

Zeitschrift: Archives des sciences physiques et naturelles
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 45 (1918)

Artikel: Le phénomène magnétocalorique
Autor: Weiss, Pierre / Piccard, Auguste
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-743004>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 13.01.2026

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

LE

PHÉNOMÈNE MAGNÉTOCALORIQUE

PAR

Pierre WEISS et Auguste PICCARD

(Avec 1 fig.)

I. Au cours d'expériences ayant pour objet le relevé exact d'un réseau d'isothermes de l'aimantation du nickel en fonction du champ, dans le voisinage du Point de Curie, nous avons observé des variations très sensibles de la température, accompagnant l'établissement ou la suppression du champ.

L'appareil comprend un four électrique contenant la substance et dont la température est indiquée à un centième de degré près par un couple constantan-argent. La substance est aimantée par un électro-aimant dont le champ est connu en fonction du courant d'excitation. L'aimantation se mesure par la méthode balistique en faisant glisser la substance, avec le four qui la contient, du centre d'une bobine induite au centre d'une autre bobine identique dont l'enroulement est de sens contraire¹.

Quand la température est voisine du Point de Curie et que l'on établit un champ de 15 000 g, on observe un échauffement pouvant atteindre 0°,7. Si l'on supprime le champ, l'échauffement disparaît. Si, l'effet de l'établissement du champ s'étant produit, on attend que la substance ait repris la température

¹ PICCARD, A. *Arch.* 1917, vol. 44, p. 467.

du four, la suppression du champ produit l'effet inverse. Le couple accuse un refroidissement.

La réversibilité de cet effet suffit à marquer la différence avec le phénomène bien connu de la chaleur d'hystérèse. L'ordre de grandeur aussi est différent. La chaleur d'hystérèse ne produit, même pour un acier très dur, qu'une élévation de température de $1/200$ de degré par cycle. Pour le nickel elle est encore beaucoup plus faible.

On pouvait supposer une action du champ magnétique sur la force électromotrice du couple. Nous nous sommes assurés par des expériences indépendantes que cette action n'existe pas ou du moins qu'on peut lui assigner une limite supérieure de $1/200$ de degré. Il serait d'ailleurs bien invraisemblable que le couple fût sensible au champ magnétique seulement dans le voisinage du Point de Curie du nickel.

II. Ce phénomène est, comme la discontinuité de la chaleur spécifique au Point de Curie, une conséquence du champ moléculaire. La chaleur élémentaire communiquée à l'unité de masse est, pour un gaz paramagnétique :

$$dQ = c_\sigma dt - Hd\sigma$$

où c_σ est la chaleur spécifique à aimantation constante, σ l'aimantation spécifique et H le champ magnétique.

Cette quantité devient pour une substance où les actions mutuelles d'orientation s'expriment par un champ moléculaire H_m :

$$dQ = c_\sigma dt - (H + H_m) d\sigma$$

et l'on a, pour un phénomène adiabatique :

$$dt = \frac{(H + H_m)}{c_\sigma} d\sigma$$

Mais les mesures magnétiques qui étaient le but premier de notre travail, ont montré que, conformément à l'hypothèse primitive du champ moléculaire, celui-ci est proportionnel à l'aimantation

$$H_m = n \cdot \sigma$$

En négligeant le champ extérieur par rapport au champ molé-

culaire, approximation souvent permise, on a par conséquent :

$$dt = \frac{n}{2c_\sigma} d\sigma^2$$

L'élévation de température est proportionnelle à l'accroissement du carré de l'aimantation.

On peut se dispenser de faire cette approximation. Tant que l'aimantation n'est pas trop grande pour être considérée comme proportionnelle au champ total $H + H_m$, c'est-à-dire pratiquement jusqu'à la moitié de la saturation absolue au moins, on a :

$$\frac{\sigma}{H + H_m} T = C$$

où C est la Constante de Curie. En adjoignant à cette formule la relation donnée par la théorie du champ moléculaire

$$Cn = \Theta$$

où Θ est le Point de Curie, on trouve :

$$dt = \frac{T}{\Theta} \frac{n}{2c_\sigma} d\sigma^2$$

qui ne diffère de la formule approchée que par le facteur $\frac{T}{\Theta}$ peu différent de l'unité dans la région où le phénomène a une certaine importance.

Dans l'application de cette formule il convient de faire une distinction entre les variations apparentes et réelles de l'aimantation.

D'après la théorie du champ moléculaire il se produit, dans des éléments de volume de grandeur suffisante pour que le champ moléculaire puisse s'y développer, une aimantation spontanée de grandeur et de direction déterminées. La direction dépend, dans chacun de ces éléments de volume, des propriétés magnétocrystallines et des accidents de la structure microscopique. Elle est donc livrée au hasard. La substance, bien que fortement aimantée, paraît non magnétique par compensation. Le champ extérieur fait dévier l'aimantation de la direction qu'elle a prise spontanément et la rapproche de sa propre direc-

tion. L'aimantation primitivement cachée devient ainsi sensible à l'observation. A la température ordinaire, dans les métaux ferromagnétiques usuels, cet effet constitue à lui seul presque toute l'aimantation donnée par les méthodes de mesures classiques, et l'aimantation à saturation n'est autre que l'aimantation spontanée complètement orientée.

Au dessus du Point de Curie l'aimantation spontanée n'existe pas et toute variation d'aimantation produite par le champ est réelle.

A faible distance au dessous du Point de Curie, en même temps qu'il se produit une aimantation apparente par orientation de l'aimantation spontanée, le champ a pour effet de changer d'une manière appréciable la grandeur réelle de l'aimantation. A chaque accroissement du champ correspondent donc des accroissements réels et apparents superposés.

