

# Proceedings of the NWWA Conference on Characterization and Monitoring of the Vadose (Unsaturated) Zone

November 19-21, 1985  
Stapleton Plaza Hotel  
Denver, Colorado

———— Sponsor ————

National Water Well Association

———— Published by ————

National Water Well Association  
500 W. Wilson Bridge Rd.  
Worthington, Ohio 43085

———— Produced by ————

Water Well Journal Publishing Co.  
500 W. Wilson Bridge Rd.  
Worthington, Ohio 43085

Enclosure 3  
8.3.1.2.2.1

**Session VIII: Vadose Zone Investigations  
at a Potential Nuclear Waste  
Repository Site**

**Moderator: Thomas Naymik**

DRILLING AND CORING METHODS THAT MINIMIZE THE DISTURBANCE  
OF CUTTINGS, CORE, AND ROCK FORMATION IN THE  
UNSATURATED ZONE, YUCCA MOUNTAIN, NEVADA

Dale P. Hammermeister<sup>1</sup>, Daniel O. Blout<sup>2</sup>, and J. C. McDaniel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>U.S. Geological Survey, Mercury, Nevada

<sup>2</sup>Fenix & Scisson, Inc., Mercury, Nevada

<sup>3</sup>Reynolds Electrical & Engineering Co., Inc., Mercury, Nevada

Abstract

A drilling-and-casing method (Odex 115 system)<sup>4</sup> utilizing air as a drilling fluid was used successfully to drill through various rock types within the unsaturated zone at Yucca Mountain, Nevada. This paper describes this method and the equipment used to rapidly penetrate bouldery alluvial-colluvial deposits, poorly consolidated bedded and nonwelded tuff, and fractured, densely welded tuff to depths of about 130 meters. A comparison of water-content and water-potential data from drill cuttings with similar measurements on rock cores indicates that drill cuttings were only slightly disturbed for several of the rock types penetrated.

Coring, sampling, and handling methods were devised to obtain minimally disturbed drive core from bouldery alluvial-colluvial deposits. Bulk-density values obtained from bulk samples dug from nearby trenches were compared to bulk-density values obtained from drive core to determine the effects of drive coring on the porosity of the core.

~~Rotary coring methods~~ utilizing a triple-tube core barrel and air as the drilling fluid were used to obtain core from welded and nonwelded tuff. Results indicate that the disturbance of the water content of the core was minimal.

Water-content distributions in alluvium-colluvium were determined before drilling occurred by drive-core methods. After drilling, water-content distributions were determined by nuclear-logging methods. A comparison of the water-content distributions made before and after drilling indicates that Odex 115 drilling minimally disturbs the water content of the formation rock.

<sup>4</sup>Use of the brand name is for descriptive purposes only and does not constitute an endorsement by the U.S. Geological Survey.

Results of studies concerning the effects of water contained in drilling fluids on natural water content of core are inconclusive. Rotary coring of soft sandstone, using polymer mud, produced cores with moisture contents 2 to 6 percent greater than drive cores that were assumed to be undisturbed (Eugene Shuter and W. E. Teasdale, U.S. Geological Survey, written commun., 1985). Whitfield (1985, these proceedings) concluded that the moisture content of core from tuffaceous rock, obtained by using air foam as a drilling fluid, did not differ significantly from cuttings obtained from reverse air-vacuum drilling. These cuttings were assumed to be minimally disturbed. The studies do suggest that rock type may be an important factor. Water content and water-content-dependent properties of low-porosity and low-permeability core are likely to be affected less by water in drilling fluids than by high-porosity and high-permeability core. Other factors, such as coring rate and depth of fluid in the hole, may affect the water content of core.

Considerable evidence exists that water in drilling fluids may affect the water content of formation rock substantially during coring and drilling activities. These effects mainly occur as a result of lost circulation. For example, during the drilling and coring of the first geologic borehole on Yucca Mountain (USW G-1), more than 11,600 m<sup>3</sup> of drilling fluid containing water and an organic polymer were lost to the formation. Three years later during the drilling of borehole USW UZ-1, located approximately 300 m to the northwest of borehole USW G-1, perched water was encountered at approximately the 380-m level (Whitfield, 1985) (these proceedings). This perched water contained the same organic polymer that was used in the drilling fluid during the drilling of borehole USW G-1. It has been postulated that the drilling fluid "lost" during the drilling of borehole USW G-1 formed a perched water zone extending to borehole USW UZ-1.

Air can be used as a drilling fluid in ~~rotary drilling~~ (Campbell and Lehr, 1973) and rotary coring (Teasdale and Pemberton, 1984); however, the ability of air to stabilize the walls of the borehole, prevent vibration of the drill pipe, and prevent lost circulation is considerably less than these same abilities in drilling fluids containing water. Opinions vary concerning the effect air has on the water content of geologic samples and formation rock; few reliable data are available. Some investigators argue that air dries the formation rock and core; other investigators claim that air wets both formation and samples. Wetting is thought to occur when compressed air, exiting the core and drill bits, rapidly expands, cools, and condenses water. Eugene Shuter and W. E. Teasdale (U.S. Geological Survey, written commun., 1985) have collected data that show that air dries core samples below ambient water contents and heats core above ambient temperatures.

The authors of this study believe that these apparent disadvantages of using air as a drilling fluid are overshadowed by the potential hydrologic and geochemical problems that may occur in the formation if polymer mud or air-foam drilling fluids containing water are lost in large quantities to the formation rock. With the above in mind, the U.S. Geological Survey, in cooperation with Reynolds Electrical & Engineering Co., Inc., designed and carried out a "state-of-the-art" drilling and coring program

After careful consideration of a variety of methods, the Odex 115 drilling system was selected for drilling both types of boreholes. This method was developed in Sweden for drilling through and casing off unconsolidated overburden, such as glacial till overlying bedrock. This method drills and advances casing equally well through unconsolidated deposits and consolidated bedrock. To this date, this method mainly has been used in the United States for civil-engineering and mineral-prospecting purposes. However, the method has great potential for use in geohydrologic investigations.

The Odex 115 method used a downhole percussion hammer to drill and ream at the bottom of a casing. A pilot bit, in conjunction with an eccentric reamer, drills a hole slightly larger than the outside diameter of the casing (Figure 1). The percussion hammer also impacts on the casing through a shoe attached to the bottom joint of the casing. Thus, the casing is advanced downward as the hole is drilled deeper. Drill cuttings are returned to the surface through the inside of the casing, thereby minimizing the disturbance of borehole walls with drilling fluids.

Air foam is recommended as the drilling fluid by the manufacturer; however, air was used successfully for all the neutron access and unsaturated-zone core holes at Yucca Mountain. Large volumes of air were required to remove cuttings from the deeper core holes: 25 m<sup>3</sup> at 1,250 kPa were required in the lower parts of these holes. The use of air did not appear to amplify problems, such as lost circulation or excessive friction between the casing and formation walls. The use of air did cause a large vibration in the drill string that probably would be reduced significantly by using other types of drilling fluids. This vibration, coupled with the rotation of the drill pipe, caused the threaded connection between the drill bit and the guide assembly (Figure 1) to unscrew. The threaded connection between the hammer and the guide sleeve on the drill pipe unscrewed on another occasion. Those problems were solved by pinning these threaded connections together.

Another problem, which also related to the use of air, involved the separation of the bottom-casing shoe from the casing on a number of occasions. Probably excessive vibration and stress, caused by the operation of the percussion hammer in air, resulted in shearing the threaded connection between the shoe and the casing. The length of the casing shoe was increased from 0.66 to 8.23 m to move the threaded connection between the shoe and the casing farther away from the vibration of the downhole percussion hammer. This change in the design alleviated the separation problem.

The Odex 115 system advanced a 14.0-cm outside diameter (O.D.) casing into an approximately 15-cm diameter drill hole. In moist unconsolidated formations, the cuttings appear to be forced up into, and to seal off, the small annular spacing between the casing and the formation rock, thereby eliminating any void space around the casing. Television logs show that this "rind" of compacted cuttings remains after the casing is removed from nonwelded tuff units, making the hole diameter approximately 14.0 cm rather than 15 cm. A similar phenomenon probably occurs in moist alluvial-colluvial material, except near the ground surface, where some caving probably occurs around the casing. In several situations where casing was removed from alluvial-colluvial material because of drilling problems, the holes remained open, except for some minor sloughing near the ground surface.

This sealing-off process around the casing also probably occurs in consolidated welded tuff. When a hole is started in consolidated rock, cuttings and air usually stop coming to the surface from the annular spacing between the casing and the rock formation by the time the hole reaches 3 m in depth. This condition indicates that cuttings are filling the annular space. However, because the cutting particle size generally is large, and the moisture content generally is small for consolidated welded tuff, this rind of cuttings does not stay in place when the casing is pulled. Cuttings from welded-tuff units fall to the bottom of the hole when the casing is pulled up from these regions, yielding varying quantities of fill.

Holes were drilled in 1.52-m depth intervals using 1.52-m long joints of casing and drill pipe. Most neutron-access holes were drilled with a CME 550 all-terrain drill rig; most core holes were drilled with a Joy 225 core rig. All neutron-access holes located in alluvial-colluvial materials were drilled through the entire thickness of these deposits and at least several meters into underlying consolidated bedrock. Neutron-access holes in welded tuff generally were drilled to 15 m, although some holes were slightly deeper and some holes were shallower. The casing was left in place in all neutron-access holes.

In core holes, the Odex 115 system was used to drill and drive the casing down to the desired depth for coring. Core then was collected in 1.52-m core runs and wirelined out of the hole. Core was taken to depths as great as 30 m below the bottom of the casing. When the core hole became unstable and circulation became a problem, the core hole was reamed and cased down to the bottom with the Odex 115 system. Coring then was resumed at the bottom of the casing.

The percussion hammer in the Odex 115 system yields drill cuttings with a relatively large average particle size and a relatively small surface area when drilling consolidated rock. Therefore, evaporation of water from these cuttings when being transported to the ground surface

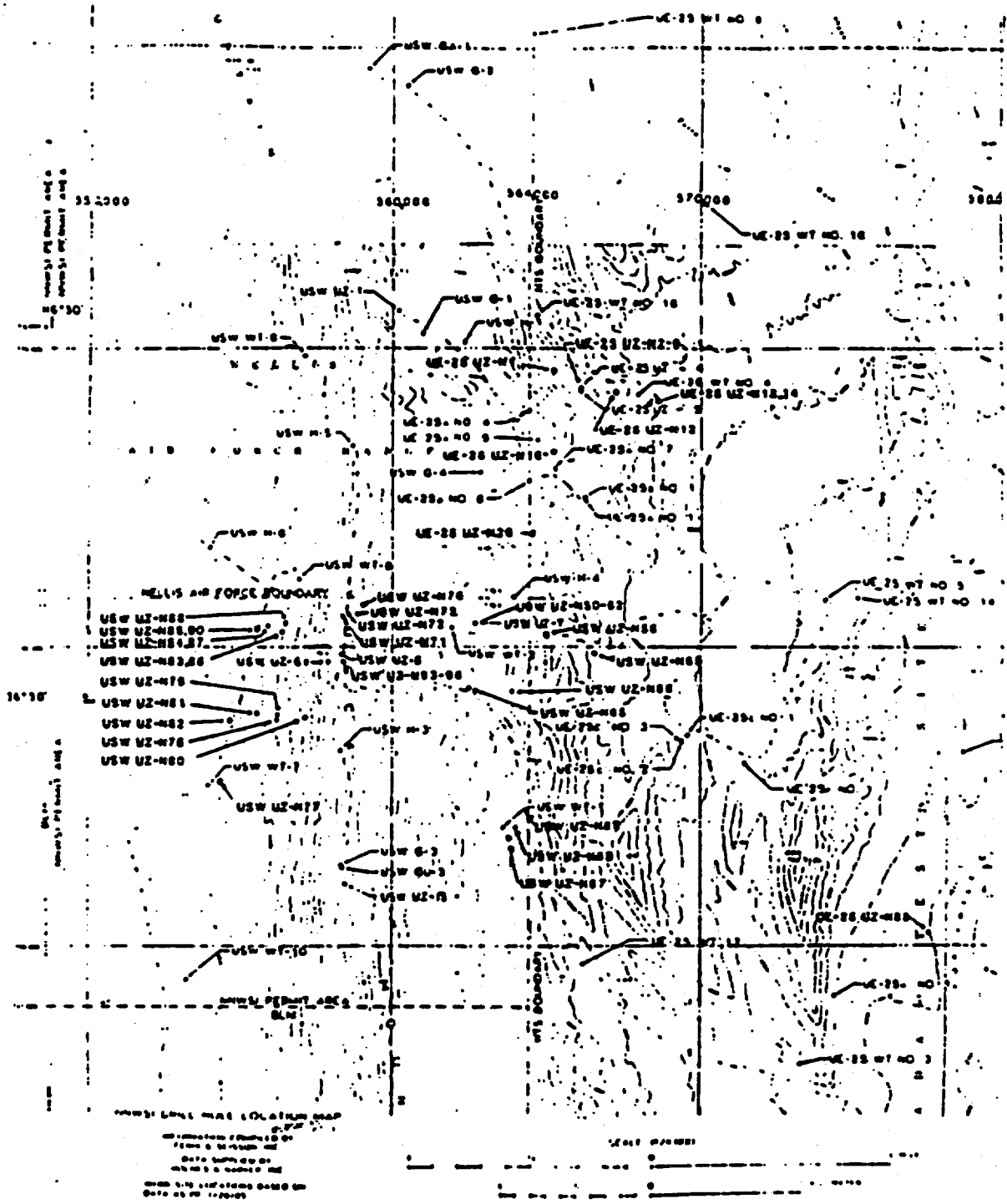


Figure 2. Location of drill holes on and in vicinity of Yucca Mountain, Nevada.

in the separator were emptied. If cuttings were moist and sticking to the inside walls of the separator, a large hammer was used to knock the cuttings off the inside walls, thus completely emptying the separator for the next 0.61-m interval. Drilling usually would not stop during these sampling activities.

After the collection of samples from the separator was completed, samples in glass jars quickly were taken to the laboratory located on the drill site for processing. If this action was not possible, samples were stored in a large water cooler to minimize condensation inside the glass jars caused by the heating and cooling of the rock in response to ambient-temperature fluctuations and solar radiation. Inside the laboratory trailer, the 0.94-L jars of cuttings were placed inside a humidified glove box to minimize evaporation from samples during subsequent handling. Initially, during drilling of the first few neutron-access holes, three different types of samples were taken from the glass jars for gravimetric water-content measurements: composite, coarse, and fine samples. These measurements determined the distribution of water between particle-size fractions of cuttings and determined which fraction yielded water contents most representative of the formation rock. In later holes, only composite or coarse samples or both were taken. Samples of cuttings taken from the glass jars and placed in large (400-cm<sup>3</sup>) moisture cans were designated composite samples. Samples of cuttings obtained by sieving the remaining contents of the jars with a screen (0.159-cm openings) and filling moisture cans with coarse fragments from the screen were designated coarse samples. Samples of cuttings obtained by filling moisture cans with the smaller diameter fragments that passed through the screen were designated fine samples. Smaller samples of coarse and fine cuttings also were taken during the sieving process for the purpose of making water-potential measurements with a Richard's thermocouple psychrometer. Samples of both coarse and fine drill cuttings were taken from the first few neutron-access holes drilled at each depth interval and placed in small jars (0.38-L capacity or less). In the majority of holes, only coarse cuttings were collected for water-potential measurements. After collection, the lids on these jars were taped and waxed to minimize evaporative losses while awaiting water-potential measurements.

#### Drive-Core Samples

Solid-tube and split-tube samplers were transported to the field laboratory and placed in a humidified glove box as soon as possible after they were pulled from the hole. Brass liners containing unconsolidated rock were extruded from the solid-tube sampler or lifted from the split-tube sampler. One 15.2-cm segment generally was selected for tritium analysis; one 7.6-cm segment generally was selected for gravimetric water-content and water-potential measurements; two 7.6-cm segments generally were selected for matric-potential and permeability-related measurements; and the last 7.6-cm segment generally was selected for volumetric water-content, bulk-density, grain-density, and porosity analyses. The 15.2-cm segment located in the uppermost part of the tube samplers usually contained some rubble from the bottom of the hole, in addition to a sample of formation rock. The rubble was discarded, and



described here. In these measurements, calibration solutions were measured concurrently with actual rock samples to compensate for the zero drift of the amplifier of the nanovoltmeter. Generally, three of the sample chambers contained calibration solutions equivalent to known water potentials, six of the sample chambers contained samples of cuttings and core, and the remaining tenth chamber contained distilled water. Thermocouple output (voltage) first was measured on known calibration standards, followed by measurements of output from rock samples, followed by measurements of calibration standards again. The average of "before" and "after" voltage outputs for each calibration standard was used to construct the calibration curve of water potential versus voltage. Calibration curves were nearly linear over the range of water potentials measured (-0.1 to -7 MPa). Regression coefficients ( $r^2$ ) typically ranged from 0.994 to 1.000, with most coefficients equal to 1.000.

The SC-10 sample chamber was loaded with calibration solutions and rock samples in a humidified glove box to minimize evaporation. After loading was completed, at least 1/2 h was allowed to pass before measurements were made to permit the approach to temperature and vapor equilibrium. To avoid temperature fluctuations, all measurements were made inside the glove box at room temperatures between 20 and 25°C. All equipment, including the thermocouple junction, was meticulously cleaned after each set of measurements to prevent carryover of salts or dust to the next set of measurements.

#### Matric-Potential Measurements

Matric potential was measured on selected drive core and rotary core, using a tensiometer-transducer system assembled by the U.S. Geological Survey. Small, 0.63-cm diameter, 0.1 MPa high-flow ceramic tips (Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, California) were placed in contact with the rock. Each tip was hydraulically connected to 68.9 kPa differential-pressure transducer and carrier demodulator (Validyne Engineering Corp., Northridge, California). A four-way valve was placed between the transducer and ceramic tip to permit filling the system with water and purging air bubbles from the system. Energy of water in the tensiometer system was allowed to equilibrate with energy of water in the matrix of the rock. This quasi-equilibrium state was assumed to be reached when two potential readings taken at least 24 h apart were within several tenths of a kilopascal of negative pressure.

