 - Description des terrains karstifiés

#### a) Configurations distinctives internes. Les réseaux karstiques

Lorsque les mouvements hydriques souterrains acquièrent de telles allures, et d'autres encore plus vives (sans doute jusqu'à 2 et peut-être 3 kilomètres à l'heure) soit 0,50 à 0,80 m. par seconde, comme cela se produit peut-être dans certaines parties du Jura, ou dans le Vercors jusqu'aux exutoires qui débouchent dans la Bourne, puis en d'autres endroits, cette rapidité dénote un développement remarquable des configurations internes dites karstiques <sup>12)</sup> signalées précédemment, propres à de nombreux massifs calcaires et que nous allons maintenant décrire (fig. 5). La karstification signifie essentiellement une grande

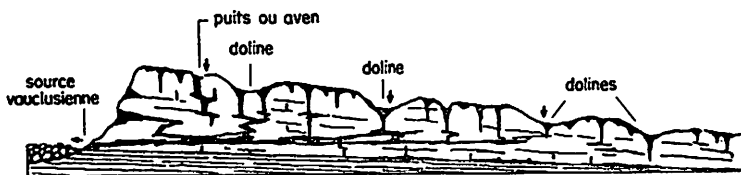


Fig. 5: Représentation sommaire de la circulation souterraine karstique. D'après L. MORET (Précis de Géologie, figure 101).

spaciosité des conduits internes et partant une remarquable facilité de circulation à travers les masses rocheuses où elle triomphe. Elle comporte, grâce à la dissolution chimique active aux dépens des calcaires l'épanouissement des fissures, notamment là où les diaclases se coupent, et celui des joints entre

11) Nous avons brièvement défini la turbulence dans la note 1 de la page 14 des épreuves.

12) Parce que ces phénomènes sont particulièrement développés dans le karst illyrien (Alpes dinariques, parallèles à l'Adriatique et d'ossature très calcaire).

strates. D'où création de galeries, de grottes dont les dimensions peuvent atteindre plusieurs mètres ou dizaines de mètres dans le sens transversal et encore bien plus dans le sens vertical. Et des puits verticaux ou avens<sup>13)</sup> élargis en cloches vers le bas dans une foule de lieux, traversent partiellement ou totalement une ou plusieurs strates du système rocheux. D'où l'existence de véritables nefs dont certaines ne sont pas beaucoup moins grandioses que celles des cathédrales. Les orifices de pénétration par le haut en ces gouffres sont des emposieux ou des catavothres dont les diamètres peuvent atteindre 1 à plusieurs mètres et qui se situent, soit isolés, soit en groupes, au fond de dolines ou cuvettes peu ou point déprimées, sans écoulement superficiel vers l'extérieur. Les dimensions des dolines sont elles mêmes très variées; quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres dans le sens transversal, quelques mètres à quelques hectomètres en creux extérieur, pour la surface rocheuse.

A la base des perforations internes verticales tendent à s'établir de véritables réseaux hydrographiques souterrains; à savoir des rivières en tunnels dont les cours plus ou moins ramifiés peuvent mesurer en longueur des hectomètres, des kilomètres et plus (grottes de Han sur Lesse dans l'Ardenne belge, grottes du Mammoth dans les Appalaches). Beaucoup des eaux karstiques s'épanouissent çà et là dans des creux élargis, dans des étangs en miniature, surcreusés, ou barrés par des saillies rocheuses. En tous les parcours de ce genre les surfaces liquides sont exposées à un air libre, quoique souterrain.

A des distances plus ou moins proches des couloirs ou des vasques aérés de la sorte, les eaux remplissent jusqu'à certains niveaux des fissures plus ou moins larges et point assez harmonieusement reliées les unes aux autres pour constituer de vrais réseaux avec un écoulement quasi-fluvial ou même des pauses lacustres. Puis, en aval de chenaux à surfaces libres ou de lacs souterrains, en maints systèmes karstiques, les débits doivent se mettre en charge avec des pressions variables, et fortes là où ils occupent jusqu'aux plafonds de véritables conduites forcées rocheuses plus ou moins ovales ou circulaires. En certaines de celles-ci les eaux s'engouffrent et se meuvent horizontalement ou en descendant avec ou sans violence. Et d'autres tuyaux naturels se redressent vers l'aval et contraignent les eaux à y effectuer des remontées siphonnantes, au-dessus des niveaux atteints contre les toits rocheux de l'amont immédiat. Puis au gré des variations hydrométriques subies en ces derniers endroits, les siphons se désamorcent ou s'amorcent de nouveau.

#### b) Zone noyée, et zone dénoyée

La réserve hydrique mobile ou bloquée qui se comporte de ces manières, occupe tous les vides, infimes ou équivalant à des chenaux et à des poches sur une épaisseur qui peut être très grande; plusieurs mètres ou dizaines de mètres

---

13) On les appelle encore des gouffres (Schlünde) des abîmes (Abgründe) des puits, des cheminées.



et même plus<sup>14)</sup> en certains massifs. Cette zone a pour base un substratum imperméable généralement marneux ou marno calcaire. On ne peut la considérer comme une nappe proprement dite faute de régularité pour la surface liquide et pour ses pentes, puis de lenteur uniforme dans l'écoulement et d'homogénéité pour le matériel baigné par l'eau. Monsieur G. CASTANY adopte pour cette couche le terme de zone noyée. Au-dessus d'elle, jusqu'à la surface du terrain, il n'y a qu'une seule zone «dénoyée» sans capillarité, sauf par exceptions localisées et avec une très faible rétention. Mais lors des grandes pluies, il s'y produit une forte circulation verticale, d'abord de haut en bas, par véritables cascades dans les avens, et par descentes bien moins précipitées dans les fissures de moyenne ou de petite largeur. Et inversement, de bas en haut, le niveau hydrostatique peut monter de plusieurs mètres ou décamètres, l'eau de la zone noyée augmentant en débit et en volume à la fois par invasions latérales dans le sens des gradients hydrauliques, et grâce à l'alimentation directement venue d'en-dessus, verticalement. En conséquence de ces surélévations liquides internes, des galeries haut situées ainsi que leurs émergences, ordinairement ou fréquemment dénoyées reçoivent des afflux liquides et fonctionnent pendant des durées diverses.

### c) Porosité totale et effective. Rapidité des circulations

Dans les parties excavées à l'extrême, sous quelques hectares ou dizaines d'hectares peut-être et pour cent à quelques cents mètres de profondeur, ce qu'on peut appeler la porosité totale caverneuse représente peut-être selon nos suppositions jusqu'à 10 ou 20 % et plus des volumes rocheux, y compris l'air et l'eau qui s'y logent. Mais elle ne doit plus atteindre 5 % ni peut-être 3 % dans la totalité des massifs même les plus minés, si on les considère pour des centaines et de milliers de kilomètres carrés. Et la porosité créée par des fissures très fines ou par des pores proprement dits pour les mêmes roches, peut être beaucoup plus grande; 15 à 40 % par exception pour la craie, 10 à 20 % pour le calcaire oolithique; et beaucoup plus petite en général: moins de 1 %, pour d'autres calcaires. Mais fait essentiel, la porosité caverneuse purement karstique est presque totalement efficace. Elle permet des circulations souterraines infiniment plus abondantes que dans d'autres terrains beaucoup plus poreux au total (sables, silts, argiles) où la grandeur des pourcentages en volume interstitiel est bien plus que compensée par la lenteur extrême de la percolation.

### d) Quelques régions karstifiées typiques

La plupart des montagnes et des plateaux calcaires sont les théâtres de phénomènes karstiques plus ou moins accentués. On citera outre le karst

14) La profondeur de cette zone est d'autant plus grande que l'introduction se fait plus vite, pour des pluies plus puissantes au total en peu de jours ou de semaines, puis que la spaciosité caverneuse est cependant plus réduite, et la sortie moins facile et moins prompte pour les causes que nous suggérerons plus loin.

illyrien, les monts Matra en Hongrie, le grand Apennin calcaire, le Jura, les Massifs préalpins français les plus calcaires, notamment la Chartreuse et le Vercors, les monts du Vaucluse, les Causses, diverses parties des Pyrénées, les auréoles calcaires du bassin de Paris, de larges parties des Appalaches, etc. ...

## 2 – Les pertes subies par les rivières dans les secteurs karstifiés

Dans ces régions, et partout où les rivières coulent en contact absolu avec des calcaires suffisamment évolués et perforés, ou seulement séparés de ce substratum par de faibles épaisseurs de graviers et de sables, elles peuvent perdre une partie de leurs eaux ou même la totalité des celles-ci à condition que le débit ne dépasse point la capacité d'engloutissement dans les orifices. La perte, en effet croit avec le débit fluvial, mais pas indéfiniment, faute de dilatation possible pour les trous de fuite. Et beaucoup de rivières n'abandonnent la totalité ou la majeure partie de leur écoulement que lors des étiages. C'est le cas pour la Loire qui expédie dans le sous-sol calcaire à partir de Bouteille (aval de Gien) et peut-être de lieux situés à l'amont, les deux tiers ou les trois quarts sinon plus de ses eaux lors des pénuries graves. En juillet 1870, le débit déjà misérable à Gien (20 m<sup>3</sup> pour 35 000 km<sup>2</sup>), n'aurait point dépassé 5 m<sup>3</sup>. à Orléans. Lors de l'étiage-record de l'été 1949, le débit à Gien est tombé à 12 m<sup>3</sup> et l'écoulement visible à Orléans est devenu pratiquement nul. Mais nous ignorons totalement quelle est la déperdition en moyenne, puis ses chiffres les plus forts (50 ou 100 ou 120 m<sup>3</sup>) durant les crues exceptionnelles qui roulent sans doute dans le lit 6000 à 7000 m<sup>3</sup> vers Gien, 5500 à 6000 à Orléans. Peut-être le module qui devrait avoisiner 355 m<sup>3</sup> en ce lieu est-il réduit localement à 330 ou 320 m<sup>3</sup>.

Quant au Danube non loin de ses sources, peu au-delà de la Forêt Noire cristalline, il perd vers Immendingen environ 6 m<sup>3</sup> en année moyenne, dans le calcaire. Puis diverses petites rivières côtières d'Israël s'affaiblissent en moyenne de moitié ou des deux tiers, soit de 500 à 1000 lit. sec. et plus à l'approche de la mer. Et dans toute la longueur méridienne de cet état, une bande occidentale de terrain, inclinée en surface vers la Méditerranée, envoie beaucoup des eaux qui l'arrosent, sous la crête apparente de séparation inter-fluviale vers l'est, c'est-à-dire vers le Jourdain.

Une autre perte célèbre est celle que subit le Doubs vers Arçon en aval de Pontarlier, et peut-être dès l'amont de cette dernière ville. D'après ses modules exactement déterminés à l'aval et ceux de la Loue, affluent du cours inférieur et qui naît à l'ouest, les débits perdus par le Doubs et qui parviennent au tributaire doivent représenter quelque 12 m<sup>3</sup> ou même plus; soit au moins la moitié de l'écoulement du Doubs dans le secteur des pertes. Nous mentionnerons plus loin le cas du Tchou.

Puis la Vernaison affluent de la Bourne dans le Vercors perd au moins 6 et

peut-être 7 m<sup>3</sup> en moyenne. Ou plutôt ces débits après une certaine distance de ruissellement disparaissent, avant de rejoindre le lit de la Bourne.

Mais la perte la plus grandiose que nous connaissions en ce genre est celle quasi fabuleuse (125 à 130 m<sup>3</sup>), dont bénéficie le Manavgat (fig. 6), rivière qui

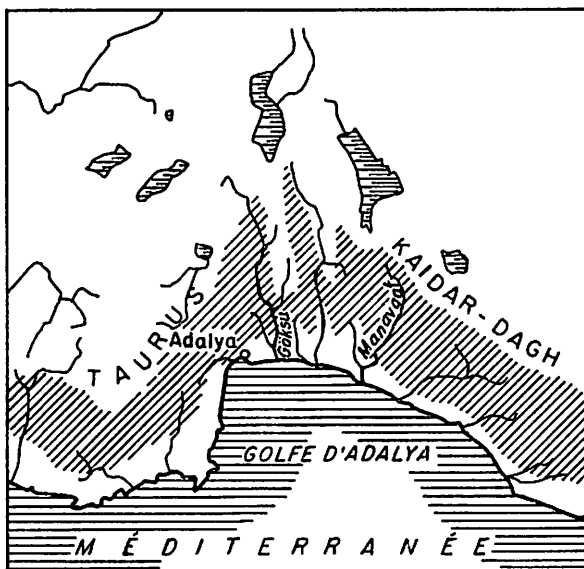


Fig. 6: Situation du Manavgat en Turquie méridionale.

draine le revers Sud-occidental des montagnes du Taurus ou plutôt du Haidar Dagh vers le Golfe d'Adalia en Turquie. Nous reviendrons bientôt sur ce phénomène.

### 3 – Parcours des eaux perdues et lieux des résurgences

En des cas nombreux, les débits soustraits aux rivières par les pertes karstiques rejoignent les mêmes cours d'eau directement ou par l'intermédiaire d'affluents en aval. Ainsi les pertes éprouvées par la Loire moyenne vers Bouteille et plus en amont servent à nourrir presque entièrement un faux et bel affluent, le Loiret qui naît dans le Val de Loire, à quelques kilomètres du fleuve au sud d'Orléans. En outre une partie (peut-être plus du tiers) des débits perdus reviennent au fleuve directement à l'amont du confluent avec le Loiret, par plusieurs bouches sans doute.

De même la Nera tributaire du Tibre, reçoit, surtout par la Fontaine Peschiera, vers Narni, la majeure partie de débits disparus dans le haut bassin situé au coeur du Grand Apennin calcaire.

Puis, comme nous l'avons vu, les eaux perdues par le Doubs supérieur

aboutissent au cours inférieur de la même rivière par la Loue. Et les pertes dont pâtit dans le Vercors le bassin de le Vernaison, viennent renforcer la Bourne, vers Pont-en-Royans, à la sortie de la montagne.

L'Ach petit affluent septentrional du lac de Constance et donc indirectement du Rhin supérieur amène à ce fleuve les eaux perdues par le Danube vers Im-mendingen. Et une petite rivière des plus hautes Pyrénées qui draine le versant septentrional du Massif de la Maladetta et se perd bientôt dans le trou de Toro <sup>15</sup>) envoie les eaux ainsi disparues (peut-être 2 à 2,5 m<sup>3</sup> en moyenne) non au Rio espagnol d'Esera qui descend vers la Cinca, le Segre et l'Ebre, mais du côté du nord à la Garonne par le Goueil de Jouéou, dans le Val d'Aïan après un parcours souterrain de 3,5 kilomètres. L'émissaire de la Maladetta est donc le vrai cours supérieur de la Garonne.

Puis un remarquable cours d'eau du Kazakstan, le Tchou, fort d'environ 70 m<sup>3</sup> au lieu où on le jauge, est sans aucun doute l'émissaire souterrain du lac Issyk-Koul, dont la contribution d'ailleurs n'atteint peut-être pas le chiffre susdit <sup>16</sup>. L'écoulement caché doit se faire par-dessous un ensellement qui abaisse l'altitude entre deux Massifs montagneux de direction est-ouest, comme celle du lac, et dont les sommets dépassent 4500 mètres. L'engouffrement s'effectue à l'Ouest du lac, non loin de celui-ci et la résurgence à 20 ou 30 kilomètres vers l'ouest nord-ouest.

Enfin nous savons déjà que le Manavgat reçoit par-dessous le Taurus au moins 125 à 130 m<sup>3</sup> qui lui donnent un module réel de 175 à 180 m<sup>3</sup> soit 189 à 194,4 lit. sec. par km<sup>2</sup> à Homa; cela supposerait un écoulement annuel de 5,59 à 6,11 m. en fonction du bassin topographique à la station susdite (928 km<sup>2</sup>). Cependant le débit spécifique provenant directement du Taurus méridional ne peut guère dépasser 50 lit. sec. par km<sup>2</sup> tandis que la Turquie intérieure fournit tout au plus à ce qu'il nous semble 5 lit. sec. par km<sup>2</sup> et sans doute moins. D'où notre estimation selon laquelle le bassin réel du Manavgat avant Homa occupe, outre les 928 km<sup>2</sup> situés entre les crêtes topographiques et la station, au moins 25 000 et peut-être 30 000 km<sup>2</sup> ou plus.

#### *4 – Surfaces réceptrices apparentes et réelles*

La connaissance de ces phénomènes ne laisse aucun doute, pour les régions calcaires karstifiées, sur la gravité des discordances qui peuvent opposer les surfaces réceptrices réelles, d'où proviennent effectivement les débits des rivières, et les bassins apparents planimétrés, sur les cartes topographiques où, d'après les reliefs, on a repéré et tracé les interfluves ou lignes qui départagent les écoulements superficiels. Car les débits fluviaux réels fournis par des bassins

---

15) Ou forat des Aigualluts.

16) Car nous ne savons point si la station où l'on mesure 70 m<sup>3</sup> en moyenne se trouve près des sources ou assez loin en aval.

effectifs en partie souterrains peuvent différer beaucoup des écoulements virtuels, c'est-à-dire de ceux que l'on constaterait si la surface réceptrice se confondait avec le bassin topographique. Le débit réel peut être très supérieur au débit virtuel (C'est le cas pour le Manavgat, pour le Tchou, pour la Bourne, avant le confluent avec la Vernaison, pour la Loue, et infiniment plus pour le Loiret presque dépourvu de bassin topographique). En revanche la Loire à Orléans, le Doubs entre les abords de Pontarlier et le confluent avec la Loue, puis le Danube, définitivement à partir d'Immendingen, ont des débits réels inférieurs aux débits virtuels (de plus de moitié pour le Danube à Möhringen).

Dans ces derniers cas la médiocrité de l'écoulement donnerait à croire que les bassins apparents sont très supérieurs aux bassins réels. Et ceux-ci dans les cas inverses, dépassent en certaines régions de beaucoup <sup>17)</sup> les bassins planimétrés sur la carte.

Aussi les pertes suivies de récupérations en aval par la même rivière, et bien plus fâcheusement les pirateries souterraines commises à son détriment par des cours d'eau voisins, ou au contraire les captures dont ils pâtissent peuvent-elles gravement perturber les appréciations des surfaces réceptrices réelles. Donc pour les débits spécifiques et bruts, les évaluations fondées, à défaut de mesures directes, sur les planimétrages et sur certaines valeurs admises des précipitations sont défectueuses en pareils cas. Et l'ignorance ou l'erreur sur ces phénomènes hydrogéologiques inspire des hypothèses explicatives mauvaises pour certains débits constatés. En particulier on peut concevoir des estimations trop généreuses ou trop avares sur les précipitations recueillies par les bassins apparents.

Cependant de bonnes connaissances en hydrologie et en climatologie générales et régionales permettent de précieuses mises au point. Nous raisonnons par exemple comme il suit au sujet de la Loue et du Doubs à l'amont d'Arçon. Si la première débite à Chénecey presque 40 lit. sec. par km<sup>2</sup> de bassin apparent, contre un chiffre raisonnable selon notre opinion, de 25 à 30, le surplus à savoir 12 à 15 lit. sec. par km<sup>2</sup> soit un peu plus de 10 à 12 mètres cubes, en valeur brute, devrait être ajouté au débit virtuel du Doubs. Et celui-ci à Goumois, devrait rouler au moins 40 m<sup>3</sup> au lieu de 28 M<sup>3</sup>, soit plus de 35 lit. sec. par km<sup>2</sup>. Cependant une nouvelle complication gêne ces calculs. Le débit qui, abandonnant le Doubs, aboutit à la Loue ne doit pas être rapporté virtuellement à toute la surface réceptrice du Doubs jusqu'au lieu des pertes éprouvées par cette rivière. Car elle même en étiage n'est point entièrement asséchée par les fuites.

Et l'on peut aussi admettre en risquant peu d'erreur que la Bourne à Pont Rouillard, avant son confluent, avec la Vernaison devrait débiter 35 à 38 lit. sec. par km<sup>2</sup> et non 65; et la Vernaison une trentaine et non 6.

17) On ne doit cependant pas oublier que d'ordinaire les inexactitudes et les incertitudes de ce genre ne peuvent porter sur des surfaces réceptrices considérables. Car aucun des détournements souterrains que nous connaissons ne dépasse 130 m<sup>3</sup> en moyenne. Et seulement quelques autres atteignent ou dépassent 30 ou 40 m<sup>3</sup>. Débits médiocres et en des cas bien plus nombreux, minimes à côté des débits réels des grosses rivières.

Ou encore la Siagne issue vers Cannes des Préalpes Maritimes calcaires débite dans son cours supérieur plus d'eau que ne peut en fournir son bassin topographique. Elle dérobe à coup sûr des débits relativement point insignifiants à deux rivières voisines, le Loup au nord-est et l'Artuby tributaire du Verdon au nord-ouest. D'après M. Jean CARZON, 1,1 m<sup>3</sup> viendrait à la Siagne de l'Artuby.

### 5 – Les sources vaclusiennes

#### a) Liste de sources et leurs modules

D'après M. I. DERINER, Directeur du Service hydrographique turc une grande partie des eaux soutirées par le Manavgat lui arriveraient en une seule source; ou en tout cas une seule bouche fournirait la totalité des eaux d'étiage; soit plus de 40 m<sup>3</sup>. Il ne nous est point interdit de supposer qu'au moins 80 à 100 m<sup>3</sup> sinon l'intégralité des écoulements capturés passeraient par cet exutoire. De toutes façons selon notre information actuelle, aucune autre émergence ou aucun ensemble de sources rapprochées, dans le monde, ne possède une pareille abondance.

Mais déjà le Khabour (fig. 7), dans le désert du Djéziréh Syrien, entre le

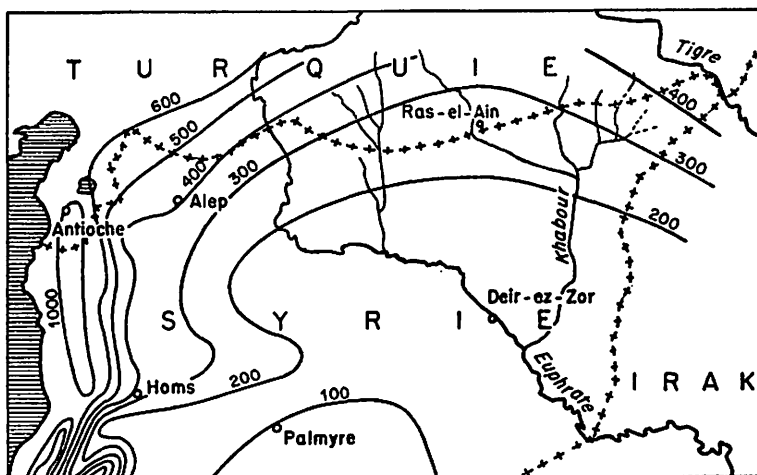


Fig. 7: Situation des sources du Khabour à Ras-el-Aïn en Syrie nordorientale. Ras-el-Aïn se trouve en réalité au sud de la frontière. On a indiqué les précipitations moyennes annuelles.

