

# Sur le Dispersement et l'Écart Moyen de l'Écoulement des Eaux Souterraines

## III. Expériences Faites dans le Sol

par Kiugoro Kitagawa

(Reçu le 9 février 1935)

### Sommaire

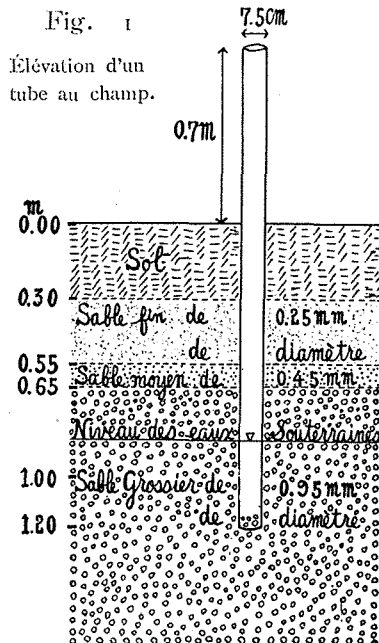
Dans les Notes précédentes, on a étudié avec un appareil de laboratoire le dispersement et l'écart moyen d'un courant d'eau à travers le sable, et trouvé leurs régimes qui sont très importants.

Dans la Note présente, on étend les expériences à un sol naturel, pour étudier le dispersement et l'écart moyen de l'écoulement des eaux souterraines, et on établit le régime de la proportionnalité du dispersement et de l'espace parcouru. Puis on vérifie dans un cas défini la formule théoriquement établie sur la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines.

### § 1 Disposition et Données des Expériences Faites dans le Sol

On a précédemment précisé l'idée du dispersement d'un courant d'eau dans le sol, et calculé l'écart moyen de l'écoulement des eaux souterraines. Depuis lors on a fait construire un appareil<sup>1</sup> de laboratoire, avec lequel écart et circuit du courant d'eau ont été mesurés, et l'on a vérifié notre idée du dispersement, tout en trouvant de nouveaux résultats importants. Proposons-nous maintenant d'expérimenter en plein sol, en choisissant pour terrain une partie du jardin de l'École Supérieure d'Agriculture de Mié.

**Premier cas.**—Le 27 septembre, on plante à intervalles réguliers



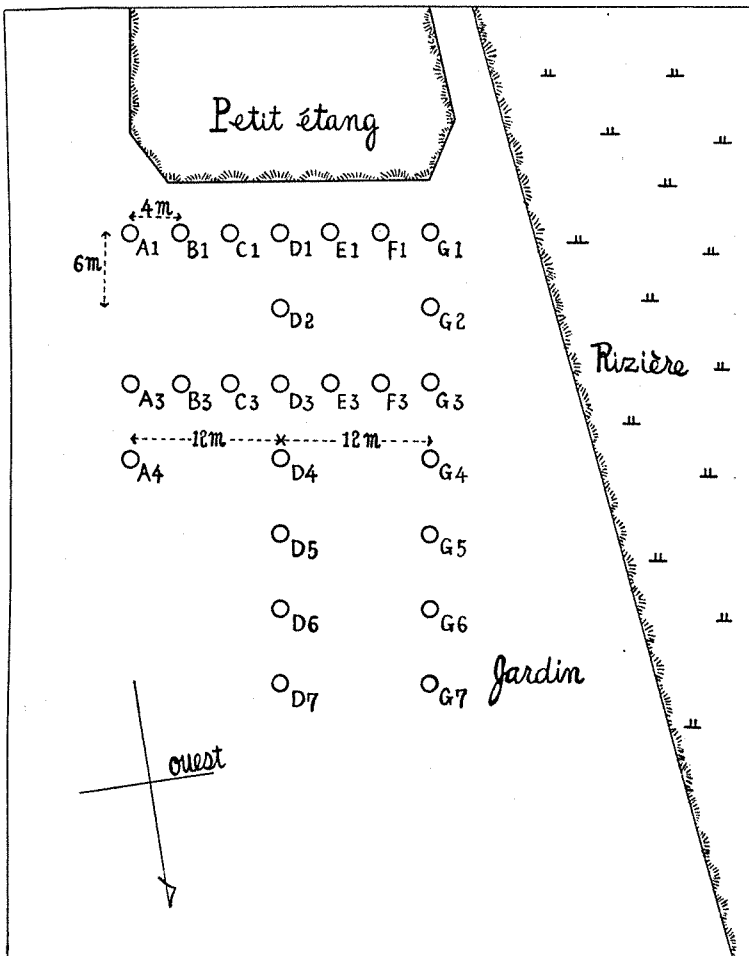
1. K. Kitagawa, ce Mémoire, 15, 4, 203 (1932)