#### Results and Discussion

##### Drill Cuttings

The Odex 115 system, using air as a drilling fluid, produces drill cuttings with a slightly lower gravimetric water content than core taken from the same depth interval. This was found for all particle-size fractions of cuttings, types of core, and rock units penetrated. Table 1 summarizes the results of linear-regression analyses carried out between the water content of composite samples of core and the water content of

Table 1. Summary of linear-regression analyses for water contents of core versus particle-size fractions of cuttings

Rock type	Hole numbers	Dependent variable	Independent variable	Number of samples	Regression coefficient	Intercept	Slope
Alluvium-colluvium.	UE-25 UZ-N1, -N8, -N12, -N13, -N14, -N60; USW UZ-N69.	Gravimetric water content of unsieved composite drive core.	Gravimetric water content of unsieved composite drill cuttings.	28	0.747	0.012	0.996
---do---	UE-25 UZ-N1, -N4, -N6, -N8, -N12, -N13, -N14, -N60, -4; USW UZ-N69.	-----do-----	-----do-----	42	.593	.012	1.102
---do---	UE-25 UZ-N60, -N85; USW UZ-N90, -7.	-----do-----	Gravimetric water content of sieved coarse drill cuttings.	27	.799	.004	1.133
---do---	UE-25 UZ-N4, -N6, -N60, -N85, -4; USW UZ-N90, -7.	-----do-----	-----do-----	41	.744	.002	1.102
---do---	UE-25 UZ-N4, -N6, -4; USW UZ-7.	-----do-----	Gravimetric water content of sieved fine drill cuttings.	14	.307	.028	.783
---do---	-----do-----	-----do-----	Gravimetric water content of sieved fine drive core.	17	.769	.003	.642
---do---	-----do-----	-----do-----	Gravimetric water content of sieved coarse drive core.	17	.885	.008	.927
Welded tuff.	UE-25 UZ-4, -5.	Gravimetric water content of unsieved composite rotary core.	Gravimetric water content of unsieved composite drill cuttings.	9	.997	.0003	1.259
---do---	UE-25 UZ-4, -5; USW UZ-7, -13.	-----do-----	Gravimetric water content of sieved coarse drill cuttings.	28	.856	.005	1.003
Nonwelded and bedded tuff.	UE-25 UZ-4.	-----do-----	Gravimetric water content of unsieved composite drill cuttings.	45	.751	.062	1.481
---do---	-----do-----	-----do-----	Gravimetric water content of sieved coarse drill cuttings.	45	.804	.036	1.314
---do---	UE-25 UZ-4, -5; USW UZ-7, -13.	-----do-----	-----do-----	143	.605	.007	.875

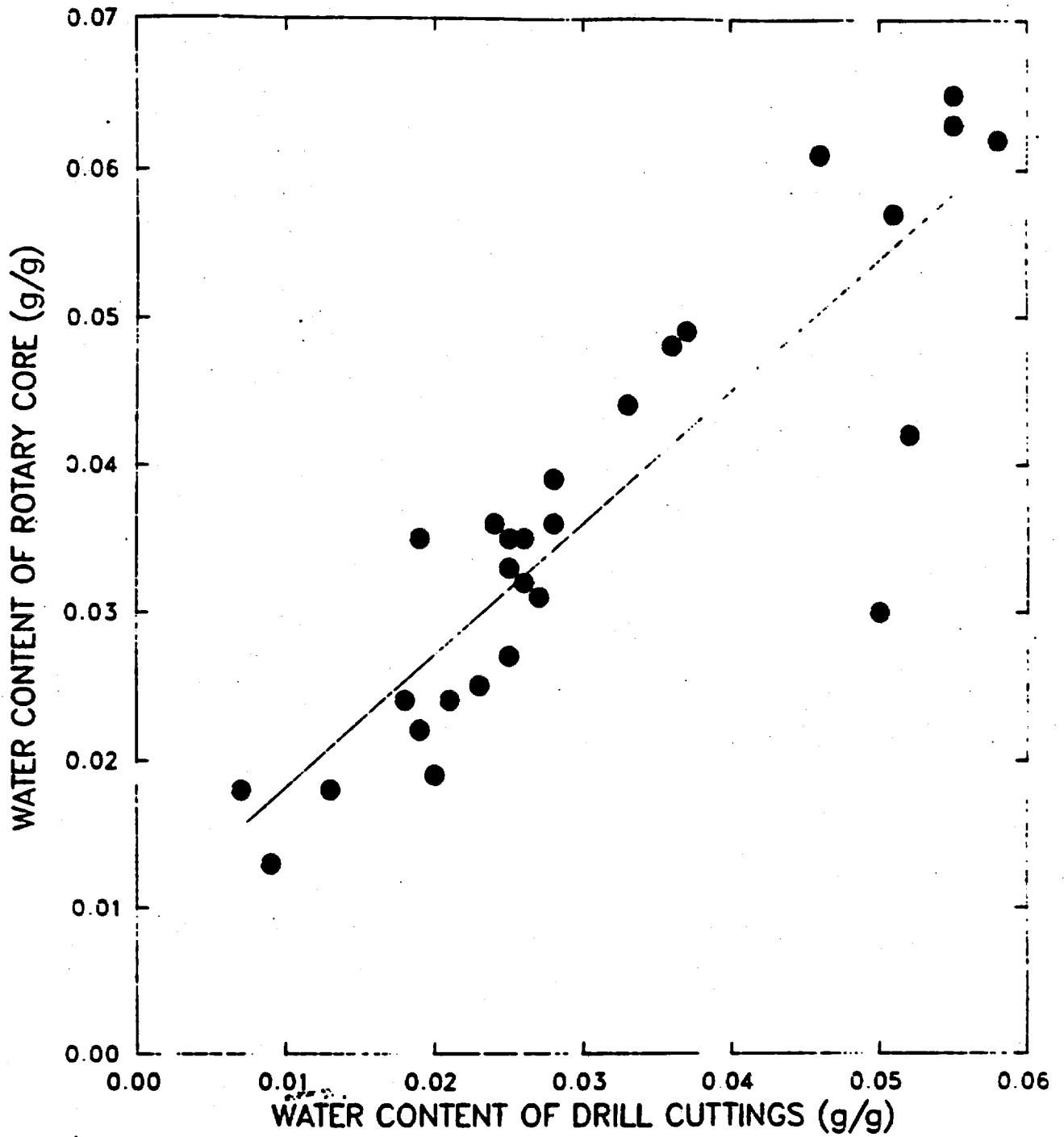


Figure 4. Gravimetric water content of coarse drill cuttings compared to rotary core data at similar depths in welded tuff, and the resulting linear-regression line (g/g. gram per gram).

Table 2. Summary of miscellaneous linear-regression analyses

Dependent variable	Independent variable	Number of samples	Regression coefficient	Intercept	Slope
Water potential of coarse drive core from alluvium-colluvium.	Water potential of coarse drill cuttings from alluvium-colluvium.	60	0.867	0.393	0.737
Water potential of composite drive core from alluvium-colluvium.	Water potential of composite drill cuttings from alluvium-colluvium.	27	.952	1.151	.529
Water potential of rotary core from welded tuff.	Water potential of coarse drill cuttings from welded tuff.	29	.040	13.188	.147
Water potential of rotary core from nonwelded and bedded tuff.	Water potential of coarse drill nonwelded and bedded cuttings from tuff.	133	.023	.008	-3.240
Bulk density of drive core.	Depth (mid-interval) of drive core.	23	.044	1.770	-.003
Bulk density of sand-cone sample.	Depth (mid-interval) of sand-cone sample.	15	.654	1.470	.032
Formation volumetric water content measured by neutron-moisture-meter logging.	Volumetric water content of drive core from alluvium-colluvium.	20	.225	.126	.240
Formation gravimetric water content obtained from neutron-moisture-meter logging and sand-cone bulk-density data.	Gravimetric water content of drive core from alluvium-colluvium.	41	.754	.028	.768

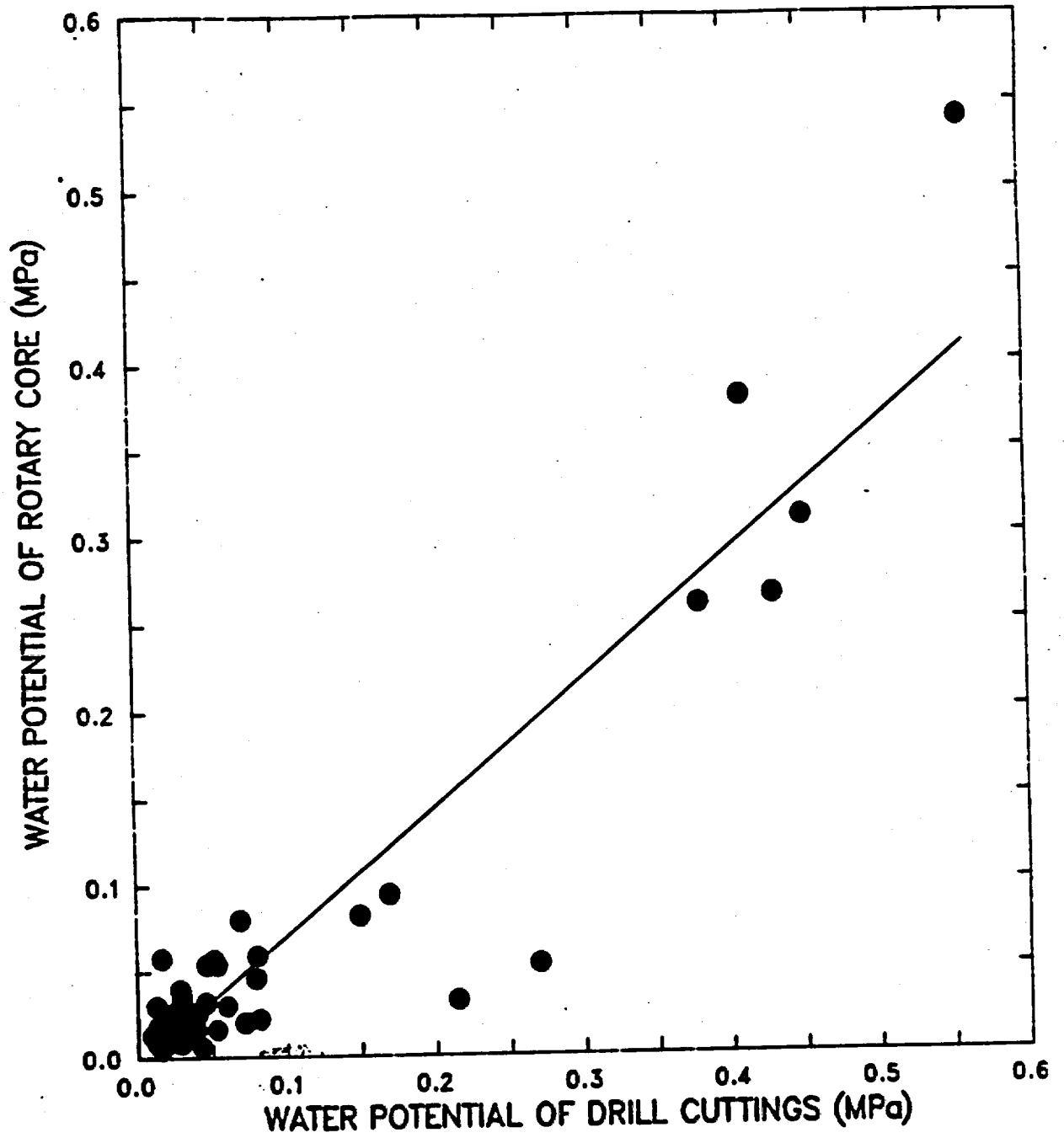


Figure 6. Water potential of coarse drill cuttings compared to drive core data at similar depths in alluvium-colluvium, and the resulting linear-regression line (MPa, megapascals).

Average bulk density for 7 drive-core samples taken between depths of 1.52 to 3.05 m is 1.74 g/cm<sup>3</sup>; the average bulk density for six drive-core samples taken between depths of 3.05 and 6.10 m is 1.69 g/cm<sup>3</sup>; average bulk density for seven drive-core samples taken between depths of 6.10 and 9.14 m is 1.70 g/cm<sup>3</sup>. These data indicate that the method of drive coring used in this study increases the density of uncompacted near-surface materials by compacting the sample and reducing the porosity. Moreover, this method appears to disturb the packing of sediments in higher density deposits lying at greater depths, yielding drive-core samples with densities lower than the formation rock. Further evidence that drive coring disturbs volume-related properties of drive core is the low correlation (Table 2) between volumetric water content of drive core and volumetric water content of formation rock, determined by neutron-moisture, geophysical-logging methods. These volumetric water-content data are summarized in Figure 7.

Table 3. Bulk density of bulk alluvium-colluvium samples determined by the sand-cone sampling method

[m, meter; gm/cm<sup>3</sup>, gram per cubic centimeter]

Depth interval (m)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Average bulk density for depth interval (g/cm <sup>3</sup> )
0.08-0.23	1.43	1.43
0.08-0.23	1.40	
0.08-0.23	1.46	
0.76-0.91	1.44	1.57
0.76-0.91	1.51	
0.76-0.91	1.76	
1.37-1.52	1.80	1.70
1.37-1.52	1.66	
1.37-1.52	1.63	
3.05-3.20	1.80	1.79
3.05-3.20	1.08	
3.05-3.20	1.61	
4.05-4.19	2.03	1.88
4.05-4.19	1.82	
4.05-4.19	1.79	

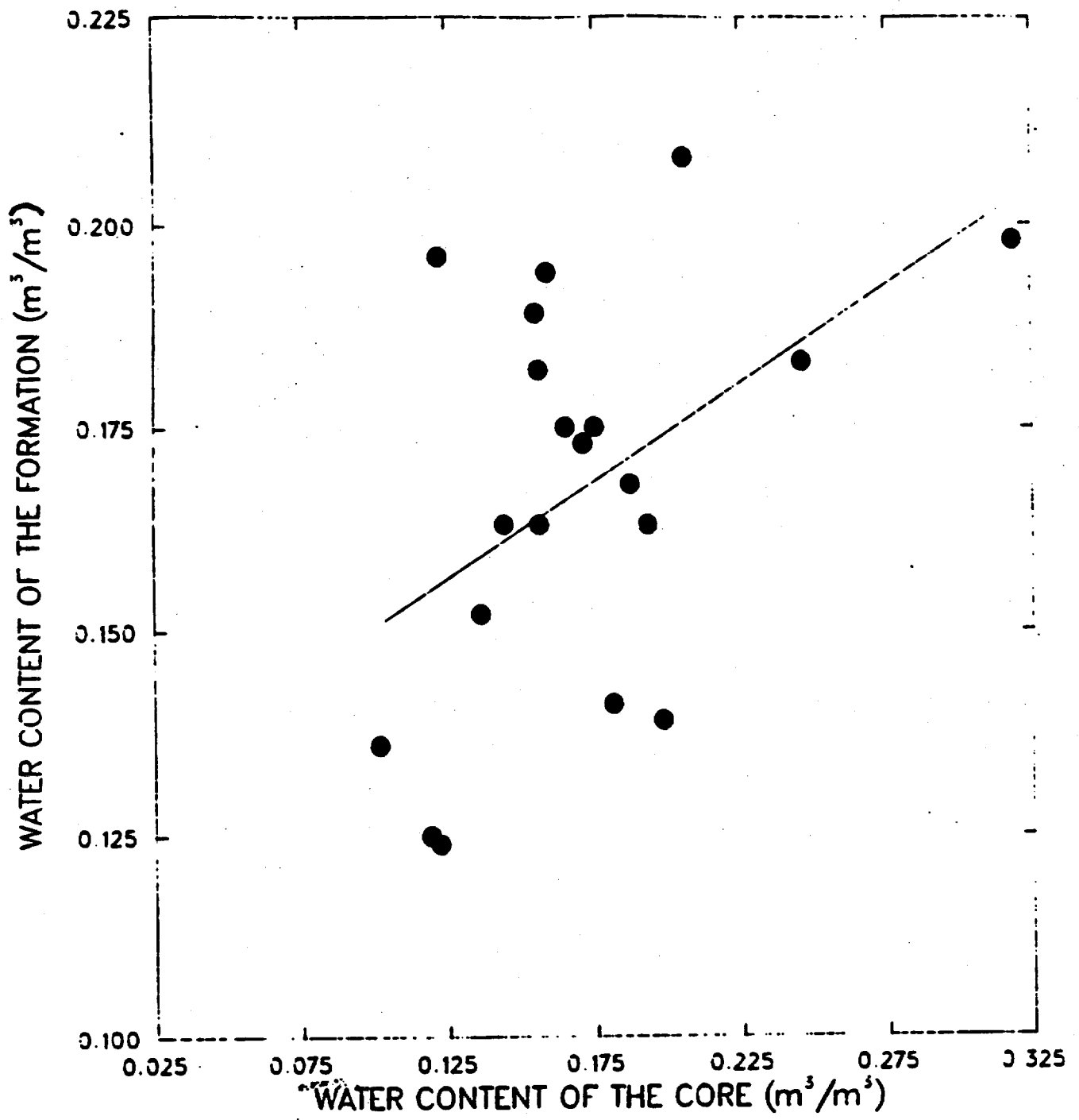


Figure 7.-- Volumetric water content of core compared to that of the formation at similar depths and resulting linear regression line (m³/m³.cubic meter per cubic meter).

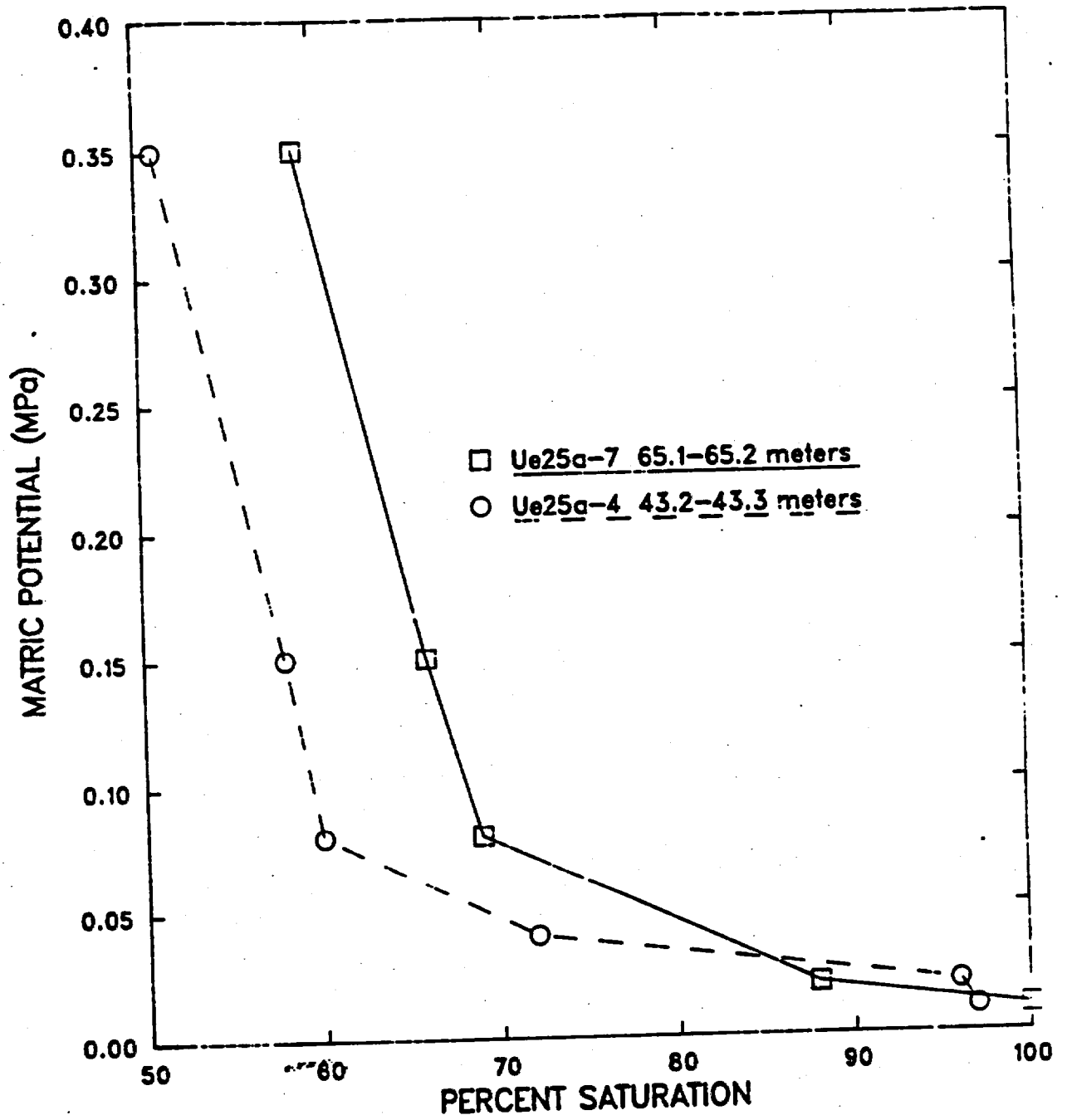


Figure 8. Moisture-retention curves for cores taken from the nonwelded base of the Tiva Canyon Member of the Paintbrush Tuff (MPa, megapascals).