Tigre et l'Euphrate, et très près de la Turquie où se fait l'alimentation sur plus de 7000 km<sup>2</sup> montagneux débite en moyenne 40 mètres cubes, point venus d'une seule bouche à vrai dire. Cependant 27 de ces mètres cubes sont régurgités

par 13 exutoires dont aucun n'est situé à plus de 2 kilomètres de l'émergence la plus éloignée. Telles sont les sources de Ras-el-Aïn. Et l'émissaire de 9 d'entre elles est rejoint presque aussitôt par un bras venu de Turquie, et de régime identique à celui de l'autre rivière, ce qui dénote pour toutes les deux, et donc pour le collecteur général, une origine hydrogéologique analogue. Puis dans le Frioul, la Stella (fig. 8), donne 33,6 m<sup>3</sup>, sans doute prélevés en partie sur

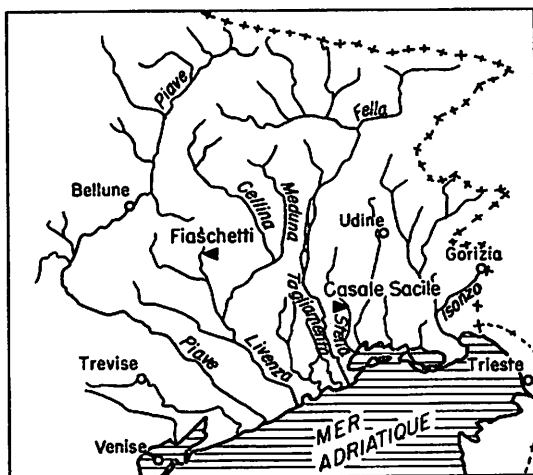


Fig. 8: Situation de la Source de la Stella à Casale Sacile et de la source de la Livenza à Fiaschetti.

l'écoulement qui devrait revenir au Tagliamento. Les sources d'une rivière voisine, la Livenza à Fiaschetti donneraient environ 17 m<sup>3</sup>. Et l'apport total des sources Peschiera, voisines du Velino inférieur (affluent de la Nera, elle-même tributaire du Tibre) totalise en moyenne 18 m<sup>3</sup> sur un front de 1 kilomètre d'après M. le Professeur M. ORTOLANI.

La célèbre Fontaine de Vaucluse, au nord-est d'Avignon s'approprie 26 à 27 m<sup>3</sup> en moyenne issus d'un bassin souterrain qui s'étend sans doute sur 1500 km<sup>2</sup> au plus (en partie sans doute aux dépens des eaux du Calavon affluent de la Durance. Mais une certaine fraction des eaux pluviales qui arrosent le bassin topographique de la rivière (à savoir la Sorgue, grossie par l'Ouvèze, et par la Nesque) s'écoulent par ruissellement jusqu'aux cours d'eau et dans les lits de ces derniers.

Puis la Fontaine Levêque, laquelle débouche tout près du Verdon inférieur, au sud de celui-ci, lui apporte en moyenne 6,5 m<sup>3</sup> auxquels il faut ajouter 0,5 m<sup>3</sup> sortant par les bouches voisines des Garrubys. Ces eaux proviennent ainsi que l'a montré dans une belle étude M. Jean Carzon, de 4,5 m<sup>3</sup> perdus par un affluent du Verdon, l'Artuby, puis de 1,8 m<sup>3</sup> infiltré directement dans 70 km<sup>2</sup> du Plan, ou Plateau calcaire de Canjuers et de 0,7 m<sup>3</sup> souterrainement dérobés au Jabron, autre tributaire oriental du Verdon.

On pourrait citer pour la France une foule d'autres sources karstiques, d'ailleurs moins grosses que les précédentes; notamment dans les Préalpes du Nord (sources du Guiers, Cuves de Sassenage, «Goules» de la Bourne) puis dans le Jura, les Causses (Sorgue du Larzac) les Pyrénées calcaires, le Poitou (source de la Touvre) etc. . . . A Chatillon-sur-Seine la Douix est une résurgence du fleuve point très éloigné de son origine. Et une autre Douix au sud-ouest de Bricon, non loin de Chaumont, envoie ses eaux à l'Aujon affluent de l'Aube.

Puis le Liban est une zone d'élection pour les grandes sources du type karstique. Citons celles d'Aïn Zarka qui créent richement l'Oronte, avec 15 à 16 m<sup>3</sup>; celles du Nahr Sene (14,5 m<sup>3</sup>) petit fleuve côtier de 6 kilomètres au sud de Lattakié, celle de Barada (4 m<sup>3</sup>) sur le côté oriental de l'Anti-Liban; celle d'Anjar, celles de Tell Ayoun (5 m<sup>3</sup>) qui renforcent le Litani (Renseignements fournis par MM. Soubhi Mazloum et I. Abd-el-Al).

Enfin aux Etats-Unis on trouve dans la Floride la Silver Spring et la Blue Spring, chacune de 14 à 15 m<sup>3</sup>, puis dans les Monts Ozark au nord du bas Arkansas, d'après O. E. MEINZER, 12 M<sup>3</sup> pour la Source Van Buren, presque autant pour la Source Greer.

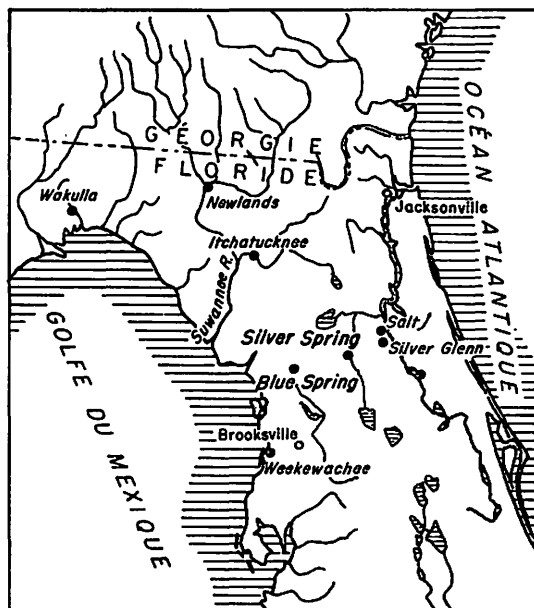


Fig. 9: Situations de la Silver Spring, de la Blue Spring, et d'autres grandes sources en Floride. D'après O. E. MEINZER, Large springs in United States.



## b) Aspects de ces exutoires

Les émergences karstiques ont des aspects très divers. Tantôt la porte de sortie laisse un large espace entre la surface liquide et la plafond calcaire, et l'on peut pénétrer dans le réseau souterrain jusqu'à plus ou moins grande distance (Grottes de Han sur Lesse en Belgique, grottes du Mammoth dans les Appalaches). Tantôt la bouche est entièrement occupée par l'eau qui jaillit sous pression (Fontaine Levêque). Souvent des exutoires secondaires permanents, ou temporaires et qui fonctionnent seulement quand la roche est gorgée par des pluies très abondantes, apparaissent à quelque distance de la bouche principale, sur les côtes ou au-dessus. Dans les Causses du Tarn, et à l'origine du Bief de l'Enragé, dans la vallée jurassienne de la Bienne, affluent de l'Ain, ces bouches s'étagent jusqu'à 50 et 100 mètres d'altitude sur la paroi calcaire plus ou moins verticale qui se dresse au-dessus de la source principale. Elles fonctionnent en cascade après les pléthores pluvieuses. D'ailleurs divers exutoires principaux et permanents sont aussi des cascades. C'est le cas pour les sources de la Loue et du Lison dans le Jura, pour le Goueil de Jouéou dans le Val d'Aran, etc. . . .

La Fontaine de Vaucluse comporte en permanence un jaillissement d'eau par de nombreuses bouches sur deux cents mètres de trajet continuant un lit rocheux le plus souvent à sec et d'une longueur égale. Mais au début de ce chenal supérieur, et au pied d'une reculée rocheuse très haute, abrupte, et circulaire, en «bout du monde» (forme très commune à l'origine des rivières karstiques) une large ouverture laisse apercevoir en contre-bas, à l'intérieur une eau verdâtre très calme. Lors des grandes crues, cette eau monte, déborde par le déversoir rocheux qui forme la base de l'ouverture, le couvre de quelques mètres et dévale puissamment et bruyamment vers l'aval.

Enfin de nombreuses sources par lesquelles débouchent les eaux de bassins souterrains calcaires sont de simples vasques dont certaines peuvent être très spacieuses et fortement ou doucement bouillonnantes dans leurs fonds. C'est le cas par exemple en Floride pour la Silver Spring. Ses multiples ouvertures apparaissent dans un bassin large de presque un demi-hectare et profond de 10 mètres ou plus<sup>18</sup>. Et d'après une photographie, la Blue Spring paraît avoir une conformation analogue avec des eaux quelque peu dormantes.

Nous sommes assez enclins à réserver l'appellation de sources vauclusiennes (résurgentes, si une rivière engloutie assume au moins en partie leur alimentation) aux exurgences qui se caractérisent par une certaine vigueur turbulente et se situent à la base de versants rocheux, ou à une certaine hauteur dans leurs parois.

---

18) A 4 kilomètres au-delà de cette émergence, de nombreux apports souterrains ont presque doublé le débit moyen. Celui-ci paraît ainsi presque le même que celui de la Fontaine de Vaucluse, mais après un parcours presque 10 fois supérieur à celui qui suffit pour presque toute l'alimentation exurgente de la Sorgue à son origine.

## D – QUELQUES DONNÉES SUR LES RÉGIMES INFLUENCES PAR LA KARSTIFICATION

### 1 – *Documentation sur le régime des eaux souterraines*

Les eaux souterraines, à savoir celles des nappes phréatiques ou des zones noyées et des réseaux karstiques ont, comme les eaux de surface, des régimes, c'est-à-dire des débits moyens annuels et mensuels, puis des étiages et des crues. On connaît bien plus facilement les débits pour les sources où l'écoulement est concentré, visible, donc très observable, que pour les rivières souterraines, peu ou point accessibles dans le sous-sol assez loin à l'amont des sources, et pour les nappes phréatiques, de sections mouillées énormes par rapport à l'infinité des vitesses donc des débits dans une unité du profil en travers. Cependant comme nous l'avons vu, grâce à des pompages dans des puits, on détermine les débits que peuvent apporter les nappes sans épuisement progressif pour elles. Mais ces mesures ne donnent en toute certitude que des informations locales. Pour connaître suffisamment l'écoulement phréatique dans toute la tranche d'une grande vallée alluviale, il faudrait effectuer des pompages dans des puits très nombreux, ce qui entraînerait des frais extrêmement lourds. D'autre part les observations très simples des niveaux piézométriques renseignent sur les dates, les retards par rapport aux causes pluviales, des crues et des pénuries éprouvées par les nappes et sur les dénivellations réalisées lors de ces évènements. Mais la documentation ainsi obtenue est encore sporadique ou groupée seulement pour quelques pays (États-Unis, Allemagne, Autriche, Hongrie, Italie) ou plutôt pour quelques régions de ces contrées. Bref on connaît infiniment mieux les comportements des rivières que ceux des eaux souterraines et des sources. Nous pouvons cependant ici indiquer des phénomènes typiques et indubitables.

### 2 – *Cas de pondération pour des rivières alimentées par des circulation karstiques*

Nous commencerons par l'examen des régimes fortement influencés par la karstification (fig. 10 à 13).

Tout de suite, à leur sujet, nous combattons une erreur bien trop répandue. Pour beaucoup, la très grande perméabilité ici incontestable, signifie partout où elle se manifesterait une décisive pondération des régimes fluviaux, c'est-à-dire la réduction ou la quasi suppression des crues et en compensation l'abondance très honorable conservée par les étiages même rares, grâce à la grandeur des réserves souterraines; et du même coup la modération des écarts entre les moyennes mensuelles extrêmes des débits.

Ce tableau encourageant est certes exact à des degrés divers pour d'assez nombreuses sources vaclusiennes et pour les rivières que celles-ci alimentent.

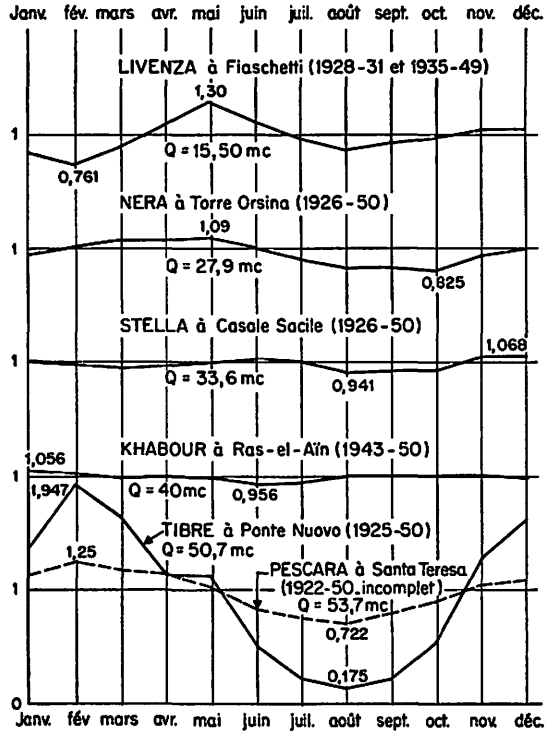


Fig. 10: Rivière ou sources fortement ou extraordinairement pondérées par le genre de karstification avec très grosses réserves hydriques lentement dégorgees. Régime contrasté pour le Tibre supérieur à cause de l'imperméabilité.

### a) Grande abondance des étiages ainsi conditionnés

Et tout d'abord les plus favorisés de ces cours d'eau, par pondération dûe à des types de karstification qui conditionnent l'existence de réserves souterraines surabondantes et très lentement épuisées, ont des étiages remarquablement forts et soutenus. Les remarquables valeurs des eaux fluviales nourries de la sorte malgré les pires sécheresses se manifestent soit par la richesse que conservent alors les écoulements, soit par la grandeur des rapports qui s'établissent entre ces débits de pénurie et les modules ou débits moyens annuels. Ces coefficients de débit (selon l'expression de A. COUTAGNE) peuvent atteindre, même pour les écoulements minimaux connus, 0,30 à 0,50, et plus bien entendu pour les étiages caractéristiques, c'est-à-dire pour ceux dont les débits sont dépassés en moyenne pendant 355 jours par an<sup>19)</sup>.

19) Et plus exactement d'après les durées totalisées pendant 3550 jours en dix ans, 7100 jours en 20 ans etc. ...

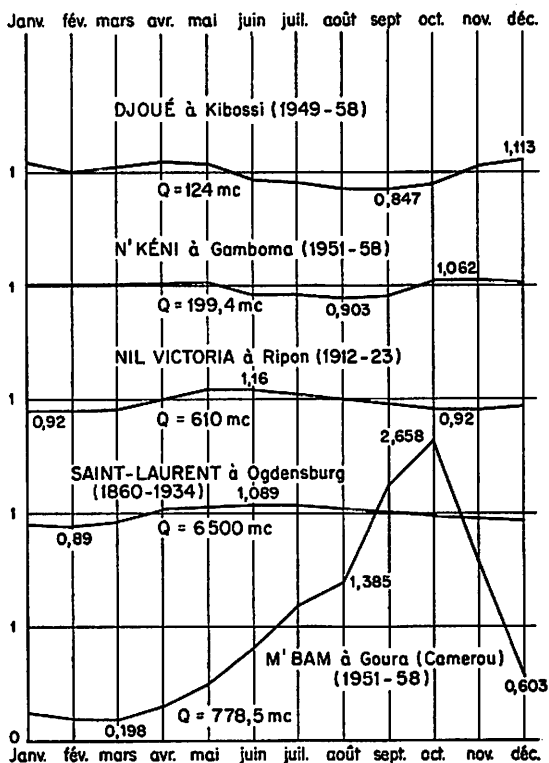


Fig. 11: Coefficients mensuels de débits (rapports des débits moyens mensuels aux débits moyens annuels) pour des rivières dont les régimes sont très pondérés par des terrains perméables (Djoué et N'Kéni) ou par des grands lacs (Nil Victoria, et Saint-Laurent). On donne pour comparaison le régime non pondéré du M'Bam au Cameroun.

Dans le haut Apennin calcaire, arrosé par des pluies abondantes, on observe de façon frappante ces deux caractéristiques lors des sécheresses. Sur deux affluents du Tibre, la Nera et l'Aniene, les minima minimorum connus dans les cours inférieurs, ne sont point tombés naturellement au-dessous de 8 et de 10 lit. sec. par km<sup>2</sup> (alors que le débit moyen annuel de la Seine à Paris atteint à peine 7 lit. sec. par km<sup>2</sup>). Les coefficients de débits pour les étiages extrêmes en question ont dépassé 35 %. Pour la Pescara à Santa Teresa au sortir des mêmes montagnes, mais du côté de l'Adriatique, le minimum connu à encore présenté 9 lit. sec. par km<sup>2</sup>, soit plus de 50 % du module.

Or pour le haut Tibre qui émane de terrains grésio-argileux à Ponte Nuovo, nous connaissons un minimum de 0,430 lit. sec. par km<sup>2</sup>, et l'étiage caractéristique avec 0,800 lit. sec. par km<sup>2</sup>, équivaut seulement à 6,5 % du module. Et la Seine à Paris que beaucoup estiment très pondérée, doit pouvoir tomber à moins de 0,5 lit. sec. par km<sup>2</sup>, soit à 7 ou 7,5 % du module.

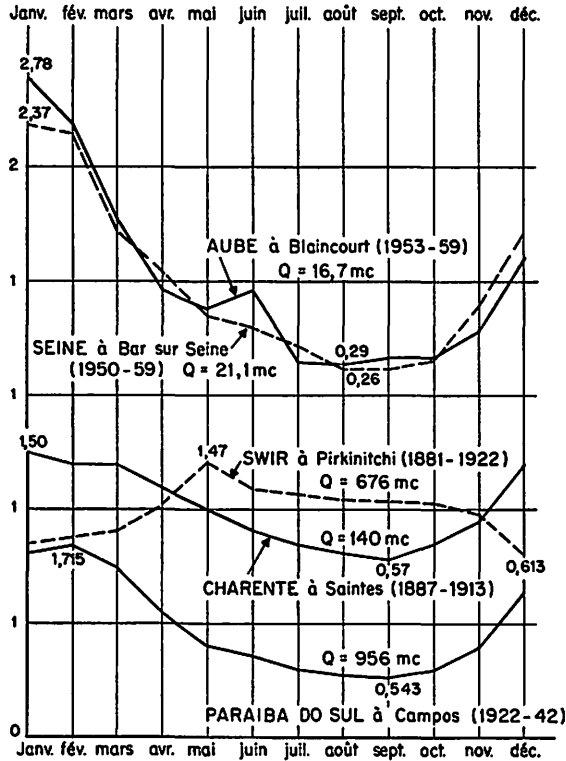


Fig. 12: Régimes saisonniers peu pondérés malgré de grosses infiltrations, à cause de résurgences rapides (Aube et Seine supérieure); régimes beaucoup moins contrastés grâce à des réserves souterraines assez lentement déchargées (Charente et Paraïba do Sul, malgré la sécheresse de plusieurs mois sur le bassin de ce dernier), et rivière sensiblement pondérée par le lac Onéga (le Swir).

Quant au Khabour à Ras-el-Aïn, l'équilibre de son régime à l'issue d'une surface réceptrice où l'écoulement est presque uniquement souterrain est saisissant et même presque total. Il ne semble pas qu'au point susdit la rivière puisse tomber au-dessous de 32 m<sup>3</sup>, contre 40 à peu près pour le module, soit environ 0,80 pour le coefficient de débit.

## b) Crues et variations extrêmes

En contrepartie de telles résistances à l'épuisement, les mêmes exutoires et les cours d'eau qu'ils nourrissent ont des crues modestes ou même très faibles. La Nera dans l'Apennin calcaire, n'a jamais débité à notre connaissance plus de 450 à 500 m<sup>3</sup> sec. au débouché d'un bassin qui d'après son étendue (4020 km<sup>2</sup>), son relief et les averses possibles sur lui émettrait parfois 3000, sinon

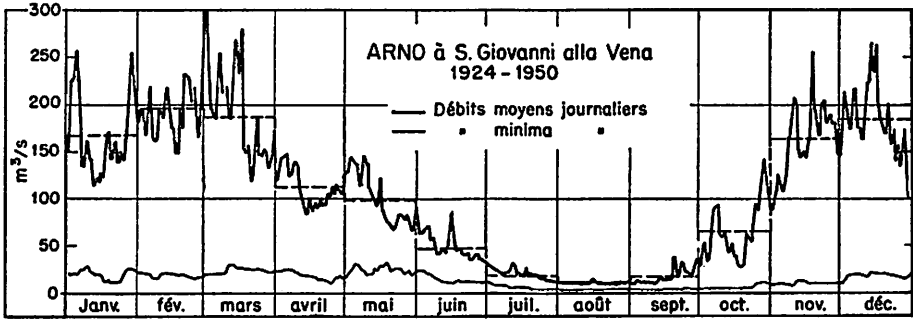
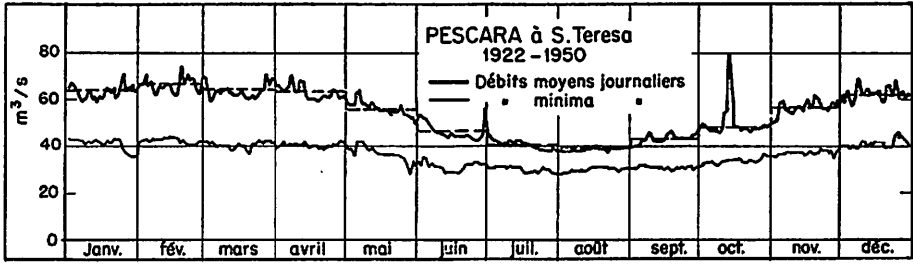


Fig. 13: Allure des régimes fluviaux sur la Pescara très pondérée par un bassin calcaire karstifié avec réserves souterraines énormes et lentement restituées, et sur l'Arno dont le bassin est en grande partie imperméable. D'après Dati caratteristici dei Corsi d'acqua italiani, 1953.

4000 m<sup>3</sup> sec. si les terrains en ce domaine étaient étanches, et 2500 à 3000 m<sup>3</sup> si les calcaires en question étaient traversés avec la rapidité que nous verrons ailleurs.

La Stella en 25 ans n'a varié que de 18 à 79,5 m<sup>3</sup>. Les Fontaines Peschiera semblent remarquablement calmes. La Fontaine Lévêque a pour extrêmes bien connus, 2,5 et environ 20 m<sup>3</sup>. Il n'est pas certain qu'aux Etats-Unis les plus gros débits de la Silver Spring et de la Blue Spring puissent égaler trois fois les modules. La Fontaine de Vaucluse est bien plus capricieuse. Elle aurait déjà, débité (en novembre 1935 et 1951) 170 mc contre 26 à 27 pour le module global. Et à Bédarrides, la Sorgue issue de cette source mais qui reçoit l'Ouvèze et la Nesque roule peut-être, en très grandes crues 350 à 400 m<sup>3</sup> d'origine en partie ruisselante. Mais le même bassin, s'il était exposé à une grande prépondérance du ruissellement pourrait sans doute éprouver des crues de 1200 et plutôt de 1500 m<sup>3</sup>. Quant aux sources libanaises et syriennes, et en particulier à celles du Khabour elles varient bien moins que la Fontaine de Vaucluse.

