

Bulletin de la Société belge de Géologie	T. 92	fasc. 3	pp. 195-212	Bruxelles 1983
Bulletin van de Belgische Vereniging voor Geologie	V. 92	deel 3	blz. 195-212	Brussel 1983

L'HYDROGEOLOGIE THERMALE DE CHAUFFONTAINE.

par J.M. GRAULICH

Résumé.

Les sondages avec mesures thermométriques, les analyses isotopiques et les géothermomètres peuvent à l'heure actuelle nous donner des précisions sur les eaux thermales de Chauffontaine qui d'origine météorique descendent en profondeur par les calcaires du Frasnien et ensuite par les calcaires du Carbonifère mis en contact par la Faille Eifélienne. Quand elles ont acquit une température d'environ 50° C (soit vers 1.500 m), elles remontent par les calcaires du Carbonifère et ensuite du Frasnien mis en contact par la même faille et viennent jaillir en surface à la source Prince Albert de Liège. La circulation des eaux chaudes a profondément modifié les courbes isothermes de la région.

Historique

Dans son "Parallèle des eaux chaudes" publié à Liège en 1721, Bresmael nous apprend que "anciennement ces eaux ne furent connues que par une quantité de petites sources qui coulaient sur les bords de la Weste". Cependant, en 1676, Simon Sauveur obtint de Remy Le Godet, Major de Chênée, son beau-frère, la permission de faire ériger dans son fonds une hutte d'argile avec quelques bains à l'endroit où se trouvait une de ces sources. Sauveur essaya plus tard d'obtenir du Prince-Evêque une concession définitive. Des démêlés s'ensuivirent et par décision de la Chambre des Comptes, des recherches coûteuses furent entreprises afin de découvrir le véritable sourdon d'eau chaude ; les multiples infiltrations furent examinées et on remonta jusqu'à la source réelle qui fut décrétée d'utilité publique et la concession des eaux fut accordée par ordonnance de la Chambre des Comptes du 9 juin 1713. C'est cette source qui est encore exploitée et qui a été dénommée "Prince Albert de Belgique, Prince de Liège" après autorisation royale du 3 3 juin 1937.

Géologie

Dans la région de Chauffontaine, les terrains du Dévonien supérieur dessinent un anticlinal complexe et faillé dont les flancs formés de grès du Famennien supérieur constituent l'ossature des versants abrupts de la vallée. Sous les grès, il y a une centaine de mètres de schiste famennien et frasnien qui encapuchonne les calcaires du Frasnien sous-jacents. L'axe anticlinal dirigé suivant la vallée (E W) a un ennoyage vers l'Est, si bien que les calcaires frasnien affleurant près de la Maison Sauveur s'enfoncent progressivement sous les schistes qui forment la couverture imperméable du gisement d'eau chaude dans la direction Est. Le massif dévonien est charrié suivant la Faille Eifélienne et repose sur les terrains du Silésien et Dinantien du Massif de Herve.

L'ANOMALIE GEOTHERMIQUE DE CHAUDFONTAINE.

Si la source dénommée depuis 1937 Prince Albert de Liège a été reconnue en 1713 (Point 1 des fig. 1 et 2), il faut attendre l'année 1947 pour voir le commencement de recherches d'autres sources. Afin de délimiter les zones favorables en surface, P. Fourmarier a fait exécuter environ 50 forages dans le parc de l'Etablissement des Bains pour mesurer les températures à la base des alluvions de la Vesdre et ainsi tracer la carte des isothermes à ce niveau (Fig. 1). On y voit deux zones à température supérieure à 33° C, une où se situe la source Prince Albert de Liège et l'autre où fut creusé un puits de captage d'une nouvelle source qui porte le nom de son inventeur P. Fourmarier (point 2 des fig. 1 et 2). Ces deux sources se situent au sommet des calcaires du Frasnien directement sous des schistes rouges calcareux crinoïdiques. Les possibilités de découvrir de nouvelles sources en surface étant épuisées, il a bien fallu se résoudre à les chercher en profondeur.

134 E/303

En 1964, le Service Géologique a fait exécuter par la firme E.F.C.O. un sondage de 548 m de profondeur (134 E/303) (point 3 des fig. 1 et 2).

Ce sondage dévié mécaniquement vers le Nord a recoupé à la profondeur de 321 m une nappe jaillissante en surface ; elle a été captée sous le nom de source Marguerite en l'honneur de Marguerite de Valois, épouse de Henri IV, dont le charme avait séduit les habitants de la région qui dénommaient déjà de son prénom la source de cette époque.

La description de ce sondage a été publiée dans le P.P. 1967/11.