2. K. Kitagawa, ce Mémoire, 17, 1, 37 (1934), et 17, 6, 431 (1934)

dans cette partie du jardin 25 tubes métalliques de 7.5 cm de diamètre, et de 1.9 m de longueur, et on les enterre jusqu'à 1.2 m de profondeur. La figure annexe 1 représente l'élevation d'un tube enterré, le sol se composant de terre, de sable fin de 0.25 mm de diamètre, de sable moyen de 0.45 mm, et de sable grossier de 0.95 mm. La figure ajoutée 2 montre le plan des 25 positions des tubes dans cette partie du jardin, dont la surface est plate et plus haute d'un mètre que celle de la rizière. Par conséquent, la pente de pression hydraulique fait face à l'ouest, sa grandeur variant de 0.002 à 0.003 en

Fig. 2

Plan des 25 positions de tube.



septembre et octobre, et diminuant de moitié de ces nombres en novembre et décembre. L'eau s'écoule donc à travers le sous-sol d'une façon erratique vers l'ouest. Le 14 octobre, à dix heures du matin, on introduit dans le tube nommé A4 1.3 kg de sel. Après cette charge, on puise dans les tubes D's et G's de l'eau qui s'est écoulée à travers le sous-sol, et on évalue par l'emploi du nitrate d'argent sa salinité, calculant ainsi les écarts de l'écoulement. Voici deux séries de résultats fournis par les expériences, dans des conditions aussi pareilles que possible; l'écart type  $\sigma$  et la distribution de fréquence moyenne  $a$  étant calculés par la méthode des moments, en prenant comme unité: 6 m (Tableaux I (1), et I (2)), et en désignant par  $x_1$  la distance entre le tube A4 et la ligne des tubes dont on contrôle la sali-

Tableau I (1)

$x_1 = 12$  m.

Positions	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Moyenne $\bar{y}$	$\Sigma y$	$\Sigma^2 y$
D <sub>1</sub>	0	0	0	0	16.9	10.4	10.2	4.0	13.3	11.9	6.7	100.0 $\equiv S_0$	
D <sub>2</sub>	33.3	33.3	28.6	28.6	25.4	20.8	20.4	20.0	16.7	16.9	24.4	93.3	227.2 $\equiv S_1$
D <sub>3</sub>	33.3	33.3	42.9	35.7	33.9	27.1	26.5	30.0	25.0	25.4	31.3	68.9	133.9
D <sub>4</sub>	33.3	33.3	28.6	35.7	16.9	20.8	20.4	20.0	16.7	16.9	24.3	37.6	65.0
D <sub>5</sub>	0	0	0	0	3.4	8.3	8.2	6.0	8.3	3.4	3.8	13.3	27.4
D <sub>6</sub>	0	0	0	0	1.7	6.3	8.2	8.0	8.3	16.9	4.9	9.5	14.1
D <sub>7</sub>	0	0	0	0	1.7	6.3	6.1	12.0	11.7	8.5	4.6	4.6	4.6
Date	15 oct.	24 "	29 "	2 nov.	5 "	6 "	7 "	9 "	10 "	14 "	$a = 3.27, \sigma = 1.42$		472.2 $\equiv S_2$
Temp.	21°C	20	19	18	17	17	17	17	17	16			

Tableau I (2)

$x_1 = 24$  m.