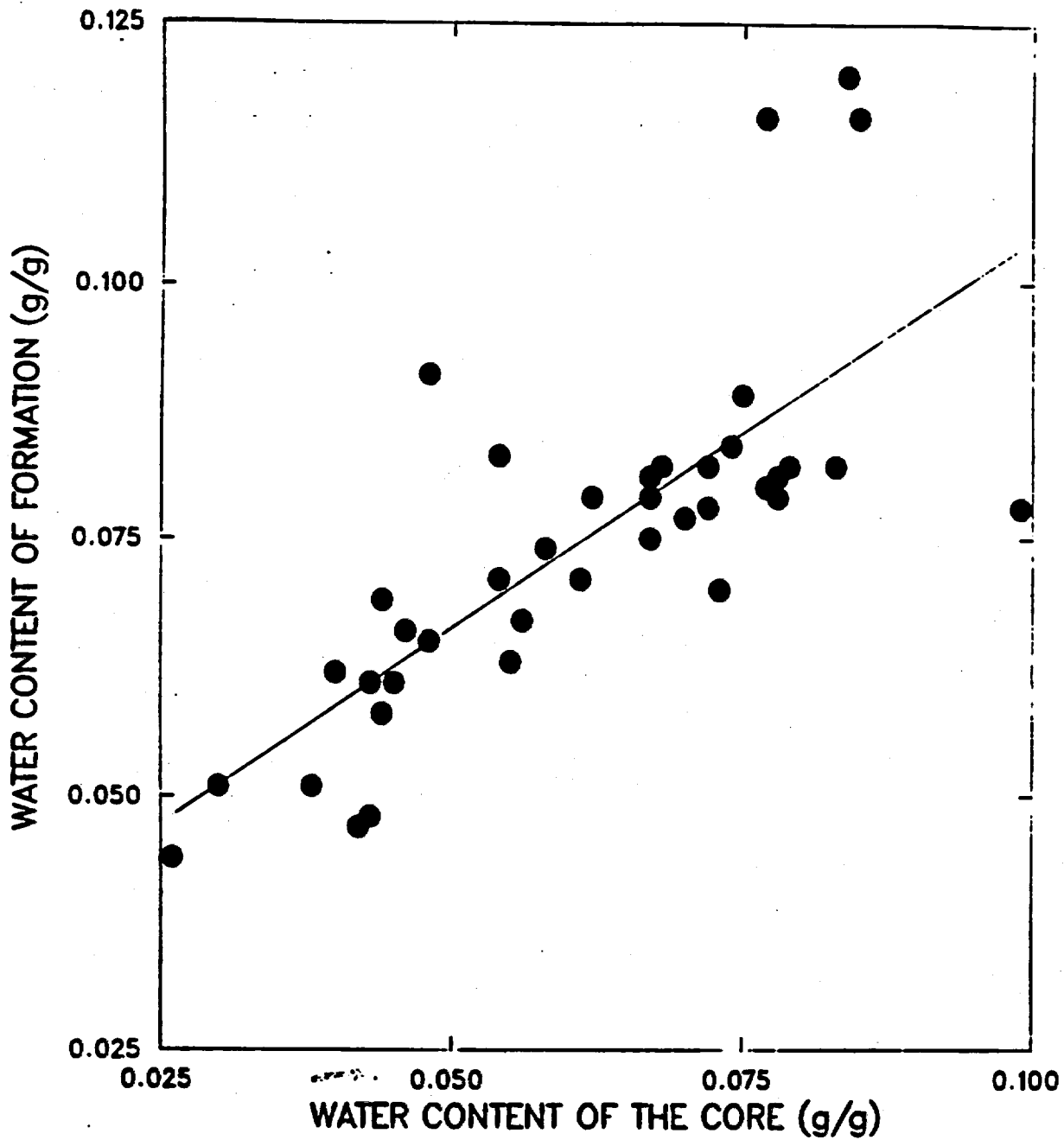


Figure 9.-- Gravimetric water content of core compared to that of the formation at similar depths, and resulting linear regression line (g/g, gram per gram).

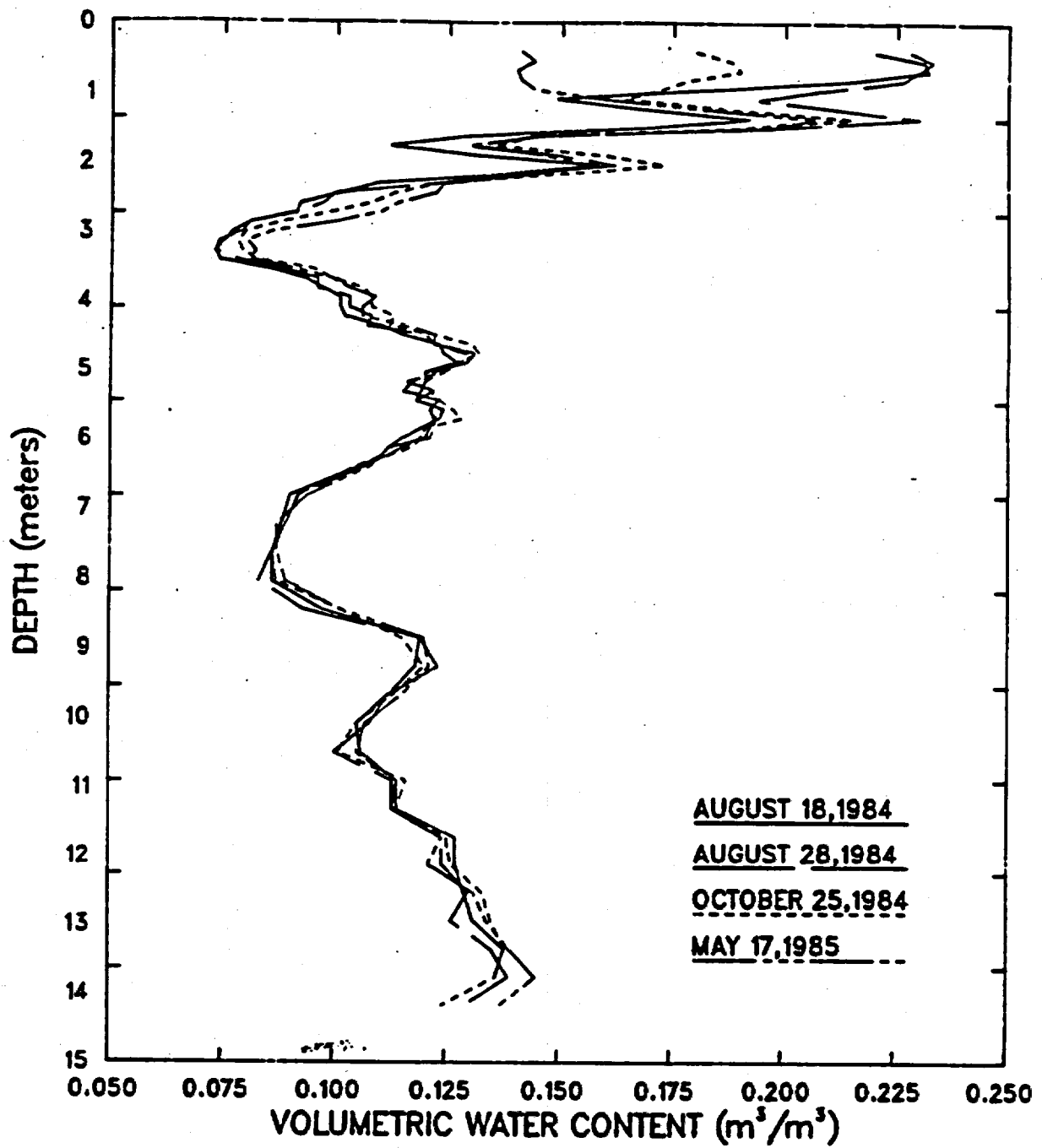


Figure 11. Moisture-content profiles of UE-25 UZ-N96 in moderately welded tuff (m³/m³, cubic meter per cubic meter).

### Conversion Table

<u>Multiply</u>	<u>By</u>	<u>To Obtain</u>
centimeter (cm)	0.394	inch (in.)
cubic centimeter (cm <sup>3</sup> )	0.061	cubic inch (in <sup>3</sup> )
meter (m)	3.281	foot (ft)
cubic meter per minute (m <sup>3</sup> /min)	35.34	cubic foot per minute (ft <sup>3</sup> /min)
kilometer (km)	0.621	mile (mi)
liter (L)	33.78	ounce (oz)
liter (L)	2.113	pint (pt)
liter (L)	1.056	quart (qt)
kilogram (kg)	2.204	pound (lb)
megapascal (MPa)	.000145	pound per square inch (lb/in <sup>2</sup> )

## Biographical Sketch

Dale Hammermeister received a Bachelor of Arts degree in Science Education from the University of Washington in 1968, a Master of Science degree in Chemistry from Denver University in 1972, and a Doctor of Philosophy degree in Soil Physics from Oregon State University in 1977. He taught secondary science and gardening with the U.S. Peace Corps in Guyana, South America, from 1968 to 1970; from 1977 to 1979 he was an Assistant Professor of Soil Science at the University of Wisconsin-River Falls; and since then he has been with the U.S. Geological Survey's Water-Resources Division working mainly in the area of unsaturated-zone hydrology. He currently is conducting near-surface hydrologic studies at Yucca Mountain, Nevada. His address is: U.S. Geological Survey, P.O. Box 327, MS 721, Mercury, NV 89023.

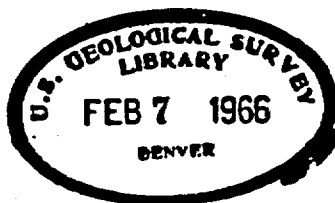
Daniel Blout received a Bachelor of Arts degree in Earth Science from the University of Northern Colorado, Greeley, in 1979. He worked for the U.S. Geological Survey for waste-storage investigations in Colorado and Utah. Since 1980, he has been working for Fenix & Scisson, Inc., at the Nevada Test Site on the potential Yucca Mountain high-level nuclear waste repository. His address is: Fenix & Scisson, Inc., P.O. Box 498, Mercury, NV 89023.

J. C. McDaniel completed high school in Muskogee, Oklahoma, in 1945. He began work for A.D. Rushing Drilling, Inc. in Santa Paula, California, in 1950 and was company vice president from 1960 to 1965. He sold his interest in that company in 1965 and was employed as a drill-rig superintendent for Reynolds Electrical & Engineering Co., Inc. at the Nevada Test Site, becoming a project manager in 1970. He currently is managing that company's drilling activities at Yucca Mountain, Nevada. His address is: Reynolds Electrical & Engineering Co., Inc., P.O. Box 14400, Las Vegas, NV 89114.

**ASSOCIATION DE RECHERCHE  
SUR LES TECHNIQUES DE  
FORAGE ET DE PRODUCTION**

**COMPTES RENDUS DU  
DEUXIÈME COLLOQUE**

**ar  
flp**



**RUEIL-MALMAISON 31 MAI - 4 JUIN 1965**

**ÉDITIONS TECHNIP 7 RUE NÉLATON PARIS 15<sup>e</sup>**

Enclosure 3

8.3.1.2.2.1

## ÉTUDE DES HÉTÉROGÉNÉITÉS DE PERMÉABILITÉS DANS LES MILIEUX POREUX

**Y. MORINEAU, P. SIMANDOUX et M. DUPUY**  
Institut Français du Pétrole.

Cette communication a pour objet de décrire les premiers résultats obtenus dans l'étude des hétérogénéités du milieu poreux naturel à l'échelle des échantillons.

Une étude préliminaire nous a conduit à choisir comme grandeur caractéristique de l'hétérogénéité la perméabilité monophasique. Différentes techniques ont été utilisées pour faire apparaître ses variations, certaines donnant des mesures locales de la perméabilité, d'autres, plus globales, donnant une image qualitative de l'échantillon. Toutes ces techniques utilisent l'écoulement monophasique de gaz ou de liquide.

Ces méthodes ont été appliquées à deux types très différents d'échantillons : l'un stratifié (grès des Vosges), l'autre sans structure apparente (grès de Fontainebleau). On a cherché à interpréter l'information de base conformément à un modèle statistique postulé à l'avance :

- distribution gaussienne du logarithme de la perméabilité ;
- répartition aléatoire caractérisée par une distance d'hétérogénéité.

Ce modèle s'est bien adapté à l'échantillon non structuré, fournissant des paramètres stables pour le modèle envisagé ; dans le cas du milieu stratifié une meilleure approximation doit tenir compte de la structure.

Ces mesures locales de perméabilité ont aussi été utilisées dans certaines expériences d'écoulement monophasique :

- dans le cas d'un milieu stratifié : vérification que l'écoulement monophasique est expliqué par le modèle fourni par la structure (assemblage de strates) ;
- dans le cas d'un milieu non structuré, la valeur des débits locaux en aval de l'échantillon suit une loi de distribution dont la valeur moyenne résulte de l'ensemble des perméabilités, mais dont les fluctuations autour de cette valeur moyenne sont essentiellement gouvernées par les valeurs des perméabilités sur la face de sortie.

*This paper describes the first results obtained from core samples in the study of heterogeneities in a natural porous medium.*

*After a preliminary study, air permeability was chosen as a heterogeneity criterion. Different techniques were used to bring out these variations, some of which provide local measurements of permeability, while other more global ones give a qualitative picture of the sample.*

*These techniques all use monophasic gas or liquid flow. Samples of two different types were tested by these methods: the first type stratified (grès des Vosges), the other without any apparent structure (grès de Fontainebleau).*

*The basic data were interpreted according to an assumed statistical model:*

- *log normal distribution of permeability values;*
- *spatial distribution was random, yet with a characteristic heterogeneity distance.*

*This model proved to fit in well with the non-structured core sample and to supply stable values for the model parameters. In the case of the stratified medium, the structure should be taken into account for an improved approximation.*

*These local permeability measurements were also used for interpreting some monophasic flow experiments:*

- in the case of a stratified medium, it was checked that monophasic flow is fully explained by the model suggested by the structure (assembly of layers) ;
- in the case of a non-structured medium, the local output-flow values follow a law of distribution, the mean value of which is a resultant of the whole set of permeabilities, with the fluctuations around this mean value being closely controlled by the local permeability values at the output side of the sample.

## I. INTRODUCTION

L'importance des hétérogénéités dans les phénomènes d'écoulement en milieu poreux a été souvent montrée. Le milieu poreux constituant la roche réservoir est intrinsèquement hétérogène à l'échelle microscopique des pores et une bonne partie de nos connaissances provient de l'analyse de modèles réalisés à cette échelle (faisceaux de capillaires, assemblage de sphères...). De même, à une autre échelle, la Géologie de Production aide à définir les grandes zones constituant un gisement, et l'on essaie de construire, alors, un modèle de gisement par l'assemblage de telles zones, supposées homogènes.

Entre ces deux échelles extrêmes, il doit exister dans les milieux poreux toute une gamme d'hétérogénéités d'échelles intermédiaires qui ne sont, à notre connaissance, jamais prises en compte dans les problèmes de production et dont, cependant, on ne connaît guère l'influence globale sur les écoulements.

Pour définir une propriété continue dans le milieu poreux, il existe un volume élémentaire qui constitue notre limite inférieure d'observation. D'autre part, en pratique la dimension des échantillons qu'il est possible de manipuler est limitée. Il n'est donc pas question d'étudier au laboratoire l'effet d'hétérogénéités de dimensions supérieures à quelques centimètres.

L'étude dont nous présentons ici les premiers résultats a un objectif double :

- Toutes les expériences de laboratoire, destinées à préciser les caractéristiques et les performances d'un gisement, sont faites sur des petits échantillons de quelques centimètres et ces expériences sont interprétées en supposant que l'échantillon en question est homogène. Cette interprétation peut se révéler partiellement faussée par l'hétérogénéité de l'échantillon (on songe par exemple aux expériences de WELGE). On peut donc penser critiquer l'interprétation des mesures courantes de laboratoire et éventuellement leur substituer des expériences nouvelles, ou modifier leur interprétation au vu de la part prise par l'hétérogénéité.

- Dans un deuxième stade, on peut envisager pouvoir, sous certaines réserves, extrapoler à la dimension du gisement certains résultats trouvés au laboratoire et ainsi tenir compte dans l'évaluation des performances des gisements, des hétérogénéités à cette échelle intermédiaire que nous avons définie.

Ayant insisté sur la notion d'échelle que l'on doit introduire dès que l'on parle de fluctuations, il est évidemment nécessaire de définir le paramètre fluctuant que l'on va étudier. Il faut remarquer qu'un milieu poreux peut être hétérogène vis-à-vis d'un grand nombre de ses propriétés: il peut par exemple présenter, à l'échelle où nous nous sommes placés, des hétérogénéités de caractère morphologique: porosité, perméabilité, granulométrie, etc., et des hétérogénéités spécifiques du type d'écoulement réalisé dans ce milieu: mouillabilité, pression capillaire, saturations résiduelles, perméabilités relatives, largeur de la zone de mélange, etc. Autrement dit, le choix de la variable représentant l'hétérogénéité doit être fait en fonction de son importance présumée sur les phénomènes que l'on désire étudier.

Lorsque l'échelle à laquelle on étudiera l'hétérogénéité et la variable à travers laquelle on « appréciera » l'hétérogénéité ont été choisies, l'étude du phénomène prend alors deux aspects étroitement liés :

- un aspect descriptif de cette hétérogénéité;
- un aspect : influence de l'hétérogénéité telle qu'on l'a décrite, sur les écoulements en milieu poreux;
- l'aspect descriptif doit nous permettre de « connaître » l'hétérogénéité du milieu auquel on s'intéresse, par l'interprétation des mesures du paramètre choisi.

Une des difficultés de cet aspect vient d'ailleurs du fait que les paramètres, servant à condenser l'information, doivent être choisis en fonction du phénomène sur lequel on désire observer une influence. En particulier, ici, tout cet aspect descriptif doit tendre à bâtir un modèle, ou des modèles qui se comportent comme les milieux hétérogènes en question pour tout ce qui touche les écoulements.

Le deuxième aspect du problème est évidemment très important: il consiste à utiliser notre connaissance de l'hétérogénéité pour interpréter, ou même, prévoir son influence sur les différents types d'écoulement. Il est aisé de se rendre compte, par l'analyse de modèles simples, constitués par l'assemblage en série ou en parallèle de blocs de propriétés différentes, que les phénomènes globaux que nous observons sont profondément modifiés (1) :

- la perméabilité monophasique globale d'un tel modèle peut varier entre la moyenne arithmétique (assemblage en parallèle) et la moyenne harmonique (assemblage en série);
- la courbe de pression capillaire présente un palier plus incliné que chacune des courbes élémentaires; observation que l'on interprète généralement comme l'indice d'une large distribution des dimensions de pores et qui peut donc s'interpréter différemment;
- les courbes de perméabilités relatives sont modifiées, spécialement celle au fluide non mouillant;
- dans le cas du déplacement miscible, on trouve également une influence de l'hétérogénéité sur les valeurs du coefficient de dispersion et la largeur de la zone de mélange (2) (3).