134 E/310

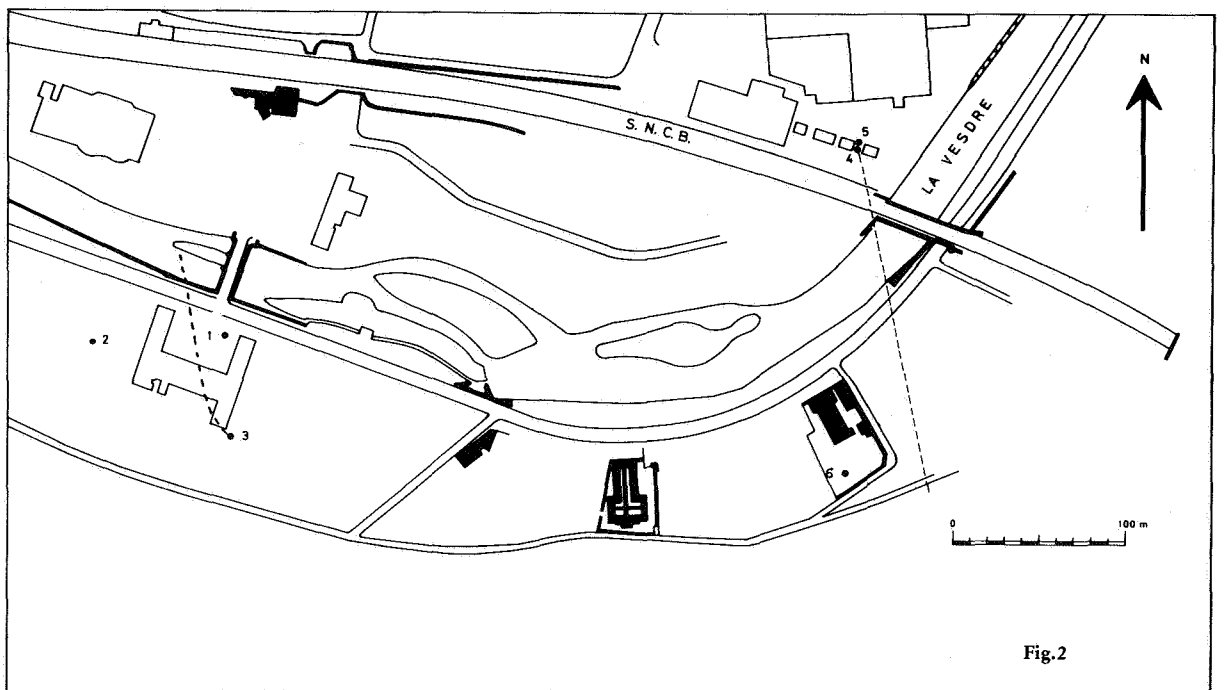
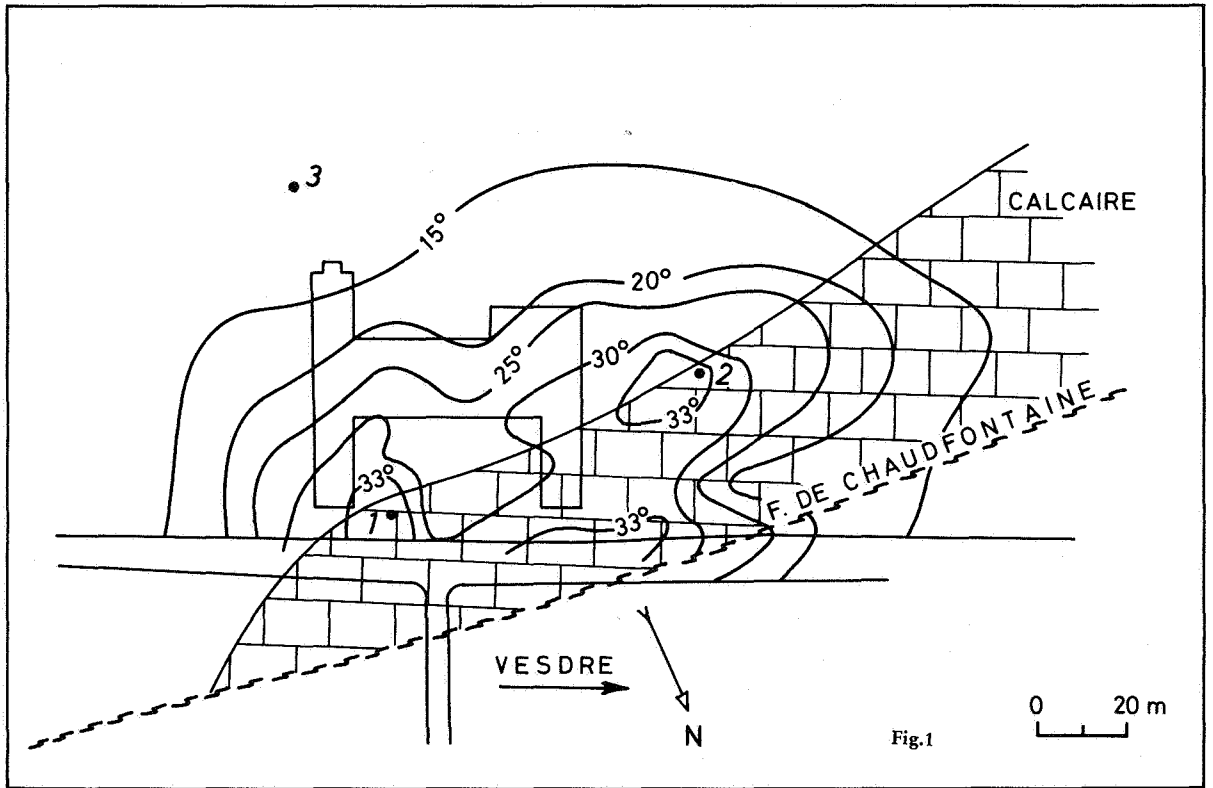
Devant les résultats encourageants de ce sondage (débit de 28,8 m³/h pour un rabattement de 17,60 m), la S.A. Chaudfontaine Monopole, conseillée par l'hydrologue G. Damiean, a fait exécuter par la firme E.F.C.O. un sondage incliné au départ de ses propriétés. Ce sondage (134 E/310 - point 4 de la fig. 2) incliné de 30° à 35° sur la verticale et dirigé vers le Sud a recoupé l'anticlinal Frasnien situé au-dessus de la faille de Chaudfontaine. (Voir planche n° 2 du P.P. 1978/4). Dans les calcaires du Frasnien, ce sondage a recoupé à 296 et 317 m des venues d'eaux chaudes jaillissantes en surface avec un débit de 400 lit/h. En régime de pompage au débit de 6,9 m³/h, avec un rabattement vertical de 61 m. L'eau arrive en surface avec une température de 34,6°, elle est captée sous le nom de source P6. La description de ce sondage a été publiée dans le P.P. 1978/4.