Pour observer le phénomène dans sa pureté, il faut donc opérer au dessus du Point de Curie. Pour le nickel étudié, ce point est à $629^{\circ},6$ abs. A $634^{\circ},9$ nous avons trouvé, en faisant varier le champ de zéro aux valeurs de la première colonne, et inversement de ces valeurs à zéro :

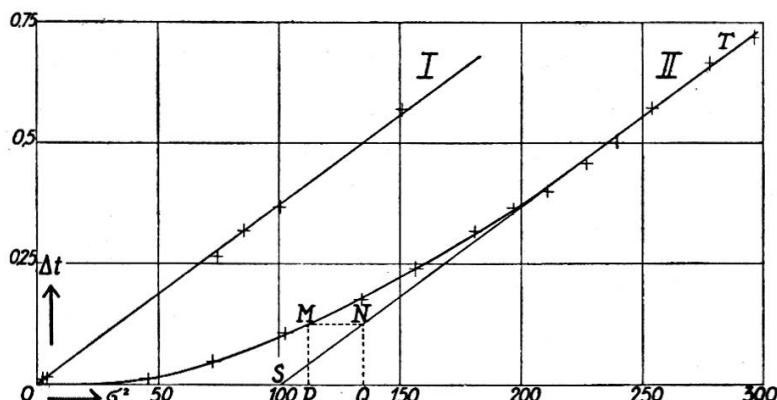
H	Δt°	σ^2	$\frac{\Delta t}{\sigma^2}$
990	0,011	2,18	(0,00505)
1320	0,014	4,04	(0,00347)
7820	0,264	74,5	0,00355
8780	0,317	85,5	0,00371
10050	0,370	100,8	0,00367
14960	0,569	151,0	0,00377

On se rend compte, par la représentation graphique, en I dans la figure, et aussi par les nombres de la dernière colonne du tableau, que la variation de température est bien proportionnelle au carré de l'aimantation. Les deux premiers points, correspondant à des effets très faibles et difficilement mesurables avec une certaine précision relative, ont été pris pour s'assurer que Δt et σ^2 tendent vers zéro dans un rapport fini.

Le tableau suivant contient une série de mesures faites au dessous du Point de Curie, à $627^{\circ},2$ abs.

H	Δt°	σ^2
320	0.011	45.8
660	0.048	72.5
1320	0.106	102.3
2330	0.176	134.5
3340	0.240	156.2
4670	0.319	181.2
5640	0.367	197
6600	0.399	211
7820	0.458	227
8780	0.500	239.5
10050	0.572	254
12320	0.665	278
14230	0.718	296.5

Ces mesures sont représentées par la courbe II. Elle part tangentielle à l'axe des σ^2 . D'abord des accroissements



notables de l'aimantation, dus pour la plus grande partie à l'orientation de l'aimantation spontanée, ne donnent lieu qu'à de très faibles phénomènes thermiques. Puis, l'aimantation réelle se développant de plus en plus, la courbe se relève, et lorsqu'à partir de $\sigma^2 = 200$ environ l'orientation est parachevée et tout accroissement d'aimantation est réel, la courbe II devient sensiblement parallèle à la droite I. Il doit en effet en être ainsi d'après la théorie développée ci-dessus, avec l'approximation consistant à remplacer $\frac{T}{\Theta}$ par l'unité.

III. On peut interpréter les courbes I et II en disant que les abscisses représentent les valeurs apparentes du carré de l'ai-

mantation et les ordonnées les valeurs vraies à une autre échelle. Quand il y a une aimantation spontanée, ces dernières sont comptées à partir du carré de cette quantité. Si l'aimantation était dès le début orientée dans la direction du champ, la courbe II serait remplacée par la ligne OST où OS est le carré de l'aimantation spontanée. Comme ST est donné par l'expérience il en résulte que les mesures calorimétriques combinées avec les mesures d'aimantation donnent sans ambiguïté l'aimantation spontanée.

Mais ce n'est pas tout. Soit OP une valeur observée du carré de l'aimantation apparente. PM représentera l'excès du carré de l'aimantation vraie sur celui de l'aimantation apparente à l'échelle des ordonnées. On revient à l'échelle des abscisses en traçant MNQ. OQ est le carré de l'aimantation vraie correspondant à OP. Le phénomène magnétocalorique donne donc la grandeur de l'aimantation vraie, abstraction faite de sa direction dans la substance.