Dans des milieux plus complexes que ceux-ci, certains auteurs, postulant a priori des modèles hétérogènes, suffisamment simples pour être traités mathématiquement (milieux stratifiés, (4) (5) (6) (7) (8), milieu à répartition aléatoire (9), ont montré quantitativement toute l'importance de l'hétérogénéité.

Dans le cas des milieux naturels, plus complexes encore que ces modèles, il est probable que l'hétérogénéité conserve une grande importance et que, dans les écoulements diphasiques en particulier, certains paramètres d'hétérogénéité judicieusement choisis doivent permettre de dégager cette influence.

L'essentiel de cette communication se rattachera aux problèmes descriptifs. Le premier stade de cette étude a consisté en effet dans la mise en évidence des hétérogénéités pour deux types d'échantillons de milieu poreux naturel. Le deuxième aspect du problème est abordé dans une seconde partie en ce qui concerne les écoulements monophasiques.

## II. MISE EN ÉVIDENCE EXPÉRIMENTALE DE L'HÉTÉROGÉNÉTÉ

### II. 1. Généralités. Choix du critère d'hétérogénéité

La mise en évidence des hétérogénéités a nécessité la réalisation d'appareillages permettant la mesure d'une propriété sensible à l'hétérogénéité. Plusieurs types de mesures ont été réalisés et vont être décrits, mais pratiquement tous sont basés sur le choix de la perméabilité monophasique comme critère d'hétérogénéité.

Le choix de la perméabilité monophasique s'est inspiré des considérations suivantes :

- commodités expérimentales : la perméabilité étant une grandeur facile à mesurer et susceptible de varier dans de grandes proportions;
- fréquence de son intervention dans de nombreux phénomènes.

La perméabilité monophasique est en effet une grandeur prépondérante dans les écoulements. Ceci résulte des équations de l'écoulement monophasique, d'un fluide quelconque, que l'on peut mettre sous la forme :

$$\vec{\Gamma}P + \rho\vec{G} + \frac{\mu}{K}\vec{V} = 0 \quad [1]$$

avec les notations classiques suivantes :

- $P$  : pression;
- $\rho$  : densité;
- $\mu$  : viscosité;
- $\vec{G}$  : vecteur pesanteur;
- $\vec{V}$  : vitesse de filtration;
- $K$  : perméabilité.

A partir d'une légère perturbation en un point, on peut se faire une idée de la façon dont se développe celle-ci, en prenant le rotationnel de la vitesse :

$$\vec{r} \wedge \vec{V} = \left( \frac{\mu'}{\mu} \vec{V} + \frac{\rho'K}{\mu} \vec{G} \right) \wedge \vec{r}C + \vec{r} (\text{Log } K) \wedge \vec{V} \quad [2]$$

en posant  $\mu = \mu(C)$  et  $\rho = \rho(C)$ ,  $C$  étant par exemple la composition du fluide, soit :

$$\begin{aligned} \vec{r}\mu &= \mu' \vec{r}C \\ \vec{r}\rho &= \rho' \vec{r}C \end{aligned}$$



Pour un fluide de propriétés constantes, le premier terme est nul et on voit que cette perturbation va disparaître ou se développer suivant le signe du terme  $\vec{\Gamma} (\text{Log } K) \wedge \vec{V}$ . Ceci permet de sentir l'influence prépondérante des variations locales de la perméabilité qui intervient par son logarithme. Dans le cas d'un déplacement diphasique, on réalise intuitivement que certaines zones peuvent être drainées ou non, suivant la distribution des perméabilités totales.

## II. 2. Les différentes techniques expérimentales utilisées pour mettre en évidence les hétérogénéités de filtration d'un milieu poreux naturel

### II. 2.1 Mesure des perméabilités locales ou microporosités

Ne disposant d'aucune possibilité pour mesurer à « distance » la perméabilité d'un petit bloc élémentaire situé au sein d'un échantillon de milieu poreux, on s'est limité à la mesure de perméabilité de blocs situés à la périphérie de l'échantillon, en particulier sur une face. Les conditions expérimentales imposées sont donc les suivantes (10) :

- mesure de perméabilités locales sur une face plane d'un échantillon (par exemple sur la section circulaire d'un échantillon cylindrique);
- la mesure devant être locale, elle est réalisée au moyen d'une sonde à section circulaire appliquée au point de mesure de façon étanche à l'aide d'un joint de caoutchouc suivant un mode voisin de celui réalisé par DYKSTRA et PARSONS (5). La figure 1 montre l'extrémité de cette sonde.

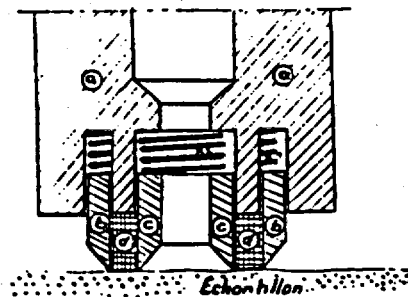


FIG. 1.

L'appareil a été conçu pour mesurer la perméabilité monophasique locale à l'air. Il procède de la façon suivante (fig. 2, schéma de principe): de l'air est envoyé à travers la sonde, sous une différence de pression assez faible pour qu'on puisse négliger sa compressibilité (de l'ordre de 10 à 50 g/cm<sup>2</sup>), sur la portion de l'échantillon limitée par la sonde. Cet air ressort à la pression atmosphérique autour de la sonde, après avoir suivi à l'intérieur de l'échantillon un chemin représenté schématiquement dans le plan par la figure 3. La

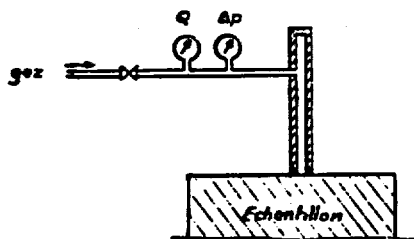


FIG. 2.

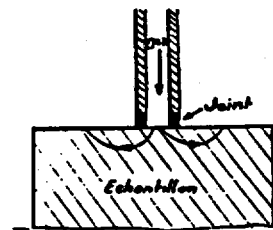


FIG. 3.

pression étant maintenue constante, on mesure le débit. La sonde peut se déplacer en  $x$  et  $y$  dans le plan de la surface à investiguer. Dans l'écoulement ainsi réalisé, la valeur de la pression  $p$  en un point dépend des conditions imposées sur les limites (hauteur  $H$  et rayon  $R$  de l'échantillon — diamètre  $2a$  de la sonde et

épaisseur  $e$  du joint d'étanchéité — distance radiale  $r_s$  de la sonde, repérée par rapport à l'axe de l'échantillon). On peut mettre cette pression sous la forme adimensionnelle suivante :

$$p = \Delta p \cdot \varphi \left( \frac{r}{a}, \frac{z}{a}, \frac{H}{a}, \frac{R}{a}, \frac{r_s}{a}, \frac{e}{a} \right)$$

$\Delta p$  représentant la surpression appliquée à l'intérieur de la sonde.

Le débit traversant l'échantillon est :

$$Q = -\frac{2\pi K}{\mu} \int_0^a \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right)_{z=0} r dr$$

$$Q = -\frac{2\pi K}{\mu} \Delta p \cdot a \int_0^1 \left[ \frac{\partial}{\partial z} \varphi \left( r, \frac{z}{a}, \frac{H}{a}, \frac{R}{a}, \frac{r_s}{a}, \frac{e}{a} \right) \right]_{z=0} r dr$$

en sorte que la perméabilité en un point est égale à :

$$K = \frac{\mu Q}{\Delta p} \frac{1}{-2\pi a \int_0^1 \left[ \frac{\partial}{\partial z} \varphi \left( r, \frac{z}{a}, \frac{H}{a}, \frac{R}{a}, \frac{r_s}{a}, \frac{e}{a} \right) \right]_{z=0} r dr} = \frac{\mu Q}{\Delta p} \cdot \frac{1}{a} f(G) \quad [3]$$

avec :

$$f(G) = \frac{1}{2\pi \int_0^1 \left[ \frac{\partial}{\partial z} \varphi \left( r, \frac{z}{a}, \frac{H}{a}, \frac{R}{a}, \frac{r_s}{a}, \frac{e}{a} \right) \right]_{z=0} r dr} = \frac{1}{\phi \left[ \frac{H}{a}, \frac{R}{a}, \frac{r_s}{a}, \frac{e}{a} \right]} \quad [4]$$

Les dimensions de la sonde ont été choisies de façon à donner à la mesure une grande finesse, compatible avec la définition de la perméabilité, qui suppose un volume grand devant la dimension des pores. Compte tenu du volume que nous voulions investiguer, une étude mathématique du problème et une analogie électrique nous ont conduit à prendre pour diamètre de la sonde  $2a = 4$  mm et pour épaisseur du joint  $e = 1$  mm.

Dans ces conditions, ont pu être déterminées :

— l'influence des limites de l'échantillon  $\left( \frac{R}{a}, \frac{H}{a} \right)$  de même que l'influence du positionnement de la sonde  $\left( \frac{r_s}{a} \right)$  sur la fonction  $f(G)$  caractéristique de l'écoulement. Il s'est avéré que, dans les conditions fixées pour la valeur du paramètre  $\frac{e}{a} = 0,5$ , l'influence de la longueur de l'échantillon est nulle tant que  $\frac{H}{a}$  est supérieur à 2 ( $H \geq 4$  mm); de même le rayon de l'échantillon a une influence négligeable tant que  $\frac{R}{a} \geq 2$  ( $R \geq 4$  mm).

Ces conditions étant en pratique toujours réalisées, on peut admettre l'indépendance de la fonction  $f(G)$  vis-à-vis des dimensions de l'échantillon. Conséquence de ceci, l'influence du positionnement de la sonde (paramètre  $r_s/a$ ) est également négligeable, sauf pour des valeurs très proches du bord de l'échantillon.

Autrement dit, en pratique :

$$f(G) = \frac{1}{\phi \left( \frac{e}{a} \right)}$$

— les dimensions du volume élémentaire investigué par la mesure. En effet, conséquence également de ce qui précède, bien que l'écoulement intéresse théoriquement tout l'échantillon, seules les zones très proches de la sonde ont une contribution effective sur la valeur du débit. Et l'on peut assimiler le volume, affecté par la mesure, à un petit cylindre de 4 mm de hauteur, sur 8 mm de diamètre;

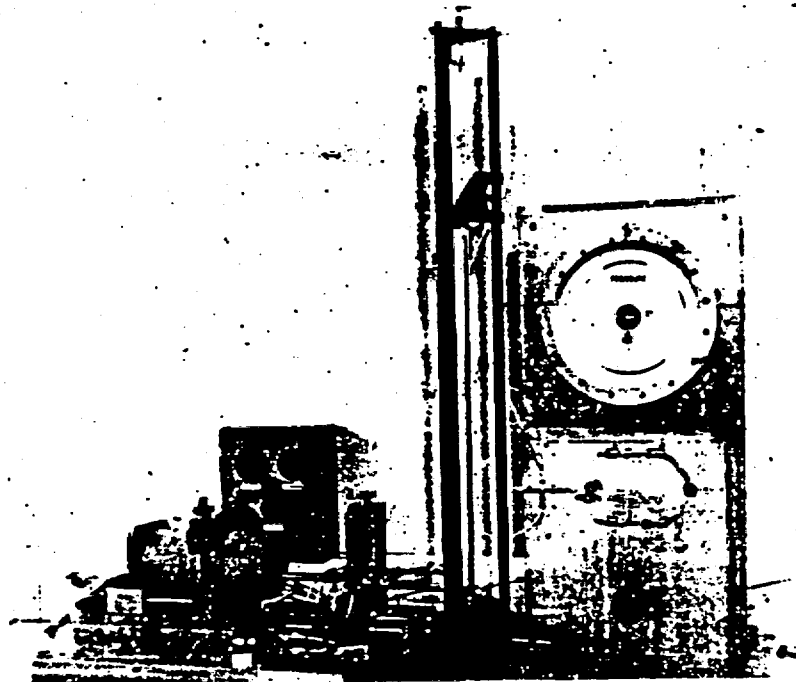
— Enfin, la valeur de la fonction d'écoulement  $f(G)$ . Lorsque le débit est exprimé en  $\text{cm}^3/\text{s}$ , la perte de charge en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , la viscosité du gaz en cPo, on trouve, toujours pour la valeur  $e/a = 0,5$  choisie :

$$K_{\text{millitarcy}} = 194 \mu_{cp} \frac{Q_{\text{cm}^3/\text{s}}}{\Delta p_{\text{kg}/\text{cm}^2}} \frac{1}{a_{\text{cm}}} \quad [5]$$

soit dans les conditions opératoires choisies (air à 20°C) :

$$K_{\text{millitarcy}} = 18,1 \frac{Q_{\text{cm}^3/\text{s}}}{\Delta p_{\text{kg}/\text{cm}^2}} \quad [6]$$

Le dispositif expérimental conçu tel qu'on vient de le décrire a été réalisé, est reproduit sur la photo de la figure 4. Les essais préliminaires ont donné entière satisfaction et en particulier ont confirmé une excellente reproductibilité dans les résultats, les valeurs obtenues pour la perméabilité étant toujours reproduites à moins de 2 % près.



Cliché I. F. P.

FIG. 4.

## II. 2.2 Mesure de débits locaux

### II. 2.2.1 Le microdébitmètre

Moyennant quelques modifications simples et rapides, l'appareil de mesure de perméabilités locales que nous venons de présenter est susceptible de mesurer non plus des perméabilités, mais des débits locaux.

La figure 5 donne le principe de cette mesure : l'échantillon étant traversé par un flux permanent de gaz, la sonde appliquée cette fois sur la face de sortie de l'échantillon sert simplement à canaliser le flux de gaz qui sort au point considéré à la pression atmosphérique. Cette expérience nécessite l'enrobage latéral de

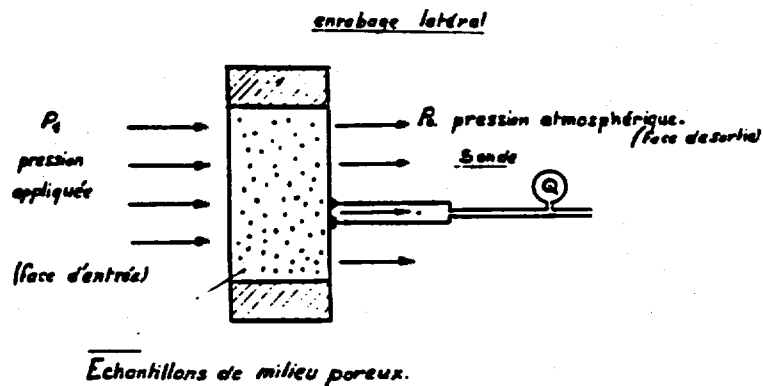


FIG. 5.

l'échantillon et ne permet pas en général de remonter à des valeurs de perméabilité locale, à moins que les échantillons soient parfaitement homogènes, ou à strates homogènes ou encore dans le cas d'échantillons hétérogènes mais très minces, car les chemins suivis par une particule fluide restent inconnus. La dernière partie de cette communication analysera en détails les résultats de ces expériences de microdébitmétrie.

### II. 2.2.2 Méthode des collecteurs

Cette méthode s'applique à un échantillon saturé de liquide. Elle consiste à réaliser un écoulement permanent de ce liquide et à mesurer les quantités de fluide recueillies au bout d'un certain temps sur la face de sortie de l'échantillon, dans des petits tubes convenablement disposés. Le dispositif expérimental représenté sur la figure 6 est celui qui a été utilisé pour des échantillons de 5 cm de diamètre. Il comporte dix-

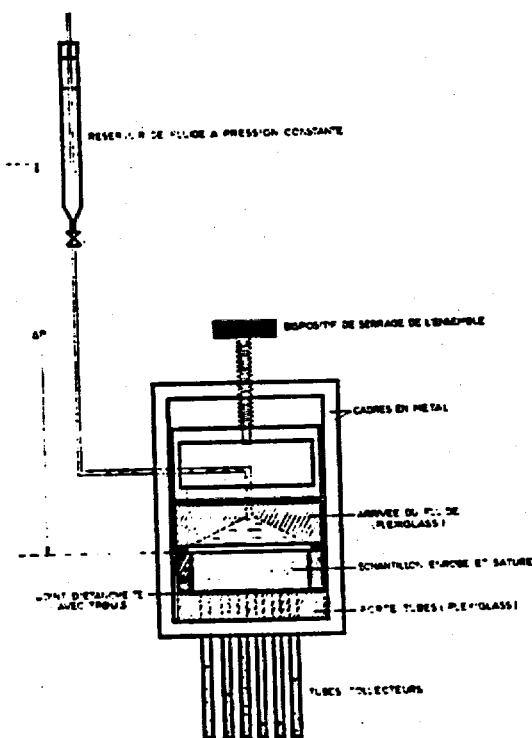


FIG. 6.

neuf points d'échantillonnage de 8 mm de diamètre. Cette expérience qui est en beaucoup de points analogue à celle du microdébitmètre en diffère cependant sur les points suivants :

- elle utilise des liquides;
- elle est moins fine, ou plutôt moins localisée;
- elle est plus rapide puisque les dix-neuf valeurs sont obtenues simultanément;
- elle est en outre de réalisation très simple.

### II. 2.3 Méthode qualitative des fluides colorés

Cette expérience n'a servi jusqu'à maintenant qu'à mettre en évidence les hétérogénéités de filtration d'un milieu poreux. Néanmoins, sous sa forme actuelle ou sous une forme plus élaborée elle pourrait être interprétée dans le sens des écoulements en milieu hétérogène.

L'échantillon saturé de liquide et enrobé est placé dans une cellule conçue pour que l'une de ses faces soit visible. On fait alors un déplacement miscible en poussant le fluide en place par ce même fluide, mais coloré.

L'arrivée du fluide déplaçant est observée et au besoin photographiée sur la face de sortie. La série de photographies de la figure 7 montre ce que l'on peut attendre d'une telle méthode: l'échantillon de cet exemple est une carotte cylindrique de grès de Fontainebleau de diamètre  $\varnothing = 5$  cm et d'épaisseur  $e = 1$  cm; ce grès est habituellement considéré comme homogène.