Fig. 1 - Isothermes à la base des alluvions de la Vesdre dans le parc de l'Etablissement des Bains (d'après P. Fourmarier).

1 - Prince Albert, 2 - Fourmarier, 3 - Marguerite.

134 E/324

Pour atteindre l'origine probable des eaux chaudes, soit le calcaire Carbonifère (Viséen et Tournaisien), la S.A. Chaudfontaine Monopole et le Service Géologique ont fait exécuter par la firme E.F.C.O. un sondage vertical situé à 1 m au Nord du sondage incliné (point 5 de la fig. 2). Ce sondage qui a débuté dans le Famennien du massif charrié a recoupé la Faille Eifélienne à 341,90 m et ensuite du Namurien jusque 1229 m sans atteindre les calcaires du Viséen. Il a dû être arrêté pour des raisons techniques. La description de ce sondage a été publiée dans le P.P. 1978/4.



134 E/396

Afin d'augmenter les possibilités aquifères de Chaudfontaine, l'Administration Communale, le Syndicat d'Initiative et le Service Géologique ont fait exécuter par la firme Smet un sondage vertical sur l'aire de stationnement de l'Ecole Communale (point 6 de la fig. 2). Ce sondage a recoupé une venue d'eau chaude à 246,30 m dans les calcaires du Frasnien, elle est captée sous le nom de source Graulich. Il est publié dans le P.P. 1978/4.

Fig. 2 - Situation des captages

1 - Prince Albert, 2 - Fourmarier, 3 - Marguerite, 4 - P 6, 5 - Sondage 324, 6 - Graulich.

La température a été mesurée dans chacun de ces sondages, ce qui va nous permettre d'illustrer l'anomalie géothermique de Chaudfontaine.

A environ 8 km à l'Est de Chaudfontaine, un sondage de 2.528 m a été exécuté à Soumagne par la firme Smet pour le compte du Service Géologique. La Société Schlumberger a procédé à un enregistrement continu de la température jusque 2.250 m. De plus un thermomètre à maximum descendu par la même société donne une température de 58,5° à 2.510 m. La méthode des thermomètres coupés donne une température de 46,8° à 2.000 m.

Ces données sont représentées graphiquement à la fig. 3.

Fig. 3 - Les variations de températures relevées en profondeur entre Liège et Verviers.

Ch : Chaudfontaine, S : Soumagne, B : Bolland, E.L. : Ensival Lambermont.
Ch. 303 : Marguerite, Ch. 324 : Sondage profond et Ch. 396 : Graulich.

Nous obtenons les gradients géothermiques suivants :

86,36 m dans le Silésien du Massif charrié de la Vesdre limité à sa base par la faille du Tunnel (720 m).

47,39 m dans le Silésien du Massif de Herve (de 720 à 1.573 m).

75,71 m dans le Dinantien du Massif de Herve (de 1.573 à 1.785 m).

36,80 m dans le Dévonien du Massif de Herve (de 1.785 à 2.510 m).

Au sondage de Bolland (B), la méthode des thermomètres coupés donne 33° C à 1.400 m ; 48° C à 1.655 m ; 75° C à 3.000 m soit un gradient géothermique de **38,10 m** dans le Dévonien inférieur et le Siluro-Ordovicien du Massif de Herve. (fig. 3).