Cet étouffement des crues, presque complet ou réalisé aux trois quarts ou aux quatre cinquièmes pour les maxima a pour suite une belle modicité des contrastes entre les moyennes respectives globales des mois riches et des mois pauvres. Le fait a certainement pour cause une grande lenteur du cheminement

souterrain pour les réserves, très considérables. Phénomène qui peut être dû à l'horizontabilité des strates inférieures, puis à l'existence de dépressions internes spacieuses où l'eau s'emmagasine, et à l'étroitesse vers la sortie des débouchés (galeries de médiocre diamètre, siphons, etc. . . .), en contraste avec la facilité de l'introduction dans la masse rocheuse.

Et l'on ne peut ici, invoquer un état peu avancé de la dissolution interne par l'érosion chimique. Car alors, les réserves accumulées dans les bassins en question, seraient, faute de place, peu volumineuses. Hypothèse absolument démentie par la richesse quasi inépuisable des débits lors des étiages.

### *3 – Cas de pondération très faible pour les eaux karstiques*

Ailleurs au contraire, la circulation souterraine est jusqu'au bout, jusqu'à l'exsurgence, rapide et facile, à cause de grandes spaciosités même vers les sorties, et d'inclinaisons internes vives. Lorsqu'il en est ainsi, les étiages peuvent devenir très chétifs. A Besançon le bassin en grande partie calcaire et karstifié du Doubs n'empêche pas certains débits de s'effondrer au-dessous de 1 lit. sec. par km<sup>2</sup>. Et dans les bassins de la Tamise et de la Seine, l'abondance des calcaires soutient encore moins les écoulements les plus faibles. Et au contraire, les maxima des crues ne sont pas lourdement inférieurs aux flots que de mêmes averses engendreraient en des réseaux identiquement dessinés et inclinés, et qui draineraient des montagnes marneuses et cristallines mais point recouvertes par un manteau de décomposition.

Car une forte fraction des eaux ruisselantes d'abord puis engouffrées, peut participer à la gestation du maximum. Les crues de la Bourne dans le Vercors, malgré le passage partiel précipité de leurs eaux à travers la montagne jusqu'aux goules, ne semblent pas beaucoup moins puissantes que celles de rivières vosgiennes ou limousines. Les crues de l'Areuse, rivière jurassienne suisse, paraissent aussi peu atténuées. Celles de sa voisine l'Orbe, et de la Loue nous semblent réduites de moitié ou d'un peu plus, par la karstification. Mais elles sont déjà fortes.

Puis dans le haut bassin du Vidourle, terrible petit fleuve côtier méditerranéen non loin de Nîmes, les résurgences ne peuvent évidemment débiter au maximum des eaux aussi gonflées que celles qui, dans les grandes occasions ont ruisselé à la suite d'averses éminemment torrentielles. M. JACQUET a cependant mesuré 30 m<sup>3</sup> dans la résurgence de Sauve, après une crue ordinaire. Et lors de déchainements fluviaux plus diluviens la même bouche doit émettre des débits supérieurs, mais sans aucun doute, bien moindres que ceux qui proviennent dans le même réseau, par ruissellement, de surfaces réceptrices égales. Ainsi, même les circulations karstiques les plus rapides et les plus surabondantes ne doivent point rivaliser avec les gonflements superficiels produits par des averses exorbitantes; par exemple plusieurs centaines de millimètres en 12 à 24 heures,

100 à 150 ou plus en deux heures. Le seul fait de propagations souterraines qui ne dépassent point sans doute 1,5 à 2 ou peut-être par très rares exceptions 3 kilomètres à l'heure, contre 8 à 15 ou plus dans les lits exposés à l'air libre, implique une atténuation des crues. Là où celles-ci sont produites par des précipitations moins intenses et plus durables, comme dans le Jura et les Préalpes, les maxima d'origine karstique sont bien moins réduits<sup>20)</sup> pour chaque élément considéré seul, par la lenteur initiale de la propagation. Mais grâce à ce dernier phénomène, les concordances entre débits très forts des affluents courts à l'aval et flots venus de l'amont assez lointain dans les artères principales se trouvent favorisées; d'où, par exemple, la puissance des crues roulées par l'Ain, malgré la grandeur de la participation souterraine à ses déchainements. Grandeur sur laquelle aucun doute n'existe. Entre autres preuves, nous citerons l'information d'origine très sérieuse, selon laquelle certaines sources ou doyes, dans ce bassin, vomissent des eaux boueuses, quelques heures après le déchainement d'averses très intenses. Au cas de grande lenteur souterraine les troubles se décanteraient avant l'éjection hors du calcaire.

#### 4 – La pente, ennemie de l'infiltration

Cependant si maintes rivières issues de montagnes calcaires minées par l'érosion karstique ont des crues affaiblies seulement d'un quart ou de moitié par rapport à celles que cause pour une part très prépondérante le ruissellement, cela ne tient pas seulement à la rapidité (de toutes façons modérée dans l'absolu numérique) des circulations souterraines. On doit encore invoquer le fait que les fortes pentes extérieures, nous voulons dire: en surface soustraient à l'infiltration des fractions difficilement chiffrables, mais point du tout insignifiantes, en maints secteurs, des eaux atmosphériques. Il suffit pour réduire l'absorption que les calcaires des versants raides n'aient que des fissures étroites, et que les précipitations se signalent par une intensité assez grande (sans même égaler à beaucoup près la rigueur torrentielle des pluies cévenoles ou japonaises ou texiennes).

En outre dans les bassins considérés, des bandes marneuses ou marno-calcaires s'intercalent entre les strates calcaires, et sur ces terrains plus ou moins imperméables ou vite saturés le ruissellement ne souffre guère ou point lors de pluies diluviennes.

---

20) Des maxima qui ne dépasseraient point 1000 ou 1500 lit. sec. par km<sup>2</sup> pour 100 km<sup>2</sup> et donc pas 100 à 150 m<sup>3</sup> s'ils ruisselaient seulement en surface peuvent n'être réduits que de moitié (simple conjecture) par leur laminage à travers les galeries karstiques. Si le débit craché par un exutoire unique ou par quelques bouches voisines les unes des autres ne peut dépasser pour la même cause 60 à 80m<sup>3</sup>, son émission sera encore spectaculaire; mais avec une réduction bien plus décisive que dans l'autre cas, si les flots superficiels, dans la même région, peuvent faire 5000 à 10 000 lit. sec. par km<sup>2</sup> pour 100 km<sup>2</sup>; soit 500 à 1000 m<sup>3</sup>. Or ces valeurs sont possibles dans le système du Vidourle supérieur.



Selon nos conjectures très grossières, et d'après ce que nous savons des intensités et des durées pluviales, les crues de l'Ain qui ne semblent point dépasser 2200 m<sup>3</sup> <sup>21)</sup> atteindraient ou peut-être excèderaient 3000 m<sup>3</sup> si les circulations karstiques n'y jouaient pas un rôle aussi grand. Mais si ces derniers phénomènes supprimaient pour ainsi dire le ruissellement, les records connus de la rivière, malgré toute la célérité relative des propagations souterraines, ne dépasseraient peut-être point 1000 à 1200 m<sup>3</sup>. Ceux de l'Orbe et de l'Areuse feraient au plus 100 à 120 m<sup>3</sup>, au lieu de 200, puis 150 à 200 au lieu de 330 m<sup>3</sup> respectivement.

### *5 – Les variations saisonnières moyennes des eaux karstiques*

Les développements que l'on vient de lire font comprendre sans ambiguïté à priori, les influences de l'alimentation karstique sur les variations saisonnières des cours d'eau, phénomènes que l'on caractérise d'habitude incomplètement, mais de façon déjà très parlante, par les moyennes mensuelles globales des débits. Au cas de circulations karstiques rapides, les moyennes mensuelles extrêmes sont presque aussi contrastées que pour les rivières surtout gouvernées dans les mêmes régions, sous les mêmes climats, par les fluctuations en abondance des eaux ruisselantes. Leurs rapports globaux atteignent 5,75 pour la Seine à Paris, 6 pour l'Ain à Cize-Bolozon, 4 pour le Doubs inférieur à Neublans. Tout au plus des retards de quelques jours peuvent-ils affecter les dates des maxima journaliers moyens. Au cas de cheminement lent avec nette restriction des crues, le retard infligé à l'hydrologie saisonnière doit pouvoir atteindre 2 à plusieurs semaines; plus en des bassins où le déplacement des eaux souterraines s'opère avec une extrême lenteur. Et les rapports des moyennes mensuelles extrêmes sont très réduits: 1,63 pour le Velino affluent de la Nera à Terria, 1,38 pour la Néra supérieure à Torre Orsina, 1,84 pour l'Aniene à Lunghezza, 1,70 pour le Pescara à Sambuceto, 1,25 pour la Stella à Sacile, et 1,10 chiffre merveilleux, pour le Khabour à Ras-el-Aïn.

### *6 – Evapotranspiration réduite et débits moyens annuels globaux accrus par les infiltrations rapides à grande profondeur*

Et nous avons trouvé aussi en étudiant les bilans annuels précipitations-débits, que l'infiltration expéditive jusqu'à grande profondeur dans les calcaires amoindrit beaucoup (de 20 à 30 % croyons-nous en certains cas) l'évapotranspiration, donc les déficits annuels d'écoulement. Par conséquent la prospérité de l'Hydrogéologie karstique est avantageuse <sup>22)</sup> pour l'abondance fluviale moyenne.

21) Dans nos ouvrages anciens, nous avons admis 2400 à 2500 m<sup>3</sup>.

22) Cependant cette relation de causes à effets n'est certaine et inmanquable, quelle que soit la rapidité de l'exurgence que pour les modules ou débits moyens annuels glob-

## E – HYDROGÉOLOGIE NON KARSTIFIÉE AVEC PERMÉABILITÉS REMARQUABLES

### 1 – *Roches ici considérés*

Un effet analogue <sup>23)</sup> de l'infiltration assez hâtive en profondeur doit favoriser les rivières qui émanent d'autres roches extrêmement perméables mais non karstifiées, et où la circulation n'est point assez rapide pour engendrer de grosses crues exsurgentes et pour vider en peu de temps les réserves souterraines qui assurent de gros débits en étiage.

A la perméabilité qu'ont ces roches, moyennant certains états pour elles, nous avons fait plus haut allusion. Ce sont certains produits des épanchements volcaniques et surtout basaltiques point trop anciens, et certains grès.

Notre attention s'est fixée vers ces terrains lorsque nous avons découvert la remarquable pondération des régimes pour les rivières qui émanaient d'elles, en certaines contrées, Sierra Nevada et Monts des Cascades aux Etats-Unis pour les basaltes, Plateaux gréseux Batékés au Congo vers Brazzaville. Et ces phénomènes nous ont d'autant plus intrigué qu'en d'autres bassins fluviaux les grès, les basaltes, ou les formations de même nature lithologique dans l'ensemble ont une faible perméabilité ou même une imperméabilité manifeste.

### 2 – *Rôles respectifs des interstices et des fissures dans ces roches*

Nous avons vite soupçonné que le grand nombre et la spaciosité des fissures ne suffisaient peut-être point à expliquer des pénétrations et des accumulations surabondantes dans ces formations généralement compactes en soi. Nous avons penché vers l'hypothèse que des terrains à interstices doués de grosses porosités efficaces s'intercalent aux roches en question. Et certains renseignements ont fortifié en nous cette croyance.

---

aux, c'est-à-dire établis en bloc pour tout un groupe d'années. Elle se vérifie encore pour les modules particuliers, c'est-à-dire ceux d'une seule année, aux cas d'exsurgence très prompte. Dans les cas contraires, et surtout si le retard de l'exsurgence atteint pour une forte fraction des eaux infiltrées plusieurs mois, l'évapotranspiration de chaque année considérée à part sera certes, selon la règle, plus faible que dans des bassins voisins imperméables, ou perméables sur une très médiocre profondeur. Mais si de fortes pluies sont tombées d'octobre ou de septembre à décembre, et ont été en notable partie emmagasinées, sans restitution équivalente en janvier-mai ou en janvier juin précédents, à la suite de précipitations survenues dans le dernier trimestre ou semestre de l'année antérieure, le module particulier de l'année que l'on considère souffrira d'un déficit qui pourra être sensible.

- 23) Selon nos estimations le déficit annuel global d'écoulement est réduit à quelque 950 à 1050 mm (un peu plus ou un peu moins) pour les rivières congolaises, issues des grès Batékés, contre 1150 à 1250 mm aux débouchés de bassins limitrophes imperméables.

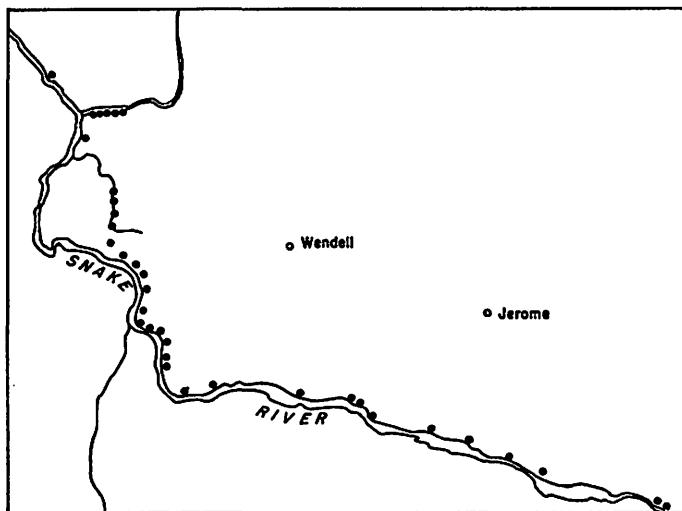


Fig. 14: Les nombreuses sources émises par les basaltes, sur la rive droite de la Snake River dans l'Idaho méridional. D'après O. E. MEINZER, Large Springs in United States.

En effet non seulement les basaltes des domaines fluviaux considérés et qui se trouvent dans les Etats-Unis occidentaux (Snake River moyenne, Mac Kenzie River [fig. 15], affluent de la Willamette, Metolius, Mac Cloud River [fig. 14] en Californie du Nord) ont quelques centaines de mètres d'épaisseur. Mais encore ils recouvrent ou supportent des matelas puissants de scories, où l'eau gravifique doit se loger en volumes énormes.

Quant aux grès des plateaux Batékés, drainés au Nord et au Nord-Ouest de Brazzaville, par la Djoué, la Léfini, l'Alima, la N'Keni affluents du Congo inférieur, ils ont été par, décomposition, transformés au moins partiellement en gros sables sur des profondeurs de plusieurs hectomètres. C'est une gigantesque éponge où s'emmagasinent les eaux qui échappant à l'évapotranspiration proviennent de pluies équatoriales imposantes : environ 2 mètres par an.

### 3 – Les sources à l'issue de ces terrains

Ces florissantes réserves hydriques ne peuvent pas ne pas alimenter des exurgences remarquables, moins semble-t-il par l'opulence des débits que pourraient fournir en moyenne des bouches isolées, que par le grand nombre de ces émergences et par l'abondance de leurs contributions additionnées en des surfaces totales réduites, et surtout, au long de lignes assez peu étendues d'affleurements «sourciers».

Nous n'avons aucun renseignement précis de lieu et d'abondance sur les sources qui amènent aux rivières les eaux infiltrées dans les plateaux Batékés. Mais la richesse exceptionnelle des étiages<sup>24)</sup> et la certitude que les modules ou débits moyens annuels plus qu'honorables de ces cours d'eau ont pour plus des quatre cinquièmes ou des neuf dixièmes une origine souterraine, suffiraient à écarter de notre esprit tout scepticisme sur la puissance des débits que totalisent les exurgences de cette région.

Puis l'excellent ouvrage déjà cité de M. O. E. MEINZER: *Large springs in United States* signale quelques très belles sources dans des pays gréseux pourtant peu arrosés.

Et M. MEINZER nous renseigne mieux sur des émergences, grandioses dans leur ensemble, par lesquelles se vident dans la Snake, principal affluent de la Columbia, les eaux infiltrées dans un vaste et profond plateau basaltique. Celui-ci domine la rive nord-occidentale et septentrionale de la rivière, dans l'Idaho (fig. 14). Il est abrité par de hautes montagnes, de toutes parts, contre les influences du Pacifique aussi bien que contre les afflux humides de l'Atlantique. A cause de cette situation, il reçoit seulement 250 à 400 millimètres de précipitations. Mais grâce à la grande étendue certaine de la surface réceptrice réelle, les nombreuses sources qui arrivent à la Snake moyenne, sur 50 kilomètres de distance, à peu près, entre King Hill et Milner, débitaient au total environ 110 m<sup>3</sup> sec. vers 1902, avant d'être renforcées par les effets d'irrigations.

Dans ces sources, aucune bouche considérée à part ne fournit à beaucoup près autant d'eau que ne le font la Silver Spring ou la Blue Spring dans les calcaires de Floride. Mais les «Mille Fontaines» à elles seules sur quelques kilomètres de distance devaient émettre au moins 13 ou 14 m<sup>3</sup> sec. Toutes débouchent dans la Snake, en cascades, sur des parois verticales basaltiques, à 40 ou 50 ou même 60 mètres au-dessus du niveau de la rivière.

#### 4 – *Detournements souterrains*

Les 110 m<sup>3</sup> livrés par les sources susdites de la Snake, provenaient selon nous d'au moins 20 000 km<sup>2</sup> et plutôt de 30 000. On imagine à quel point en de telles régions, comme dans les pays karstifiés, les bassins réels d'alimentation peuvent différer des bassins topographiques. Ce n'est point le cas ici dans l'ensemble puisque la zone d'où les sources en question reçoivent leur eau appartient de toutes façons, d'après les reliefs, au domaine de la Snake.

---

24) Les débits minima connus et les coefficients de débits correspondants (rapports aux modules) sont respectivement: 24 lit. sec. par km<sup>2</sup> et 0,75 pour la N'Kéni, 29,8 et 0,88 pour la Léfini, 17,4 et 0,77 pour la Djoué, 23,5 et 0,83 pour l'Alima avec des records possibles peut-être pas inférieurs à 90 % de ces chiffres pour les indigences extrêmes. Indices d'une pondération quasi-hallucinante. A l'issue des basaltes de l'ouest nord-américain, on trouve 25,5 et 0,49 pour la Mac Kenzie. Et le minimum connu de la Metolius voisine représente 73 % du module.

Mais dans le détail, divers affluents de la grande rivière doivent perdre au profit direct de celle-ci, des eaux que la topographie leur destinerait. Si l'on examinait tous les débits desdits tributaires ou sous-tributaires en les rapportant aux surfaces réceptrices apparentes, on trouverait sans doute aussitôt sur ces détournements des indications révélatrices.

Et une critique de ce genre nous éclaire sans contestation possible, au moins sur le sens du phénomène, lorsqu'avec M. Jean Loup, autour d'une belle monographie malheureusement inédite sur l'Hydrologie de la Columbia, nous examinons le module de la Métolius, affluent de la Deschutes River. Celle-ci qui draine un plateau basaltique déprimé, par rapport aux Monts des Cascades, dressées immédiatement à l'ouest et qui interceptent en grande partie les afflux pluvieux du Pacifique, est un tributaire méridional de la Columbia. Or sans aucun doute, sur 41,8 m<sup>3</sup> roulés en moyenne par la Métolius, 10 à 12 au plus

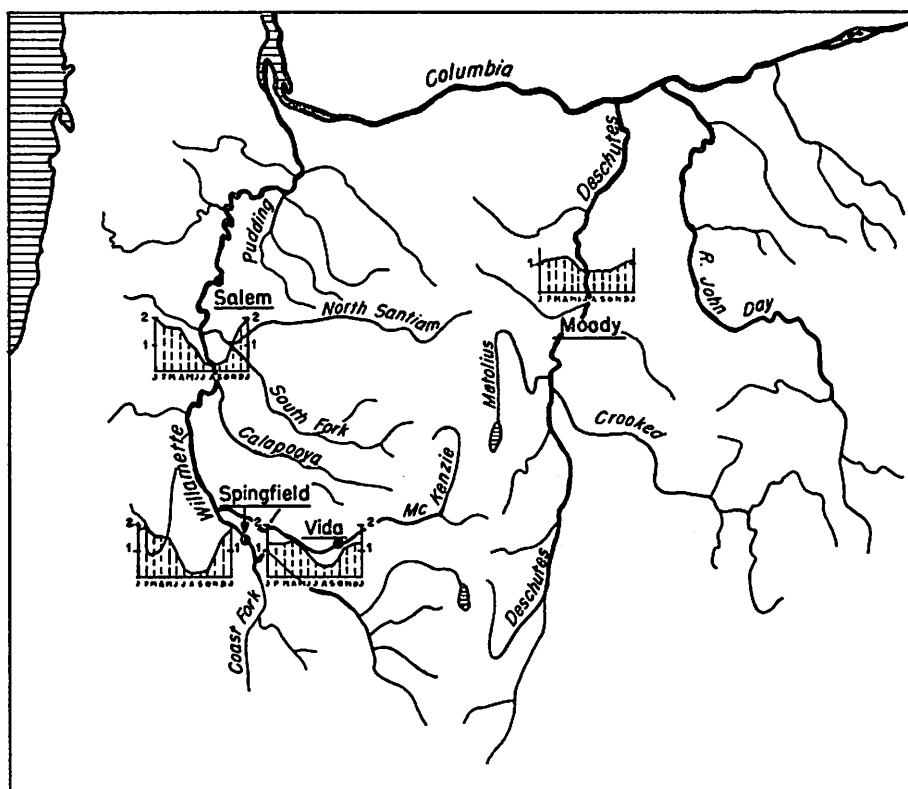


Fig. 15: Situation de la Mackenzie River et de la Métolius River de chaque côté des Monts des Cascades à l'ouest des Etats-Unis.

D'après M. Jean LOUP, Diplôme d'études supérieures sur le régime de la Columbia (Univ. de Grenoble, non imprimé).

et sans doute moins pourraient provenir du bassin topographique apparent. Donc au moins 30 ont pour origine des parties souterraines, voisines de ce dernier, et qui s'étendent peut-être sur plusieurs milliers de km<sup>2</sup>.

### *5 – Ecoulements souterrains vers la mer*

Les débits perdus dans les soubassements basaltiques (et aussi bien d'ailleurs ceux qui s'échappent dans les calcaires karstifiés) n'aboutissent point forcément à la même rivière en aval, ou à un cours d'eau plus ou moins proche. Ils peuvent se diriger dans la masse rocheuse vers des lacs ou vers la mer<sup>25</sup>) et y sourdre dans les rivages, soit un peu au dessus, soit en bien plus grande proportion, à ce qu'il semble, au-dessous du niveau marin. C'est le cas selon toute vraisemblance, pour des eaux abondantes qui disparaissent sous les basaltes plus ou moins loin à l'amont des embouchures dans l'île volcanique de la Réunion d'après une étude de M. TOUCHEBEUF de LUSIGNY.