Positions	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Moyenne $\bar{y}$	$\Sigma y$	$\Sigma^2 y$
G <sub>1</sub>	0	0	33.3	7.9	9.8	10.5	15.9	14.5	13.8	13.5	11.9	100.0 $\equiv S_0$	
G <sub>2</sub>	50.0	33.3	33.3	34.2	27.5	26.3	23.8	24.2	21.5	24.3	29.8	88.1	262.1 $\equiv S_1$
G <sub>3</sub>	50.0	33.3	0	26.3	23.5	21.1	19.0	21.0	21.5	16.2	23.2	58.3	174.0
G <sub>4</sub>	0	0	0	0	3.9	7.0	7.9	8.1	9.2	9.5	4.6	35.1	115.7
G <sub>5</sub>	0	0	0	0	3.9	7.0	7.9	8.1	6.2	4.1	3.7	30.5	80.6
G <sub>6</sub>	0	0	0	0	7.8	3.5	4.8	3.2	4.6	10.8	3.5	26.8	50.1
G <sub>7</sub>	0	33.3	33.3	31.6	23.5	24.6	20.6	21.0	23.1	21.6	23.3	23.3	23.3
Date	15 oct.	24 "	29 "	2 nov.	5 "	6 "	7 "	9 "	10 "	14 "	$a = 3.62, \sigma = 2.15$		705.8 $\equiv S$
Temp.	21°C	20	19	18	17	17	17	17	17	16			

nité. La valeur absolue de la concentration de salinité de l'eau puisée est dans cette expérience au plus de 0.1 ‰. Le 27 octobre, on introduit une deuxième fois 2 kgs de sel dans le tube A4.

**Deuxième cas.**—Puis le 22 novembre, on change les tubes de positions, comme le montre la figure ci-jointe (Fig. 3), et on introduit une troisième fois 2 kgs de sel dans le tube A4 le 28 novembre.

On calcule les résultats des expériences à partir du 29 novembre.

Voici deux séries de résultats qui se déduisent, dans des conditions aussi pareilles que possible, des dites expériences (Tableaux II (1), et II (2)).

Fig. 3

Plan des 30 positions de tube.

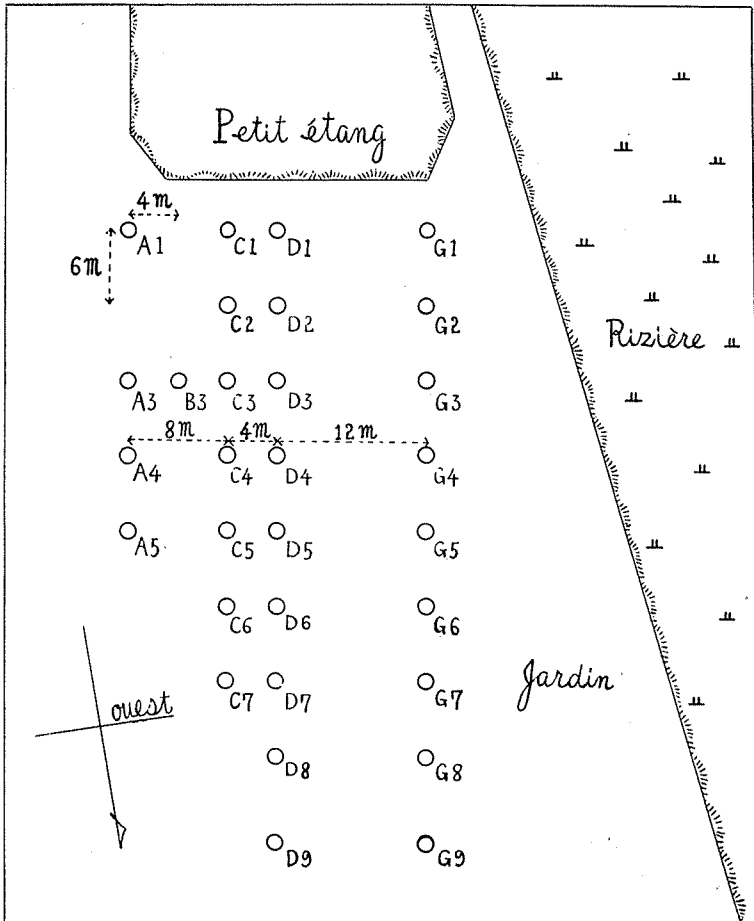


Tableau II (1)