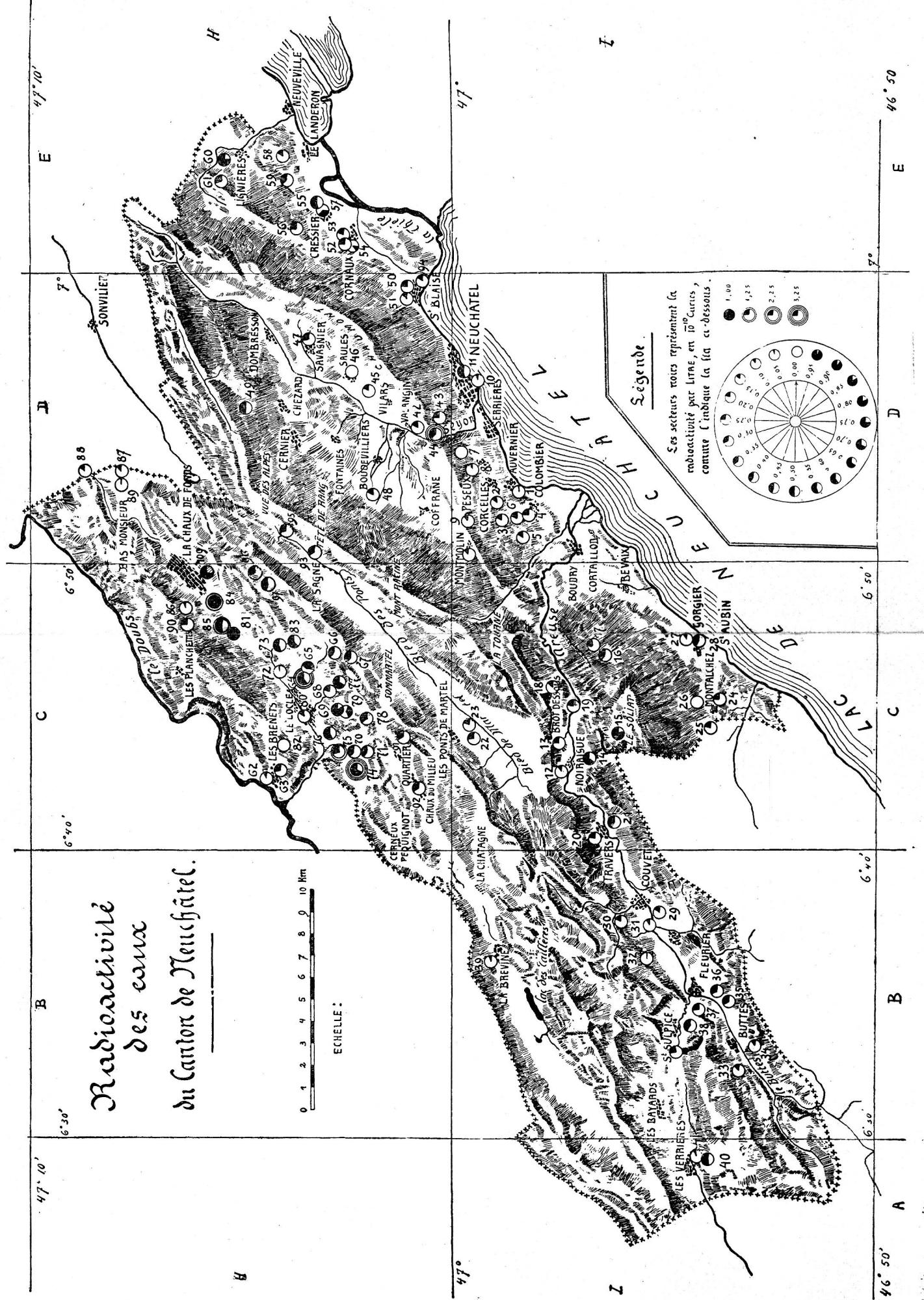
IV. Les observations du phénomène magnétocalorique ont toutes été faites 25 secondes après la fermeture ou la rupture du courant d'excitation de l'aimant. Ce retard était imposé par la lenteur de l'établissement et de la disparition du champ. Pendant ce temps la différence de température entre le corps et le milieu, c'est-à-dire le four électrique, diminue dans un rapport constant. Le phénomène est donc en réalité plus grand que les valeurs observées. Une pièce d'argent, servant à fixer la sphère de nickel dans le four, augmente sa capacité d'environ 15 % et agit dans le même sens. Néanmoins il est intéressant de calculer la valeur absolue du phénomène d'après la formule:

$$dt = \frac{n}{2c_\sigma} d\sigma^2$$

en empruntant à des mesures d'aimantation inédites $n = 70\,000$ et à l'étude calorimétrique¹ la chaleur spécifique vraie du nickel immédiatement au dessus du Point de Curie, $c_\sigma = 0,1256$ cal. p. degré. On trouve :

$$dt = 0,00665 d\sigma^2$$

¹ WEISS, PICCARD et CARRARD, *Arch. 1917*, vol. 43. p. 11.



valeur 1,8 fois plus grande que la valeur observée 0,0037, ce qui est parfaitement plausible.

V. La démonstration expérimentale du phénomène magnétocalorique serait facile s'il ne fallait, pour l'observer avec une certaine ampleur, porter la substance à une température voisine du Point de Curie, maintenir cette température constante et mesurer exactement ses variations. Elle serait beaucoup plus simple pour une substance dont le Point de Curie serait à la température ordinaire. Tel est le cas de certains ferronickels irréversibles, de titre en nickel voisin de 25 ou 30 %, quand par une élévation de température préalable on les a amenés à l'état non magnétique à la température ordinaire. Nous avons examiné à cet effet une petite collection de ferronickels que nous devons à M. Ch.-Ed. Guillaume et nous avons trouvé que le métal contenant 27 % de nickel et 2 % de carbone donne, dans un champ de 21 000 g. un effet de 0°,34 environ qui varie peu dans l'intervalle de 8° à 37°. On est donc dans le voisinage de son maximum. Avec cette substance la démonstration du phénomène magnétocalorique devient une expérience de cours des plus faciles.

VI. En résumé, ce nouveau phénomène apporte une confirmation frappante de la théorie du champ moléculaire qui rend compte de toutes ses particularités et aurait pu le faire prévoir.

Il est intéressant aussi comme moyen d'investigation, en permettant de déduire de l'aimantation apparente observée l'aimantation vraie, débarrassée de l'effet de raccourci produit par son inclinaison sur la direction du champ. Dans l'établissement d'un réseau précis d'isothermes de l'aimantation, étude actuellement en voie d'exécution, on pourra tracer, à côté des isothermes de l'aimantation apparente, les isothermes de la grandeur vraie, particulièrement précieuses pour le contrôle de la théorie.

Enfin dès à présent le phénomène magnétocalorique a donné la valeur de l'aimantation spontanée à quelques températures. Ces déterminations sont d'accord avec celles que l'on peut déduire de mesures purement magnétiques.

RECHERCHES
SUR LA
RADIOACTIVITÉ DES EAUX
NEUCHATELOISES ET SEELANDAISES

PAR

H. PERRET et A. JAQUEROD

(Avec 6 fig. et 1 planche)

(*Suite*).

VI. ÉTUDE GÉNÉRALE.

A. Tables. — Les tableaux suivants résument les résultats de nos recherches. La colonne intitulée « Position sur la carte » permet de situer les sources : ainsi, 86, C . H, indique la source N. 86, dans le rectangle de la carte ayant C comme abscisse et H comme ordonnée¹.

Chaque source est représentée par un petit cercle comprenant un secteur noir plus ou moins grand. Ce secteur est proportionnel à la quantité d'émanation par litre de la source, comme l'indique la légende qui accompagne la carte.

La colonne intitulée « Teneur totale » donne, pour chaque source, le produit de l'émanation par litre par le débit. Ce dernier, il est bon de le rappeler, n'est qu'approximatif, car il est souvent très difficile de l'évaluer exactement par une méthode simple. Parfois, nous n'avons aucune indication à ce sujet.

¹ Voir la planche I.