Au sondage d'Ensival-Lambermont (E.L.), la méthode des thermomètres coupés donne 13° C à 907,52 m et 13,5° C à 1.020,40 m soit un gradient géothermique de **225 m**.

Ce gradient exceptionnel peut s'expliquer par un refroidissement dû à une circulation d'eau froide descendant par des conduits karstiques dans les calcaires du Viséen et provenant du calcaire carbonifère affleurant au Nord de la Faille de Soiron (3 km) ou de la Fenêtre de Theux (6 km).

Passons maintenant au cas de Chaudfontaine.

Au captage Marguerite (134 E/303), un relevé de température ponctuel par méthode électrique a été fait jusqu'à la profondeur de 300 m, soit avant la venue de la nappe jaillissante en surface rencontrée à 321 m. (Voir P.P. 1967/11 p. 17).

De la surface (temp. 14° C) jusqu'au sommet des calcaires du Frasnien recoupé à 69 m (temp. 20° C), nous avons un gradient géothermique de **11,50 m** et puis de 69 à 300 m (temp. 18,4° C) un gradient négatif de **- 144 m**.

Au sondage 134 E/324, un diagramme de température en continu a été relevé par la "Dienst Grondwaterverkenning T.N.O. de Delft" (D.G. de T.N.O.) le 11-02-1980 alors que le sondage était au repos depuis 1976. (Fig. 3).

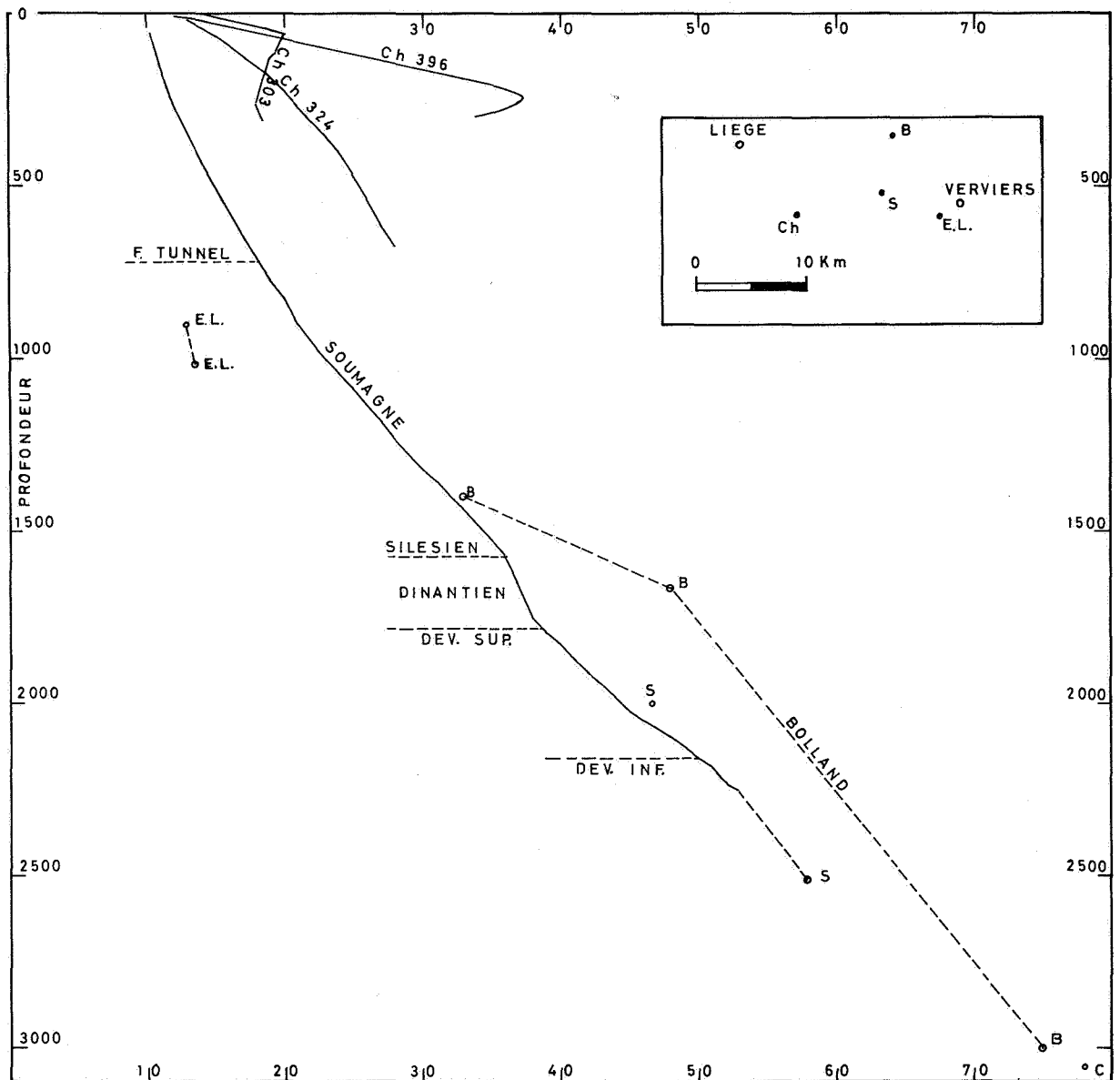


Fig. 3

Nous obtenons les gradients géothermiques suivants :