$x_1 = 8$  m

Positions	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Moyenne $\equiv y$	$\Sigma y$	$\Sigma^2 y$
C <sub>1</sub>	17.9	18.6	21.4	17.1	11.9	21.4	20.0	19.5	14.6	21.3	18.4	100.1 $\equiv S_0$	
C <sub>2</sub>	12.8	11.6	11.9	8.6	14.3	11.9	7.5	12.2	12.2	17.0	12.0	81.7	285.2 $\equiv S_1$
C <sub>3</sub>	15.4	14.0	11.9	14.3	14.3	14.3	17.5	12.2	17.1	12.8	14.4	69.7	203.5
C <sub>4</sub>	17.9	14.0	16.7	14.3	19.0	16.7	17.5	17.1	14.6	14.9	16.3	55.3	133.8
C <sub>5</sub>	7.7	16.3	14.3	17.1	14.3	11.9	15.0	12.2	9.8	8.5	12.7	39.0	78.5
C <sub>6</sub>	12.8	11.6	11.9	14.3	11.9	14.3	12.5	14.6	14.6	12.8	13.1	26.3	39.5
C <sub>7</sub>	15.4	14.0	11.9	14.3	14.3	9.5	10.0	12.2	17.1	12.8	13.2	13.2	13.2
Date	29 nov.	30 "	1 déc.	3 "	4 "	5 "	6 "	7 "	8 "	10 "	$\alpha = 3.85, \sigma = 2.02$		753.7 $\equiv S_2$
Temp.	14°C	13	13	13	13	13	13	13	13	12			

Tableau II (2)

$x_1 = 12$  m.

Positions	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	Moyenne $\equiv y$	$\Sigma y$	$\Sigma^2 y$
D <sub>1</sub>	9.7	11.6	9.5	10.8	10.8	11.0	10.8	9.4	11.1	10.5	10.5	100.1 $\equiv S_0$	
D <sub>2</sub>	12.5	14.5	13.5	13.5	12.0	12.2	12.0	11.8	11.1	11.6	12.5	89.6	358.6 $\equiv S_1$
D <sub>3</sub>	18.1	20.3	21.6	20.3	18.1	22.0	20.5	22.4	22.2	23.3	20.0	77.1	269.0
D <sub>4</sub>	13.9	14.5	13.5	13.5	12.0	13.4	13.3	14.1	13.3	11.6	13.3	56.2	191.9
D <sub>5</sub>	6.9	7.2	5.4	6.8	7.2	7.3	7.2	8.2	6.7	5.8	6.9	42.9	135.7
D <sub>6</sub>	8.3	5.8	6.8	6.8	9.6	6.1	7.2	5.9	7.8	9.3	7.4	36.0	92.8
D <sub>7</sub>	9.7	7.2	9.5	9.5	9.6	9.8	9.6	7.1	8.9	8.1	8.9	28.6	56.8
D <sub>8</sub>	11.1	13.0	12.2	10.8	10.8	9.8	10.8	10.6	11.1	11.6	11.2	19.7	28.2
D <sub>9</sub>	9.7	5.8	8.1	8.1	9.6	8.5	8.4	10.6	7.8	8.1	8.5	8.5	8.5
Date	29 nov.	30 "	1 déc.	3 "	4 "	5 "	6 "	7 "	8 "	10 "	$\alpha = 4.58, \sigma = 2.53$		1141.5 $\equiv S_2$
Temp.	14°C	13	13	13	13	13	13	13	13	12			

§ 2 Proportionnalité du Dispersemment et de l'Espace Parcours

Dans une Note précédente<sup>1</sup>, on a vérifié par l'expérience avec un modèle de laboratoire que le dispersemment du courant d'eau dans le sable est proportionnel à l'espace parcouru : à savoir

$$\frac{\sigma}{x_1} = \text{const.} \dots (1) \quad \sigma \text{ désignant l'écart type du dispersemment,}$$

et  $x_1$  l'espace parcouru par l'eau. Afin de vérifier en plein sol cette

1. K. Kitagawa, ce Mémoire, 17, 1, 37 (1934)

règle, calculons les valeurs numériques par les données expérimentales comme suit :