Sources neuchâteloises.

N°	Nom de la source	Date	Debit en l par m	Temp. eau	Eman. par l 10^{-10} C	Eman. totale	Position sur la carte
1	Abbesse	22- 1-16	4	5	traces	traces	
2	Ruz Chatru	22- 1-16		6	0,19		
3	Grand' Vigne	22- 1-16		11	0,22		
4	Bregot	9- 9-15	80	8	0,25	20	
5	Epinettes	9- 9-15	40	8	0,18	72	
6	Roty	9- 9-15	80	9	0,22	18	
7	Plan des Faougs	15- 1-15		11	rien		
8	Les Guches	15- 1-15		10	traces		
9	Glettrens	2- 8-15			0,13		
10	Neuchâtel (lac)	28- 9-16		12	0,06		
11	Neuchâtel (éliers)	28- 9-16		12	0,54		
12	Noiraigue (?)	6- 4-15	8	12	0,10	1,52	C. I.
13	La Noiraigue	6- 4-15	15000	6	0,24	3600	
14	Oeuillons	12- 8-16	6	9	0,65	3,9	
15	Fontaine froide	13- 8-16	3	8	0,79	2,37	
16	Mont. de Boudry	28- 5-16		9	rien		
17	Mont. de Boudry	29- 1-16			0,47		
18	Combe grise	15- 3-16	40	8	0,17	6,68	
19	Moillat	15- 3-16	75	7	0,23	17,25	
20	Chez le Bois	5- 3-15	36	8	0,24	8,64	
21	Château Gredin	5- 3-15	1600	10	0,45	720	
22	Les Ponts (ferr.)	26-11-14			0,27		
23	Les Ponts (sulf.)	26-11-14			0,20		
24	Pré St-Pierre	3- 7-15	5	14	0,25	1,25	
25	Pré Juard	3- 7-15	30	12	0,23	6,9	
26	Corne du Bois	3- 8-15	5 $\frac{1}{2}$	13	rien		
27	Les Tannes	26- 2-15	300	7	0,40	30	
28	Brenaz	26- 2-15	45	7,5	0,46	1,61	
29	Grandes Prises	19- 2-15			0,16		B. I.
30	Pré Chardon	18- 2-15	100	4,5	0,15	15	
31	Neyri	16-12-15	85	6	0,11	9,35	
32	Tailleu	16-12-15	22	8	traces		
33	La Doubs	20- 4-15	600	7	0,45	90	
34	Araignée	20- 4-15	75	8	0,10	75	
35	Breuil inférieur	13- 9-15	2	8	0,38	0,64	
36	Les Raisses	13- 9-15		7,5	0,32		
37	Sassel	13- 9-15	2	9	0,27	0,54	

N°	Nom de la source	Date	Débit	Temp. eau	Eman. par l	Eman. totale	Position sur la carte
38	Sagnette	15- 9-15	25	9	0,42	10,05	B. I.
39	La Brévine (ferr.)	20- 1-15			0,08		
40	Les Aujets	24-12-14		12	0,52		A. I.
41	La Fille	24-12-14		11	0,06		
42	Cergnat	7- 7-14			0,21		D. H.
43	Pierre à Bot	22- 6-14			0,25		
44	Trois Pigeons	30- 6-14			2,40		
45	Villars (Village)	27-12-15	10	10	0,20	2	
46	Saules	27-12-15	3	5	rien	rien	
47	Rosey	11- 6-15	1	10	0,27	0,27	
48	La Creuse	20- 7-14			0,18		
49	Fontenay	28- 9-14			0,50		
50	St-Blaise (tunnel)	12- 9-15	3	14	0,24	0,72	
51	Ruau	1-10-15	120	10	0,12	14,4	
52	Les Barbes	6-11-15	puits		0,25		E. H.
53	Les Planches	6-11-15			0,20		
54	Sur le Peu	4-11-15	10	6	0,15	1,5	
55	Cressier (fontaine)	12- 4-15	900	10	0,53	477	
56	Montruz	12- 4-15	fort	9	0,26		
57	Cressier (Eviers)	12- 4-15		8	0,31		
58	Landeron (réservoir)	10- 3-15	72	6	0,17	12,4	
59	Combazin	10- 3-15	18	8	0,36	6,68	
60	Les Brous	18- 6-15	2	13,5	0,78	1,55	
61	Clemenau	18- 6-15		9,5	0,27		
62	Les Crêtes	1-12-14			0,09		C. H.
63	Grands Prés	1-12-14		10	0,27		
64	Combe Girard	22-10-14	4	8	2,62	10,48	
65	La Jacques	5- 9-14	8	11	0,48	3,84	
66	Entre-Deux-Monts	22- 7-15	7	5	0,39	2,73	
67	Roches de la Sagne	22- 7-15	50	6,5	0,41	20,5	
68	La Jaluse	22- 1-17	7,5	5	0,20	1,5	
69	Les Replates	6- 9-17	4	11,5	0,88	35,2	
70	Varodes	26- 6-16	3,8	9,5	0,47	1,79	
71	Crozot	9-10-16	puits	10	0,311		
72	Combe Robert	19-10-16	1,5	6,5	traces	traces	
73	Le Rocher	19-10-16	50	10	0,56	28	
74	Vioulou (pâture)	24- 6-17	6	7	3,71	22,26	
75	Calames (école)	28- 6-17	1	12	1,38	1,38	
76	Molière	9- 7-17	35	9	0,57	20	