### *6 – Régimes des sources et des rivières sorties de ces roches*

Les circulations à travers les grès et les basaltes très perméables ne ressemblent pas du tout aux traversées intra-karstiques rapides. Elles trahissent au contraire à coup sûr des mouvements d'une grande lenteur dans le sol et cela rend merveilleusement sages les régimes. Par exemple d'après des chiffres incomplets, mais sûrs et significatifs, les sources des basaltes, dans la vallée de la Snake paraissent émettre au cours de chaque année des débits remarquablement stables. Pour beaucoup d'entre elles, l'abondance ne varierait même pas comme de 1 à 2. Et les sources congolaises issues des plateaux Batékés auraient des régimes au moins aussi inertes, selon nos conjectures fondées sur les très faibles variations des débits fluviaux, auxquelles ces eaux aboutissent.

Bref d'après les chiffres comparatifs que l'on verra bientôt, les rivières alimentées par les basaltes très fissurés, avec cendres et scories, et par des grès semblables à ceux dont nous venons de traiter semblent encore moins capricieuses que celles des cours d'eau gouvernés par la circulation karstique lente.

Aussi nous permettrons-nous de mentionner d'autres éléments de leurs régimes, en caractérisant l'Hydrogéologie soumise aux perméabilités d'interstices et de fissures étroites. Cependant on n'oubliera pas que ces grès et ces basaltes, au moins grâce à l'abondance de leurs contributions hydriques, imposent aux sources et aux cours d'eau des comportements intermédiaires entre ceux des émergences karstiques les plus sages, et ceux des sources provenant des nappes extrêmement interstitielles et très peu mobiles.

---

25) Les débits dérobés à plusieurs petites rivières d'Israël, dans les calcaires, non loin de la Méditerranée, doivent avoir des destinations analogues.

## F – RÉGIMES INFLUENCÉS PAR LES PERMÉABILITÉS D'INTERSTICES OU DE FISSURES ÉTROITES

### 1 – Abondance de l'évapotranspiration dans les parties supérieures de ces couches

#### a) L'évaporation directe et la transpiration. Profondeurs atteintes par elles dans le sol

Les terrains à porosité de petits interstices et tout spécialement les sables fins et les limons plus ou moins sableux et argileux contiennent, fait essentiel qu'il faut rappeler, jusqu'à proximité de la surface, 15 ou 20 % et plus d'eau de rétention, c'est-à-dire hypodermique, par rapport au volume total du complexe terrain-air, et eau. Puis après les averses, les eaux gravifiques échappées dans les mêmes sols à la rétention agressive peuvent, pendant plusieurs jours ou semaines, selon les granulations, ne pas avoir atteint des profondeurs supérieures à 2 mètres ou même à 1 mètre.

Or c'est un domaine où les racines en luttant contre l'attraction exercée par les molécules solides absorbent beaucoup d'eau, qui sera ensuite transpirée, c'est-à-dire évaporée. Puis l'évaporation directe, nous voulons ainsi dire celle qui ne se fait point par l'intermédiaire des végétaux attaque d'abord les eaux gravifiques en voie d'infiltration, et les eaux capillaires montées assez haut; et finalement lors des grandes chaleurs sèches une fraction des eaux adhésives, jusqu'à des profondeurs croissantes avec le temps. Et des ascensions capillaires soulèvent et amènent à la place des contingents hydriques évaporés, des eaux précédemment situées, de par leur profondeur sous la surface, à l'abri de l'évaporation. En outre celle-ci peut s'en prendre au niveau phréatique, s'il n'est point trop bas. Cependant la transpiration par les plantes et l'évaporation directe sous l'air libre, à la surface des sols semblent incomparablement plus actives que l'évaporation seule à l'intérieur. Ainsi envisageons, sur un terrain préalablement sec ou très peu envahi par l'eau gravifique, une averse déjà assez forte, par exemple sous nos climats, 40 à 60 millimètres, et même plus en été, durant 24 heures. Cette précipitation sera bien trop modérée pour nourrir des infiltrations plusieurs fois égales aux succions possibles par le fait des racines. Et celles-ci là où la végétation est dense absorberont donc avant descente jusqu'à la nappe, moitié ou bien plus de l'eau infiltrée, même si la rétention pelliculaire et hygroscopique atteint au début du phénomène le maximum requis par le terrain considéré.

D'après de nombreuses informations que présente M. SCHOELLER, on semble encore incomplètement éclairés malgré le recours aux lysimètres<sup>26)</sup> (et à

---

26) Ce sont à l'air libre des récipients, en général des parallélépipèdes remplis de terrains divers apportés ou laissés sans dérangement, en place. Les lysimètres sont clos sur les côtés et à leur base par des écrans étanches, mais on peut les munir en leur fond d'un

d'autres observations) sur les profondeurs que peut atteindre l'évaporation directe et l'évapotranspiration au-dessus du sol. La nature de celui-ci, sa porosité, sa couleur et bien sûr, celle des plantes, puis l'humidité de l'air, les températures, les insulations, jouent dans ces actions des rôles déterminants. Selon diverses formules, les profondeurs exposées à l'évapotranspiration varieraient entre 1,50 m et 4 mètres en quantité de régions. Mais au-dessous de 1,50 à 2 m. ce prélèvement est très faible.

Ou encore à 50,8 cm de la surface, l'évaporation directe dans un limon argileux brun atteindrait 17 % du chiffre observé dans une nappe d'eau libre, puis 16 % dans des limons très foncés et noirs, comme dans des sols argileux bruns intacts, et seulement 7 % dans des sols argileux gris, etc. . . . M. SCHOELLER indique aussi que l'épaisseur du sol dans laquelle le système racinaire effectue une consommation active, dépasse rarement 2 mètres. Et l'absorption par les racines se fait surtout dans le premier mètre.

Si incertaines ou même contradictoires que soient ces données dans le détail, elles ne laissent aucun doute sur les réalités décisives suivantes.

## b) Effets sur l'évapotranspiration des infiltrations rapides à grande profondeur, ou au contraire retardées ou limitées vers le bas. Nappes superficielles

1° De même que dans les profondeurs karstiques, il n'y a pratiquement plus d'évaporation directe et plus aucune transpiration dans le domaine des nappes véritables, à partir de 3 ou 4 mètres, au-dessous de l'air libre. Et plus les fissures utilisables pour les infiltrations verticales, ou les interstices entre les particules ont de spaciosité, moins durant la descente vers les nappes, l'évapotranspiration a le temps de s'attaquer à l'eau qui a pénétré dans le sol.

Par conséquent, dans les domaines karstiques, puis dans les genres de basaltes et de grès où nous avons reconnu des perméabilités remarquables, et certainement aussi dans d'épais entassements de cailloux, graviers et de sables, l'infiltration rapide en profondeur des eaux gravifiques, doit bien «rationner» l'évapotranspiration et accroître l'abondance moyenne annuelle fluviale, comme nous l'avions pressenti d'après des raisonnements de «bon sens» avant de trouver des preuves.

2° Dans la tranche supérieure, jusqu'à 2 mètres et surtout à 1 mètre sous le sol, l'évapotranspiration peut être très efficace, si les eaux qui imbibent cette couche s'y attardent. En somme si la perméabilité avec preste dérobade vers des profondeurs d'immobilisation amoindrit beaucoup le déficit d'écoulement, la perméabilité de petits interstices avec infiltration très lente exerce l'effet contraire.

---

robinet par où l'eau gravifique infiltrée s'échappe. On implante dans les lysimètres des végétations diverses, ou on laisse leur sol nu. On mesure grâce à eux les quantités d'eau infiltrées devenues adhésives, ou descendues jusqu'au substratum et les évapotranspirations de chaque jour.



Puis si le substratum imperméable est si haut placé qu'il laisse seulement une épaisseur possible de 1 à 2 ou 3 mètres à la couche aquifère, la presque totalité de la couverture éponge perméable sera sans cesse exposée à l'évapotranspiration, même si le revêtement se compose d'éléments assez grossiers et forme un tout nettement perméable. En somme, une faible épaisseur de la couche perméable supérieure, encore plus que la lenteur de l'infiltration au sommet d'une couche profonde, réduit les débits moyens annuels en aggravant l'évapotranspiration. A vrai dire cette disposition équivaut à un fort degré d'imperméabilité, pour ce qui concerne les facilités offertes à l'évapotranspiration.

Et même, ce nous semble, pour peu que la surface du sol ait une déclivité point trop insensible, les eaux pluviales qui ont arrosé le terrain, y ruissellent s'il est imperméable. Leur déplacement a beau n'être pas rapide, elles échappent plus vite à l'évapotranspiration en atteignant pour une grande part assez tôt des artères de drainage, que ne le font les contingents liquides emprisonnés par infiltration dans une couche éponge mince. Même si la pente de celle-ci est notable, le mouvement s'y effectue avec la lenteur que l'on sait. Et de la sorte les eaux en question sont, durant des semaines, la proie des racines et de la chaleur qui pénètre dans le sol.

Car dans ces conditions non seulement la surface de la nappe très mince et sa frange capillaire sont situées dans la zone où fonctionnent l'évaporation directe interne et la transpiration. Mais encore la capillarité renouvelle sans cesse, tant qu'elle peut s'alimenter par le bas, l'eau que prélèvent ces consommations.

Et l'on peut, comme le font de nombreux auteurs, appeler nappes superficielles (et elles ne sont plus vraiment ou plus guère phréatiques par surcroît) celles qui doivent se confiner dans une couche si peu épaisse que leur niveau n'est jamais ou presque jamais soustrait à l'évapotranspiration.

### c) Remarques supplémentaires diverses

Pour analyser les conséquences de la porosité sur l'évapotranspiration, il faut encore mettre en évidence deux influences contradictoires. A travers des terrains à interstices assez spacieux, comme les sables grossiers, la chaleur pénètre plus facilement; mais les poussées capillaires montent bien moins haut que dans les sables fins et les limons. Ce dernier phénomène l'emporte sur l'autre et rend l'évaporation plus forte dans les sols à granulation menue, point trop argileux<sup>27)</sup> cependant, que dans les assortiments sableux et graveleux grossiers.

Enfin on ne saurait trop le répéter, sur les terrains à porosité d'interstices comme sur les roches fissurées, l'infiltration varie en raison inverse de la pente.

---

27) Puisque l'ascension capillaire, paraît moindre dans les argiles que dans les limons.

## 2 – *Rapports des débits extrêmes*

Les phénomènes de retard et d'amortissement, d'égalisation signalés pour les variations des débits dans ceux des sous-sols karstiques où l'évacuation est bien moins facile que l'introduction, ces phénomènes donc triomphent à fortiori à des degrés divers, mais toujours de façon marquée dans les nappes d'interstices. Et les effets apparaissent dans les fluctuations des niveaux piézométriques et dans celles des débits émis par les sources.

Ceux-ci peuvent être déclarés moyennement variables quand les rapports de leurs extrêmes connus dépassent 2,5; par exemple en des périodes assez longues: 6,17 à Telemly, près d'Alger; 4,81 à Cérilly pour une des sources de la Vanne, 3,5 à Belle-Fontaine près du Havre. Or, pour la plupart des rivières qui ne sont point exceptionnellement pondérées, les mêmes rapports atteignent 20, 50, 100 et bien plus (— bien moins cependant, par exemple seulement quelques unités, pour certains grands fleuves — aux régimes remarquablement compensés).

Et l'on dit qu'une source est très peu variable, lorsque les rapports de ses débits extrêmes ne dépassent guère 2; ainsi: 2,08 à la Source de la Noë [Vanne] 1,96 à la Grande Fontaine de la Loupe [Eure-et-Loire] 1,59 à la source de Hamma [Algérie]).

Enfin des sources issues de roches volcaniques très épaisses, par exemple dans l'Ouest des Etats-Unis, ou émises par d'autres couches riches en réserves hydriques, puissantes, mais très lentement vidangées, ont des débits qui varient seulement comme de 1 à 1,80, 1,50 et moins.

## 3 – *Variations saisonnières*

Quant aux régimes saisonniers, ils reflètent comme à l'issue des terrains karstiques à débouchés lents, ceux des rivières voisines alimentées en abondance par les eaux de surface, mais aussi avec des retards d'un à deux mois, pour les dates des moyennes mensuelles maxima. Par exemple pour l'ensemble des sources de la Vanne, de 1873 à 1882, la moyenne maxima s'est située en avril, et la moyenne minima en octobre; contre janvier ou février, et aout, respectivement pour l'Yonne, le Loing, la Seine, etc. ... Et le rapport des moyennes mensuelles extrêmes a représenté 1,43 contre 6,6 pour la Loire à Gien, moins de 6 pour la Seine à Paris, 7,7 pour la Marne à Saint-Dizier, etc.

Puis des circulations extrêmement lentes, dans du matériel à interstices ou à fissurations très fines, peuvent retarder beaucoup plus les moments des maxima et des minima.

C'est presque certainement ce qui se produit, d'après M. Jean LOUP dans le bassin supérieur de la Rivière Deschutes, affluent méridional de la Columbia. Cette rivière draine un vaste plateau basaltique. A sa dernière station, Moody,

le régime est pondéré pour les écarts des moyennes mensuelles mais sans retard très marquant pour les phases principales. A Crane City, au contraire, poste situé le plus à l'amont, la moyenne mensuelle maxima se place en juillet, soit en retard de 3 mois sur l'apogée que l'on note à Moody. Et les débits d'août égalent presque ceux de juillet. On peut d'ailleurs se demander si des perturbations artificielles comme celles qui résultent des irrigations ne concourent point à ces résultats.

#### 4 – Les étiages

Les étiages dont les débits proviennent de nappes situées dans les terrains à perméabilités d'interstices, peuvent représenter de gros ou même çà et là de très gros débits spécifiques (en lit. sec. par km<sup>2</sup>) si les couches où l'eau s'infiltré sont à la fois profondes (ce qui supprime à peu près les oeuvres de l'évapotranspiration dans le sol) et très perméables (sables grossiers, graviers, cailloux). Affirmation guère contestable et cependant assez théorique. En effet tous les très gros étiages que nous pouvons citer proviennent non d'alluvions épaisses mais de terrains rocheux soit calcaires et karstiques, soit gréseux<sup>28</sup>) ou basaltiques.

Beaucoup plus certaine d'après des preuves numériques expérimentales en ce qui regarde l'influence hydrologique des terrains d'interstices, est la gravité des étiages à l'issue de bassins où la lenteur d'infiltration ou bien la faible épaisseur de la couche aquifère, donc ici la qualification de superficielle méritée par la nappe, donnent de grandes facilités à l'évapotranspiration. C'est spécialement en aggravant les étiages, là où les régimes les font venir dans les mois chauds, que les caractéristiques susdites des terrains, l'imperméabilité en général et le renforcement consécutif de l'évapotranspiration, influencent le plus le comportement des rivières en anémiant à l'extrême les débits des sources.

#### 5 – Les crues

Quand les couvertures supérieures perméables ne sont point saturées elles réduisent maintes crues, dans des proportions comprises entre guère moins de 100 % et guère plus de zéro, selon le degré préalable de saturation, la saison, la perméabilité locale, à condition bien entendu que l'intensité dans le temps, n'excède point trop les capacités d'absorption journalières et horaires. Dépassement difficile dans les terrains qui peuvent loire 10 à 15 et même 20 millimètres par heure.

Cependant la possibilité d'intensités horaires pas inférieures à 50 ou 100

---

28) Cependant on peut se demander si les grès des plateaux Batékés; n'ont pas été transformés par décomposition générale en véritables terrains meubles très perméables d'interstices sur des centaines de mètres de profondeur.

mm, en maintes contrées et à certains moments, sur des bassins point minuscules, et celle de déluges de 100 à 200 millimètres par heure, de 300 à 400 en trois heures, en certains pays, ne laissent aucun doute sur l'impuissance de force couches superficielles même très perméables contre certaines causes de crues très graves.

Quand ces trombes d'eau n'ont point lieu, la perméabilité des couvertures décomposées peut faire merveille ou en tout cas sensiblement atténuer les fureurs fluviales. Grâce à elle et malgré les très fortes saillies des montagnes cristallines, puis en dépit d'averses atteignant 200 à 400 millimètres en un jour, les crues des rivières californiennes méridionales, sans être dans l'absolu bénignes, il s'en faut de beaucoup, ont moins de puissance dévastatrice que cela pourrait être le cas à l'issue de reliefs analogues mais imperméables ou très vite saturés, et soumis à des averses équivalentes<sup>29)</sup>.

Et quand la couche affleurante est à la fois très profonde et très perméable, même sous de grosses chutes d'eau, les crues peuvent être réduites à bien peu de chose ou même pratiquement supprimées. Lors des inondations catastrophiques dues au cyclone tropical de la fin de septembre 1938 en Nouvelle-Angleterre, les sables et graviers non cimentés morainiques qui couvrent dans sa partie méridionale, l'île de Long Island, à l'est-nord-est de New-York, absorbèrent en deux petits bassins de 25,9 et 96 km<sup>2</sup> respectivement, 97 % et 98 % de 273 et 275 millimètres reçus en 5 jours.

Les débits maxima ne dépassèrent point 2,1 m<sup>3</sup> ni 2,55 m<sup>3</sup> soit 81 et 26 lit. sec. par km<sup>2</sup>, chiffres absolument infimes. Aux mêmes moments, et à la suite d'arrosages point ou guère plus forts, dans la partie continentale assez imperméable (fig. 16), des surfaces réceptrices analogues ou plus grandes, boisées et point exagérément saturées avant l'intempérie émirent des débits maxima qui atteignirent 2000 à 6000 lit. sec. par km<sup>2</sup> avec des quotients d'écoulement de 50 à 60 %.

L'atténuation des crues par la perméabilité très absorbante, emmagasinante et retardante n'est guère moindre qu'à Long Island, dans certains bassins fluviaux très sableux de l'Afrique Equatoriale française. Dans la région de Pointe Noire, sur la côte, à l'ouest de Brazzaville, certaines très petites rivières étudiées par M. AIMÉ ont subi, lors des averses des ruissellements d'une remarquable insignifiance. Pour la Songolo (38,75 km<sup>2</sup>) la crue centenaire évaluée à 390 lit. sec. par km<sup>2</sup> serait déjà très médiocre en comparaison de débits dépassant 10 000 à 15 000 lit. sec. par km<sup>2</sup> pour des maxima de même fréquence déjà petite, émanant de surfaces réceptrices analogues, dans les territoires en question, là où le terrain est imperméable d'emblée, ou après une saturation qui ne demande point un arrosage excessif. Le bassin bien plus absorbant encore de la Gambouini, aurait comme maximum centenaire, pour 75 km<sup>2</sup> sous 285

---

29) PARDÉ (M.) Sur les coefficients et les déficits d'écoulement des très grandes crues. Ann. Inst. pol. Grenoble, 1954, p. 106—129. Traduction en espagnol avec quelques adjonctions dans Geographica, Saragosse, 1956, p. 3—29, 5 fig.

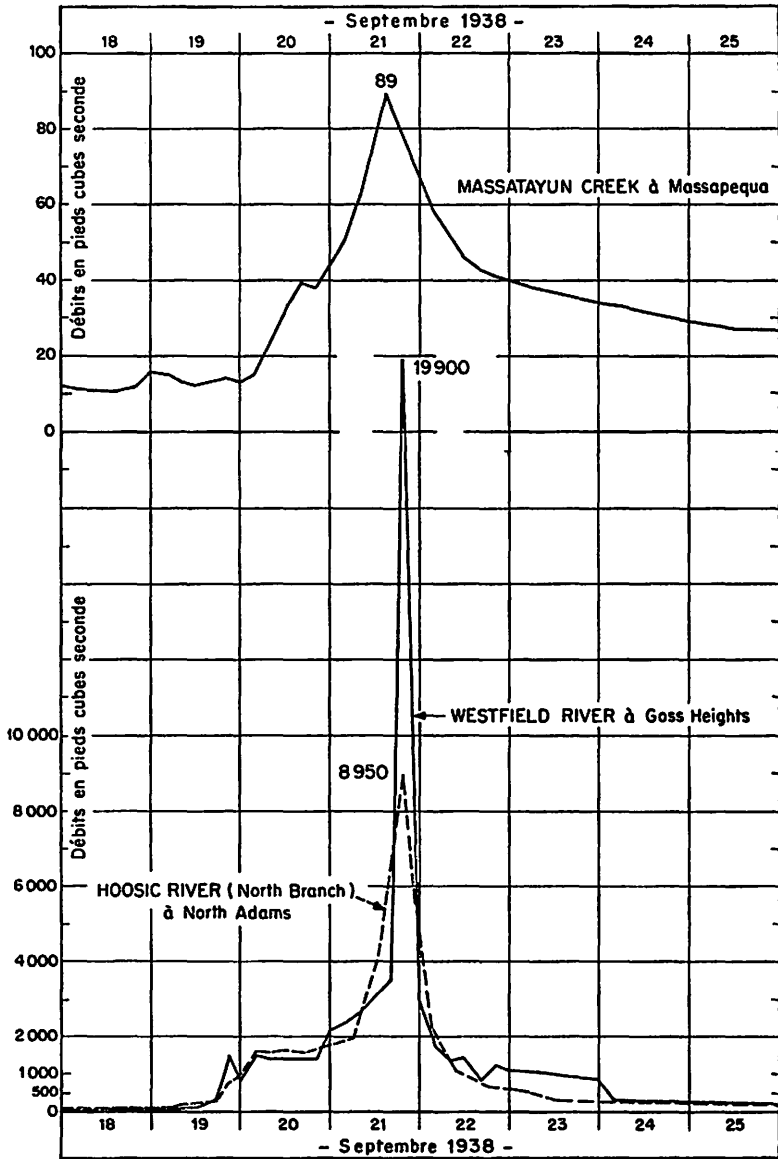


Fig. 16: Crues causées par le cyclone tropical de septembre 1938 en Nouvelle Angleterre sur 3 rivières drainant de petits bassins de superficies assez analogues. Sur le Massatayun Creek à cause de terrains ultra-perméables et avec grosse rétention le maximum est 100 fois plus faible que sur la Hoosic River, 200 fois plus que sur la Westfield.

mm de pluie en un jour, 160 lit. sec. par km<sup>2</sup>. Et à l'issue de 110 km<sup>2</sup> drainés par le Koulombo, un phénomène de cette fréquence présenterait 103 lit. sec. par km<sup>2</sup>.

Comme éléments de comparaisons suggestives on retiendra que dans les Vosges, le Jura, les Préalpes du Nord, l'Ouest du Massif central, etc. les crues centenaires fournies par 50 à 100 km<sup>2</sup> doivent atteindre sur maintes petites rivières à la suite d'averses bien moins intenses que vers Pointe Noire 1500 à 2000 lit. sec. par km<sup>2</sup>.

Et revenons aux Plateaux Batékés dont nous avons déjà célébré l'extraordinaire pouvoir absorbant. L'étouffement des crues par les grés pourris de cette région est réellement merveilleux (fig. 17 et 18).