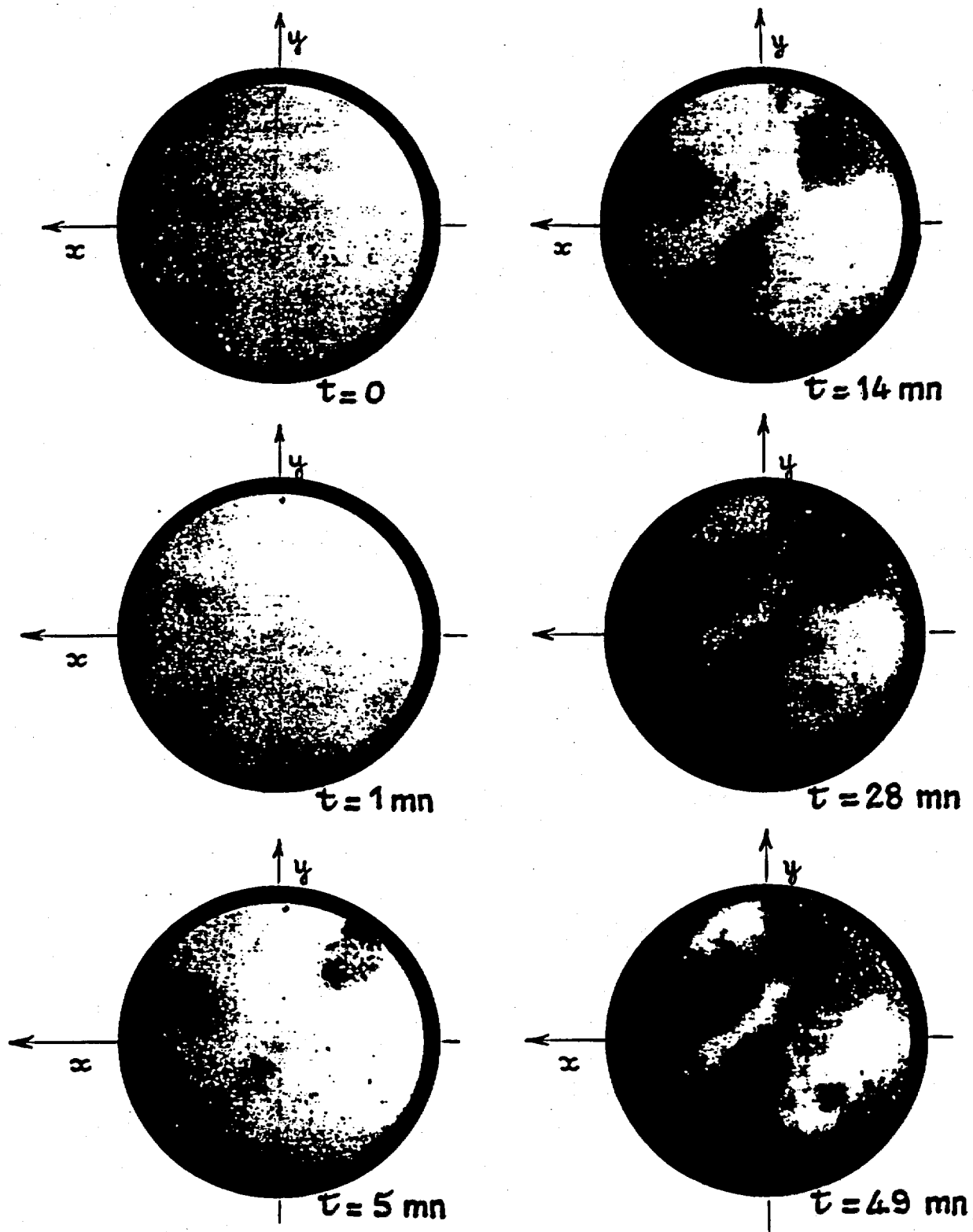


FIG. 7. — Grès de Fontainebleau, carotte n° 2.

$\Delta P = 25 \text{ g} :$   
 $K = 100 \text{ md.}$

II. 3. Premiers résultats expérimentaux

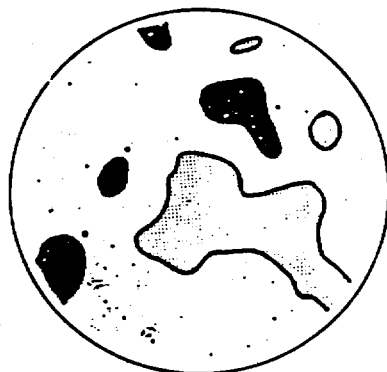
Les méthodes expérimentales que nous venons de présenter ont été appliquées sur deux types d'échantillons différents : du grès des Vosges, stratifié, et du grès de Fontainebleau (10) (11).

La perméabilité et les débits locaux ont été mesurés sur toute la surface d'une face suivant les nœuds d'un réseau hexagonal de 4 mm de côté. On en a tiré une représentation cartographique concrétisée par des courbes iso-perméabilités ou iso-débits (iso-k et iso-Q). Les figures 8 et 9 montrent les cartes obtenues pour les deux échantillons de type différent en iso-k.

■	$k < 2,75 \text{ md}$	$n^{\circ} = 3 \text{ et } 4$
	$2,75 < k < 5,5$	5 et 6
	$5,5 < k < 11$	7 et 8
▨	$11 < k < 22$	9 et 10
•	$22 < k < 44$	11 et 12
	$44 < k < 88$	13 et 14
	$88 < k < 176$	15 et 16
====	$176 < k < 352$	17 et 18
====	$352 < k$	19



FIG. 8. — Carotte de grès des Vosges. (Échelle 1/2).



▨	$31,1 < k < 44$
•	$44 < k < 62$
▨	$62 < k < 88$

FIG. 9. — Carotte de grès de Fontainebleau, face 1. Perméabilités (md). (Échelle 1).

La figure 10 montre la carte iso-Q obtenue pour une autre carotte de grès des Vosges tandis que la figure 11 montre la carte iso-Q obtenue avec la méthode des collecteurs: dans ce cas les débits ont été exprimés en pour-cent du débit total et affectés aux centres de chaque zone: enfin la figure 12 montre les résultats donnés par la méthode des fluides colorés sur ce même échantillon.

Ces représentations sont assez parlantes et montrent notamment dans le cas du grès des Vosges une certaine anisotropie; on remarque également par comparaison entre les deux types de grès que les contrastes de perméabilité sont d'un ordre de grandeur très différent.

Dans la partie suivante, nous présentons une tentative de description, à l'aide de méthodes statistiques, des résultats obtenus sur les échantillons précédents.

III. MÉTHODES DE TRAITEMENT NUMÉRIQUE ET STATISTIQUE

Le traitement numérique des résultats de mesure a été effectué selon des méthodes analogues en ce qui concerne les microdébits et les micropéméabilités. Mais l'interprétation de celles-ci se rattache à l'aspect

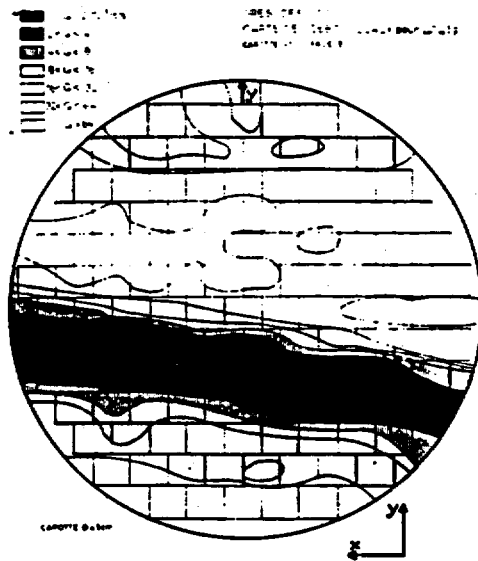


FIG. 10.

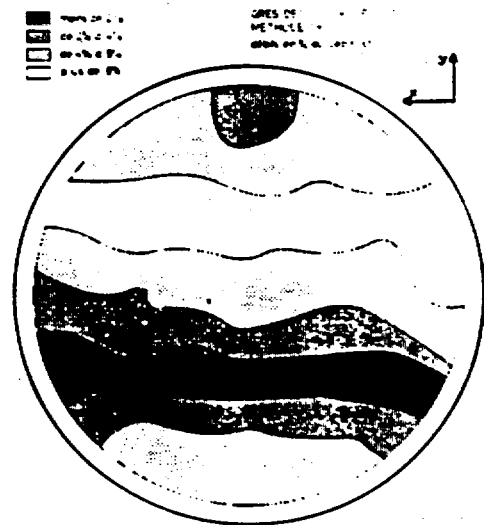


FIG. 11.

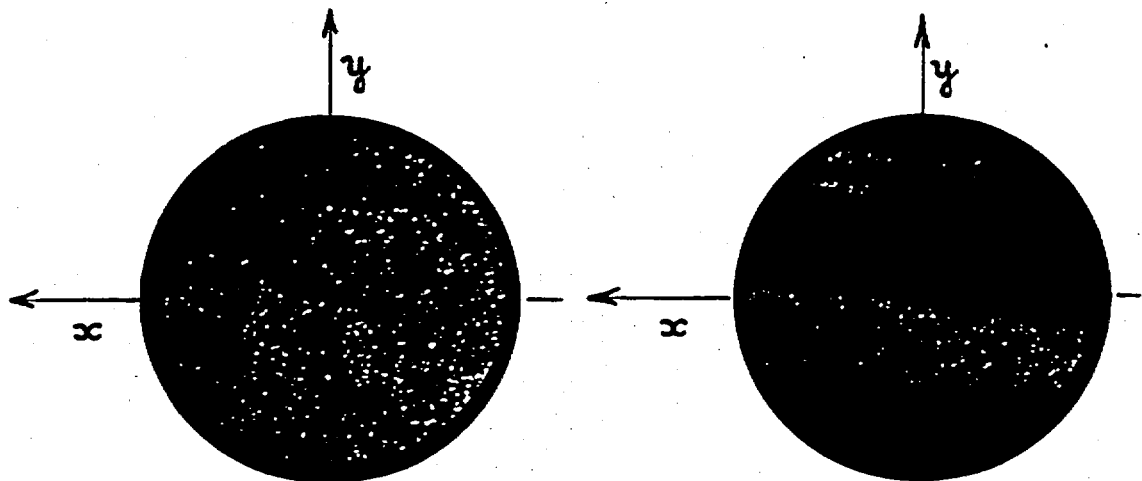


FIG. 12. — Grès des Vosges, face B.

descriptif de l'hétérogénéité dont il a été question, alors que pour les microdébits il s'agit déjà d'étudier une influence sur un type particulier d'écoulement.

Pour cette raison, nous présenterons séparément les résultats de ces deux études.

### III. 1. Présentation générale

La grande quantité de mesures effectuées rend nécessaire un traitement numérique systématique pour obtenir, d'une part, une description claire de l'évolution des propriétés (microperméabilités, microdébits) dans les échantillons étudiés; d'autre part, une appréciation — ou estimation — globale du matériau d'origine, à partir des échantillons considérés comme représentatifs.

Ce traitement met en jeu implicitement une hypothèse sur le mode de distribution des fluctuations dans le milieu poreux, ou modèle statistique de ces fluctuations, qui joue le rôle de référence pendant le traitement numérique.

On peut dire que les manipulations numériques effectuées sur l'information ont une valeur statistique dans la mesure où :

— le schéma statistique postulé au départ apparaît qualitativement validé au fur et à mesure du traitement;

— des valeurs numériques stables (donc, dignes de confiance) des paramètres impliqués par le modèle peuvent être obtenues en conclusion des manipulations numériques;

— l'indication du degré de confiance à accorder à ces valeurs est donnée au vu des résultats rendus par des tests statistiques convenablement employés — même si leur intervention paraît tout à fait simple : régularité d'un histogramme, d'une droite d'Henry — et qui sont cohérents avec le modèle statistique pris comme hypothèse.

On conçoit bien qu'un milieu poreux où ne s'observe aucune structure remarquable a priori puisse, au point de vue des écoulements, être représenté par une répartition spatiale de valeurs de perméabilités obéissant à une loi statistique donnée. A cet égard, la plus simple est la loi normale, ou loi de Gauss, entièrement caractérisée par une valeur moyenne et une variance. Pour les perméabilités, on admet, à la suite d'observations prolongées (5) (12), que c'est leur logarithme ( $\text{Log } k$ ) qui doit être référencé à la distribution normale. Ceci implique que l'information initiale en millidarcys sera transformée en valeurs logarithmiques avec ou sans une certaine tolérance d'arrondi : on aboutit ainsi aux classes de perméabilité  $k^*$  utilisées ici, fondées sur la progression géométrique binaire. C'est sur de telles valeurs transformées qu'il convient de calculer des moyennes, des écarts-types, et en général tous les paramètres statistiques nécessaires.

D'autre part, en ce qui concerne la répartition dans l'espace, l'observation directe du matériel, notamment en s'aidant des représentations cartographiques mentionnées, décèle une notable influence de voisinage : les éléments adjacents ne sont pas indépendants l'un de l'autre bien que l'on ait pris soin d'éviter tout recouvrement des zones touchées par la mesure. Il y a lieu de penser à une véritable « liaison de voisinage », formulable mathématiquement, mais dans cette optique, une notion tout à fait simple s'introduit nécessairement : celle de « distance d'indépendance », à partir de laquelle la liaison cesse d'exister.

C'est là un paramètre de distance, caractéristique de « l'hétérogénéité », qui fait partie du modèle de référence et auquel le traitement de l'information doit conférer une valeur numérique estimée, stable.

Dans le cadre de la présente étude, les milieux poreux observés n'offrent pas de structure remarquable a priori. Indiscutable pour le grès de Fontainebleau, cette appréciation ne l'est pas en ce qui concerne la face de l'échantillon de grès des Vosges, où s'observe une certaine disposition stratifiée : celle-ci toutefois n'est pas suffisamment prononcée, ni régulière, pour interdire l'emploi du modèle sans structure, au moins à titre de première approximation.

De ceci il découle que, dans les deux cas examinés :

- grès de Fontainebleau.
- grès des Vosges.

les paramètres recherchés en premier lieu pour la description globale des microperméabilités doivent être :

- a) Le niveau moyen — ou valeur moyenne — de la microperméabilité locale,  $k^*$ ;
- b) La dispersion, ou mieux, l'écart-type  $\sigma_{k^*}$  de cette grandeur par rapport à sa valeur moyenne (on rappelle que la variance est le carré de  $\sigma_{k^*}$ );
- c) La longueur  $l$  exprimant la distance d'indépendance, caractérisant le milieu.

On verra ci-après que, pour l'échantillon de grès de Fontainebleau, il est possible de conclure à la validité du modèle, tandis que, pour le grès des Vosges, l'introduction d'une hypothèse de structure paraît nécessaire pour une approximation meilleure.

L'étude de ce dernier matériau n'est cependant pas encore assez avancée à l'heure actuelle pour nous permettre de présenter une solution finale à cet égard.

Après ces explications sur le principe de méthode suivi, voici le plan que nous adopterons pour l'exposé des travaux effectués.

Dans un premier paragraphe, examinant le modèle statistique sans structure, avec relation de voisinage, nous montrerons que certaines de ses caractéristiques conduisent, par une procédure simple, à découvrir les valeurs les plus probables de la longueur  $l$  et de la variance de perméabilité. Ce paragraphe vise donc à justifier le choix des méthodes de traitement numérique de l'information, ainsi qu'à présenter les critères statistiques adoptés pour qualifier la certitude des conclusions.

Nous décrirons ensuite succinctement les algorithmes employés, agissant sous forme de programmes d'ordinateur. Leurs propriétés d'emploi seront brièvement évoquées.

Il faut souligner que la disponibilité de programmes adéquats sur ordinateur a conditionné la possibilité même d'une interprétation soignée et théoriquement valable sur l'information de base.



Dans un troisième paragraphe, nous récapitulerons les résultats obtenus en ce qui concerne la distribution de microperméabilités sur les faces considérées d'échantillons (grès des Vosges, grès de Fontainebleau).

Dans le cas du grès de Fontainebleau, on a cherché à confirmer la valeur trouvée pour la distance d'indépendance par une toute autre méthode, basée sur l'algorithme de corrélation rectiligne, et exposée au paragraphe IV. 2. 2.

Dans l'étude des microdébits, qui forme le quatrième paragraphe, on a cherché à s'expliquer les propriétés du milieu poreux grès de Fontainebleau pour les écoulements longitudinaux à la lumière des résultats de l'étude des microperméabilités.

Pour le traitement de cette tranche d'information, nous nous sommes appuyés essentiellement sur l'hypothèse de l'existence d'une bonne corrélation entre les microdébits et les microperméabilités sur la face de sortie, et nous nous sommes attachés à l'étude serrée de cette corrélation. Celle-ci a été constatée stable pour les onze cartes de microdébits dont nous disposions. La valeur numérique du coefficient de corrélation est toujours élevée, indiquant une forte influence de la face de sortie; elle s'améliore, comme on pouvait s'y attendre, quand diminue la longueur de l'échantillon.

La concordance de réponses positives obtenues, pour le cas du grès de Fontainebleau, à l'égard du modèle statistique proposé, nous paraît devoir être portée en particulier au crédit de la technique de mesure; celle-ci manifestant une bonne répétitivité et sensibilité. Quant aux descriptions et épreuves très diverses auxquelles ce matériau relativement banal a été soumis, il est très probable qu'elles pourront trouver des applications plus intéressantes sur d'autres milieux poreux. Mais il était nécessaire qu'elles soient mises en jeu dès l'origine, et il est encourageant de constater que ces tests divers se sont appliqués avec facilité et succès dans le cas actuel.

### III. 2. Le modèle statistique utilisé : ses caractéristiques et la détermination numérique de celles-ci

On récapitule les caractéristiques du schéma de distribution employé pour le grès des Vosges comme pour le grès de Fontainebleau :

a) Distribution Log normale des valeurs de microperméabilité : on travaillera donc sur des valeurs  $k^*$  déduites des  $k$  par une transformation logarithmique.

b) La population source, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs de microperméabilité qui auraient pu être mesurées sur les échantillons étudiés, est stable et elle est caractérisée par deux paramètres :

$$\bar{k}^* \text{ (valeur moyenne), } \sigma_{k^*}^2 \text{ (variance) ou } \sigma_{k^*} \text{ (écart-type)}$$

c) Une liaison de voisinage est postulée, décroissante avec la distance. Les valeurs espacées de 4 mm — intervalle des mesures — sont corrélées; sans chercher à préciser analytiquement la loi de décroissance fonction de la distance, on peut supposer, simplement, que la corrélation cesse tout à fait à partir d'une certaine distance  $l$ . En deux points à cette distance, les valeurs  $k(\vec{M})$  et  $k(\vec{M} + \vec{r})$  avec  $|\vec{r}| = l$ , sont indépendantes.

d) Imaginons, sur l'information de base, des groupages de forme constante mais d'aire croissante : dans le cas présent, c'est la forme losange, bien adaptée aux schémas des mesures, qui a été retenue.

Appelons  $\Delta S_i$  l'aire d'une cellule, rapportée à l'aire d'influence d'une mesure initiale. On a pris ici :

$$\Delta S_1 = 1, \quad \Delta S_2 = 2^2, \quad \Delta S_3 = 3^2 \quad \text{etc.}$$

affectons au centre de chaque cellule la microperméabilité moyenne dans la cellule. Appelons  $r$  le côté d'un losange; pour  $r = l$ , les  $k^*$  en des points homologues de deux cellules contiguës sont, d'après l'hypothèse, indépendantes; les deux cellules contiguës sont donc globalement indépendantes entre elles. Les valeurs moyennes  $\bar{k}_i^*$  pour les cellules de cette taille forment une population gaussienne d'éléments indépendants, de paramètres :

$$\begin{array}{ll} \text{Valeur moyenne } \bar{k}_i^* & \text{identique à } \bar{k}^* \\ \text{Variance } \sigma_{k_i^*}^2 & \text{non identique à } \sigma_{k^*}^2 \end{array}$$

En particulier, la valeur quadratique moyenne de la différence  $\Delta k_i^*$  entre cellules contiguës doit être :  $\left[ \sigma_{k_i^*} \cdot \sqrt{2} \right]$

e) Envisageons à présent des groupages sur les unités ci-dessus (qui seront appelées cellules autonomes) en respectant toujours la même forme: on considère un groupage d'ordre  $j$ , contenant  $N$  cellules élémentaires ( $N = j^2$ ). A ce niveau on aura affaire à une population normale de paramètres :

$$\begin{aligned} \text{Valeur moyenne } \bar{k}_j & \text{ identique à } \bar{k} \\ \text{Variance } \sigma_{k_j}^2 & = 1/N \cdot \sigma_k^2 \end{aligned}$$

et la différence moyenne quadratique entre deux telles cellules adjacentes est liée à l'écart-type à ce même niveau par la relation déjà indiquée  $\sqrt{2} \cdot \sigma_{k_j}^2$ .