23 m dans le Famennien allant de la surface (temp. mesurée dans l'eau 12° C) jusqu'à la Faille de Chaudfontaine recoupée vers 100 m (temp. 16,3° C)

37 m dans le Famennien compris entre la Faille de Chaudfontaine et la Faille Eifélienne recoupée à 341,90 m (temp. 22,8° C).

64 m dans le Namurien du massif de Herve jusqu'à la profondeur de 693,50 (fin des mesures) (temp. 28,3° C).

Au captage Graulich (134 E/396), il a été procédé à un relevé de température par la méthode des thermomètres coupés lors de l'avancement des travaux (P.P. 1978/4 page 51) (Voir. Fig. 4).

Dans le massif au-dessus de la Faille de Chaudfontaine, nous obtenons les gradients géothermiques suivants :

12 m dans le Famennien et le Frasnien de 10 m de profondeur (temp. 12° C) à 258 m avec une température maximum relevée de 33° C.

- 10 m de 258 à 298 m.

A ce même captage il a été procédé à un relevé continu de température par la S.G. de T.N.O. (Fig. 4). De la surface à 246,3 m, point de venue des eaux chaudes avec une température de 37,4° C, nous obtenons un gradient de 9,30 m suivi d'un gradient négatif de - 15 m jusqu'à la profondeur de 300 m.

Au P 6 (134 E/310), la température a été mesurée à différentes profondeurs en cours d'avancement par thermorésistance (P.P. 1978/4 page 14), ce qui donne un gradient géothermique de 14,5 m.

Toutes ces mesures illustrent l'anomalie géothermique de Chaudfontaine caractérisée par des gradients très petits dans le massif au-dessus de la Faille de Chaudfontaine qui peuvent être suivis par des gradients négatifs.