N°	Nom de la source	Date	Débit en l par m	Temp. eau	Eman. par l	Eman. totale	Position sur la carte
77	La Claire (Haut)	1- 8-17	10	7	0,72	7,2	C. H.
78	Combe Jeanneret	6- 9-17	8	8	0,41	32,8	
79	Replates (Haut)	13- 8-17	6	11	0,34	1,44	
80	Crêt Perrelet	29- 8-17	12	11	0,14	1,68	
81	Eplatures	16-11-17	7	8	1,04	7,28	
82	Les Frêts (Combôles)	29- 9-17	2,25	13,5	rien	rien	
83	Combe des Enfers	27-10-16	40	6	0,59	23,6	
84	Eplatures	16-11-17	16	7,5	2,02	32,32	
85	Eplatures	16-11-17	1,3	7	1,54	2	
86	La Recorne	9-12-16	4	6,5	0,06	0,24	
87	Bas Monsieur	2- 9-15	puits	8	0,09		D. H.
88	Moulin de la Roche	2- 9-15	15	5	0,11	1,65	
89	Bas Monsieur	2- 9-15	puits	9	traces		
90	Pouillerel	17-11-17	faible	5,5	0,25		C. H.
91	Le Quartier	16-11-17	2,5	5	0,36	0,90	
92	Chaux-du Milieu	16-11-17	4,5	6	0,37	1,67	
93	Charbonnière	25-11-17	20	4	0,34	6,8	D. H.
94	St-Blaise	20- 9-16	4	8	0,15	0,60	
95	Roche des Crocs	23-11-17	12	4	0,29	3,48	
96	Les Roulets	27-11-17	puits	4	0,36		
97	Les Roulets	27-11-17	puits	5	0,48		
109	Chaux-de-Fonds	3-12-17	1	7	0,73	0,73	
110	Chaux-de-Fonds	10-12-17	1	6,5	0,42	0,42	
111	Le Chalet	20-12-17	80	4	0,11	8,8	

Quelques sources bernoises¹.

N°	Nom de la source	Date	Débit	Temp. eau	Eman. par l	Eman. totale
98	Puits Racheter	13- 5-14		11	0,42	
90	Puits Méroz	14- 7-14		12	0,31	
100	Taubenloch I	25- 5-16	4	10	0,10	0,40
101	Taubenloch II	25- 5-16	2	10	0,12	0,24
102	Bienne (éviers)	24- 6-15		12	0,12	
103	Macolin	22- 6-16	9	10	0,08	0,72
104	Brühl	12- 4-14	8	11	0,35	2,80
105	Seeland	27- 5-14	3	11	0,84	2,52
106	Péry	23- 7-16	12	9	0,24	3,6
107	Lac de Bienne	25- 6-17		18	traces	
108	Aar (sortie du Lac)	25- 6-17		16	traces	

¹ Plusieurs de ces sources figurent sur la carte de Madretsch (voir n° juin des Arch.). Pour les autres, il ne valait pas la peine de faire une carte spéciale.

B. *Conclusions.* — Avant de traiter chacun des points du plan que nous nous sommes proposé, il nous paraît intéressant et utile de faire un court exposé historique de la question.

On pourra ainsi facilement comparer nos résultats à ceux qui ont été trouvés jusqu'à présent, à notre connaissance du moins.

Les chiffres entre parenthèses se rapportent à ceux du chapitre intitulé « Ouvrages consultés ».

1. Radioactivité des sources.

Note historique. — Les recherches faites jusqu'à ce jour sur la radioactivité des eaux montrent qu'elles emportent toutes du sol une certaine quantité d'émanation. S'il est vrai que certaines eaux sont si peu radioactives que leur émanation n'influence pas les appareils, tout fait prévoir que des appareils plus sensibles ne tarderont pas à la déceler.

Les travaux ont surtout porté sur les eaux thermales et minérales dont la radioactivité est en général relativement forte, et qui, grâce à leurs vertus, offraient un intérêt particulier. Les eaux ordinaires ont été beaucoup moins étudiées. Celles du Simplon ont donné lieu à des travaux de G. von der Born (20) et, comme il fallait s'y attendre, vu leur provenance, elles sont fortement actives.

Dinert a étudié les eaux potables qui alimentent la ville de Paris (32). Presque toutes ont une faible activité. Le maximum est donné par la source de la Dhuis qui contenait une quantité d'émanation de $6 \cdot 10^{10}$ C par litre. Celle du groupe de la vanne donnent des résultats allant de 0,8 à $1,5 \cdot 10^{10}$ C/L ; les eaux du Nouvet, d'Erigny, de Rivière, du Breuil, contiennent également peu d'émanation.

Schmidt et Kurz (38) ont analysé un très grand nombre de sources de la Hesse. Ils arrivent à ce résultat que confirment nos recherches : *Presque toutes les eaux qui sortent du sol sont radioactives.*

Muller a étudié les eaux potables qui alimentent Mulhouse ; leur activité est relativement forte et va jusqu'à près de $30 \cdot 10^{10}$ C/L (67).

Satterly s'est occupé des eaux de Cambridge : leur activité va de 1,3 à $1,96 \cdot 10^{10}$ C/L.

C. Schiffner s'est occupé des eaux de la Saxe (55), et ses recherches portent sur plus de 170 sources.

Radioactivité des sources neuchâteloises et bernoises. — Comme le montrent les résumés et les cartes, presque toutes les eaux que nous avons étudiées sont radioactives. Celles qui ne dégagent aucune émanation appréciable sont les suivantes :

Plan des Faougs, près de Peseux	N° 7	D I
Montagne de Boudry II	16	C I
Corne du Bois, près de Montalchez	26	C I
Saules	46	D H
Les Frêtes, près du Locle	82	C H

D'autres sources contiennent une si faible quantité d'émanation qu'il est impossible d'en indiquer sûrement la quantité; ce sont les suivantes:

Abbesse près d'Auvernier	N° 1	D I
Les Guches près de Peseux	8	C I
La Tailleu près de Boveresse	32	B I
Combe Robert près du Locle	72	C H
Bas Monsieur près de la Chaux-de-Fonds	89	D H
Lac de Bienne et Aar	107 et 108 (2 ^e carte)	

La proportion des eaux inactives ou très faiblement actives, en tenant compte des expériences dont nous parlerons dans les chapitres suivants et qui portent sur d'autres sources, se monte à peine à 7 %.