On voit qu'au-dessus du niveau de groupage qui correspond aux unités autonomes, l'écart-type des valeurs et leur différence de voisinage moyenne diminuent régulièrement, en restant liés par le rapport constant  $\sqrt{2}$ .

f) Au contraire, avant l'atteinte de ce niveau de groupage, la différence de voisinage moyenne doit augmenter: on s'en rend compte à l'aide de la formule de la variance résiduelle en corrélation rectiligne :

$$\sigma_{y/x}^2 = \sigma_y^2 (1 - R^2)$$

appliquée au cas de l'autocorrélation entre éléments très voisins; l'axe de régression est alors très sensiblement la première bissectrice de sorte que :

$$\sigma_{y,x}^2 = \text{variance de } (y - x)$$

c'est-à-dire de la différence intéressée. Si on fait augmenter la distance de comparaison  $r$ , le coefficient de corrélation  $R_r$ , correspondant va décroître rapidement à partir de 1, donc  $1 - R^2$  va croître assez rapidement et, par conséquent la valeur moyenne de la différence étudiée, car à ce stade, la variance  $\sigma_y$  reste pratiquement égale à celle des unités de base.

La discussion analytique précise n'est pas nécessaire pour affirmer qu'aux tous premiers niveaux de groupage à partir des unités de base, la différence quadratique moyenne de voisinage entre cellules croît, alors qu'au-delà du niveau des unités autonomes, elle doit décroître, en  $1/\sqrt{N}$ .

Cette propriété fournit un moyen direct et très simple de détecter l'aire des cellules autonomes, ou encore, la distance d'indépendance  $l$ , qui est une caractéristique essentielle de l'hétérogénéité selon notre schéma.

On est donc amené à calculer la série des différences moyennes de voisinage aux différents niveaux de groupage, que nous appellerons variogramme (en soulignant qu'il ne s'agit pas de la même acceptation que chez M. MATHERON). Chemin faisant, on devra obtenir des estimations se contrôlant mutuellement des paramètres (moyenne, écart-type) de la population des unités autonomes, qui est, dans ce modèle, l'instrument fondamental de description de la population source.

g) On voit que cette procédure d'acquisition du « variogramme » réunit et coordonne toutes les opérations numériques de traitement de l'information, à l'exception de la transformation logarithmique préliminaire sur les valeurs de mesure brutes.

Le paragraphe qui suit décrit sommairement les algorithmes définis sur ordinateur pour ces diverses opérations de traitement.

### III. 3. Algorithmes employés

Soulignons tout d'abord l'importance de l'information à traiter :

- pour l'échantillon de grès des Vosges, en microperméabilité : 505 mesures;
- pour chaque section étudiée de l'échantillon de grès de Fontainebleau, 121 mesures de microperméabilité et de microdébit.

Cette densité de mesure était entièrement justifiée, dans un premier travail, pour l'étude soignée des relations de voisinage.

On a donc eu à traiter au total plus de 2200 mesures.

Les algorithmes requis pour le traitement numérique sont :

- d'une part, des algorithmes statistiques généraux, dans lesquels on peut signaler notamment : le rangement en classes, le classement (ou interclassement) en séquence ordonnée, l'algorithme de corrélation rectiligne.

Ces algorithmes <sup>(1)</sup> permettent d'obtenir directement tous les paramètres statistiques descriptifs d'une information soit simple (une seule série de valeurs rangées en mémoire), soit double (deux séries...);

— d'autre part, des algorithmes spécifiques du problème, c'est-à-dire immédiatement associés à la procédure du variogramme, décrites ci-dessus; on trouve ainsi :

a) L'algorithme de groupage en cellules, celles-ci pouvant être soit contiguës, soit en recouvrement les unes sur les autres. Nous parlerons ainsi des « cellules  $3 \times 3$  », des « cellules  $4 \times 4$  » avec recouvrement, etc. (fig. 13).

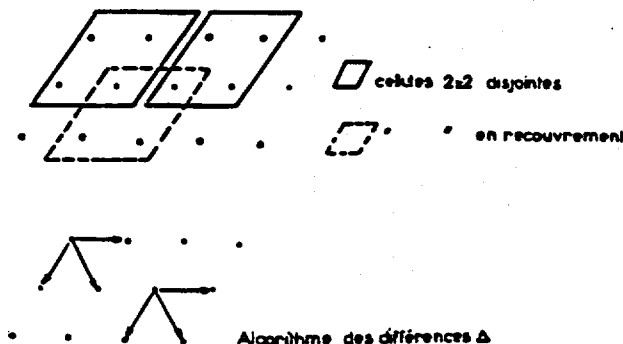


FIG. 13.

b) L'algorithme de différences de voisinage, qui, en chaque point peut calculer la moyenne arithmétique des valeurs absolues des différences avec les trois points voisins.

Les résultats fournis par ces deux algorithmes — employés dans l'ordre indiqué — sont traités statistiquement, pour chaque niveau de groupage, donnant ainsi les éléments du « variogramme ». Il est cependant utile, nous dirons même indispensable, de présenter par des schémas représentatifs (des cartes, en quelque sorte) les valeurs fournies par les deux algorithmes avant ce traitement statistique. Un programme particulier dit « de dessin de la carotte » a été établi dans ce but, et constamment utilisé.

L'emploi des algorithmes a été le suivant :

Pour les microperméabilités du grès des Vosges :

- groupage en cellules « disjointes » jusqu'à l'ordre  $6 \times 6$ ;
- différence de voisinage — à chaque niveau.

Un traitement statistique particulier, par lignes, a été aussi appliqué, nous le citons pour mémoire, renvoyant le lecteur à la référence (10).

Pour les microperméabilités, grès de Fontainebleau :

- groupage en cellules « disjointes »  $2 \times 2$  et  $3 \times 3$ ; cellules  $4 \times 4$  avec recouvrement;
- différences de voisinage;
- utilisation de l'algorithme de corrélation rectiligne.

Pour les microdébits, grès de Fontainebleau :

- groupage en cellules disjointes, même traitement que ci-dessus;
  - comparaison systématique des microperméabilités et micro débits, selon l'algorithme de corrélation.
- Nous présentons ci-après les résultats essentiels à retenir de ce traitement numérique et statistique <sup>(2)</sup>.

#### IV. DESCRIPTION DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ : INTERPRÉTATION QUANTITATIVE

Prenant comme référence le modèle statistique d'hétérogénéité décrit ci-dessus, nous rendrons compte, pour les divers ensembles de mesures :

- de la qualité de l'ajustement du modèle;
- des paramètres descriptifs auxquels on aboutit par analyse et synthèse des résultats partiels.

<sup>(1)</sup> L'ensemble des programmes statistiques généraux établis pour l'ordinateur CAB 500 a été décrit en référence (13).

<sup>(2)</sup> En rappelant que les détails et justifications divers peuvent être trouvés dans le rapport référence (10) et les comptes rendus effectués ultérieurement sur le sujet, dans le cadre des rapports à l'A. R. T. F. P.

#### IV. 1. Échantillon de grès des Vosges : étude des microperméabilités

##### IV. 1.1 Validité du modèle

Pour les données « cartographiques » disponibles dès le départ, la notion de corrélation de voisinage est nettement illustrée. L'affaiblissement de la liaison de voisinage est mise en évidence par les cartes obtenues aux niveaux successifs de groupage (fig. 14).

Le variogramme (fig. 15) précise ce résultat, indiquant que « l'unité autonome » est obtenue approximativement au niveau du groupage  $5 \times 5$ , ce qui correspond à  $3 \text{ cm}^2$  de surface environ et à une distance d'indépendance / voisine de 1 cm. Le caractère aléatoire de la distribution spatiale n'est toutefois pas démontré par la carte des moyennes ( $4 \times 4$ ), ou ( $5 \times 5$ ), qui reflète une direction privilégiée transversale aux cartes schématiques, et qui correspond à la direction NW-SE de la carte initiale des mesures brutes.

##### IV. 1.2 Paramètres descriptifs

C'est la dispersion en perméabilités qui caractérise surtout cet échantillon. Pour les mesures brutes on observait un facteur 500 (dix-neuf classes demi-binaires) de 1 md environ, à 500 md. Au niveau des cellules ( $5 \times 5$ ) la dispersion est encore de 12 classes demi-binaires, correspondant à un facteur de 64, entre 4,5 md et 300 md. La notion de perméabilité moyenne est, nécessairement, très mal définie dans un tel milieu. La donnée de  $k^* = 11.2$  et  $k = 27$  md pour la perméabilité moyenne géométrique n'a qu'une valeur indicative faible.

L'écart-type de perméabilité  $\sigma_k$  au même niveau ( $5 \times 5$ ) apparaît être, d'après le variogramme, de l'ordre de trois classes demi-binaires. Cependant, l'ultime test d'ajustement du modèle normal avec les valeurs de paramètres indiquées, à savoir la régularité de l'histogramme construit sur les unités autonomes, fournit une réponse négative (fig. 16).

Deux perturbations à la régularité statistique sont décelables a posteriori :

- l'organisation des valeurs selon une direction préférentielle ;
- l'existence d'un contraste très accusé entre le groupe des fortes et celui des faibles perméabilités : il paraît s'agir pour cette carotte, en fait, d'une juxtaposition de deux populations différentes.

Ces traits étaient d'ailleurs détectables par l'observation a priori. Pour le grès des Vosges, on doit conclure que la face de carotte de 10 cm de diamètre, étudiée, constitue un échantillon beaucoup trop petit de la roche, et qu'on ne peut pas espérer, à partir de cet échantillon seul, estimer une perméabilité moyenne dans la roche intéressée. La nécessité d'une étude complémentaire s'appuyant sur des échantillons adjacents au premier est indéniable.

#### IV. 2. Grès de Fontainebleau : étude des microperméabilités

En suivant le même plan que précédemment, nous donnerons directement une synthèse des résultats recueillis sur les sections individuelles. Constatant la faiblesse, dans ce cas, de la méthode de groupage en cellules, utilisée pour la recherche des paramètres du modèle statistique, nous exposerons ensuite une autre idée de recherche de la distance d'indépendance, basée sur l'algorithme de corrélation rectiligne, et qui se révélera beaucoup plus riche d'informations.

##### IV. 2.1 Description générale des microperméabilités d'après l'ensemble des sections

Ce matériau s'oppose au précédent par la dispersion beaucoup moindre des microperméabilités.

Pour l'ensemble des 847 valeurs disponibles au départ, on constatait un facteur 6 (de 20 à 120 md) ; au niveau des cellules ( $4 \times 4$ ) pour lesquelles nous avons 84 valeurs, on observe un facteur 2 environ (de 32 à 69 md).

La notion de perméabilité moyenne revêt ici un sens concret : divers prélèvements indépendants les uns des autres à l'intérieur de l'information de base conduisent à la valeur moyenne : 51 md.

Le procédé du « variogramme » fournit des résultats beaucoup moins nets que précédemment. Au niveau des cellules ( $4 \times 4$ ), la différence de voisinage moyenne n'indique pas nettement l'atteinte d'un maximum.

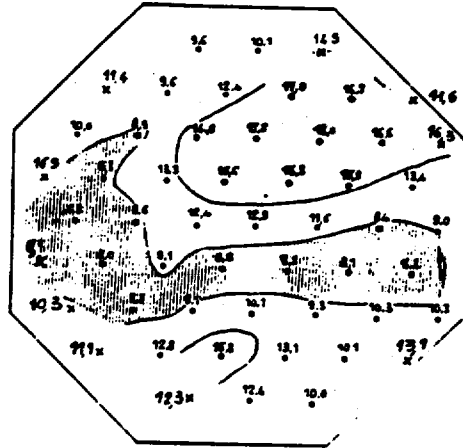
Ayant étudié, mais de manière non systématique, des groupages d'ordre supérieur, on pense que les cellules ( $6 \times 6$ ) sont supérieures à l'unité autonome. On peut estimer celle-ci à la dimension approximative ( $5 \times 5$ ). Il y aurait, dans ces conditions, cinq à six unités autonomes par face de 5 cm, et leur diamètre apparent serait de 2 cm environ, ce qui donne, ici encore, une distance d'indépendance / de l'ordre du centimètre.

Pour ces unités autonomes, l'écart-type, pour les « variogrammes » (fig. 17) apparaît légèrement inférieur à 1/6 de classe binaire, c'est-à-dire, à  $\pm 7$  md au voisinage de 50 md. On peut conclure de ceci, selon le mo-

Echantillon de grès des Vosges

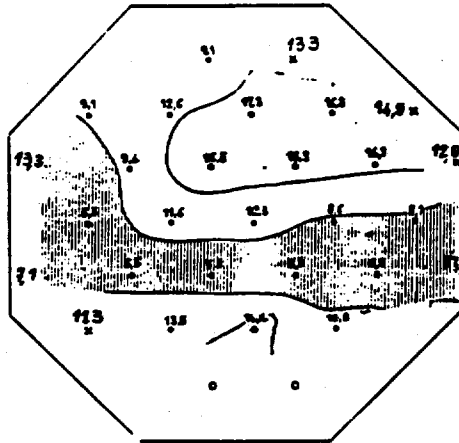
Cartes de la carotte aux différents niveaux de groupage

Cellules 3x3  
 • 43 Complètes  
 × 10 Incomplètes  
 (au moins 7/9)  
 (53)



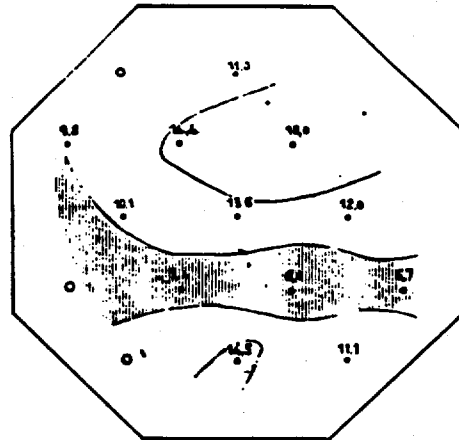
Proportion représentée  
 des mesures initiales  
 $(9 \times 43) = 387$  (78%) 465  
 76% 92%  
 moyenne et écart type  
 $\bar{k}_s(43)$  11,1 (1/53) 11,3  
 $\sigma k_s$  3,75 3,6  
 dispersion totale  
 14,9 14,5

Cellules 4x4  
 • 21 Complètes  
 × 7 Incomplètes  
 (au moins 12/16)  
 (28)



Proportion représentée  
 des mesures initiales  
 $(16 \times 21) = 336$  (65%) 490  
 65% 84%  
 moyenne et écart type  
 $\bar{k}_s(21)$  11,1 (1/28) 11,2  
 $\sigma k_s$  3,8 3,55  
 dispersion totale  
 11,5 11,5

Cellules 5x5  
 12 Complètes



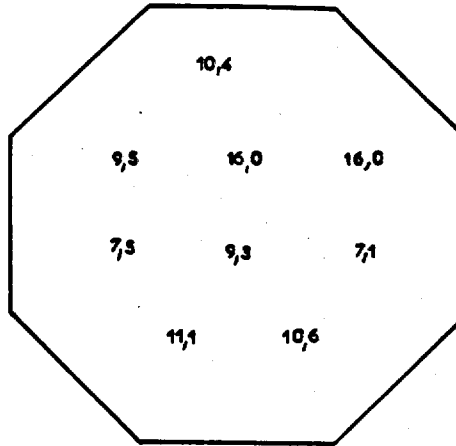
Proportion représentée  
 $(25 \times 12) = 300$   
 60%  
 $\bar{k}_s(12)$  11,2  
 $\sigma k_s$  3,4  
 dispersion 12,0

Légende

$k < 9$   $9 < k < 14$   $k > 14$

FIG. 14.

Groupage 6x6

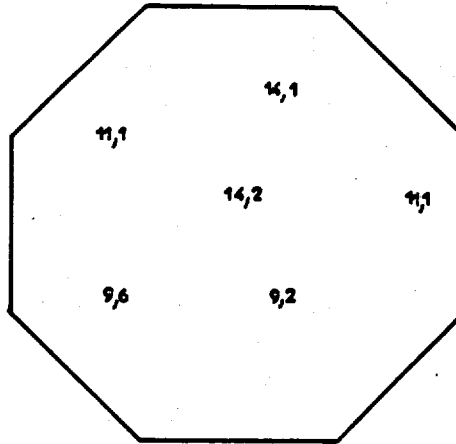


Proportion représentée  
 $(35 \times 9) = 324$   
 64%

moyenne et écart type

$\bar{k}_g$	1/91	10,9
$\sigma k_g$		3,0

Groupage 8x8



Proportion représentée  
 $(64 \times 6) = 384$   
 76%

moyenne et écart type

$\bar{k}_g$	1/6	11,6
$\sigma k_g$		2,0

Partage de la carotte

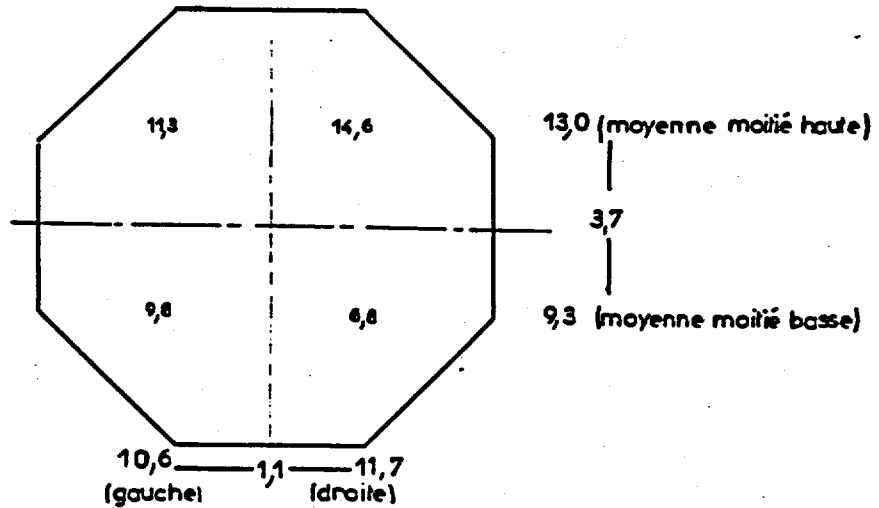
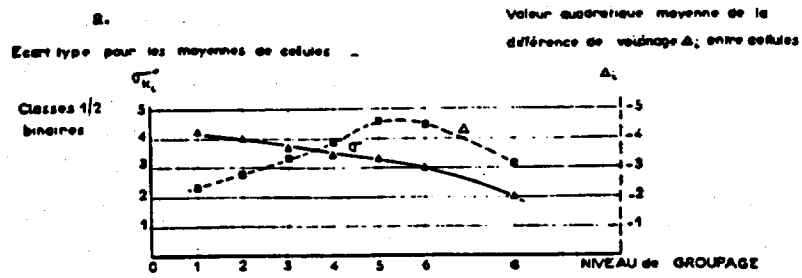


FIG. 14 bis.



b. — Variogramme, présentation modifiée : abscisses en 1/N.