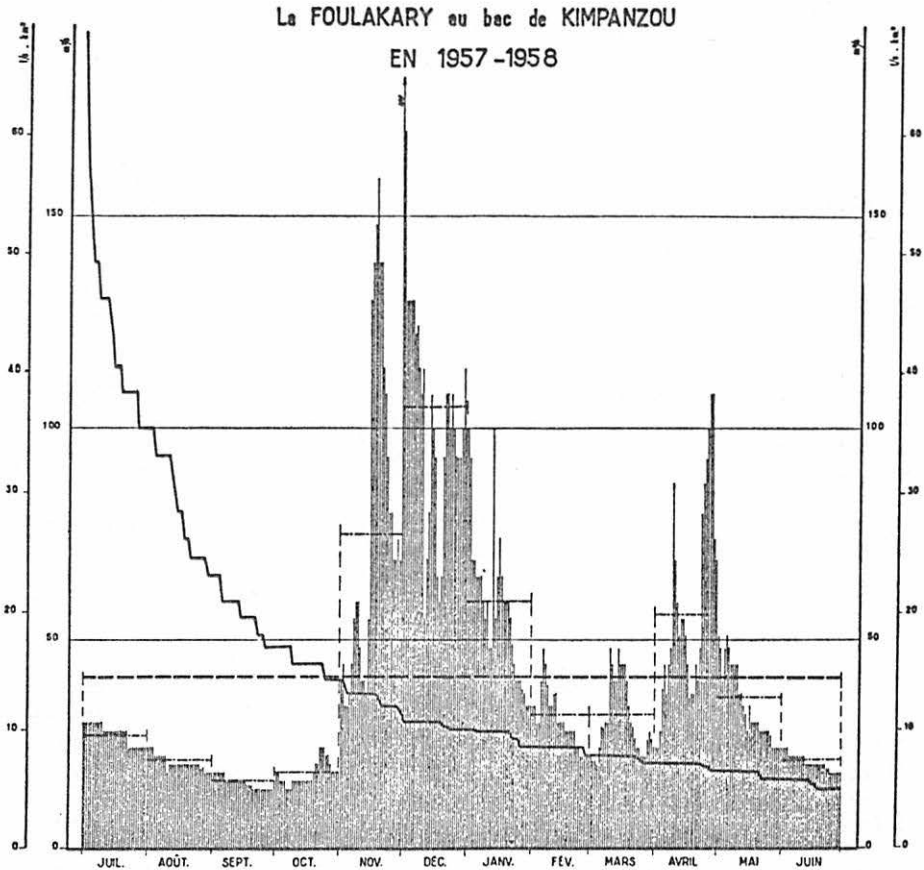


Fig. 17: Régime de la Foulakary affluent du Congo inférieur pendant une année. Réserves souterraines abondantes et basses eaux bien alimentées. Mais possibilité de ruissellements assez vifs et de crues.  
D'après l'Annuaire hydrologique de 1957 pour les pays d'Outre-Mer.

Le N'KENI à GAMBOMA  
EN 1957-1958

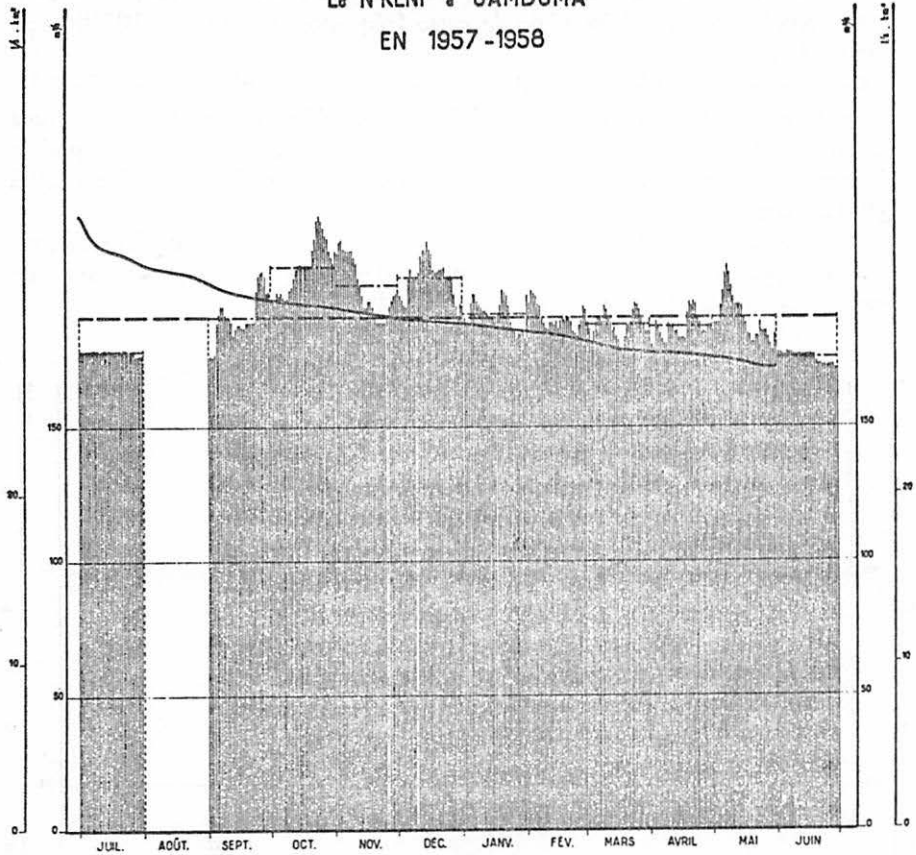


Fig. 18: La N'Keni affluent du Congo en 1957—58. Rivière pondérée de façon extraordinaire par la perméabilité extrême de son bassin (grès décomposés ou très fissurés des Plateaux Batékés) et par l'énormité des réserves souterraines lentement dégorées. Ruissellement et crues presque abolis. D'après l'Annuaire hydrologique français de 1958 pour les pays d'Outre-Mer.

	Surface réceptrice km <sup>2</sup>	module m <sup>3</sup>	crues maxima en quelques années	
			m <sup>3</sup> sec.	lit. sec. km <sup>2</sup>
N'Kéni à Gamboma	6 250	199	286	45,7
Djoué à Kibossi	5 450	124	345	64
Alima à Tchicapika	20 350	598	750	37
Lobaye à M'Bata	30 000	331	551	18,4

Nous doutons fort que les crues tout à fait exceptionnelles, au débouché de ces bassins destructeurs pour le ruissellement, puissent dépasser de plus de 50 à 75 % les chiffres susdits, presque misérables pour des débits maxima émanant de telles surfaces.

Par contre nous ne croyons pas émettre des hypothèses risquées en admettant que, sous le même climat, les débits maximaux centenaires devraient atteindre pour les 4 rivières, au moins 1600, 1400, 2800 et 3500 m<sup>3</sup>, chiffres qui signifieraient encore une réelle modération. Celle-ci paraît inhérente en ce qui concerne les crues, à la région considérée, pour des bassins de cette étendue.

#### *6 – Régimes dans les nappes très étendues et situées à grande profondeur notamment dans les nappes captives et à leur issue*

Non seulement les écarts entre les valeurs extrêmes tombent à très peu de chose, mais encore les événements hydrologiques peuvent survenir à des dates retardées de 2 ou 3 mois et plus par rapport à celles des causes pluviales; et chose plus déconcertante, l'explication des variations hydrostatiques ou des débits exurgents par des causes pluviales et thermiques identifiées et datées avec précision, devient très difficile, ou même impossible, lorsqu'il s'agit de nappes à la fois très étendues, peu inclinées et situées à de très grandes profondeurs (des dizaines et des centaines de mètres) sous les terrains où l'infiltration et ensuite la percolation dans le sens du gradient hydraulique se font avec beaucoup de langueur; par exemple à raison de quelques mètres ou de 1 mètre et moins par jour.

Car les eaux descendues par exemple en 5 jours ou en deux semaines jusqu'à la nappe y rencontrent des débits venus de lieux situés à 5 ou 10 kilomètres et plus en amont et qui ont été alimentés par des pluies ou par des fontes respectivement survenues à des dates très diverses, et échelonnées en un temps total d'un mois, d'un trimestre, un semestre, d'une année ou bien plus. De cette polygénie résultent des interférences et des embrouillements qui écrètent, étalent et suppriment, pour ainsi dire ou à la lettre, les plus hautes eaux et du même coup comblent les creux des niveaux hydrostatiques et rendent quasi constants les débits des sources. Là où il subsiste un régime saisonnier avec un maximum et un minimum, les causes de ces deux phases deviennent le plus souvent indéchiffrables et point datables, ainsi que nous l'avons dit plus haut, même si l'on a pu déterminer la vitesse générale de cheminement dans la nappe considérée.

Ces confusions, et surtout les retards excessifs des effets par rapport aux causes affectent tout particulièrement les nappes à la fois profondes et captives. On désigne par ce dernier mot, en opposition aux nappes phréatiques, celles qui s'engagent au-dessous d'une ou plusieurs couches imperméables et n'ont pu être alimentées par l'infiltration sur place au lieu que l'on considère. Cela se produit, lorsqu'une nappe supérieure, phréatique, ou profonde du premier degré, si l'on peut dire ainsi, c'est-à-dire non captive, envoie ses eaux à travers son support imperméable par une faille; ou lorsque les strates superposées du côté le plus haut tranchent en biseau la surface du sol. L'extrémité supérieure



des bancs perméables absorbe l'eau de pluie et celle-ci devenue souterraine se déplace avec une obliquité plus ou moins accentuée vers l'intérieur. Son cheminement d'un seul côté se poursuit jusqu'aux lieux où le substratum et le plafond se relèvent grâce à une inflexion, ou jusqu'à une faille avec rejets brusques vers le haut du soubassement et de l'étage supérieur imperméable. Bien entendu la pente de versants élevés et longs peut couper une nappe captive à l'amont. Et des sources jalonnent cette intersection comme celles qui affectent les nappes phréatiques.

En certaines régions, la tectonique, c'est-à-dire l'architecture souterraine est très calme, sans replis ni failles. D'où pour les strates une inclinaison unique et faible sur de longs parcours. Dans ces conditions on peut assez facilement atteindre par forages la nappe profonde même là où elle est captive et l'utiliser à de grandes distances des lieux où s'est produite l'alimentation. D'après MMrs. L. B. LEOPOLD et W. B. LANGBEIN, l'eau consommée à Janesville dans le Wisconsin et à Rockford ou Streator dans l'Illinois, provient du Wisconsin central, où affleure vers Portage sur une largeur considérable, une bande aquifère appelée grès de Potsdam. Cette strate s'enfonce vers le sud sous un toit imperméable. Le parcours de l'eau en question entre le secteur où elle est devenue souterraine, et Streator, n'est pas inférieur à 360 kilomètres (figure 19). Cer-

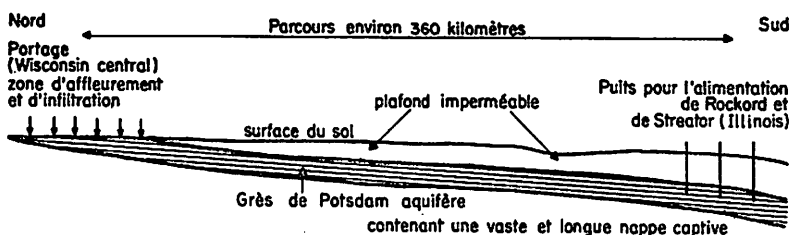


Fig. 19: Schéma de l'alimentation et du cheminement sur un long parcours d'une nappe captive dans le Wisconsin central et l'Illinois. D'après L. B. LEOPOLD et W. B. LANGBEIN. A Primer on Water, Washington, 1960.

tainement plusieurs siècles s'écoulent avant qu'une goutte infiltrée dans le Wisconsin central, ne parvienne dans le sous-sol de Streator. Et les variations saisonnières de la nappe, phréatique vers son origine, puis profonde et captive dans l'Illinois doivent en chemin s'être très fortement amorties. Mais nous ne savons si elles ont pratiquement disparu.

### *7 – Régimes influencés ou non par ceux des rivières dans les nappes phréatiques des vallées alluviales*

Et des perturbations autres que des retards, des amortissements et, des étalements dûs aux distances de parcours et aux profondeurs d'infiltration peuvent affecter les régimes des eaux souterraines et tout spécialement ceux

des nappes phréatiques incluses dans les alluvions des vallées que suivent les rivières. Faits surtout intéressants, lorsqu'il s'agit de talwegs assez larges, occupés par des sables grossiers et surtout par des graviers et des cailloux, à travers lesquels le cheminement se fait sans trop de lenteur, par exemple, à raison de quelques centaines de mètres, ou même d'un kilomètre par jour. Encore, pour que les phénomènes aient le temps de se développer, faut-il que la rivière ait eu des crues abondantes par leurs débits et qui comportent des hausses, puis des baisses de plusieurs mètres et des évolutions point limitées à quelques heures. Ce n'est pas tout. Il faut encore que l'eau de la rivière se raccorde par pénétration latérale immédiate<sup>30)</sup> avec l'eau de la nappe phréatique intra-alluviale. Or les cours d'eau gros transporteurs de matériaux fins, argileux et colloïdaux, et d'autre part point trop érosifs tendent à colmater leurs berges assez stables, par dépôts dans les interstices intragraveleux et intrasableux. Et cette sorte de cimentation peut être assez efficace pour que toute communication latérale entre la rivière et la nappe disparaisse, au-dessous de certains niveaux rarement dépassés par les crues boueuses et colmatantes, ou même sur toute la hauteur des berges.

Dans ces derniers cas les variations de la nappe n'ont point ou guère pour causes des perturbations dues aux montées ou aux baisses de la rivière. Elles sont produites par la fraction point évapotranspirée de la pluie qui tombe sur place, puis par le ruissellement accru qui arrive des versants ou de zones adjacentes plus larges.

Ainsi montent ou baissent les eaux phréatiques, dignes d'être appelées autonomes et dirigées de l'extérieur vers le talweg, et en même temps une fois le milieu alluvial rejoint, dans le sens général de l'écoulement vers l'aval de l'artère maitresse (fig. 20).

Considérons maintenant les cas où, faute de cloison argileuse imperméable, il y a communication latérale entre la rivière et la nappe, pour toutes les cotes de la première. Alors les variations du niveau piézométrique dans la vallée, jusqu'à certaines distances du lit apparent sont, non seulement concordantes avec celles du cours d'eau (sous réserves des décalages que l'on va voir) mais encore causées principalement ou uniquement, s'il n'a pas plu fortement dans le secteur en question, par des oscillations de ladite rivière (fig. 21 et 22).

Cependant la pénétration intra-alluviale partant du lit est plusieurs dizaines ou centaines de fois plus lente, même dans les graviers et cailloux que le déplacement des eaux entre berges.

En conséquence il se crée au début, lorsque la rivière s'élève fortement, une pente phréatique transversale inverse, c'est-à-dire dirigée du lit vers l'extérieur. Puis quand la rivière baisse, cette inclinaison persiste d'abord temporairement jusqu'à un certain point, au-delà des lieux en deçà desquels l'affaissement des

---

30) En outre, au cas d'inondations les eaux débordées doivent alimenter la nappe par infiltrations verticales, d'abondances très diversifiées selon la perméabilité des alluvions.

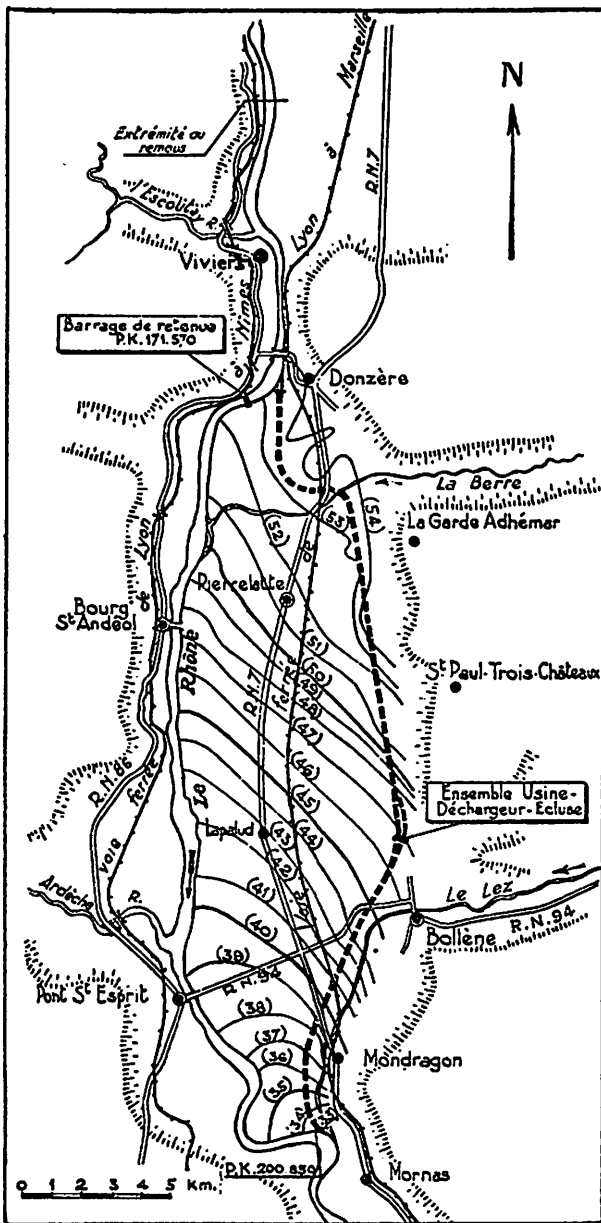


Fig. 20: Niveaux (isobathes) de la surface piézométrique dans la vallée du Rhône, sous la rive gauche avec des débits stables, entre Donzère et Mondragon. Nappe alimentée par les hauteurs voisines et inclinée à la fois vers le Rhône et vers l'aval de ce fleuve. D'après Monsieur MARC HENRY: Contribution à l'étude des nappes phréatiques.

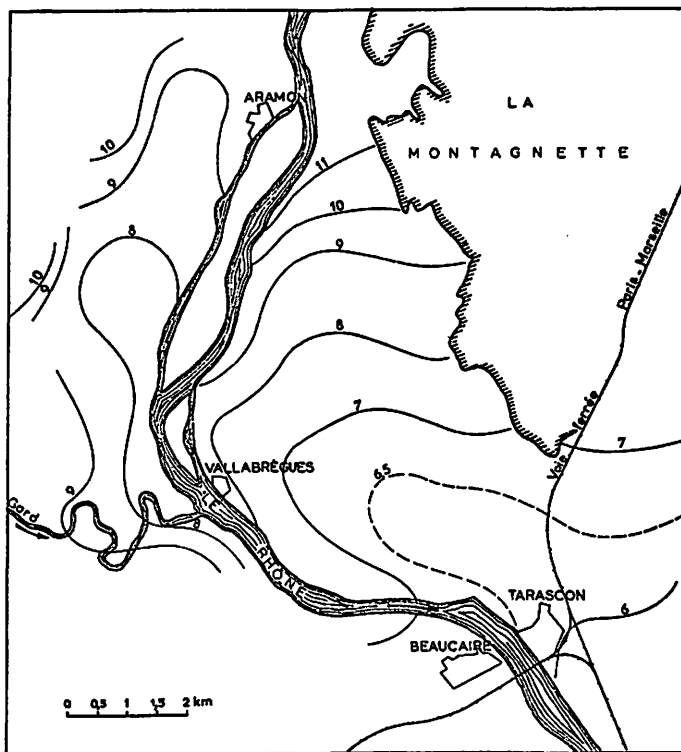


Fig. 21: Niveaux (isobathes) de la surface piézométrique dans la vallée du Bas Rhône lors d'une crue de fleuve entre Aramon et Tarascon-Beaucaire. Les pentes piézométriques près des versants sont inclinées vers le Rhône. A proximité de celui-ci une pente transversale allant du fleuve vers l'extérieur jusqu'à une certaine distance s'est formée. D'après M. MARC HENRY, Contribution à l'étude des nappes phréatiques.

eaux fluviales a pour suite celui de la surface piézométrique, d'abord à proximité des berges puis de plus en plus loin vers l'extérieur. Et alors (fig. 22) de part et d'autre du point où les eaux souterraines sont les plus élevées, il y a pente transversale, d'un côté vers la rivière, de l'autre vers l'extérieur. En outre les phénomènes dus à la pluie locale, puis aux ruissellements venus des parties adjacentes et suivis d'infiltrations produisent des variations souterraines autonomes, mais qui s'interfèrent avec celles que cause la rivière. On devine la variété des résultats possibles, y compris les modalités des évolutions durant les temps de ces troubles. La complication atteint son comble quand plusieurs crues et autant de pénétrations latérales souterraines se succèdent en se superposant plus ou moins. De toutes façons à tout point des surfaces piézométriques

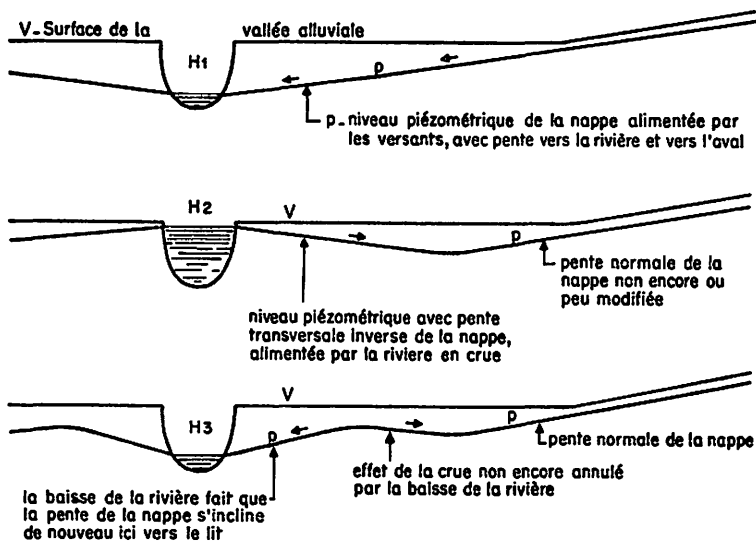


Fig. 22: Nappe phréatique de vallée alluviale pour plusieurs niveaux successifs de la rivière dans le temps.

il doit subsister en principe<sup>31)</sup> une composante de pente vers l'aval. Mais que de modalités, de diversité, là encore! Enfin lorsque le niveau fluvial est à la fois peu élevé ou même bas et pratiquement stationnaire depuis un temps assez long pour que les eaux introduites lors de la crue dans les alluvions se soient vidées, les gradients hydrauliques normaux à la fois vers la rivière et vers l'aval se rétablissent.

Là où les hautes eaux de la rivière ne consistent point en crues rares et brèves mais en gonflements répétés à faibles intervalles ou soutenus avec de médiocres fluctuations, chaque année pendant plusieurs semaines ou quelques mois (régimes des fleuves nivaux de plaine, comme ceux de Russie dans leurs cours moyens et inférieurs, ou des fleuves pluviaux tropicaux) l'exhaussement phréatique parti des berges peut avoir le temps de gagner toute la largeur alluviale. De la sorte dans celle-ci, les variations saisonnières, et même les mouvements phréatiques journaliers, tout au moins près des berges sont réglés essentiellement par le comportement du cours d'eau principal<sup>32)</sup>.