Dans près du 80 % des cas, l'activité des eaux ne dépasse pas $0,5 \cdot \overline{10}^{10}$ C/L. Les sources plus actives, mais dont la quantité d'émanation reste cependant inférieure à $\overline{10}^{10}$ C/L, sont:

Neuchâtel (éviers)	$0,54 \cdot \overline{10}^{10}$ C/L	N° 11	D I
Oeuillons	0,65	14	C I
Fontaine froide	0,79	15	C I
Les Aujets près des Verrières	0,52	40	A I
Cressier (fontaine)	0,53	55	E H
Les Brous, près de Lignières	0,78	60	E H
Les Replates, près du Locle	0,88	69	C H
Le Rocher	0,56	73	C H
La Molière	0,57	76	C H
La Claire (Haut)	0,72	77	C H
Combe des Enfers	0,59	83	C H
Chaux-de-Fonds	0,73	109	D H
Seeland	0,84	105	(2 ^e carte)

Enfin, voici les seules sources qui contiennent plus de $\overline{10}^{10}$ C/L.

Les Trois Pigeons, près de Valangin	$2,40 \cdot \overline{10}^{10}$ C/L	N° 44	D H
Combe Girard, près du Locle	2,62	64	C H
Vioulou, Pâturage, près du Locle	3,71	74	C H
Eplatures	1,04	81	C H
Eplatures	2,02	84	C H
Eplatures	1,54	85	C H

Remarquons en passant, qu'à l'exception de la première, elles appartiennent toutes à la région des Montagnes.

Ces résultats montrent clairement qu'une première conclusion s'impose :

La radioactivité des eaux neuchâteloises et seelandaises est faible et varie en général de 0 à $0,50 \cdot 10^{10}$ C/L.

2. Nature de l'émanation.

Note historique. — En général, l'émanation observée par les divers auteurs est celle du radium. Cependant, il arrive assez fréquemment que cette émanation soit accompagnée de celle du thorium, mais cette dernière n'est pas toujours recherchée.

Starke (3, p. 87) a porté ses recherches sur 32 sources des environs de Halle. Une vingtaine contiennent, à côté de l'émanation du radium, celle du thorium. Elle est due à des sels dissous dans l'eau. Ce résultat est conforme à celui qui a été trouvé par Rutherford (3, p. 88) après ses recherches sur les eaux de Baden-Baden.

G. A. Blanc (18) a trouvé que les dépôts solides, formés aux sources d'Echaillon en Maurienne et aux petites sources de Salins-Moutier, émettent l'émanation du thorium, ce qui prouve que les eaux de ces sources en contiennent en dissolution.

G. von der Born (20) a divisé les sources du Simplon en deux classes, désignées par les symboles TH et R : le premier se rapportant aux eaux qui contiennent l'émanation du thorium, le second à celles qui ne contiennent que l'émanation du radium.

Laborde et Lepape (81) ont aussi trouvé, dans les eaux de Luxeuil et de la Néris, de l'oxyde de thorium. Les sédiments de la première en contiennent $5 \cdot 10^3$ g par g et ceux de la seconde $1 \cdot 10^{10}$ g par g.

Les émanations de quelques sources fort rares ne suivent aucune loi connue. Mache et Adam (2, II, p. 499) ont signalé une émanation dont la période est de trois jours. G. Vicenti et Levi di Zara (14) ont constaté, par la méthode ordinaire, dans les eaux Euganéennes, la présence d'une émanation dont la loi de décroissance de la radioactivité induite diffère notablement de celle du radium¹. Seule la source de Montegretto fait exception.

Ce résultat est confirmé par Muller, mais contesté par Elster et Geitel qui ont étudié les sources de Bataglia.

Sokolof trouve que les eaux de Narzan (15) suivent la loi exprimée par

$$I = I_0 \cdot e^{-\lambda t} = \frac{1}{357 \cdot 000} \text{ sec}^{-1},$$

d'où l'on déduit $\Theta = 2,86$ j.

G.-A. Blanc a établi que l'émanation de certaines eaux d'Aix-les-Bains

¹ Il est fort probable que ces constatations reposent sur des erreurs expérimentales.

diminué de moitié en deux jours, tandis que, pour d'autres, la $\frac{1}{2}$ période est de trois jours (18). L'auteur signale qu'une loi semblable a été trouvée par Ebert et Ewers pour les gaz extraits du sol, et par Adam pour l'émanation des eaux de Cambridge.

E. Dorn déclare que l'émanation des eaux de Gastein (21) a une période différente de celle du radium, et signale le fait que Elster et Geitel ont également trouvé, à Baden-Baden, une autre émanation que celle du radium. Il en est de même à Wildbad en Wurtemberg, où les eaux dégagent une émanation dont la période est plus longue que celle de l'émanation du radium.

C. Schiffner (55) affirme que certaines eaux de la Saxe ont une émanation qui n'est pas celle du radium. Enfin, Battelli, Occhiavelli et Chella (29) ont constaté, dans les eaux de San-Giuliano, en Toscane, la présence d'une émanation dont la période est de 6 jours, et qui produit une radioactivité induite diminuant de moitié en 37 minutes.

Sources neuchâteloises et seelandaises. — Comme nous n'avons fait aucune expérience sur place, il n'était pas question de voir si les eaux contenaient l'émanation du thorium. Il est vrai qu'elles auraient pu contenir des sels en dissolution, et particulièrement du radiothorium ; dans ce cas, leur influence se serait fait sentir, en seconde analyse. Cela se serait-il produit, que nous n'aurions pu le constater que pour une énorme activité. En effet, d'après la méthode que nous avons suivie, l'air entre très lentement dans la chambre d'ionisation, et, s'il contenait de l'émanation du thorium, elle disparaîtrait au fur et à mesure de son introduction.

Nous n'avons pas constaté non plus la présence d'une émanation de longue période autre que celle du radium. Dans le 95 % des cas, les courants d'ionisation variaient bien suivant la loi¹ :

$$I = I_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{où} \quad \lambda = 0,0075 \text{ (heure)}^{-1}.$$

C'est la loi qui caractérise l'émanation du radium.

Quelques sources laissaient subsister des doutes, mais les détails des expériences et les études ultérieures nous ont montré clairement, que l'émanation de leurs eaux suit également la loi générale.

Ainsi : *Toutes les émanations observées sont dues au radium.*

¹ Voir l'exemple numérique de la p. 294.