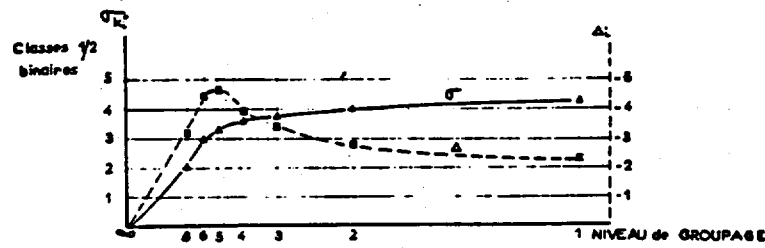


FIG. 15. — Grès des Vosges : micropérméabilités. Évolution des paramètres statistiques pour les moyennes de cellules aux différents niveaux de groupage : « variogramme ».

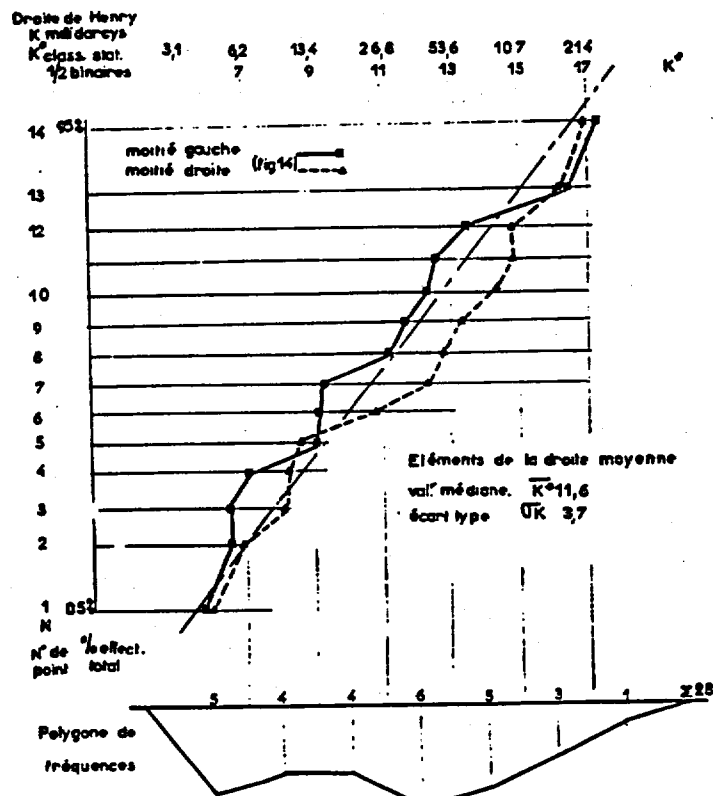


FIG. 16. — Grès des Vosges : micropérméabilités. Distribution statistique des moyennes de cellules ( $4 \times 4$ ).

GRES de FONTAINEBLEAU : MICROPERMEABILITES

— Sections successives: paramètres statistiques

— Histogramme de la population source (cellules 4x4)

aj N <sup>o</sup> convention. <sup>14</sup>	0	4	5	6	3	2	1		
moyenne $\bar{k}$ (mDy)	45,6	47,5	53,3	56,0	41,9	53,6	56,5	→ 50,6 (±5,2)	
Val. <sup>15</sup> brues disper. <sup>16</sup> (mDy)	55	70	97	63	75	88	55		
cellules(2x2) disper. <sup>16</sup> (mDy)	30	32	42	47	53	37	32	→ ±10mDy	
$\sigma$ écart type (mDy)	8,5	9	12	10,5	14	10	9		
cellules(3x3) disper. <sup>16</sup> (mDy)	24	22	30	35	28	37	24		
cellules(4x4) disper. <sup>16</sup> (mDy)	11	18	26	20	31	17	20		
	5,8cm								

b) moyennes de cellules (4x4)

a) sous ensemble (A<sub>0</sub> + A<sub>1</sub> + A<sub>3</sub> + A<sub>5</sub>)

1<sup>er</sup> tirage  
(16) 32,37,39,40,42,46,48,50,50,50,52,54,55,58,63,67

2<sup>er</sup> tirage  
(16) 31,34,39,41,41,45,48,48,49,50,55,56,60,61,63,69

b) sous ensemble (A<sub>2</sub> + A<sub>6</sub> + A<sub>4</sub>)

1<sup>er</sup> tirage  
(12) 38,43,45,48,48,52,53,54,58,58,58,67

2<sup>er</sup> tirage  
(12) 37,45,45,49,50,50,52,54,55,57,60,67

mDy	34	38	43	48	54	61	68	
1 <sup>er</sup> tirage	1	2	4	4	8	7	2	(28)
2 <sup>er</sup> tirage	1	2	3	4	7	7	3	(28)

ventilation en classe, ensemble des mesures.

Polygones de fréquence /28

1<sup>er</sup> tirage ——— 2<sup>er</sup> tirage - - - - -

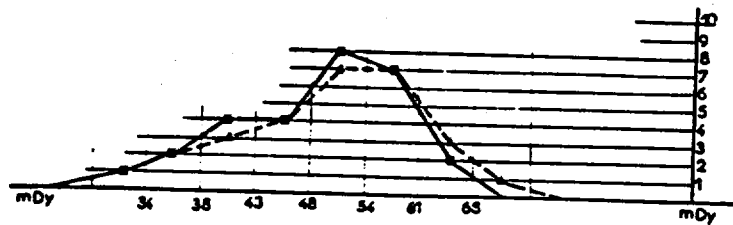


FIG. 17.



dèle, que la perméabilité moyenne sur deux faces (dix unités autonomes environ) aurait un écart-type de 2 md environ, autour de 51 md.

La qualité de l'ajustement global, au modèle de paramètres indiqués ci-dessus, des valeurs moyennes de cellules ( $4 \times 4$ ), est indiquée par les polygones de fréquence ci-joints (fig. 17). Leur régularité est indéniablement meilleure que pour le grès des Vosges. L'asymétrie de la figure laisse toutefois apparaître un groupe « perturbateur », de basses valeurs de la perméabilité, fourni par l'une des sections (la section 3).

En conclusion, on est conduit à juger que l'échantillonnage constitué par cet ensemble de sections, avec 121 mesures par face, est représentatif du milieu poreux intéressé et permet d'en décrire de façon relativement précise, la perméabilité globale.

#### IV. 2.2 Autre procédé de recherche des paramètres descriptifs. Corrélation par pas successifs

La méthode des groupages décrite au paragraphe III. 2 perd toute sensibilité lorsque les contrastes de perméabilité sont faibles, car, au fur et à mesure des groupages, la variance de la population diminuant, les différences entre cellules voisines ne deviennent plus guère significatives.

Une autre idée pour décrire la répartition spatiale consiste alors à considérer celle-ci, comme le résultat de la superposition de variations régionales à tendance lente et de fluctuations locales. Ces fluctuations peuvent très grossièrement être représentées par la répétition dans l'espace d'un certain motif suivant une certaine longueur d'onde moyenne  $\lambda$ . Ce concept de longueur d'onde est équivalent à celui d'échelle utilisé en introduction. La distance d'indépendance du modèle statistique introduit précédemment apparaît, dans cette optique, comme la demi-longueur d'onde de cette pseudo-périodicité. La recherche de cette longueur d'onde  $\lambda$  est aisée à partir de l'algorithme de corrélation : en effet si l'on compare les couples de valeurs  $k(\vec{M})$  et  $k(\vec{M} - \vec{\delta})$  séparées par un vecteur  $\vec{\delta}$ , ou pas, de plus en plus grand, la corrélation sera parfaite (positive ou négative), ou nulle suivant que ce pas  $\delta$  est égal à un nombre pair ou impair de  $\lambda/4$ . Le coefficient de corrélation obtenu variera entre  $-1$  et  $+1$  suivant la même période  $\lambda$ .

Dans la pratique, on ne peut attendre une telle périodicité de la part de ce coefficient de corrélation. Néanmoins, on peut espérer obtenir le début de la courbe, avec les premiers extremum, évidemment affaiblis. Les figures 18 et 18 bis montrent les résultats du traitement ainsi réalisé sur deux faces de l'échantillon de grès de Fontainebleau, pour les trois directions principales du maillage des valeurs initiales. Il ressort de ces figures :

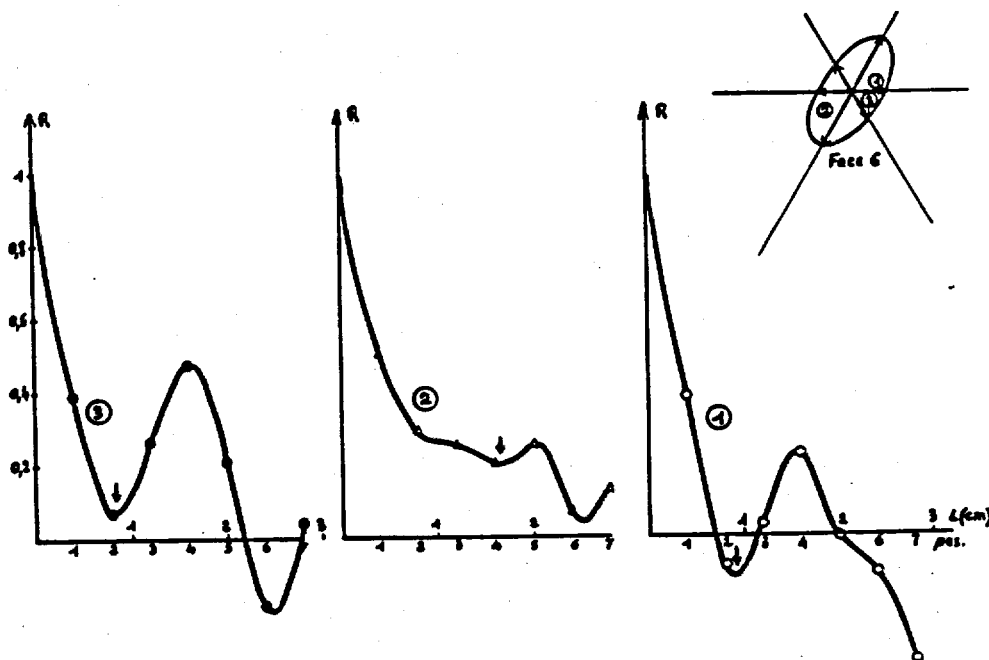


FIG. 18. — Grès de Fontainebleau : corrélations de voisinage et détermination de l'unité d'aire autonome.

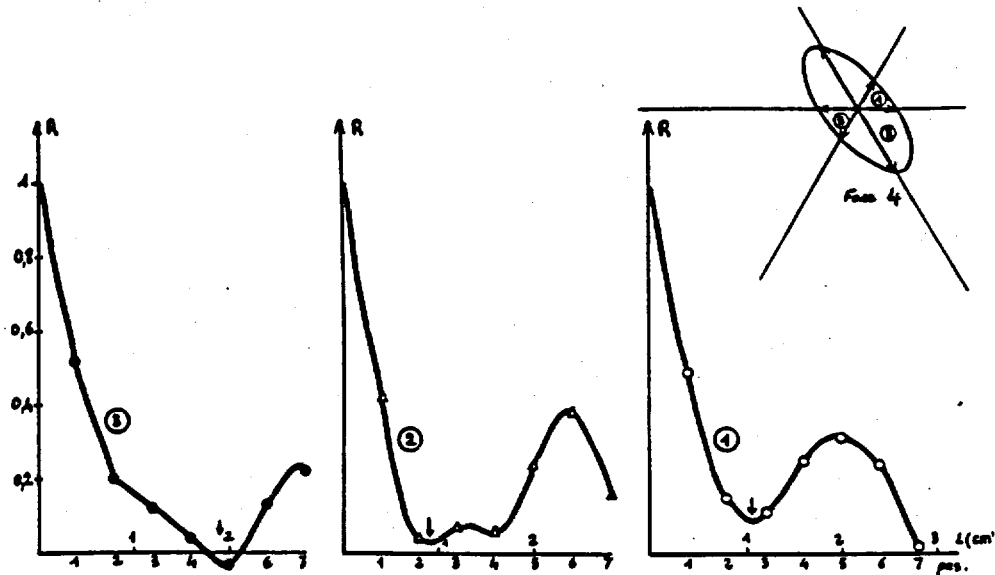


FIG. 18 bis. — Grès de Fontainebleau : corrélations de voisinage et détermination de l'unité d'aire autonome.

— une nette apparence de périodicité, avec notamment l'existence systématique d'un maximum, mais surtout, pour les faibles pas, la décroissance régulière du coefficient de corrélation, indice de l'affaiblissement de la relation de voisinage (et ceci indépendamment de toute idée de périodicité) ;

— la distance d'indépendance est ici parfaitement définie par la distance entre l'origine et le premier minimum. Elle apparaît égale en gros à 2.5 pas, ce qui se traduit bien par une longueur de 1 cm ;

— enfin, l'analyse suivant les trois directions fait clairement ressortir l'isotropie, ou l'anisotropie du matériau.

En portant dans chaque direction une longueur égale à la distance d'indépendance, on donne ainsi, comme il est indiqué sur les figures, une forme à la cellule autonome qui apparaît en outre dans l'optique présente comme le motif de base répété périodiquement dans le milieu.

Il conviendrait de confirmer cette optique de pseudo-périodicité, incompatible évidemment avec une distribution idéalement aléatoire, sur des domaines plus grands ; la méthode apparaît cependant beaucoup plus riche d'informations que la précédente, et fait notamment très bien ressortir, outre la distance d'indépendance, la forme de décroissance de la relation de voisinage.

## V. EFFETS DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ SUR L'ÉCOULEMENT MONOPHASIQUE INTERPRÉTATION QUANTITATIVE

Deux types d'expériences ont été réalisés, qui concernent tous deux l'écoulement monophasique. Celles-ci sont de portées très différentes, l'une analyse l'écoulement dans un milieu à structure simple (milieu stratifié d'Hassi-Messaoud), l'autre concerne l'étude des microdébits mentionnés précédemment dans le milieu plus complexe et déjà analysé qu'est le grès de Fontainebleau.

### V. 1. Écoulement en milieu structuré : échantillons cubiques d'Hassi-Messaoud

Cette approche présente une portée limitée : on sait naturellement que dans le cas d'un échantillon à stratifications parallèles, il existe deux perméabilités fondamentales, l'une pour un écoulement parallèle aux feuillets, égale à la moyenne arithmétique des perméabilités élémentaires de chaque feuillet, l'autre, pour un écoulement perpendiculaire aux feuillets, égale à la moyenne harmonique de ces mêmes valeurs. Dans ce cas simple, l'écoulement monophasique est parfaitement connu (14), nous avons cependant cherché à confirmer

ceci sur un certain nombre de plugs cubiques d'Hassi-Messaoud, se prêtant bien à cette vérification. En effet, il n'était pas évident a priori que le modèle suggéré par la structure du milieu soit le modèle expliquant l'écoulement monophasique.

L'étude en question (15) a donc consisté à comparer aux perméabilités globales parallèles et perpendiculaires aux feuillets, les perméabilités calculées à partir de la connaissance de ce modèle structural et de la mesure des perméabilités élémentaires de chaque feuillet, à l'aide du microperméamètre du paragraphe II. 2.1. La concordance est bonne, comme le montrent les figures 19 et 20. La bonne qualité de la corrélation entre valeurs mesurées et valeurs calculées confirme la validité du modèle dans le cas présent d'un tel milieu stratifié.

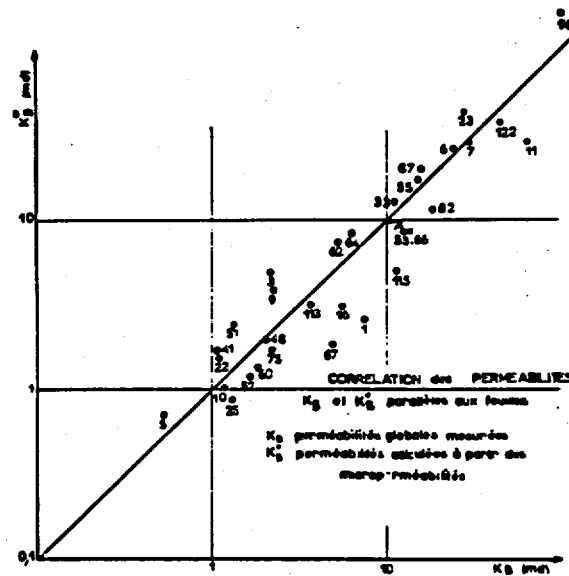


FIG. 19.

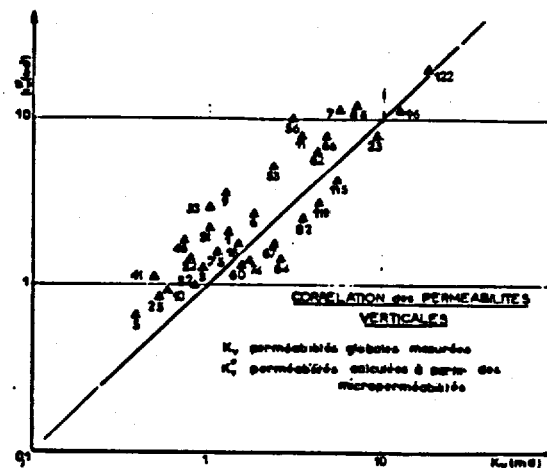


FIG. 20.

## V. 2. Écoulement en milieu non structuré : les microdébits dans le grès de Fontainebleau

L'étude des microdébits a été réalisée sur un grès de Fontainebleau, milieu beaucoup plus complexe, pour lequel la partie précédente a montré le genre de modèle que l'on pouvait envisager. Dans l'expérience des

microdébits réalisés tels que le paragraphe II. 2.2.1 l'indique, on recueille à la face de sortie une distribution de valeurs de débits élémentaires.

Dans cette étude l'idée directrice a été la suivante : dans l'écoulement global traversant l'échantillon, la valeur du débit total est également dépendante de la perméabilité de chaque tranche, quelle que soit sa distance,  $x$ , à la face de sortie, il en sera de même du niveau moyen des microdébits. Par contre, par suite de la répartition statistique des hétérogénéités, on peut penser que les fluctuations des microdébits, autour de leur valeur moyenne, seront en grande partie gouvernées par la valeur des perméabilités locales au point de mesure du débit. On a donc recherché systématiquement des corrélations entre les valeurs de microdébits et les microperméabilités, antérieurement mesurées aux mêmes points, ceci pour différentes longueurs de l'échantillon. Dans l'expérience réalisée, on a fait jouer à chaque face le rôle de face de sortie, afin de disposer de deux informations pour chaque longueur. Cette longueur a varié de 5,8 à 1 cm par pas de 1 cm.

Les figures 21 et 22 montrent la qualité de la corrélation dans les stades  $L = 5,8$  et 4 cm ; on note que les nuages de valeurs indiquent une corrélation assez forte. Le traitement numérique a permis de rendre quantitatives les observations visuelles faites sur ces nuages. Le tableau I suivant donne pour chaque stade de longueur et chaque face, les paramètres définissant le nuage, à savoir :

- le coefficient de corrélation  $R_{xy}$  (noté simplement  $R$ ), dont on sait qu'il est d'autant plus proche de 1 que la corrélation est meilleure ;
- la pente de l'axe de régression, qui indique la droite moyenne pour les microdébits (ordonnées) quand les microperméabilités (abscisses) sont supposées connues (pente du diamètre conjugué de la direction  $Oy$ ) ;
- la pente du grand axe de l'ellipse de dispersion.