31) Nous jugeons prudent d'écrire: en principe. Car si un affluent en très forte crue débouche dans une vallée alluviale principale non encore atteinte par une crue de l'artère maîtresse, la surélévation phréatique, à proximité du lit inférieur de l'affluent dont les alluvions rejoignent celles de la rivière principale, produira aux abords de celle-ci, sur un côté du tributaire une pente inclinée vers l'extérieur pour lui, et donc vers l'amont, sur une certaine distance, dans la vallée du cours d'eau principal rejoint.

32) Sur le comportement des nappes phréatiques dans les vallées alluviales on a beaucoup de textes intéressants. Nous recommandons tout particulièrement la lecture à cet égard, d'un mémoire tout récent, élaboré par M. MARC HENRY, Directeur de la Compagnie

Or celui-ci peut devoir à son bassin supérieur un régime très différent de celui qui règne localement ou régionalement pour influence immédiate dans les pays traversés. Par exemple une rivière venue de la grande montagne présente de hautes eaux printanières ou estivales de fonte dans un pays de plaines et de collines où les eaux phréatiques d'origine locale ont en moyenne, sous nos climats, leurs plus gros débits et leurs niveaux les plus élevés en mars ou même au début d'avril. Nous rappelons que ces dates marquent un retard par rapport aux apogées que connaissent en janvier ou en février les rivières et les ruisseaux nés dans la région.

## 8 – Perturbations d'origine artificielle

### a) Effets des apports d'eau par irrigations

Voici pour finir cet examen des régimes, les conséquences de perturbations d'origine artificielle.

Les irrigations introduisent des débits qui peuvent être très forts dans les vallées alluviales, y compris les épanouissements deltaïques de celles-ci. Beaucoup des eaux ainsi répandues sur le sol ne sont pas consommées par les plantes, ni directement évaporées, ni ramenées aux rivières par voie superficielle. Mais elles s'infiltrent et reviennent ainsi partiellement aux chenaux naturels où l'on a opéré le prélèvement. Dans le parcours phréatique auquel elles sont de la sorte contraintes, elles renforcent les nappes dont elles surélèvent les niveaux. Ainsi les hauteurs maximales piézométriques peuvent se produire en des saisons où les régimes locaux naturels comporteraient des minima, ou tout au moins des baisses sensibles. En particulier dans presque toutes les régions tempérées d'altitudes faibles ou peu montagneuses, les basses eaux fluviales tombent à leurs paroxysmes de faiblesse en aout ou en septembre, en accord avec les régimes pluviaux ou pluvio-nivaux «océaniques» ou méditerranéens; et dans les nappes phréatiques, le maximum survient un mois ou six semaines plus tard que le maximum fluvial donc de mars à mai. Or les besoins en eau de

---

Nationale du Rhône, chargé des études (Annales des Ponts et Chaussées, n° 5 de 1963, 21 × 26 cm, 50 p., 17 fig.). L'auteur montre notamment comment se comportent, soit naturellement lors des crues et des décrues, soit pour des causes artificielles telles que les constructions de barrages ou les creusements de canaux de fuite, ou les pompages, en des emplacements divers, non seulement les niveaux des nappes phréatiques, mais encore ceux des nappes captives ou semi-captives. Celles-ci se forment en maintes vallées alluviales, dans des bancs de graviers ou de sables au-dessous de couches ou de lentilles locales argileuses, ou limoneuses (celles-ci étant modérément perméables). Il peut y avoir en des endroits donnés dans le sens vertical plusieurs nappes superposées et séparées de ce genre. Mais elles peuvent se rejoindre latéralement si les substratums imperméables sont seulement locaux. Notre texte, délibérément sommaire n'a envisagé que les nappes réellement phréatiques, c'est-à-dire non séparées de l'air libre par un horizon étanche ou peu perméable.

la végétation croissent en général jusqu'en juin et juillet, et même jusqu'en août pour certaines plantes.

D'où le maintien de hautes cotes phréatiques à ces moments de l'année, avec des maxima dont les dates moyennes ou occasionnelles ont pour conditions la nature de la végétation à nourrir, la rapidité d'infiltration, et aussi, facteur point artificiel les fournitures d'eau atmosphérique, très variables selon les climats, et dans un pays donné selon les années. Puis certains climats éprouvent des pénuries pluviales nuisibles aux récoltes en des saisons très différentes de notre été. Ainsi dans de nombreuses contrées tropicales on doit irriguer les sols superficiels et donc enrichir les eaux phréatique en hiver ou lors des printemps, encore point ou peu pluvieux et caractérisés par des chaleurs torrides. Mais les conditions naturelles et les effets corrélatifs des irrigations sur les régimes phréatiques obéissent à beaucoup plus de types que ceux dont on vient de présenter les schémas simplistes.

Bien entendu les modifications infligées aux régimes piézométriques par les irrigations se manifestent partout où l'on pratique celles-ci et point seulement dans les vallées alluviales, inondables ou non. On irrigue des terrasses naturelles insubmersibles très étendues, des versants et des plateaux. Et partout où l'apport artificiel hydrique se fait avec abondance, les comportements saisonniers et la richesse générale des nappes et des sources qui en proviennent se modifient. L'altération, avec accroissement général de débit peut être très considérable. Par exemple nous avons vu que vers 1902 les sources qui émanent d'un plateau basaltique apportaient à la Snake en moyenne quelque 110 m<sup>3</sup>; une quinzaine d'années plus tard les irrigations massives réalisées sur le plateau avaient accru ce module d'au moins 30 m<sup>3</sup>.

#### b) Perturbations dûes aux pompages

D'autres perturbations artificielles des régimes phréatiques étaient naguère médiocres et même généralement insensibles. Nous envisageons ici les effets des pompages. Depuis deux ou trois décennies et surtout depuis quelques années, on demande à ces prélèvements opérés dans les nappes des débits rapidement accrus, désormais point négligeables en de nombreux secteurs et qui deviendront très gros ou même énormes (à moins de règlements limitatifs indispensables) dans un avenir proche. Ces eaux puisées dans le sous-sol servent aux besoins de l'industrie, à l'alimentation des villes et des villages pour la boisson ou d'autres usages, et de plus en plus aux irrigations. On projette ou même on a décidé de créer puis d'intensifier beaucoup, voire démesurément celles-ci, en particulier par aspersion, même dans des régions point défavorisées pour les arrosages pluviaux moyens, comme la vallée de la Loire, la Beauce et d'autres plaines d'Europe occidentale et centrale. Car on veut, de la sorte, accroître dans de grandes proportions les récoltes, et les gains. Il va de soi que les pompages à gros débits, en de multiples emplacements affaiblissent déjà et

risquent de réduire encore bien plus, avant peu, les réserves hydriques souterraines. Ils modifieront très fortement les régimes saisonniers de nombreuses nappes et de leurs émergences, et par conséquent ceux des rivières.

c) Effets des créations de canaux à des niveaux supérieurs ou inférieurs  
à ceux des eaux fluviales naturelles

Et d'autres interventions humaines que l'on va dire altèrent encore l'Hydrologie phréatique et tout d'abord les niveaux piézométriques.

Si l'on construit un canal d'amenée à une centrale hydro-électrique, ou si on barre la rivière à l'emplacement choisi pour l'usine, l'altitude nouvelle des surfaces liquides, dans le chenal artificiel ou dans le lit naturel d'amont deviendra plus élevée, et en certains cas de beaucoup que jusqu'alors. D'où pour les nappes, si elles communiquent latéralement avec la rivière, un exhaussement qui peut, par excès de saturation et noyage des racines, et même par création d'un état marécageux, compromettre ou rendre impossible la culture.

Puis en aval, l'installation comporte en général un canal de fuite. On le creuse à son origine sensiblement plus bas que le niveau antérieur du fleuve au droit de l'ouvrage. Et dans le lit naturel délaissé, on ne laisse couler que des débits réduits et dont par conséquent les niveaux deviennent plus bas qu'auparavant. D'où enfoncement des nappes, de leurs franges capillaires, et diminutions nuisibles d'humidité pour des terrains précédemment en culture.

Des phénomènes de ce genre ont suivi ou auraient pu suivre les grands travaux d'aménagement accomplis pour la création d'énergie hydroélectrique et pour la navigation dans la vallée du Rhône entre les abords de Valence et Bollène, et dans celle du Rhin bado-alsacien entre les abords de Bâle et Marckolsheim. Et l'on a dû chercher des remèdes<sup>33)</sup>.

D'ailleurs tout creusement fluvial, naturel ou bien artificiel par son origine, a pour conséquence un rabattement des nappes qui communiquent avec les eaux de la rivière. C'est ce qui est arrivé dans le secteur méridional du Rhin bado-alsacien à la suite des travaux par lesquels on a rétréci et rectifié le cours du fleuve entre 1840 et 1860. Et un abaissement phréatique de plusieurs mètres a eu aussi pour cause, à l'amont de Lyon, la concentration artificielle des eaux du Rhône<sup>34)</sup> dans un lit resserré que l'on nomme canal de Miribel.

---

33) On traite de ceux-ci et des perturbations qui les ont rendus nécessaires pour la vallée du Rhône dans le mémoire précédemment cité de Monsieur Marc HENRY. L'étude des problèmes analogues tels qu'ils se sont posés dans la partie méridionale de la vallée rhénane bado-alsacienne a aussi donné lieu à de très belles études.

34) Hormis les débits qui sont détournés par un canal vers l'usine de Jonage.



## G – PART DES EAUX SOUTERRAINES DANS LES DÉBITS FLUVIAUX

### 1 – *Moyens d'évaluations*

#### a) Difficultés rencontrées

Après cette analyse des phénomènes relatifs aux rôles hydrologiques de la perméabilité et de son contraire, une question capitale se pose d'elle-même. Quelles sont les proportions respectives des débits d'origine uniquement superficielle et de ceux de provenance souterraine dans l'alimentation totale des divers cours d'eau.

Aussitôt nous devons spécifier que nous attribuons à la deuxième catégorie, tout débit qui a atteint le réseau fluvial par des sources, après un cheminement point trop bref, dans le sous-sol, même si, avant de s'enfoncer dans celui-ci les eaux en question ont parcouru sur les versants ou dans des lits apparents de rivières ou de ruisseaux, des distances considérables, par exemple, plusieurs hectomètres, kilomètres ou myriamètres. L'appréciation des valeurs significatives à retenir pour les parcours et pour des durées des séjours dans le sous-sol ne peut être évidemment que personnelle, donc arbitraire et sujette à controverse ou à une indécision prudemment avouée (fig. 23 a à 23 d).

Mais surtout comment chiffrer les alimentations par ruissellement et les apports souterrains?

Les tentatives de ségrégation par la pensée peuvent sembler chimériques, vu le passage simultané, en mélange, des eaux ayant les deux origines, pendant des temps courts ou durables, chaque fois qu'il a plu de façon efficace pour l'écoulement superficiel ou que de la neige a fondu avec un même résultat. La distinction devient particulièrement ardue lorsque les précipitations ou les fontes sont si fréquentes que les gonflements dûs aux apports successifs s'interfèrent les uns avec les autres. Et la difficulté atteint son comble pour les très grandes rivières, comme le Mississippi, l'Amazone, le Danube ou le Parana. En effet, considérons une station hydrométrique donnée dans le cours moyen ou inférieur d'une telle artère fluviale. Un débit causé par une pluie ou par une fonte de neige loin à l'amont peut ne parvenir au poste considéré qu'une semaine ou un mois, ou plus longtemps après le phénomène météorologique responsable, et même après un délai encore plus long pour les écoulements d'une extrême indolence qui caractérisent les fins descendantes, les queues, les arrières-gardes des ondes de crues; débits que l'on qualifie improprement d'hypodermiques et qui sont bien plutôt épidermiques et ralentis à l'excès par l'infinité de leur épaisseur sur les versants et par la rugosité de ceux-ci.

Dans ces conditions, même si à l'endroit en question, il n'a pas plu depuis plusieurs jours ou quelques semaines, les débits qui y arrivent par le cours du fleuve peuvent avoir une origine encore partiellement superficielle.

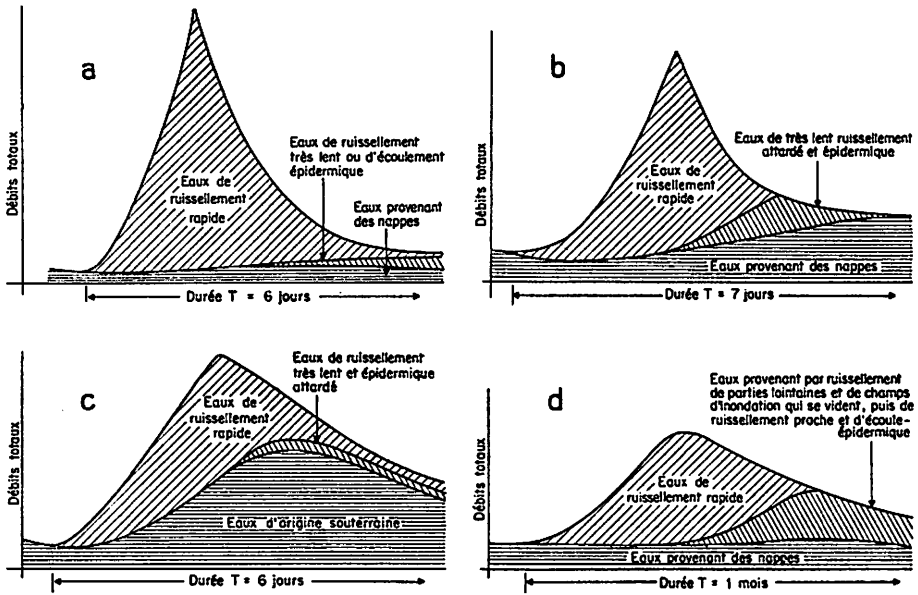


Fig. 23: Origines diverses des eaux de crue selon les cas:

- a) *crue très rapide* à l'issue d'un bassin très peu perméable avec de médiocres réserves souterraines.
- b) *crue rapide* à l'issue d'un bassin possédant une bonne perméabilité, mais avec résurgences assez promptes.
- c) *crue assez rapide* à l'issue d'un bassin calcaire, en partie karstifié, avec très grosse circulation souterraine à exurgence rapide.
- d) *crue lente* à l'issue d'un grand bassin avec pente faible ou modérée de l'artère principale, longue de 700 à 800 kilomètres, et perméabilité notable dans le bassin supérieur.

Par contre pour des rivières courtes, ou assez longues, mais caractérisées par des translations rapides, les distinctions deviennent bien moins hasardeuses. Pourvu que plusieurs jours au moins aient séparé les averses successives, on arrive assez bien à trouver et à préciser les moments où le débit fluvial dans sa totalité ou pour neuf dixièmes ou 95 centièmes de son chiffre, n'a plus pour corps que les eaux d'origine franchement souterraine.

### b) Evaluations d'après les courbes de tarissement

Et lorsque les crues se succèdent avec peu d'intervalle, l'évaluation au moins grossière des débits souterrains qui ont participé aux écoulements marqués par les apophyses des hydrogrammes n'est encore point impossible. Car si le gonflement de la rivière n'avait point eu lieu, les débits toujours en baisse, lorsque de nouveaux apports atmosphériques ne viennent point les ranimer, auraient continué à décroître plus ou moins lentement, au-dessous de l'écoulement ini-

tial, c'est-à-dire observé avant la montée. Décroissance réalisée selon des courbes exponentielles de tarissement ou de temps sec (Trockenwetter-Kurve), que l'on doit déterminer en étudiant les étiages et les moyens de les prévoir. Cependant les débits dus à l'état antérieur des nappes ne sont pas généralement les seules eaux souterraines qui passent durant les crues. Une recharge plus ou moins rapide qu'engendre l'averse ou la fonte, exhausse les niveaux piézométriques et accroît le tribut des sources, après un certain délai, pendant la phase de gonflement général, ou tout au moins quand les eaux fluviales, ayant commencé leur décroissance sont encore abondantes. Intervention modeste dans les bassins ou la perméabilité est petite, mais très forte, ou même parfois prédominante, si le bassin est du type karstique avec traversées à vive allure par les eaux ingurgitées puis expulsées.

De bons hydrologues, parviennent bien ou point trop mal à déterminer grosso modo les courbes des débits, souterrains par leur origine et qui ont participé aux grandes eaux. Et l'on ne commet pas forcément des erreurs trop lourdes lorsqu'on ose faire le partage pour des mois, des trimestres ou même des semestres, lors desquels les débits ont été fournis presque sans cesse à la fois par les sources et par les ruissellements directs massifs et prompts, ou très amoindris et attardés (fig. 24).

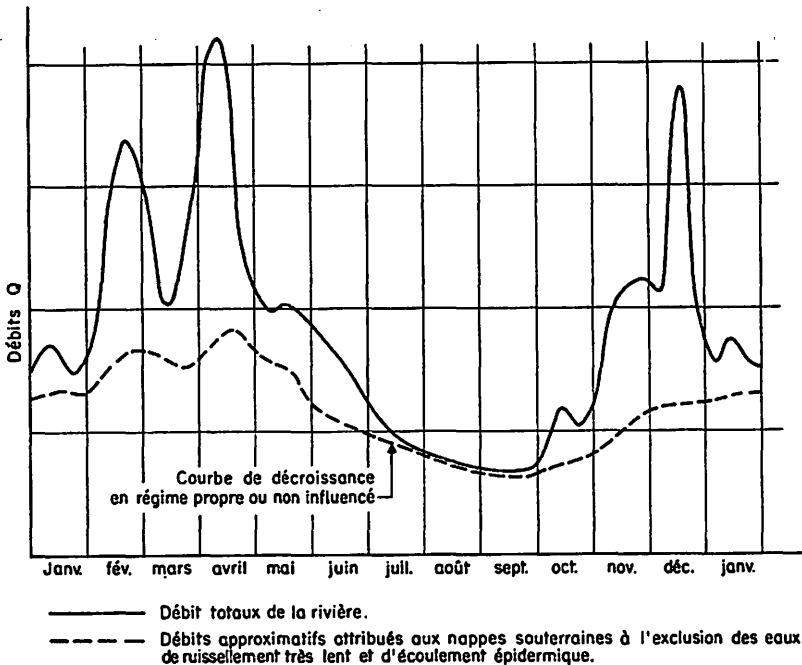


Fig. 24: Estimation approximative des débits d'origine souterraine dans l'écoulement d'une rivière, pour laquelle les résurgences sont assez rapides.

### c) Indices fournis par les moyennes mensuelles des basses eaux

Puis les régimes de nombreuses rivières et surtout les climats responsables permettent pour ces distinctions certaines conjectures, point sujettes pour ainsi dire à l'erreur par exagération des débits souterrains, mais beaucoup plus exposées en maints cas à des fautes inverses très considérables.

Nous envisageons tout d'abord ici maints cours d'eau de régime pluvial ou pluvio-nival tempéré océanique dont les eaux les plus indigentes surviennent au cours des mois chauds avec fond de la baisse le plus fréquemment en aout ou en septembre.

Les débits alors observés représentent à peu de chose près le minimum saisonnier de l'alimentation par les sources dans les bassins où les pluies habituelles de l'été sont trop faibles pour qu'une fraction de leur produit atteigne les nappes et engendre dans les exutoires, puis dans les lits fluviaux, des recrudescences autres que minimales. En Europe occidentale et en d'autres pays des latitudes moyennes ou même sous des climats à tendances continentales avec pluies les plus fortes en été, comme dans les plaines et collines allemandes, polonaises, russes, etc. . . . les bassins reçoivent souvent dans la pleine saison chaude moins de 60 à 80 mm par mois. Ces médiocres apports, surtout s'ils se manifestent par des pluies assez fréquentes et donc point drues (sauf localement lors d'orages) ne procurent point ou guère de ruissellement. Et ils n'enrichissent pratiquement point les nappes, donc l'écoulement des rivières<sup>35</sup>). C'est alors la prépondérance écrasante de ce qu'on appelle le régime «propre ou non influencé» (sous entendu: par des pluies ou fontes nouvelles); et donc l'exclusivisme plus ou moins total de l'alimentation par les nappes souterraines.

Par conséquent il y a toutes chances pour que le débit moyen mensuel global le plus faible de telles rivières soit entièrement dû aux sources, à moins que n'ait joué un mode, si répandu sur la terre d'alimentation retardée, qu'on ne peut le qualifier d'exceptionnel. C'est l'accumulation dans les lacs de volumes liquides et leur restitution progressive aux cours d'eau émissaires. Il en résulte lors des étiages un renforcement sensible ou même énorme des débits sortants, et dans ces cas une pondération qui peut être remarquable, avec une médiocrité frappante des moyennes mensuelles maxima et une impressionnante richesse conservée par les moyennes mensuelles minimales. Cette modération de cause lacustre peut s'épanouir même à l'issue de bassins éminemment imperméables et donc néfastement dépourvus de réserves souterraines disponibles.

---

35) Dans les bassins généralement composés de petites montagnes, et point ou modérément perméables, les pluies estivales de climat continental, sous les latitudes moyennes ont assez de force (par exemple plus de 100 ou 120 mm par mois en moyenne) à cause du relief, pour produire des ruissellements actifs, et donc pour fournir des fractions notables de débits pas souterrains lors de la saison la plus chaude. Elles renforcent donc plus ou moins les moyennes mensuelles fluviales. Celles-ci alors n'ont plus de signification décisive pour l'apport souterrain minimum. C'est le cas par exemple en Suisse pour diverses rivières du Mittelland et même du Jura.

Mais revenons aux régimes pluviaux ou pluvio-nivaux des rivières ici en question et dont les bassins dépourvus de lacs assez grands pour accroître sensiblement les basses eaux ne sont en outre point exposés, sauf par hasard, pour certains d'entre eux lors de telles ou telles années, à des pluies estivales ruisselantes.

Pour ces cours d'eau les moyennes mensuelles globales <sup>36)</sup> les plus faibles représentent seulement à peu de chose près des eaux souterraines. Et l'on a la quasi certitude, à moins que le bassin n'ait une imperméabilité remarquable, sans manteaux superficiels épais de décomposition, que durant la fin de l'automne, l'hiver et le début du printemps, la contribution des sources a été bien plus large (fig. 24). Donc les moyennes annuelles des débits souterrains ont dépassé lesdites moyennes mensuelles minimales. Mais évidemment l'excédent de la moyenne annuelle, souterraine par sa provenance, sur la moyenne mensuelle en question, est d'autant plus grand que le bassin a un pouvoir plus grand d'absorption; nous ne disons point de rétention durable. Car ainsi qu'on l'a vu, les eaux infiltrées rapidement peuvent ressortir avec une grande rapidité relative, en maints bassins karstifiés. De la sorte le fait pour une rivière qui draine une région calcaire d'avoir lors des basses eaux moyennes une indigence très accentuée, par rapport à son module (par exemple 10 à 20 % seulement) peut ne pas empêcher son volume annuel d'être fourni pour une forte part (30 à 60 % et plus) par des eaux qui ont traversé le sol.