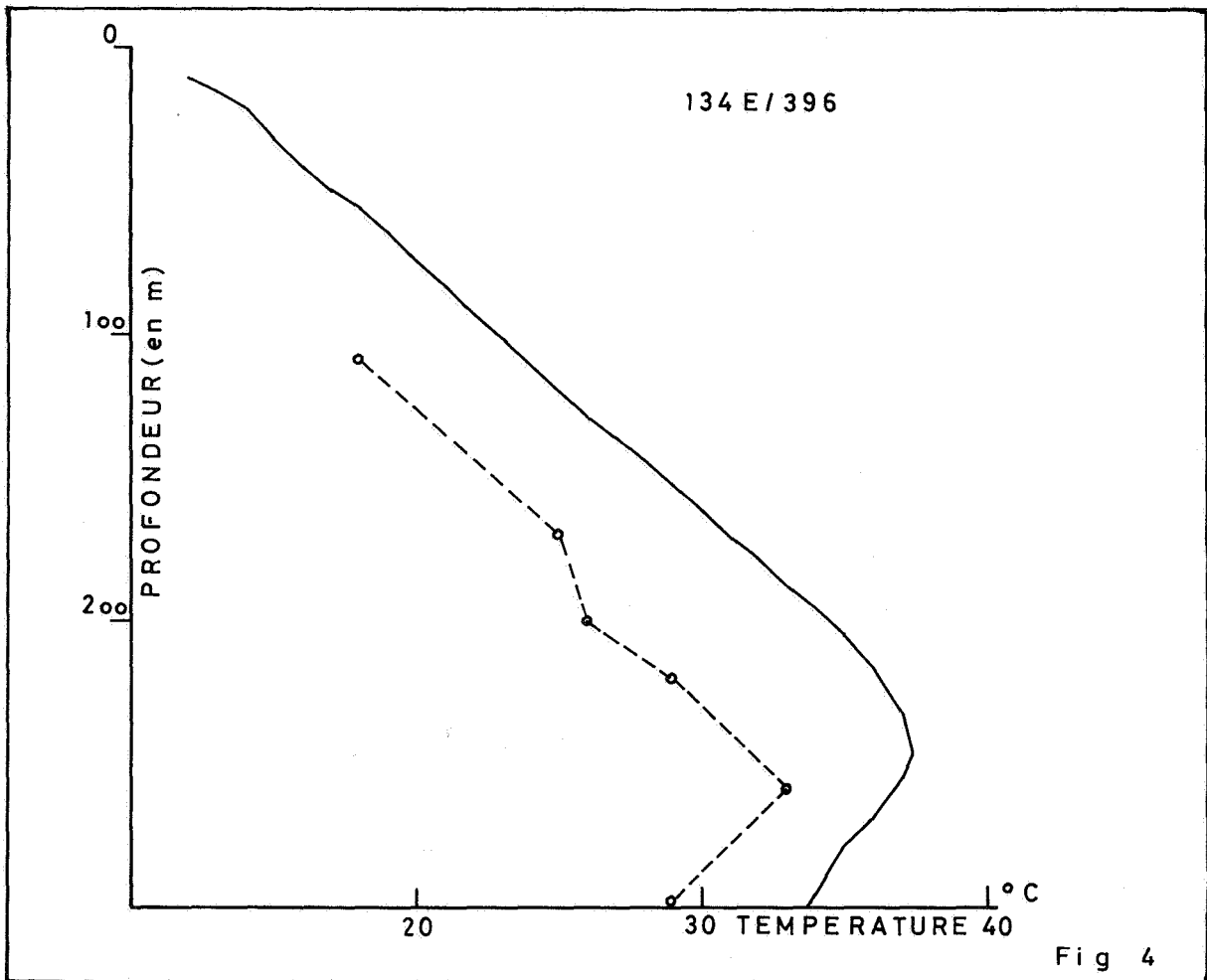


Fig 4

Fig. 4 - Les températures relevées au sondage n° 396 (captage Graulich) Lignes en traits interrompus passant par les températures déterminées par la méthode des thermomètres coupés à l'avancement.

Ligne en trait continu températures enregistrées par D.G. de T.N.O. le 12/2/80.