TABLEAU I

$L$ cm	2		3		4		5		5,8	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Sens .....										
$R_{xy} = R$ .....	0,86	0,85	0,84	0,82	0,84 <sup>(1)</sup>	0,66 <sup>(2)</sup>	0,76	0,64 <sup>(2)</sup>	0,69	0,65 <sup>(2)</sup>
$R^2$ .....	0,74	0,72	0,71	0,67	0,71	0,44	0,52	0,41	0,48	0,42
Pente axe régression	0,74	0,73	0,79	0,68	0,70	0,59	0,77	0,56	0,69	0,60
Pente grand axe ...	0,83	0,83	0,92	0,80	0,81	0,86	1,03	0,81	0,99	0,88

<sup>(1)</sup> La valeur a normalement grande de  $R$  dans ce cas (fig. 23) est probablement due à la présence sur cette face d'une zone de très faibles perméabilités ( $< 25$  md), ce qui a pour effet d'allonger, donc d'améliorer, le nuage.

<sup>(2)</sup> Les valeurs plus faibles du coefficient de corrélation dans le sens 2 résultent probablement du fait que la face de sortie, la même dans les 3 cas, présente une liaison, avec sa voisine, beaucoup plus faible que les autres faces.

Quels sont les principaux résultats indiqués par ce tableau ?

En ce qui concerne le coefficient de corrélation, on note toujours une valeur élevée, parfois même très élevée, pour les faibles longueurs d'échantillon. Il faut remarquer cependant que le paramètre  $R^2_{xy}$ , qui représente la fraction de la variance expliquée par la corrélation, permet de se faire une idée plus juste de l'amélioration de la corrélation (car une augmentation de  $R$  ne signifie pas la même amélioration suivant que  $R$  est proche de 1 ou de 0). La figure 23 montre comment varie la qualité de la corrélation (d'autant meilleure que  $R^2$  est proche de 1), en fonction de la longueur  $L$  de la carotte. La première constatation évidente sur cette figure est que la longueur initiale n'était pas suffisante pour observer tout le phénomène.

Toutefois, on note que la corrélation s'améliore lentement quand la longueur diminue, jusqu'à 3 cm environ, longueur au-delà de laquelle la corrélation ne s'améliore plus et reste parfaitement stable. Bien que l'on ne dispose pas du phénomène entier, on peut effectuer cependant une interprétation qualitative. En effet, si les microdébits étaient également influencés par les zones traversées, indépendamment de leur distance à la face de sortie, il est aisé de comprendre que le niveau  $R^2$  de la corrélation s'affaiblirait rapidement, comme  $1/L$ , en fonction de la longueur. Le fait que la corrélation soit toujours bien meilleure confirme l'idée d'un écoulement fortement influencé par les zones proches de la face de sortie. Autrement dit, on aurait

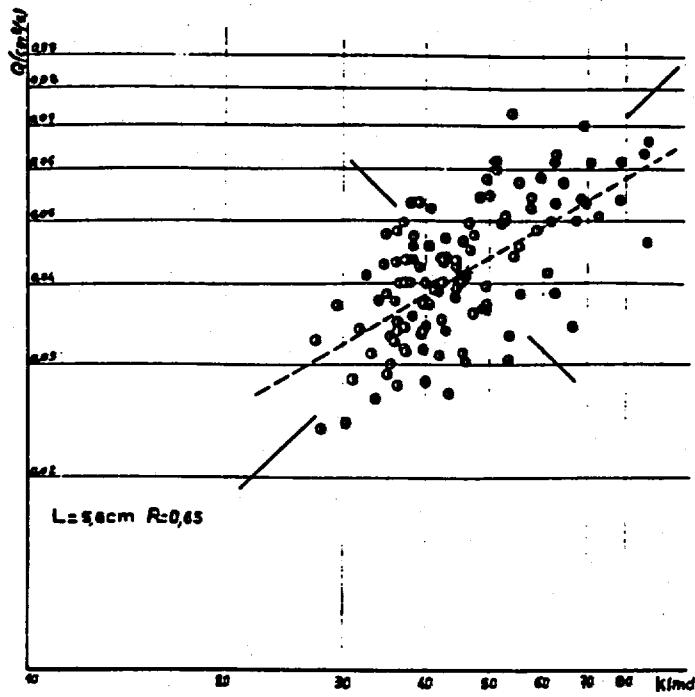


FIG. 21.

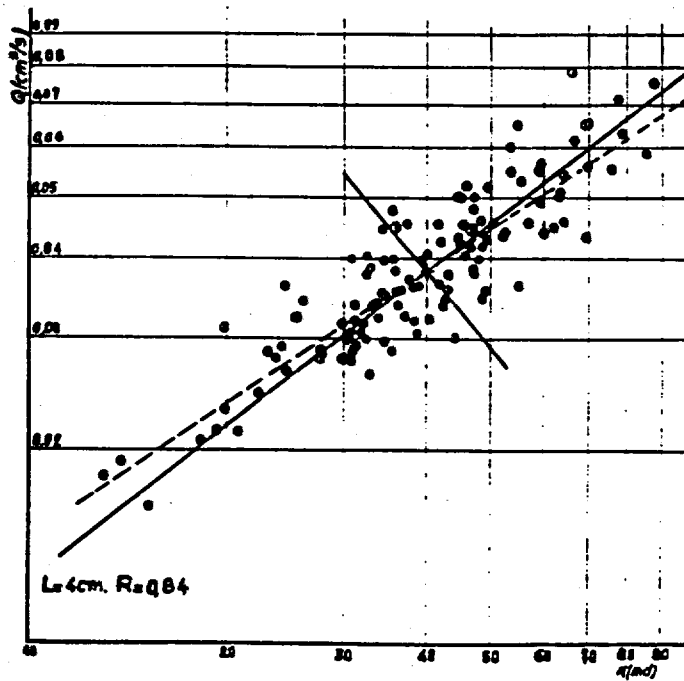


FIG. 22.

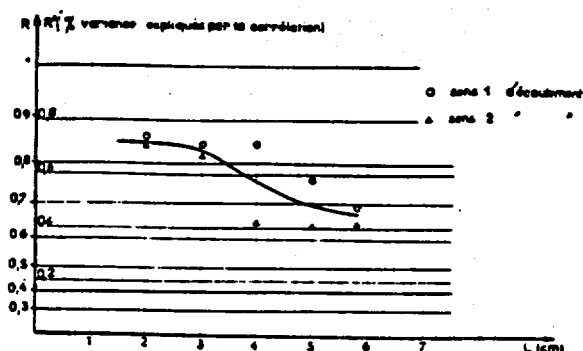


FIG. 23. — Évolution de la corrélation microporosités-microdébits en fonction de la longueur  $L$ .

dans l'écoulement un effet de moyenne pondérée, avec un coefficient de pondération, décroissant rapidement avec la distance  $x$  à la face de sortie, suivant la figure 24.

A ce stade d'ailleurs, il faut bien réaliser que le dispositif de microporosités ne fait pas autre chose que ceci, car l'écoulement radial provenant de la sonde intéresse tout le milieu, mais par suite d'un très fort coefficient de pondération seule la contribution d'une zone très proche de la sonde (que nous avons évaluée à 4 mm en profondeur) est perceptible.

On peut représenter schématiquement (fig. 25) pour les deux types de mesure la contribution respective en fonction de la profondeur. Celle-ci est différente, car sinon on n'aurait pas une corrélation mais une relation parfaite entre les deux grandeurs. La qualité de la corrélation montre toutefois que les façons de pondérer ne sont pas très éloignées l'une de l'autre ; théoriquement on peut concevoir que l'on aurait pu choisir une sonde qui nous aurait donné l'identité entre les deux mesures.

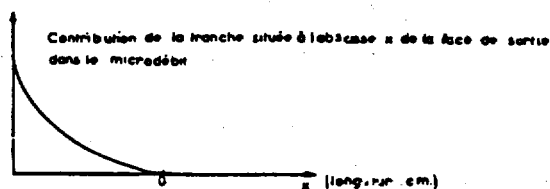


FIG. 24.

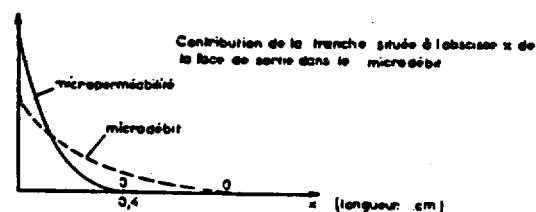


FIG. 25.

Mais avec le choix actuel on ne peut espérer, quelle que soit la diminution de la longueur de la carotte, améliorer le niveau de la corrélation au-delà d'une certaine limite.

C'est bien ce que l'on voit sur la figure 23 : la corrélation se stabilise pour les longueurs inférieures à 3 cm. Ce seuil de longueur (de même d'ailleurs que le niveau absolu de la corrélation), n'est donc pas spécifique du milieu poreux, mais bien plus des caractéristiques techniques des deux mesures.

Il faut donc bien sentir l'influence propre des appareillages de mesures, ce qui ne modifie en rien d'ailleurs le résultat important, à savoir que dans l'écoulement monophasique, si la valeur moyenne du débit dépend également des perméabilités de toutes les zones traversées, par contre l'écart à cette valeur moyenne en un point dépend essentiellement de la valeur locale de la perméabilité.

Il resterait à trouver la loi de pondération en fonction de la distance, ou du moins, la distance au-delà de laquelle le milieu cesse d'intervenir sur les fluctuations du débit (point O sur les figures 24 et 25). Ce seuil, contrairement au seuil dont on a parlé précédemment, serait caractéristique de la roche. Malheureusement la présente expérience ne nous a pas permis de le définir de façon précise, l'échantillon ayant été pris trop court au départ. Tout au plus, sur la figure 23, peut-on saisir la tendance vers un nouveau palier indiquant une corrélation indépendante de la distance. Cette distance caractéristique qui délimiterait la zone qui gouverne les fluctuations de débit, n'est évidemment pas égale à la distance d'hétérogénéité,  $l$ , que met en évidence l'étude descriptive, mais probablement lui est-elle liée, peut-être est-ce un petit nombre de fois cette longueur.

Cette interprétation, selon laquelle les fluctuations du débit sur une tranche sont essentiellement gouvernées par les perméabilités locales de cette tranche et des tranches voisines, permet de comprendre toutes les autres propriétés déduites des corrélations précédentes :

— la bonne stabilité de la pente du grand axe de l'ellipse de dispersion, autour de la valeur 1. Ceci indique que la variance totale est identique pour les deux mesures microdébit et microporoméabilité :

— la bonne stabilité de la pente de l'axe de régression autour de la valeur 0,75. Ceci, compte tenu de la valeur élevée du coefficient de corrélation, ne fait que confirmer le résultat précédent :

— enfin, le dernier résultat qui résulte de la corrélation : l'identité des distributions pour les microporoméabilités et les microdébits. Ces deux distributions sont identiques et ont même variance, parce que, l'une comme l'autre ne sont en fait que des mesures de perméabilité locale, les microdébits étant un peu moins fins que les microporoméabilités, tout au moins suivant la profondeur, puisque leur influence se fait sentir à une distance de la surface plus grande.

## VI. CONCLUSION

L'étude, dont ce qui précède reproduit certains des résultats, s'est fixée comme objectif de décrire les hétérogénéités qui se rencontrent à une échelle moyenne (centrimétrique) dans les milieux poreux, et d'explicitier l'influence de celles-ci sur les phénomènes d'écoulement en milieu poreux.

Il faut voir dans ce qui précède les premières tentatives dans ce but, et il est bien certain que, tant en ce qui concerne l'aspect descriptif, que le deuxième aspect de l'influence sur les écoulements, les résultats présentés ici sont très fragmentaires.

Pour ce qui touche à l'aspect descriptif en effet, l'idée directrice doit être la recherche de modèles pouvant représenter les milieux naturels en vue des problèmes d'écoulements. Dans cette optique, nous avons tenté de décrire en milieu poreux comme la juxtaposition de grandes zones indépendantes entre elles et réparties au hasard. Mais d'autres types de schémas seraient possibles :

— On pourrait par exemple, tenter de décrire un milieu de la façon suivante : la superposition de variations régionales à tendance lente, à des fluctuations locales qu'elles modulent en quelque sorte. Ces fluctuations pourraient grossièrement être représentées par la répétition d'un certain motif suivant une certaine « longueur d'onde » caractéristique du type d'hétérogénéité. Il faudrait également introduire une notion d'orientation, moyennant quoi ce schéma pourrait très bien s'adapter aux milieux stratifiés.

— On pourrait également définir un modèle par la donnée des valeurs aux points d'un maillage très lâche, avec une loi de définition des relations de voisinage, donnant les valeurs entre les nœuds du maillage.

De même, pour ce qui touche l'analyse de l'influence sur les phénomènes d'écoulement, seul l'écoulement monophasique est abordé ici. Le cas de l'écoulement polyphasique est beaucoup plus complexe. On peut penser notamment que la perméabilité monophasique n'étant pas la seule source d'hétérogénéité, la connaissance des hétérogénéités de perméabilité ne sera pas suffisante pour décrire l'écoulement de plusieurs phases. La présence de ces hétérogénéités diverses pourrait rendre perceptible l'influence de paramètres réputés inopérants telles que la vitesse de déplacement, ou les viscosités.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) MARLE (C.). — Réflexions sur la caractérisation du milieu poreux. Rapport I. F. P., réf. n° 7 522, juin 1962.
- (2) MARLE (C.) et POTTIER (J.). — Aspect théorique du déplacement miscible en milieu poreux pour la récupération du pétrole. *Rev. Inst. Franç. du Pétrole*, 1965, XX, 2, p. 338-366.
- (3) MARLE (C.) et SIMANDOUX (P.). — Déplacement miscible en milieu hétérogène — Réservoir constitué par deux strates homogènes. Rapport I. F. P., réf. n° 11 533, janv. 1965.
- (4) STILES (W. E.). — Use of permeability distribution in water flood calculations. *Trans. A. I. M. E.*, 1949, 186 p. 9.
- (5) DYKSTRA (H.) et PARSONS (R. L.). — The prediction of oil recovery by waterflood. *Secondary Recovery in the U. S., A. P. I.*, 1950, 2nd ed., p. 161.
- (6) HIATT (N. W.). — Injected-fluid coverage of multiwell reservoirs with permeability stratification. *Drill. and Prod. Practice, A. P. I.*, 1958, p. 165.
- (7) SCHMALZ (J. P.) et RAHME (H. S.). — The variation in water-flood performance with variation in permeability profil. *Prod. Monthly*, July 1958, 14, p. 9.
- (8) WARREN (J. E.) et COSGROVE (J. J.). — Prediction of water-flood behavior in a stratified system. *Paper presented at S. P. E. Permian Basin oil Recovery Conference*, Midland, 1963.

- (9) WARREN (J. E.) et PRICE (H. S.). — Flow in heterogeneous porous media. *S. P. E. J.*, 1961, I, 3, p. 153.
- (10) DUPUY (M.), MORINEAU (Y.) et SIMANDOUX (P.). — Étude des hétérogénéités d'un échantillon de milieu poreux. Rapport I. F. P., réf. n° 10951, juill. 1964.
- (11) MORINEAU (Y.). — Mise en évidence des hétérogénéités de filtration des milieux poreux naturels par quelques méthodes expérimentales simples et rapides. Rapport I. F. P., réf. n° 11 534, janv. 1965.
- (12) LAW (J.). — A statistical approach to interstitial heterogeneity of sand reservoirs. *Trans. A. I. M. E.*, 1964, 155, p. 202.
- (13) DUPUY (M.). — Ensemble de programmes CAB 500 pour les opérations statistiques élémentaires et le traitement de l'information. Rapport I. F. P., réf. n° 11401, 1964.
- (14) MARLE (C.). — Étude de l'anisotropie des perméabilités sur une carotte d'Hassi-Messaoud. Rapport I. F. P., réf. n° 8 766, juill. 1963.
- (15) SIMANDOUX (P.). — Application des mesures de microporosités à l'étude des perméabilités de plugs cubiques d'Hassi-Messaoud. Rapport I. F. P., réf. n° 11 388, déc. 1964.

## DISCUSSION

1. Professeur GABILLARD (*I. R. E. L.*, Lille). L'idée la plus simple consiste à admettre un mode de répartition aléatoire des perméabilités. Dans ce cas, la fonction d'autocorrélation, que vous avez introduite, ne devrait pas présenter de maxima, mais devrait se traduire simplement par une décroissance spécifique de l'hétérogénéité. A votre avis, l'existence des maxima sur les fonctions d'autocorrélation est-elle due à une certaine organisation physique des hétérogénéités, ou au contraire est-ce simplement le fait d'un domaine d'intégration limité ?

P. SIMANDOUX (*Institut Français du Pétrole*, Rueil-Malmaison). Il est probable en effet que les hétérogénéités de perméabilités n'obéissent pas à une répartition aléatoire parfaite, et c'est ce que l'on suppose en introduisant cette pseudo-périodicité dans les fluctuations. Quant à l'influence du domaine d'intégration, nous n'avons pas encore de résultats complets sur des domaines beaucoup plus grands pour trancher. On peut penser, toutefois, que dans un domaine beaucoup plus grand, l'apparition d'autres longueurs d'onde, en conservant cette image des longueurs d'ondes, inobservables sur les échantillons utilisés, aura pour effet d'atténuer par des superpositions, l'apparente périodicité vue sur les figures.

2. D. CODREANU (*Institut de Recherches pour le Forage et l'Extraction de Campina*, Roumanie). Je voudrais féliciter les auteurs de cette communication traitant en détail des hétérogénéités des roches. Je pense que les recherches menées dans cette voie aboutiront à mieux faire comprendre et à mieux interpréter les phénomènes complexes qui ont lieu dans un gisement au cours de son exploitation.

En Roumanie nous avons essayé d'obtenir des infor-

mations sur la distribution des données de perméabilité entre les puits en partant des données des perméabilités des échantillons de tout le gisement et des perméabilités moyennes des zones obtenues à partir des courbes de remontée de pression. Les observations faites dans certains cas, ont montré que pratiquement la distribution des perméabilités des échantillons, de même que celle des perméabilités moyennes obtenues à partir des courbes de remontée de pression, ne contredisent pas l'hypothèse d'une distribution log-normale. On peut donc, suivant M. MATHERON, écrire la relation suivante, liant la variance  $\sigma^2_{p/g}$  des perméabilités des échantillons rapportée à l'ensemble du gisement, la variance  $\sigma^2_{z/g}$  des perméabilités moyennes des zones par rapport à l'ensemble du gisement, et la variance  $\sigma^2_{p/z}$  des perméabilités des échantillons rapportée à ces zones :

$$\sigma^2_{p/g} = \sigma^2_{p/z} + \sigma^2_{z/g}$$

Ainsi, connaissant la variance des perméabilités des échantillons dans le gisement, à partir des analyses sur échantillons, et la variance des perméabilités moyennes des zones à partir des courbes de remontées de pression, on peut en déduire la variance des échantillons dans ces zones. Il résulte d'ailleurs de la formule précédente que cette variance des perméabilités des échantillons alentour des puits est la même pour chaque puits, seules les moyennes diffèrent.

On peut ainsi obtenir des informations sur la distribution des perméabilités dans les zones situées entre les puits, à partir des mesures dans les puits.

Je voudrais signaler, enfin, que la relation précédente, établie théoriquement, a été vérifiée sur un réseau de résistances sur lequel on a réparti selon un processus aléatoire des perméabilités obéissant à une loi log-normale.