La faiblesse des débits moyens saisonniers lors des maigres expose d'autant plus à sous-estimer la part des débits souterrains dans l'alimentation annuelle que les précipitations des mois les plus indigents en chutes d'eau sont plus faibles et par conséquent moins capables de reconforter par du ruissellement les débits contemporains. C'est ce qui arrive tout spécialement en été dans les régions soumises aux climats méditerranéens typiques <sup>37)</sup> même pour les rivières très arrosées dans l'ensemble de l'année. Car de juin ou de juillet jusqu'au milieu ou à la fin de septembre, les bassins considérés ne reçoivent que des précipitations mensuelles généralement point supérieures à 30, 40 ou à la rigueur à 50 millimètres en Europe sous des températures très évaporantes. Et les sols des bassins ont alors soif d'eaux adhésives donc plus ou moins utilisables par la végétation. En Afrique du Nord, en Syrie, au Liban, les pluies estivales sont encore plus faibles, voire presque nulles, en tout cas incapables de concourir à l'écoulement fluvial.

Puis dans les régions de climat tropical typique, une sécheresse surtout hivernale et pratiquement absolue règne pendant 3 à 5 ou 6 mois ou plus. Ou bien (Brésil tropical) les chutes d'eau sont, non point nulles mais trop médiocres

---

36) C'est-à-dire nous le répétons, celles de suites assez longues d'années.

37) Plusieurs régions voisines d'océans situés à l'ouest, ont grâce à la faiblesse de leurs pluviosités estivales, des climats qui ressemblent sur ce point à ceux des pays proprement méditerranéens. C'est le cas pour la façade occidentale des Etats-Unis, à côté de l'Océan Pacifique et pour l'Ouest et le sud-ouest de la Péninsule ibérique.

pour produire, sauf par hasard, un écoulement quelconque. Une sécheresse relative de ce genre empêche encore les rivières de vivre autrement que sur leurs réserves souterraines dans les zones de climat équatorial pur pendant 1 à 3 mois.

En toutes ces contrées les moyennes mensuelles globales les plus petites sont d'autant plus inférieures aux moyennes des débits souterrains de toute l'année que les eaux infiltrées circulent dans le sous-sol et en ressortent plus vite.

Si le bassin est effectivement très imperméable, des coefficients moyens mensuels très médiocres: 0,05 ou 0,10 lors des basses eaux peuvent ne pas exclure des pourcentages 2 ou 3 fois plus grands, mais encore faibles (par exemple 0,10 à 0,15) en valeur brute pour l'alimentation souterraine annuelle. En revanche des coefficients mensuels minimaux de 0,50 à 0,75 ou même de 0,80 à 0,90, sous les mêmes climats ne laissent aucun doute sur la prépondérance considérable ou écrasante des eaux venues du sous-sol.

#### d) Signification des étiages journaliers

Il en est de même pour la signification des débits minimaux journaliers (étiages les plus graves connus ou caractéristiques) dont les coefficients sont très élevés; par exemple 0,50 à 0,60 et plus pour les étiages caractéristiques. Mais déjà des chiffres de 0,30 à 0,40 pour ces valeurs, à l'issue de bassins sujets à des sécheresses graves, occasionnelles ou régulières en certaines saisons dénotent une grosse abondance relative de l'alimentation souterraine.

### 2 – *Quelques approximations sur les fractions respectives des débits d'origine souterraine ou superficielle*

En somme les divers indices, propres à nous renseigner sur les parts respectives de l'alimentation souterraine dans les volumes fluviaux annuels ont des significations inégales. Le mieux est de vouloir et de pouvoir les employer tous, et de recourir à des contrôles par recoupements. Si l'on procède de la sorte et si l'on connaît bien dans ses principales manifestations l'hydrologie d'une rivière et ses facteurs, on doit pouvoir déterminer avec une approximation au moins passable, quelles fractions des débits totaux annuels proviennent des nappes phréatiques et plus profondes.

#### a) Rivières très peu ou peu alimentées en eaux venues du sous-sol

Les données qui nous manquent le plus, relativement à la distinction ici envisagée sont celles qui s'appliqueraient aux rivières les moins alimentées en eaux d'origine souterraine. Ces cours d'eau doivent être ceux qui desservent des bassins où règnent les conditions suivantes: grande imperméabilité des roches en place, faibles étendues et minces profondeurs des revêtements superficiels

meubles et perméables; gros pourcentages des précipitations totales annuelles fournis par des averses assez drues pour saturer bientôt ces plaques ou pour l'emporter de beaucoup sur les vitesses d'infiltration possibles dans leur matériel, et fréquence des chaleurs, puis abondance de végétation suffisante pour extraire rapidement du sol, par évapotranspiration, beaucoup d'eaux infiltrées. Nous avons la conviction que de semblables collaborations entre facteurs fonctionnent en des bassins peut-être nombreux; avec d'autant moins de chances de neutralisation par des influences adverses que les surfaces réceptrices sont moins vastes.

En certains petits ruisseaux vite asséchés qui drainent des reliefs cristallins, ou des terrains essentiellement schisteux ou argileux, sous les climats des genres que nous avons ci-dessus définis, la part des eaux souterraines dans l'alimentation doit ne point dépasser 10 %, ni peut-être 5 %. Et nous supposons qu'elle n'est point ou guère plus élevée dans les régimes de rivières comme celles du Texas, peut-être à l'issue de domaines atteignant 10 000 et 20 000 km<sup>2</sup>. Mais ce ne sont que des hypothèses. Et nos incertitudes à se sujet illustrent l'extrême difficulté de bonnes présomptions conçues relativement aux pouvoirs d'absorption d'après la seule vue des cartes géologiques où les revêtements superficiels ne sont en général ni figurés, ni décrits dans des notes annexes.

Des évaluations américaines fondées sur les diagrammes des débits et dont nous connaissons les résultats ne s'appliquent à aucune bassin où l'alimentation d'origine souterraine serait absolument insignifiante. Elle ne dépasserait cependant pas 15,9 % pour la Black River du Wisconsin. Puis un autre chiffre faible (17,5 %) se révélerait pour la Neosho affluent septentrional de l'Arkansas moyen. On indique encore 21,2 % pour la Stillwater affluent de la Miami, tributaire de l'Ohio, à West-Milton, et 28,3 % pour la Yellow River du Wisconsin à Sprague. Tous les autres chiffres sont supérieurs à 30 %. Ces seules indications suffisent à nous faire pressentir qu'en de très nombreuses rivières des grandes plaines, sous nos latitudes la part de l'écoulement d'origine souterraine dépasse le tiers du volume total annuel. Cette révélation seule suffirait à faire ressortir l'importance capitale des études hydrogéologiques.

Et voici quelques données relatives (selon Ogievski cité par M. Schoeller) aux cours d'eau soviétiques d'Europe. Le chiffre de 11,3 % pour l'Oka supérieure à Orel nous semble bien petit; celui de 20 % pour le Don jusqu'à Kalatch n'a rien qui nous surprenne. Celui de 28 % pour la Wolga moyenne avant le confluent avec la Kama à Wiazowya est modéré, comme 29 % pour le Soj affluent du Dniepr à Gomel. On aurait 33 % pour le Dniepr jusqu'à Rechitza, dans le cours supérieur, et 37 % jusqu'à Kiev.

D'une façon générale, la brièveté relative et l'ampleur de la crue printanière due à la fusion nivale, et, quand la fonte commence, l'impossibilité pour le sol saturé, ou gelé sous la neige de boire une très forte fraction des eaux ruisselantes doivent restreindre la part de l'alimentation, pour maintes rivières nivales de plaine.

## b) Alimentations souterraines assez fortes

Pour différentes causes surtout géologiques, et qu'il faudrait pouvoir analyser à propos de chaque bassin, 12 des rivières états-uniennes sur 23 pour lesquelles on a évalué, mieux que d'après des suppositions vagues les apports d'origine souterraine devraient à ceux-ci de 40 à 56 ou 57 % de leur débit moyen annuel. Parmi elles on nommera le Merrimack à Lawrence (49,1 %), la James à Cartersville (46,4 %), le Chattahoochee de Géorgie (49,9 %), la Root River du Wisconsin à Houston (55,4 %), le Buck Creek de l'Ohio à Springfield (55,7 %). Ces chiffres nous donnent le soupçon que force cours d'eau issus de terrains sédimentaires où ne manquent ni les calcaires, ni les sables, ni les détritiques plus grossiers reçoivent des sources un peu plus ou un peu moins de moitié de leurs débits.

Et cela nous suggère presque la conviction que la Seine et beaucoup de rivières petites ou grandes qui drainent le bassin de Paris ont des alimentations souterraines d'au moins 45 à 55 %. Le fait de moyennes mensuelles minima tombant en aout à 37 % des modules (Paris), à 25 % (Bar-sur-Seine) à 33 % (St Dizier) et à 26 % (Aube à Blaincourt) n'infirme en rien notre croyance. Car nous savons et nous avons pu constater en certaines circonstances que la circulation à travers les calcaires jurassiques dans les domaines supérieurs de ces cours d'eau, est non point précipitée, comme pour la Bourne, mais relativement rapide. Et selon toutes probabilités lors des hautes eaux de saison froide, l'abondance des infiltrations par l'effet des pluies, et celle des fractions liquides qui ressortent après des séjours souterrains de 1 à quelques jours et quelques semaines ou un trimestre doit comporter lors du trimestre ou du semestre de pléthore et même au début du printemps des pourcentages de 50 à 60 % pour le tribut des sources.

Nous raisonnons de la même manière pour une catégorie différente de cours d'eau. Il s'agit des rivières de régime pluvial tropical plus ou moins privées d'arrosage en hiver. Certaines d'entre elles ont des coefficients de débits (rapports des débits en question aux modules) encore élevés lors des mois qui souffrent le plus de pénurie. C'est le cas pour la plupart des rivières qui coulent au Brésil dans la région de Rio de Janeiro et pour le Parana y compris les branches élémentaires qui constituent ce fleuve. On trouve en aout ou septembre (fin de l'hiver) au minimum 56,6 % pour le Paraíba do Sul supérieur, 49 % plus bas à Barra do Pirai, encore 35,2 % pour le haut Sao Francisco, 43,9 % pour le haut Rio Grande, 46,5 % pour le Sapucaí etc.

Pourtant les pluies de la fin de l'automne et de l'hiver ainsi que nous l'avons spécifié plus haut sont incapables d'assurer un ruissellement de quelque importance. Nous avons conclu et M. Michel Rochefort a constaté et démontré qu'en cette région des manteaux de décomposition où prédominent les sables grossiers recouvrent les roches cristallines et surtout les grès sur des profondeurs de quelques mètres à quelques décimètres; d'où une infiltration rapide des eaux gravifiques et leur emmagasinement en réserves très riches, qui donnent nais-



sance à des exurgences abondantes. Pour l'ensemble de ces rivières, les eaux d'origine souterraine doivent fournir en année moyenne 50 à 55 % des modules, et sans doute encore plus en certains bassins.

Enfin, là où l'existence d'épaisses couches de roches à forte perméabilité de fissures le permet, les régimes nivaux et même glaciaires doivent ne pas empêcher l'alimentation souterraine de contribuer pour beaucoup aux débits. C'est le cas, dans les Alpes françaises pour la haute Isère. A Moutiers le coefficient mensuel le plus bas en février est 0,40. D'où la vraisemblance d'un apport souterrain annuel au moins égal à 50 %. Plus à l'amont très près de la source, à Tignes, pour des causes géologiques encore mal précisées, le pourcentage dépasse nettement 50. Et nous le croyons supérieur à 65 % pour l'Isonzo venu des Alpes Carniques.

### c) Alimentations souterraine très forte ou formidables

Nous arrivons aux rivières qui drainent les bassins calcaires karstifiés<sup>38)</sup> et à certains domaines basaltiques et gréseux où se produisent à la fois les infiltrations et les accumulations internes les plus pléthoriques. Dans ces régions les coefficients mensuels minima peuvent atteindre 60 à 80 % et plus, même lors des saisons où les pluies, en raison de leur médiocrité ou de leur insignifiance ne causent que des ruissellements infimes jusqu'aux rivières. Et donc l'écoulement fluvial provient en prépondérance éclatante des sources. Ou même le ruissellement n'y joue plus qu'un rôle effacé ou très subordonné.

Considérons d'abord les rivières de l'Apennin central calcaire. Les coefficients mensuels de débits atteignent en aout 0,58 du côté de l'Adriatique sur la Pescara à Santa Teresa, et 0,73 plus en amont à Sambuceto; puis dans le domaine du Tibre, 0,67 sur l'Aniene à Lunghezza, 0,74 pour la Néra inférieure à Macchiagrossa, 0,83 en septembre pour la Nera supérieure à Torre Orsina, 0,76 en aout pour le Velino à Terria.

D'où la certitude que dans ces rivières, les eaux souterraines attardées<sup>39)</sup> représentent 70 à 90 % peut-être de l'alimentation annuelle. Il en est à coup sûr de même pour plusieurs cours d'eau du Liban et d'Israël.

Et les proportions doivent être analogues ou peut-être encore plus favorables à l'alimentation souterraine, à l'issue des bassins basaltiques où l'emménagement est énorme. Régions bien moins étendues au total dans le monde que les territoires calcaires envisagés dans l'examen précédent. Mais enfin à l'ouest des Monts des Cascades, aux Etats-Unis et à côté d'autres rivières moins assagies par leurs basaltes, la Mackenzie, affluent de la Willamette (celle-ci est un tribu-

38) Déjà dans le domaine très calcaire du Neckar supérieur, (Jura souabe et franconien) l'écoulement d'origine souterraine doit dépasser 65 % du volume total annuel.

39) Peut-être les proportions sont elles aussi fortes pour certaines rivières dont les bassins très karstiques sont traversés en vitesse par les eaux engouffrées. Mais nous ne pouvons citer aucun exemple de ce genre, en présentant pour lui les résultats d'évaluations précises.

taire de la Columbia inférieure) ne peut d'après son minimum absolu, et son coefficient mensuel le plus faible recevoir des sources moins de 65 à 70 % de son alimentation. De l'autre côté des Monts des Cascades, le sous-sol volcanique doit fournir à l'étonnante Metolius 85 à 90 % sinon plus de son débit.

Et pour terminer cette revue des modules fluviaux en très majeure partie d'origine souterraine nous invoquerons ceux des rivières congolaises fantastiquement pondérées qui drainent les plateaux gréseux Batékés. Le coefficient mensuel moyen global le moins élevé atteint en septembre 0,845 pour la Djoué et 0,897 pour la Léfini, et en août 0,90 pour la N'Keni, 0,836 pour l'Alima. Soit la certitude, pour ces rivières, d'alimentations souterraines égales à 90 et 95 % des modules, sinon plus malgré une surabondance pluviale et des fréquences en jours pluvieux qui satureraient beaucoup d'autres terrains même assez perméables en surface, et dès lors élèveraient beaucoup les parts du ruissellement.

Pour la Lobaye plus au nord dans la République centre africaine, nous comptons au moins 85 %, mais pas plus de 65 à 70 % dans le bassin congolais moins perméable de la Bouenza. De semblables régimes règnent au moins sur 70 000 à 80 000 km<sup>2</sup> au nord-ouest du Congo inférieur.

Et l'on fera ressortir l'abondance des ces contributions venues après traversée du sol, en indiquant à quelles épaisseurs de précipitations écoulées elles correspondent en gros:

1000 mm pour la MacKenzie et pour la Léfini,  
900 mm pour la N'Kéni et pour l'Alima,  
550 pour la Djoué  
550 pour le Velino

autant ou un peu plus pour tout le bassin de la Nera.

## QUELQUES REMARQUES CONCLUSIVES

### *1 – Proportion générale considérable des écoulements d'origine souterraine dans les débits fluviaux*

Nous avouons nous méfier beaucoup des évaluations qui essaient de chiffrer certaines quantités moyennes relatives aux précipitations, comme aux écoulements sur la totalité de tels ou tels continents ou pour l'ensemble des terres émergées sur notre globe. Car trop d'éléments régionaux sûrs manquent pour les calculs de ce genre. Cependant nous inclinons à croire que la part des eaux d'origine souterraine dans le débit total des rivières terrestres doit dépasser 40 et peut-être 50 %.

Et si cet apport intégral correspond à 250 mm de précipitations devenues dé-

bits chiffre proposé en 1922 par Wust, et en 1938 par Wundt et Meinardus, (d'après les citations de R. Keller) 100 à 125 mm ne s'écouleraient dans les rivières qu'après avoir traversé le sol ou le sous-sol.

## *2 – Perméabilités très inégales d'un bassin à l'autre*

Mais une extrême inégalité caractérise les proportions respectives de l'alimentation souterraine d'une rivière à l'autre, et même d'un grand fleuve à un autre. Certes, plus un domaine fluvial est vaste, moins il y a de chances pour qu'en totalité ou pour les neuf dixièmes ou les quatre cinquièmes de sa surface, il se signale par une très grande perméabilité ou par l'impossibilité d'infiltrations abondantes et d'emmagasinement hydriques remarquables dans ses terrains. Cependant, même sous des climats comportant de longues sécheresses, certains bassins de 50 000 ou 100 000 km<sup>2</sup> n'éprouveront jamais de graves étiages. Et d'autres bassins aussi spacieux ont presque partout une imperméabilité si forte que les débits de leur collecteur principal pourront presque disparaître lors des pénuries en précipitations, faute de soutien par des réserves souterraines volumineuses. Cela semble être le cas spécialement pour le Tage, tout au moins vers son entrée au Portugal. Mais ainsi que nos explications l'ont mis en lumière, de graves étiages peuvent avoir lieu à l'issue de bassins trop et inutilement perméables, parce que trop promptement vidés et frustrés par les exurgences extrêmement rapides des réserves hydriques temporairement constituées dans leur sous-sol, même si ces volumes d'eau infiltrés ont été très considérables.

## *3 – Proportions respectives des eaux souterraines rapidement éjectées ou longuement enfoncées*

Et cette remarque nous ramène à la certitude que de mêmes proportions totales d'eaux souterraines fournies aux rivières peuvent correspondre à des répartitions très inégales, et même différentes du tout au tout, avec des circulations internes brèves et des exurgences rapides d'une part, et de l'autre avec des sorties longuement retardées<sup>40)</sup> à la suite de mouvements d'une remarquable lenteur.

Or, ces contrastes, et toutes les nuances qui s'échelonnent entre leurs manifestations extrêmes conditionnent autant ou beaucoup plus les régimes fluviaux saisonniers, les étiages et les crues que ne le font les pourcentages respectifs des alimentations souterraines totales, dans l'année moyenne. La perméabilité

---

40) Pour les distinguer respectivement les unes des autres, on pourrait convenir par exemple que les circulations rapides comporteraient pour les pluies infiltrées des expulsions faites à raison de moitié ou des deux tiers, dans les 15 premiers jours, ou dans le premier mois postérieur aux chutes pluviales responsables.

générale qu'il faudrait pouvoir exprimer par ces fractions, s'applique à des rivières presque aussi variées que possible pour leur pondération ou leur violence sous de mêmes climats et à l'issue de reliefs de mêmes altitudes et de conformations analogues.

Donc autant que le pourcentage en volume des eaux provenant des sources, un coefficient qui signifierait la rapidité de circulation souterraine dans le bassin aurait un sens révélateur. Mais ce coefficient ne peut être celui de Darcy, valable seulement pour des superficies et des profondeurs limitées, autour de puits ou à l'amont de quelques sources, et surtout dans des terrains homogènes et où la circulation n'est point trop rapide. Or très peu de bassins supérieurs à quelques centaines de km<sup>2</sup> sont absolument identiques en toutes leurs parties pour les granulations et les arrangements internes des terrains. Il faudrait donc déterminer tant bien que mal, pour le domaine total de chaque petite rivière un coefficient combiné intégré de Darcy, ses facteurs étant pour chaque surface partielle, les profondeurs d'infiltration jusqu'aux niveaux piézométriques, puis les distances, les pentes internes locales, etc. ... Sincèrement, nous n'entrevoions guère (et c'est peu dire) que l'on puisse établir congruement des coefficients de Darcy propres à représenter au moins avec une approximation grossière, la perméabilité d'un bassin, dans ses effets sur les régimes des eaux fluviales. Tout au plus pourrait-on essayer de chiffrer en bloc après expérience point trop brève, par 1, 2, 3, 4 etc. les tendances géomorphologiques, qui en fonction de telles ou telles pluies annuelles et saisonnières, conditionneraient des coefficients de débits égaux à 0,01 ou 0,05 ou 0,10 ou 0,20, etc. ... pour les étiages caractéristiques; et à 0,1 ou 0,2, 0,4 etc. ... (jusqu'à 0,8 et 0,9) pour les moyennes mensuelles globales les plus faibles; puis des crues ayant tels ou tels quotients d'écoulement en 3, ou 5 ou 10 jours ou plus et tels ou tels débits maxima de pointe dans des états donnés de saturation préalable, à la suite de telles ou telles averses, sous telles ou telles températures, non sans égard aux autres facteurs des écoulements excessifs. Nous souhaitons bonne chance aux chercheurs qui essaieraient d'établir de telles représentations numériques.

#### *4 – Différences entre la capacité de rétention et celle de l'accumulation disponible pour les rivières*

Puis nous insisterons une dernière fois sur la différence capitale qui existe, pour un terrain, entre sa capacité de rétention, telle que la conçoivent bien des géographes dont nous partageons le vocabulaire jusqu'à une date récente; et le sens qu'attribuent à ces mots les hydrogéologues dont nous recommandons que l'on adopte en ceci la terminologie. Nous répètons que la rétention, selon eux, s'applique à des eaux adhésives, liées, suspendues, dont les volumes totaux peuvent être très grands (comme dans les argiles ou les limons ou les sables argileux) sans aucun profit pour la réduction des crues puis pour le renforce-

ment des étiages, donc pour la pondération des rivières. Le terme de rétention souterraine, selon notre ancien langage doit être remplacé par celui d'accumulation ou d'emmagasinement et les stockages ainsi désignés, sont exclusivement ceux d'eaux gravifiques disponibles pour les exurgences; Mais là où celles-ci sont rapides, les mots mêmes d'accumulation et d'emmagasinement peuvent tromper en partie. Et dans certains bassins karstifiés l'écoulement, quoiqu'en grande partie souterrain, n'est pas beaucoup moins violent et contrasté qu'à l'issue de bassins imperméables en surface.

#### *5 – Pouvoir absorbant des revêtements décomposés sur beaucoup de roches imperméables*

Puis on ne saurait trop mettre l'accent sur la perméabilité réelle et le pouvoir d'emmagasinement que possèdent les manteaux détritiques formés aux dépens des roches cristallines, le plus souvent imperméables en soi. Grâce à cette couverture, à l'issue de montagnes granitiques ou gneissiques naguère jugées complètement étanches, et avant une saturation qui exige des heures, des jours, ou des semaines selon l'épaisseur de la couche absorbante, les crues peuvent être moins promptes et moins puissantes qu'au débouché de calcaires karstiques rapidement traversés.