3. Influence de la température et du débit.

Note historique. — En général, tous les auteurs affirment qu'il n'y a pas de relation entre l'émanation d'une source et sa température.

Kurz et Schmidt ont analysé plusieurs centaines de sources de la Hesse, aussi doit-on considérer leurs résultats comme parmi les plus probables. Ils établissent qu'il n'y a pas de rapport (38) :

1^o entre l'émanation et la température ; 2^o entre le débit et l'émanation ; 3^o entre la profondeur et l'émanation ; 4^o entre la composition chimique et l'émanation.

Brochet (47) établit que, pour les eaux de Plombières, il n'y a pas de relation entre la température et l'activité.

Laborde et Lepape (81), après avoir étudié les sources de Vichy, posent en principe qu'il n'y a aucun rapport : 1^o entre l'émanation d'une source et sa température ; 2^o entre les émanations et les débits.

Mache arrive à la même conclusion en ce qui concerne les eaux de Gastein (13). Au contraire, Hermann et Pesendorf (12) concluent de leurs expériences sur les eaux de Karlsbad que les sources froides sont en général plus actives que les sources chaudes. Isitani et Yamakava (79) confirment ce résultat pour les eaux de Formose.

Eaux neuchâteloises et seelandaises. — Les quantités d'émanation variant peu d'une source à l'autre, et les débits variant considérablement, il apparaît d'emblée qu'il n'y a pas de relation entre le débit et la radioactivité, et par conséquent entre l'activité par litre et l'activité totale.

Il n'y en a pas davantage entre la radioactivité et la température. Le tableau suivant le prouve, puisque, pour des activités presque égales, débits et températures sont absolument différents.

N°	Emanation par litre	Débit	Temp.	N°	Emanation par litre	Débit	Temp.
12	$0,10 \cdot \bar{10}^{10}$ C	8	12	13	$0,24 \cdot \bar{10}^{10}$ C	15.000	6
27	0,10	300	7	20	0,24	36	8
34	0,10	75	8	50	0,24	3	4
100	0,10	4	10	106	0,24	12	9
31	0,11	85	6	4	0,25	80	8
88	0,11	15	5	24	0,25	5	14
51	0,12	120	10	90	0,25	faible	5,5
101	0,12	2	10		etc.		

Il est bon de faire remarquer cependant que les eaux ont été prises à toutes les époques de l'année et par tous les temps. Les

températures, les débits ont donc considérablement varié pour une même source, et, pour pouvoir comparer avantageusement les activités de sources différentes, il faudrait prélever les eaux le même jour et dans un rayon assez restreint pour que l'on puisse considérer les conditions météorologiques comme semblables.

Cela n'est possible que pour quelques sources puisque l'émanation disparaît rapidement avec le temps et que le nombre des appareils de dosage est nécessairement très limité.

D'autre part, avant de commencer cette étude, forcément longue, il est bon de s'assurer que, pour une même source, l'activité est fonction du débit et de la température. Si ce n'est pas le cas, on ne saurait trouver, pour des sources différentes, une relation quelconque.

Nous avons entrepris cette étude et nous en parlerons dans un chapitre spécial (Etude de deux sources).

4. Eaux thermales et minérales.

Note historique. — On sait que la plupart des eaux thermales et minérales sont très fortement actives. Il suffit de jeter un coup d'œil sur le tableau que donne Gockel (3, p. 90) pour s'en convaincre. C'est même à l'émanation qu'elles contiennent que l'on attribue leur vertu ; on explique le fait qu'il faut boire l'eau à la source même et que les eaux transportées sont inefficaces, par la disparition de l'émanation avec le temps¹.

Cependant, certaines eaux thermales ou minérales contiennent très peu d'émanation. C'est souvent le cas pour les eaux sulfureuses froides qui naissent dans des terrains sédimenteux et qui parfois sont presque complètement inactives.

Voici quelques sources renommées mais très peu actives (3, p. 90-92) :

Wiesbaden, Adlerquelle	$2,2 \cdot 10^{10}$ C/L	64°
Wildbad, Kaltequelle	0,74	
Kannstatt, Kursaal	2,2	
Karlsbad, Sprudel	0,37	71°,3
Franzensbad, Loimannsquelle	3,5	11°
Franzensbad, Salzquelle	4,8	11°
Vichy, source de l'Hôpital	0,18	33°,8
Vichy, source des Célestins	0,48	15°
Louèche	1,1	51°
Pfäfers-Ragaz, Stollenquelle	2,6	36°
Schuls, Sotsassquelle	3,7	froide
Tarasp, Carolaquelle	4,1	froide

¹ On sait que la composition chimique de plusieurs eaux très efficaces ne présente rien de particulier.

La littérature concernant les eaux thermales et minérales est très riche, aussi nous est-il impossible d'en donner un résumé même succinct.

Eaux neuchâteloises et seelandaises. — Nous ne connaissons jusqu'à présent que la radioactivité de quatre sources ferrugineuses et d'une source sulfureuse. Ce sont :

Source ferrugineuse de la Brévine	$0,08 \cdot 10^{10}$ C/L	N. 39
» » des Ponts	0,27	22
» » de St-Blaise	traces	51
» » de la Molière	0,57	76
» sulfureuse des Ponts	0,20	23

Ces cinq sources sont froides et leur activité est au-dessous de la moyenne.

5. Y a-t-il des régions de même radioactivité ?

Note historique. — L'activité d'une même source variant considérablement, il est très difficile, comme nous l'avons déjà fait remarquer (page 345), de comparer des sources dont les eaux ont été prises à différentes époques de l'année.

Souvent, des sources très voisines ont des activités différentes. Les sources de Vichy sont caractéristiques à ce point de vue : tandis que l'activité de la source de l'Hôpital est de $0,2 \cdot 10^{10}$ C/L, celle de la Bourboule est de $229 \cdot 10^{10}$ C/L, c'est-à-dire 1000 fois plus forte que la précédente (81).