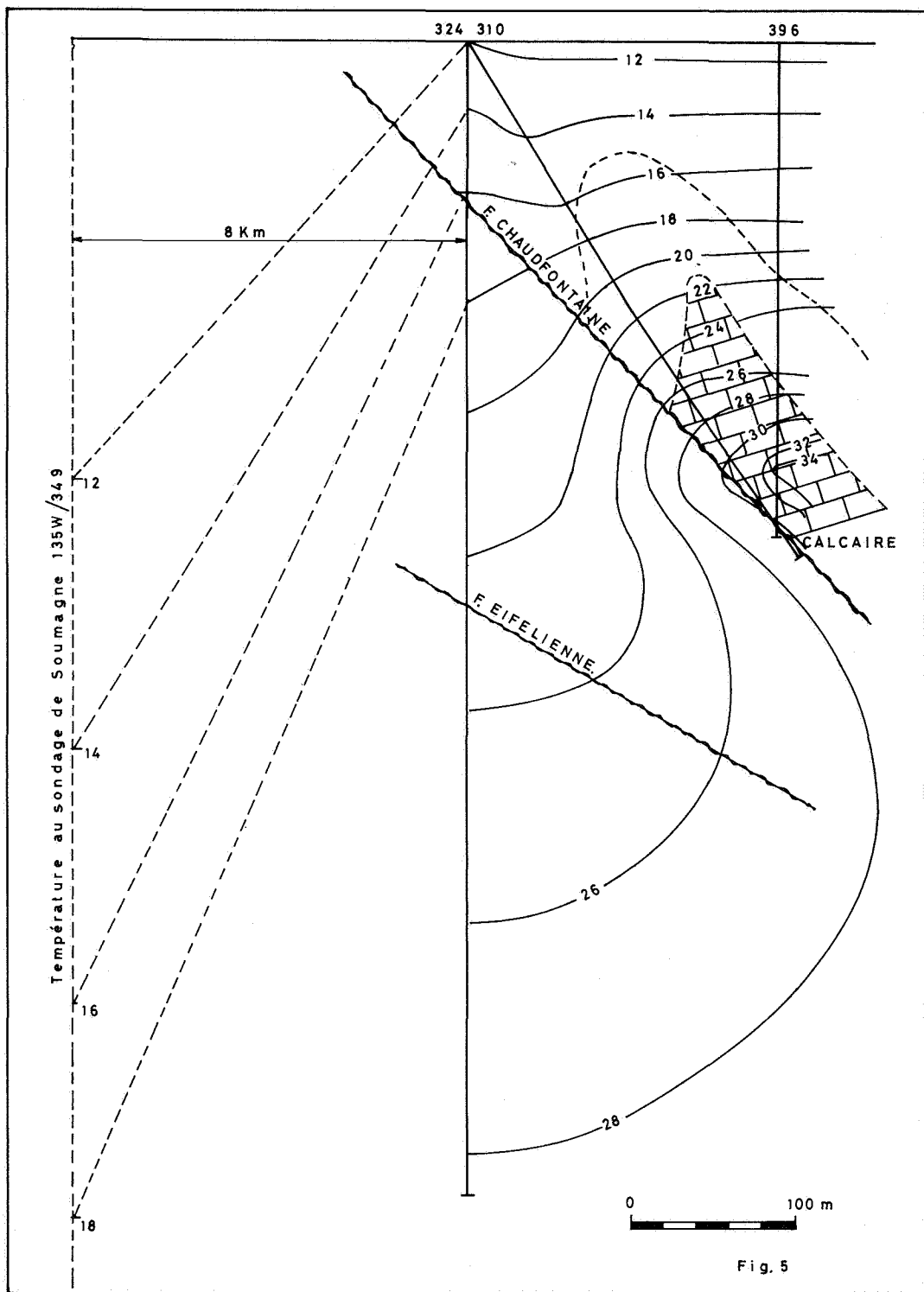


Fig. 5

Interprétation

Sur la figure 5, nous avons tracé les isothermes dans une coupe S.N. passant par les sondages 396, 310 et 324. Pour les sondages 310 et 396, nous avons pris les températures relevées à l'avancement car les venues d'eau chaude dans ces sondages perturbent les valeurs réelles existantes avant la création du conduit artificiel que constitue le sondage (voir entre autre la fig. 4).

Comme pour le sondage 324, il n'y a pas de venue d'eau chaude, nous avons repris les valeurs de l'enregistrement continu de la D.G. de T.N.O.

Fig. 5 - Les isothermes dans la coupe verticale S.N. passant par les sondages 324, 310 et 396 avec une comparaison des températures relevées au sondage de Soumagne.

Fig. 6 - Les isothermes dans la coupe verticale E.W. avec l'allure des niveaux de calcaire.

A : Point de percée du sondage incliné Marguerite (303).

B : Source Prince Albert de Liège.