#### *6 – Pellicules temporaires initialement imperméables sur certains sols aussitôt après les sécheresses*

Ensuite nous ne ferons qu'effleurer, faute de documentation autre que des témoignages verbaux, un genre spécial de phénomènes relatifs à la perméabilité, et sur lequel nous n'avons pas encore ci-dessus écrit une ligne.

Nous avons plusieurs fois insisté sur le rôle de la saturation subie par les terrains, donc sur l'influence des pluies préalables à celles dont on veut étudier les effets hydrologiques, lesquels sont essentiellement les crues. Et nous avons montré ou laissé entendre et l'on prouve facilement que plus le sol était sec juste avant une averse, plus grande a été la fraction de celle-ci qui s'infiltrait au lieu de ruisseler et de gonfler aussitôt les rivières. Et lorsque plusieurs averses de puissances comparables se succèdent en peu de temps, chacune tend à gonfler la rivière dans une proportion bien plus forte que ne l'a fait la précipitation précédente. En conséquence le quotient d'écoulement dans une série pluvieuse comportant en peu de jours ou de semaines plusieurs épisodes, s'élève progressivement dans de remarquables proportions; par exemple sous nos climats en octobre de 10 ou 20 %, pour les premières averses, à 70 ou 80 % pour la dernière.

Mais des ingénieurs qui paraissent avoir bien observé et apprécié les phénomènes nous affirment qu'en certaines contrées toujours très sèches pendant une saison, une relation contraire de causes à effets se produit lors de la première averse, ou tout au moins à son début; restriction très importante et sans doute plus exacte qu'une appréciation indiquant la conséquence susdite pour toute la première averse, même longue, jusqu'à sa fin. Le fait serait la règle, au commencement de l'automne, pour tous les sols meubles soumis aux climats méditerranéens très excessifs avec sécheresse totale pendant deux ou trois mois d'été; ou bien aux débuts du printemps sous les climats tropicaux absolument privés de pluie efficace en hiver et un peu plus tard.

Car il se constituerait au sommet de ces terrains une pellicule très mince d'éléments soudés entre eux, sans doute par des ciments naturels venus de ruissellements antérieurs pluviaux, ou amenés du bas par des ascensions capillaires. Ces remontées «illuviales» apporteraient en surface des substances provenant des attaques chimiques effectuées dans les terrains sous-jacents.

Et les premières pluies, dans leurs phases initiales à condition de n'être pas assez brutales pour que leur impact effrite la pellicule ruisselleraient sur elle avec peu ou point de pertes. C'est seulement ensuite que le ruissellement ayant décapé cet épiderme, l'infiltration commencerait. Elle deviendrait bientôt ensuite très active, et affaiblirait dans les proportions majeures que nous avons ci-dessus chiffrées, les volumes ruisselants et donc les crues.

Selon nos conjectures, l'effet protecteur contre les infiltrations serait d'autant plus vite aboli que le ruissellement initial serait plus violent, donc plus érosif. L'étanchéité superficielle durerait une heure et peut-être plus dans les seuls cas où l'écoulement sur le sol demeurerait pendant ce temps peu énergique, faute de grande intensité pluviale.

Nous inclinons d'ailleurs vers la supposition que lors d'une première averse à la fois intense et point limitée à une ou deux heures, les quotients d'écoulement des grandes rivières auraient bien dans tous les cas, pour la totalité de cette pluie, et de son produit fluvial en plusieurs jours ou semaines, les valeurs médiocres que nous avons dites. Mais, comme les ruissellements initiaux pendant un quart d'heure ou une heure ou quelques heures seraient très largement favorisés, les ruisseaux et les petites rivières seraient sensibles au phénomène susdit. Nous voulons ainsi dire qu'aussitôt après une longue sécheresse une première pluie brève les gonflerait plus en son début que ne le ferait la suivante, et peut-être la troisième malgré les progrès de la saturation.

Mais en attendant de cataloguer, dans nos articles de foi, cette relation initiale et brève de causes à effets, comme une caractéristique de l'Hydrologie fluviale, nous attendons confirmation par des chiffres expérimentaux incontestables.

## 7 – *Reseaux hydrographiques bien plus denses sur les terrains imperméables*

Ce dont nous venous de traiter ne concerne qu'une exception encore bien mal précisée. En revanche, voici un contraste catégorique et indubitable pour une caractéristique fluviale de haute importance, selon que les bassins sont perméables, ou imperméables. Là où la perméabilité règne, on constate ou l'on devine une circulation souterraine abondante, en nappes ou en galeries karstiques. Mais l'écoulement à l'air libre se concentre dans un petit nombre de ruisseaux et de rivières. Des réseaux très ramifiés, chevelus avec un très grand nombre de sources, pérennes seulement sous les climats très pluvieux sans saisons sèches, indiquent l'imperméabilité exception faite pour des manteaux superficiels peu profonds.

Ainsi par l'examen seul d'une bonne carte topographique, on reconnaît aussitôt que les roches sont ou non étanches. Il suffit par exemple de comparer le Rebord oriental du Massif Central ou le Pays de Galles, l'Ecosse, et la Forêt Noire, reliefs cristallins, à la Champagne crayeuse ou aux Causses ou aux «Plans» calcaires du Verdon et à la Beauce.

## 8 – *Rôle très grand de la nature du sol dans l'Hydrologie fluviale*

En somme, à condition d'abjurer le simplisme on repère et on élucide très suffisamment les principales influences de la perméabilité sur tous les phénomènes de la Potamologie. Ces relations de causes à effets avaient frappé depuis plus d'un siècle les personnes attentives aux moeurs des rivières. Mais les preuves numériques sûres n'abondaient point dans leur documentation. Et surtout la découverte de faits troublants, comme les remarquables absorptions possibles en maints reliefs cristallins, et les crues puissantes et rapides de rivières gonflées par des émergences karstiques, ont jeté un certain discrédit relativement aux théories classiques sur la perméabilité ou l'imperméabilité. D'autre part en beaucoup de grands bassins, les facteurs locaux ou sous-régionaux qui règlent, selon les endroits, le ruissellement ou l'infiltration dans des sens plus ou moins diversifiés et même contraires tendent à se compenser mutuellement. De la sorte en étudiant maintes grosses rivières on inclinait à l'opinion, exacte pour les comparaisons de ce genre, que les régimes fluviaux obéissaient au relief et au climat bien plus qu'à la nature du sol, et donc que cette dernière jouait un rôle subordonné.

Puis vinrent les progrès des observations sur les causes pluviales des phénomènes, sur les mouvements de l'eau dans les terrains et d'abord sur les débits des rivières. Ces constatations ont rétabli et rendu aussi concluantes qu'au début, quoique plus nuancées, et affranchies de certaines méprises, les opinions conçues avant la phase du doute, sur les influence respectives de la perméabilité et de son contraire. Simplement ces relations de causes à effets ne peuvent être évidentes et bien tranchées que sur des rivières sortant de bassins géologiquement homogènes dans une grande partie ou dans la totalité de chacun. Homo-

généité bien plus facile pour de petites surfaces réceptrices (quelques dizaines ou centaines ou même quelques milliers de km<sup>2</sup>) que pour des empires fluviaux de 100 000 ou 500 000 km<sup>2</sup>.

### *9 – La nature du sol très difficilement exprimable dans les formules géographiques à priori relatives à la Potamologie*

Une autre conclusion générale que nous pouvons donner à ce mémoire est à la fois très sceptique, presque négative, et cependant très affirmative dans sa mécréance. Et nous n'hésitons pas à la proclamer chaque fois que nous prononçons un jugement sur les formules géographiques employées en Potamologie, c'est-à-dire en Hydrologie fluviale comme en Dynamique fluviale. Nous qualifions de géographiques les équations par lesquelles on veut chiffrer les phénomènes fluviaux en fonction des facteurs géophysiques identifiés ou soupçonnés, sur les bassins que l'on étudie.

En bref avant expérience et constatations précises sur les rivières en question, il est très difficile d'introduire avec pertinence dans les formules des coefficients susceptibles d'exprimer en bonnes approximations les influences de la nature du sol. En premier lieu celles de la perméabilité dont nous avons vu les natures et les manifestations diverses selon les secteurs sont aussi peu saisissables et prévisibles à priori que celles de la résistance ou de la fragilité contre l'érosion. Au contraire les phénomènes climatiques (précipitations, températures notamment) et les caractères des reliefs (altitudes, formes, pentes) se définissent très bien par des chiffres exacts. Et l'on sait dans quel sens ils agissent sur l'hydrologie fluviale. Ils peuvent et doivent donc figurer dans les dites équations. Mais les incertitudes peu évitables, même pour d'excellents hydrologues relativement aux effets de la nature du sol sur les débits liquides et solides sont, pour l'emploi des formules géographiques à priori un fléau, d'autant plus à craindre que la variété en maints cas très sensible ou même énorme pour ces influences, existe d'un secteur à l'autre, dans des terrains de même constitution pétrographique.

### *10 – Utilité des formules expérimentales d'emploi local*

Heureusement, l'emploi convenable, avec extrapolations fructueuses, de graphiques ou de formules qui indiquent les débits en fonction des phénomènes climatiques, devient possible et assez facile lorsque par des jaugeages on a pu établir des relations entre pluies et écoulements. Mais alors ce sont les résultats, les conséquences fluviales qui ont permis de chiffrer en coefficients les influences de la perméabilité sur le bassin en question. D'ailleurs on peut construire des formules adéquates à chaque station hydrométrique, sans souci du facteur ici débattu. On le transcende en devenant attentif seulement aux causes climatiques et aux conséquences dans la rivière.



## APPENDICE

Depuis que j'ai remis ce texte à mes confrères et amis de l'Université de Bonn, j'ai appris des faits supplémentaires sur les influences hydrologiques de la perméabilité, ou j'ai pris une conscience plus nette et numériquement plus précise qu'auparavant de certaines relations de causes à effets qui caractérisent les phénomènes en question. L'exposé, de ces découvertes aurait été mieux à sa place dans le corps du présent ouvrage. Mais puisqu'il n'y figure pas, les lecteurs ne regretteront sans doute point de ne le trouver qu'en addendum.

### *1 – Débits très supérieurs aux écoulements fournis par le seul bassin topographique pour de très courtes rivières émanant de régions karstiques*

Tout d'abord, en Italie centrale, à Brocco, le Fibreno petit affluent du Liri supérieur, au Nord de Naples en 1924—42 et 1959—60, pour 48 km<sup>2</sup> d'après le relief extérieur, a débité 10, 90 m<sup>3</sup>, soit 227 lit. sec. par km<sup>2</sup>, soit 7150 mm de précipitations écoulées, alors que les chutes d'eau réelles sur le bassin sont au plus de 1300 mm, d'où résulte un écoulement de l'ordre de 750 mm peut-être. Donc près des neuf dixièmes du module sont fournis à la suite de cheminements souterrains par des parties étrangères au bassin topographique.

Plus au sud, le Torano affluent du Volturno moyen à Piedimonte d'Alife, a donné 3, 13 m<sup>3</sup> pour 15 km<sup>2</sup> apparents, soit 209 lit. sec. par km<sup>2</sup> ou 6570 mm, débit au moins 6 fois supérieur à celui qui peut résulter des précipitations sur le bassin topographique.

Il en est à peu près de même dans la circonscription de Pescara, pour le Biferno à Ponte della Fiumara; 5,04 m<sup>3</sup> pour 27 km<sup>2</sup>, soit 187 lit. sec. par km<sup>2</sup> et 5886 mm écoulés, contre environ 1650 reçus.

### *2 – Déficit d'écoulement dans le grand Apennin calcaire*

D'autre part, j'ai montré par quelques chiffres approximatifs comment dans les Plateaux gréseux Batékés du Congo occidental, le déficit d'écoulement devait être inférieur à 1050 ou à 1000 mm, contre 1200 à 1250 mm, valeurs-types admissibles généralement pour des pluies équatoriales de 1600 à 1900 mm. Puis récemment j'ai repris mes évaluations pour le grand Apennin calcaire. Considérons en bloc pour 8260 km<sup>2</sup>, les bassins limitrophes de la Néra, de l'Aniene (rivières qui descendent au Tibre) et de la Pescara qui aboutit

à l'Adriatique. Compte tenu de sous-estimations possibles mais point certaines dans le calcul des précipitations tombées sur ces bassins montagneux, je retiens pour le déficit général 520 mm au plus et peut-être seulement 500 mm. Pour le Tibre supérieur et l'Arno la perte, c'est-à-dire l'évapotranspiration globale, est au moins de 625 à 650 mm, et elle serait égale ou supérieure à 600 mm, pour des bassins aussi élevés et frais que ceux de la Nèra, de l'Aniene, de la Pescara.

Puis pour les parties des Grandes Causses (1700 km<sup>2</sup>) qui envoient leurs eaux au Tarn, le déficit ne semble point dépasser 310 à 300 mm. Or pour un bassin imperméable de même altitude nous pensons qu'il atteindrait au moins 425 à 450 millimètres.

La réduction très considérable (15 à 30 %) du déficit global et donc l'augmentation corrélatrice de l'abondance moyenne globale par la perméabilité avec infiltration rapide en grande profondeur, nous paraissent maintenant compter parmi les phénomènes les plus marquants de la Potamologie.

### *3 – Ecoulements annuels particuliers rendus moins irréguliers et déficits d'écoulement très inégaux d'une année à l'autre, donc bilans précipitations – débits gravement faussés par la grande perméabilité avec restitutions très retardées*

Mais une autre réalité aussi remarquable affecte les conséquences hydrologiques des perméabilités favorables à la constitution de puissantes réserves hydriques lentement dégorgees avec de grands retards (jusqu'à plusieurs mois et un an ou plus) par rapport aux dates des précipitations responsables. Une partie imposante des précipitations tombées dans une année que l'on considère est mise en réserve et ne s'écoulera par restitution que durant l'année suivante. Et ces accumulations défavorables au module (ou débit moyen annuel) particulier de l'année en question atteignent le plus, en pourcentages, les années les plus pluvieuses, surtout si les chutes d'eau ont été très abondantes dans le dernier semestre ou trimestre.

Elles peuvent donc réduire beaucoup les modules de ces années. Par contre, lors de maintes années pauvres en apports atmosphériques, les restitutions d'eau accumulées dans les terrains pendant l'année ou même pendant les deux ou trois ans antérieurs empêchent les moyennes annuelles d'être aussi faibles qu'on pourrait le supposer, en notant la médiocrité des chiffres pluviaux contemporains. Donc la perméabilité suivie de résurgences lentes atténue les écarts des modules particuliers extrêmes. Elle les fait bien moins varier d'une année à l'autre que ce n'est le cas pour les rivières sortant de bassins imperméables ou de domaines karstiques avec sorties très rapides pour les eaux retenues.

Mais si pour des précipitations annuelles variant d'une certaine façon, les modules fluviaux particuliers changent moins que dans des bassins où les accumulations puissantes et durables et les fortes restitutions retardées font

défaut, il s'en suit une contrepartie inmanquable. Les déficits d'écoulement, eux, sont bien plus inégaux fantasques, d'une année à l'autre pour les mêmes bassins que pour ceux où la mise en réserve, et la restitution très différée, ne jouent qu'un rôle modeste.

De fait pour les rivières point influencées par la création et par le jeu de grosses accumulations, les rapports des déficits particuliers extrêmes, en quelques dizaines d'années, sont généralement faibles ou modérés, et pour plus de précision, compris entre 1,5 et 2,25 et 2,5. Mais pour les rivières très pondérées par les karstifications très ralenties, avec exurgences très retardées, le rapport des déficits particuliers extrêmes dépasse 4 et 5.

Il atteint en moins de 20 ans, 7,45 dans l'Apennin calcaire pour la Néra à Torre Orsina, avec un maximum de 745 et un minimum de 100 pour un déficit moyen global de 431. Pour le Vélino à Terria, ce rapport n'est point inférieur à 5,82. Il vaut encore 5,43 pour la Pescara à Santa Teresa. Et nous pensons avoir lieu de croire que dans les bassins basaltiques ou gréseux de perméabilités analogues (en ce qui concerne la grandeur des accumulations et la lenteur des circulations), les déficits particuliers doivent avoir une irrégularité similaire, en contraste frappant avec la relative stabilité des modules et aussi des étiages et avec la modération des crues.

Ainsi cette perméabilité si bienfaisante contre l'évapotranspiration en général et contre les excès fluviaux, a pour conséquence logique une instabilité très capricieuse des déficits annuels d'écoulement. Pour les riverains et pour les utilisateurs des rivières, elle est un avantage naturel inestimable. Pour les hydrologues désireux d'évaluer les débits moyens annuels particuliers non mesurés, d'après les précipitations contemporaines elle est un véritable fléau. Car elle fait discorder de manière souvent déconcertante et point facilement corrigible le déficit d'écoulement et l'évapotranspiration vraie. Elle fausse donc très fâcheusement les bilans annuels particuliers précipitations-débits.

Et nous ne voulons point revenir en ces lignes sur les perturbations beaucoup plus affolantes pour les personnes point averties qui ont pour cause dans les mêmes terrains, en maintes régions, les fuites et les captures souterraines majeures.

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

### TRAITES GENERAUX DIVERS D'HYDROLOGIE

Leur lecture est indispensable. Cependant les régimes des sources et des rivières y sont analysés et définis beaucoup moins que nous l'aurions souhaité.

IMBEAUX (Ed.), *Essai d'Hydrogéologie*, Paris, Dunod, 1930, 704 p. 345 fig.

KOEHNE (W.), *Grundwasserkunde*, Stuttgart, 1948, 16×23 cm, 314 p. 128 fig.

BOGOMOLOV (G. V.) et SILIN BETCHOURIN (A. I.), *Hydrogéologie spécialisée*, Paris, 236 p. 188 fig.

FOURMARIER (P.), *Hydrogéologie*, 2ème édition, Paris, Masson, 1958, 16×24 cm, 294 p. 168 fig.

TODD (David K.), *Ground Water Hydrology*, New-York et Londres, John Wiley, 1959, 15×23 cm, 336 p.

SCHOELLER (H.), *Les eaux souterraines*, Paris, Masson, 1962, 19×25 cm, XXIX + 665 p. 187 fig.

CASTANY (G.), *Traité pratique des eaux souterraines*, Paris, Dunod, 1963, 16×25 cm, 657 p. 359 fig.

### OUVRAGES RÉSERVÉS AUX PHÉNOMÈNES KARSTIQUES

CVIJC (J.), *Das Karstphänomenon*, *Geographische Abhandlungen*, Vol. 5.

— puis *Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst*, Grenoble; 1918, 56 p. 3 pl.

LEHMANN (O.), *Die Hydrographie des Karstes*, Leipzig et Vienne, 1932, 212 p. 78 fig.

Autres ouvrages sur la karstification, de W. M. DAVIES (1930), A. GRUND (1903 et 1905),

W. Von Knebel, E. A. MARTEL, A. BOURGIN (1947), J. CORBEL (1957), F. TROMBE (1952 et 1956), etc. . . .

### ETUDES HYDROGEOLOGIQUES REGIONALES

Très nombreuses études hydrogéologiques relatives à diverses régions petites ou vastes. Citons en particulier un livre fondamental pour l'Hydrogéologie allemande.

GRAHMANN (H.), *Die Grundwässer in der Bundesrepublik Deutschland und ihre Nutzung*, Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen, 1958, 198 p. 48 fig. 3 tableaux, 3 pl. h. texte 2 cartes au 1/1 000 000.

Nombreux textes consacrés aux eaux souterraines dans les comptes-rendus des Congrès de l'Association internationale d'Hydrologie scientifique.

- Publication n° 31 (tome III pour l'Assemblée d'Oslo, 1948)
- n° 33 (tome II pour l'Assemblée de Bruxelles, 1951)
- n° 37 (tome III pour l'Assemblée de Rome, 1954)
- n° 41 (tome II pour les Symposia de Dijon, 1956)
- n° 44 (tome II pour l'Assemblée de Toronto, 1957)
- n° 52 (tome II pour l'Assemblée de Helsinki, 1960)

## TRAITÉS DE POTAMOLOGIE GENERALE

Puis des données relatives à l'influence de la perméabilité sur l'Hydrologie fluviale sont incluses, avec plus ou moins d'abondance dans les traités de Potamologie générale. Citons à cet égard:

SCHAFFERNAK (F.), Hydrographie, Vienne, 1939 et 1959.

PARDÉ (M.), Fleuves et Rivières, Paris, 1932 à 1964, 4e édition.

WUNDT (W.), Gewässerkunde, Berlin et Göttingen, 1953, 320 p. 185 fig.

NEMETH (E.), Hidrologia es Hidrometria, Budapest, 1954, 662 p. 596 fig. 32 pL.

REMENIERAS (G.), l'Hydrologie de l'Ingénieur, Paris, 1960, et Eléments d'hydrologie appliquée, Paris, 1959.

KELLER (R.), Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes, Berlin, 1962.

YEVDJEVIC (V.), Hidrologija Belgrade, tome I, 1956.

TONINI (D.), Elementi di Idroraphia ed Idrologia Venise, tome I, 1959.

ROCHEFORT (M.), Les fleuves, Paris, 1963.

Les principaux traités parus aux Etats-Unis, sont ceux de:

MEINZER (O. E.), Hydrology, ouvrage collectif, New-York, 1949.

WISLER (C. O.) et E. F. BRATER, même titre, même lieu d'impression, même date.

DAVIS (C. V.), Handbook of applied Hydrology, New-York, 1952.

LINSLEY (R. K.), Max A. KOHLER, J. H. PAULHUS, Applied Hydrology, New-York, 1949; et Hydrology for Engineers, New-York, 1958.

On terminera cette énumération d'ouvrages potamologiques généraux, en citant le livre du Slovaque O. DUB (Bratislava 1957) celui du Polonais K. DEBSKI, (Varsovie, 1959) et les traités roumains de T. MORARIU, I. PISOTA, I. BUTA (Bucarest 1962) puis de J. UJVARI (Bucarest 1959 et 1962) et les ouvrages russes de M. A. VELIKANOV (1948), V. D. BYKOV (1949), M. I. LVOVITCH (1945 et 1938), A. V. OGIEVSKIJ (1951), D. L. SOKOLOVSKIJ (1952).

Ouvrages de vulgarisation à un niveau élevé: United States Geological Survey, LEOPOLD (L. B.) et LANGBEIN (W. B.), A Primer on water, Washington 1960, 20 x 26 cm, 50 p. 16 fig. et BALDWIN (Hélène L.) et MAC GUINNESS (C. L.), A Primer on Ground Water, Washington 1963, 26 p. 15 figures.

## CHAPITRES OU PARAGRAPHERS DE MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES REGIONALES

sur les rivières étudiées séparément ou en groupes, pour quantité de bassins en une foule de pays.

Chapitres ou paragraphes de monographies géographiques où la nature du sol et les effets potamologiques sans être les objets principaux des études peuvent être mentionnés, décrits et expliqués avec plus ou moins d'ampleur, de pénétration, et de détails.