**Premier cas.**—On a, grâce aux Tableaux I (1) et I (2),

$$\text{avec } x_1=12\text{m, } \frac{\sigma}{x_1} = \frac{6 \times 1.42}{12} = 0.72 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{et avec } x_1=24\text{m, } \frac{\sigma}{x_1} = \frac{6 \times 2.15}{24} = 0.54 \quad \dots\dots\dots(3)$$

Le rapport de  $\frac{\sigma}{x_1}$  montre que la déviation du régime (1) est dans ce cas de l'ordre de vingt pour cent.

**Deuxième cas.**—On a, grâce aux Tableaux II (1) et II (2),

$$\text{avec } x_1=8\text{m, } \frac{\sigma}{x_1} = \frac{6 \times 2.02}{8} = 1.52 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{et avec } x_1=12\text{m, } \frac{\sigma}{x_1} = \frac{6 \times 2.53}{12} = 1.27 \quad \dots\dots\dots(5)$$

Le rapport de  $\frac{\sigma}{x_1}$  montre que la déviation du régime (1) est dans ce cas de l'ordre de dix pour cent. Par conséquent, la proportionnalité de l'écart moyen à l'espace parcouru peut être considérée comme bien établie en plein sol, en tenant compte de la variété des conditions expérimentales, et des écarts d'observation.

### § 3 Vérification de la Formule de la Vitesse de l'Écoulement des Eaux Souterraines

Nous avons introduit, comme cité plus haut, dans le tube A<sub>4</sub> 1.3 kg de sel à dix heures du matin le 14 octobre, et nous avons trouvé pour la première fois une trace de salinité dans le tube G<sub>2</sub> à deux heures de l'après midi le lendemain. On suppose donc que dans le sous-sol la vitesse du courant d'eau est :

$$V_1 = 22 \frac{\text{m}}{\text{jour}} \quad \dots(6) \quad \text{l'espace parcouru entre A}_4 \text{ et G}_2 \text{ étant}$$

égal à 26 m.

D'autre part, on a la formule<sup>1</sup> sur la vitesse  $V$  de l'écoulement des eaux souterraines :

$$V = 31.89 \frac{d^2 \eta}{\mu k} \frac{\text{m}}{\text{jour}} \quad \dots(7) \quad d \text{ désignant le diamètre moyen}$$

en mm du sable,  $\eta$  la pente de pression hydraulique,  $\mu$  le coefficient

1. K. Kitagawa, ce Mémoire, 15, 4, 212 (1932)

de viscosité,  $k$  le vide du sous-sol.

Calculons, de cette formule (7), la vitesse du courant d'eau, en portant les valeurs numériques des constants  $d$ ,  $\eta$ ,  $\mu$  et  $k$ :  $\eta=0.0025$  en divisant par l'espace parcouru 26 m la différence de pression hydraulique 6.5 cm.  $d=0.95$  mm. donné par mesure.  $\mu_{10^{\circ}}=0.00984$  d'après les tableaux<sup>1</sup>.  $k=0.3513$  le vide moyen géométriquement calculé<sup>2</sup>. En conséquence, on obtient

$$V=21 \frac{\text{m}}{\text{jour}} \dots (8) \quad \text{ce qui est presque la même valeur}$$

que celle de (6). C'est une vérification de la formule (7) théoriquement déjà établie sur la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines.

Pour terminer ce Mémoire, nous désirons adresser tous nos remerciements à M. le professeur T. Nomitsu qui nous a donné, au cours de ces recherches, des conseils très importants.

Nous remercions également la Fondation Nippon-Gakujutu-Sinkokai dont la subvention nous a été très précieuse pour ce travail.

---

1. MM. Landolt, Phys. Chem. Tabellen, 1, 137 (1923)  
2. K. Kitagawa, ce Mémoire, 15, 4, 211 (1932)