Au Val-les-Bains, les différences, quoique moins fortes, sont considérables : la source Ste-Marie a une activité de 3,4 et celle de St-Dominique de $1480 \cdot 10^{10}$ C/L (6).

Diénert a étudié les eaux captées par la ville de Paris (32) ; il les a divisées en trois classes et arrive aux conclusions suivantes :

1. Il y a une grande différence dans la radioactivité des eaux issues d'un même gisement géologique. Ainsi, le groupe de Loing et du Lunain est moins radioactif que celui de la Vanne.

2. Dans un même groupe, il y a également des différences dans les activités, mais elles sont moins fortes.

Ainsi, les sources de Cocherpies et du Miroir, qui ont un primaire d'alimentation dans le fort d'Othe, ont une radioactivité identique, mais différente de celle des sources de Flacy et de Pâture, issues toutes deux d'un primaire d'alimentation voisin, situé près de la rivière de la Vanne.

Aux groupes du Loing et du Lunain, les sources de Bourron et de Chaintréauville, émergeant dans la vallée du Loin, ont une radioactivité identique, mais différente de celle de St-Thomas et de Villemer constituant le groupe de la vallée du Lunain.

3. Par ces groupements, il semble qu'il y ait des zones de même radioactivité.

4. Les sources dont les primaires d'alimentation sont très riches en argile sont les plus actives.

Gockel (3) déclare qu'il est difficile d'établir une relation entre les émanations des eaux et la provenance de ces dernières, pour les raisons suivantes :

1. Il est impossible de dire, d'après les terrains situés aux environs du griffon d'une source, les terrains que l'eau a parcourus avant sa sortie. On sait que deux sources qui ont leurs points de sortie très voisins peuvent avoir des températures et des compositions chimiques très différentes.

2. L'émanation du radium peut provenir des terrains que l'eau a traversés, mais elle peut aussi provenir de terrains très éloignés, après avoir passé par des fissures.

3. Les eaux qui ont traversé des terrains riches en radium peuvent se mêler à des eaux faiblement actives ou inactives provenant d'autres terrains, de sorte que l'on ne mesure qu'une activité moyenne.

4. L'eau qui coule très lentement à travers des canaux étroits, situés dans des terrains contenant de l'émanation, en sera plus chargée que des eaux qui couleront dans de grandes artères.

Ajoutons que l'émanation est fonction du temps et qu'il n'est pas possible de savoir combien de temps une eau a séjourné sous terre.

On sait, d'une manière générale, que les eaux les plus actives sont celles qui proviennent des terrains anciens, et, comme le dit Gockel, cette question complexe fera un grand pas le jour où l'on ne se contentera plus d'étudier les eaux minérales, mais où l'on étudiera toutes les eaux d'une région.

Sources neuchâteloises et seelandaises. — Les eaux ayant été prises à toutes les époques de l'année et par tous les temps, les unes renferment beaucoup d'eau de pluie, qui n'ont fait que traverser de faibles couches de terrain, les autres n'en contiennent que peu ou pas du tout.

On ne pourra donc se baser que sur la moyenne d'un grand nombre de sources. Malgré les difficultés du problème, nos expériences sont assez nombreuses pour que nous puissions en tirer des conclusions certaines.

I. Les eaux des Montagnes sont sensiblement plus actives que celles des Vallées et du Vignoble. Dans la première de ces régions, 25 sources sur 40 contenaient une émanation supérieure à $0,30 \cdot 10^{-10}$ C/L. Dans la seconde, 19 sur 68 sont dans ce cas (le Seeland étant compris dans le Vignoble). C'est pour la première région le 62 % et pour la seconde le 28 %.

II. Tandis que le 30 % des eaux de la première région contiennent une émanation supérieure à $0,5 \cdot 10^{-10}$ C/L, le 13 % seulement des eaux de la seconde sont dans le même cas.

III. Dans les Montagnes, cinq sources (13 %) ont donné une

émanation supérieure à 1.10^{10} C/L. Dans la seconde région, une seule source, celle des Trois-Pigeons, près de Valangin, présente une aussi forte activité¹.

IV. Le contraste est surtout frappant si l'on considère le Vignoble neuchâtelois seul et qu'on le compare à la région des Montagnes. Dans le Vignoble, 4 sources sur 28 (14 %) ont une activité supérieure à $0,25.10^{10}$ C/L, et une seule dépasse $0,50.10^{10}$. Dans les Montagnes, le 70 % des eaux sont dans le premier cas, et un grand nombre dans le second.

La Région intermédiaire du Val de Travers présente, relativement aux deux précédentes, une activité moyenne. Le 44 % de ses sources contient une émanation supérieure à 10^{10} C/L.

Ainsi, *l'activité des eaux augmente quand on va du SE au NW*. Cette conclusion qui s'impose, même après un examen sommaire de la carte, semble conforme aux prévisions géologiques, et montre qu'il y a une relation entre la radioactivité des eaux et leur provenance, relation qui n'apparaît souvent et ne devient certaine que si l'on considère un grand nombre de sources.

Voici, à ce sujet, les renseignements que M. le professeur Argand nous a obligamment donnés : « Il n'est pas étonnant que la radioactivité soit plus grande dans la région du NW où il y a tout lieu de croire que l'infra-structure cristalline est plus rapprochée de la surface que dans le SE. Plusieurs max. importants et très caractérisés (les n°s 64 et 74 par exemple), se trouvent sur l'affleurement des plis-failles dont les surfaces de dislocation sont particulièrement pénétrantes et se rapprochent de l'infra-structure. On conçoit que, dans ces conditions, l'advection des eaux radifères provenant du lavage du granit soit particulièrement facilitée et que les dites régions soient privilégiées par rapport aux territoires immédiatement limitrophes. »

La question de la délimitation de régions de même activité est si importante que nous n'avons pas voulu nous contenter des résultats précédents et que nous avons étudié minutieusement deux régions, l'une au NW, l'autre au SE. C'est le sujet du chapitre suivant.

(A suivre.)

¹ Cette source sort d'une grotte profonde. Les eaux ont probablement traversé des couches épaisses de terrains, ce qui expliquerait en partie leur forte activité.