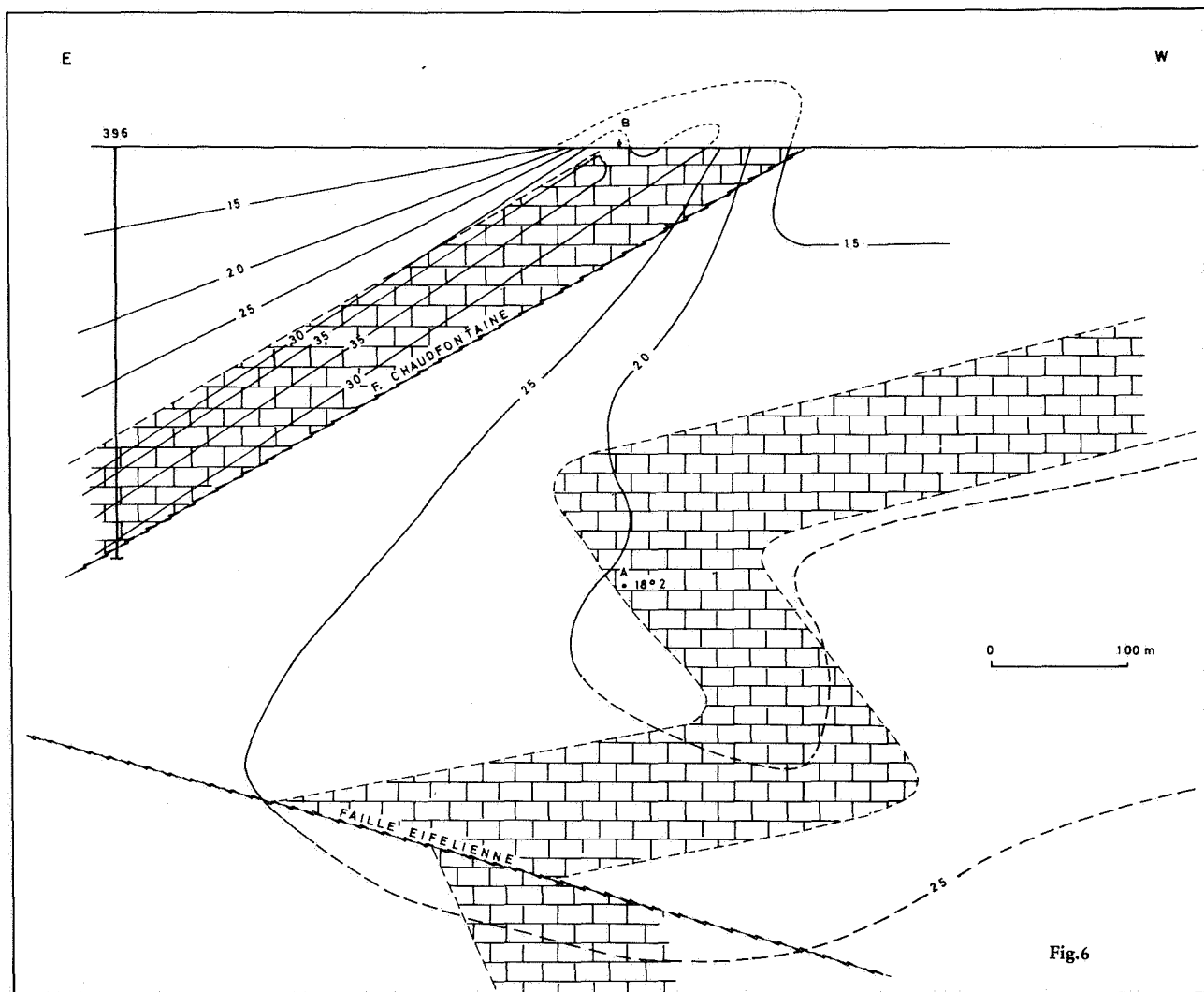


Fig.6

L'allure des isothermes de la figure 5 nous montre directement que l'eau chaude circulant dans les fissures du calcaire du Frasnien au-dessus de la faille de Chaudfontaine est à l'origine de l'anomalie géothermique, en effet nous avons un gradient très petit de la surface jusqu'au point de circulation de l'eau chaude et ensuite un gradient négatif jusqu'au rétablissement des isothermes relevés au sondage 324 qui présente encore des valeurs anormales par rapport au massif ardennais (voir sondage de Soumagne).

Grâce aux mesures thermiques mesurées, sous la direction de P. Fourmarier, dans le parc de l'Etablissement des Bains (Fig. 1) et les mesures dans le sondage Marguerite (134 E/303) nous pouvons tracer les isothermes dans une coupe E.W. passant par le captage Graulich (134 E/396) et la source Prince Albert de Liège (point B). Ces isothermes sont tracés sur la figure 6.

Les faibles gradients géothermiques s'observent dans le massif au-dessus de la Faille de Chaudfontaine avec un maximum aux points des venues d'eau chaude dans les calcaires du Frasnien (246 m au sondage 396 et à la source Prince Albert de Liège).

Au point A, point de percée du sondage incliné Marguerite dans le plan de coupe, nous avons une température de 18,2°, alors que d'après le sondage 324 nous devrions avoir une température de 22,2° C. Avons-nous là un indice pour avancer l'hypothèse que le massif frasnien sous la Faille de Chaudfontaine est refroidi par une eau descendante ?

Chap. 2

L'ORIGINE DES EAUX DE CHAUDFONTAINE

Pendant une grande partie de sa carrière de géologue, P. Fourmarier s'est trouvé devant un dilemme au sujet de l'origine des eaux de Chaudfontaine :juvénile ou météorique se réchauffant en descendant en profondeur.

Dans ses écrits, il penche tantôt pour une solution, tantôt pour une autre ; mais dans son dernier article sur le sujet (1955), il opte pour une origine juvénile.

Ses arguments sont les suivants :

a) Le débit considérable des venues thermales. En se basant sur un rapport de M. Legraye, il estime que le débit moyen des deux sources thermales captées à cette époque à Chaudfontaine est de l'ordre de 3.000 m³/jour soit 124 m³/h. Or, à un débit supérieur à 15 m³/h, les eaux de la source Prince Albert de Liège diminuent de température à la suite d'un apport d'eau froide superficielle aspirée par un rabattement exagéré dans un puits impossible à rendre imperméable, les alluvions reposant sur des calcaires fissurés. A ce débit, il faut ajouter celui de la Fourmarier qui est de 20 m³/h.

Nous arrivons donc à un total de 35 m³/h.

Dans la même publication, P. Fourmarier admet que l'eau météorique capable de descendre en profondeur par la bande des calcaires du Frasnien ne peut être guère supérieure à 33 m³/h, mais il ne compte pas les eaux du bassin de l'Ourthe qui peuvent s'infiltrer par les calcaires à Colonster à hauteur du Rocher du "Bout du monde" et celles du bassin de la Vesdre qui traversent une bande de calcaire du Frasnien à la hauteur de Henne.

b) La tectonique de la région qui s'oppose, à moins de complications inconnues, à ce que les eaux de surface descendent assez bas en s'infiltrant dans la bande calcaire de façon à y acquérir une thermalité suffisante. Ce n'est pas une grande complication tectonique d'admettre que les calcaires du Frasnien sont en contact anormal dû à la Faille Eifélienne sur les dressants des calcaires du Carbonifère. Le sondage 134 E/324 a bien recoupé des dressants renversés avec plis en chaise du Namurien depuis la Faille Eifélienne (341,90 m) jusqu'à la Faille de la Rochette (795 m). (Voir coupe de la planche 4 du P.P. 1978/4 et Fig. 8).

c) La constance relative de la température sans relation aucune avec les variations de la température extérieure.

Cela est vrai si le trajet en profondeur est de courte durée, mais comme nous le verrons dans le paragraphe consacré aux analyses isotopiques, la durée du trajet souterrain est supérieure à 25 ans (méthode du tritium).

Dans ces conditions la température ne peut plus avoir de relation avec la température extérieure.

d) La pression suffisamment élevée des eaux thermales qui leur permet de refouler les eaux de la nappe phréatique des alluvions de la Vesdre, en empêchant au surplus, le mélange des eaux profondes avec les eaux des alluvions.

Egalement par les analyses isotopiques nous démontrerons qu'il y a, aux sources Prince Albert de Liège et Fourmarier, un très léger mélange des eaux profondes avec les eaux superficielles (méthode du tritium).

Nous voyons donc que les arguments de Fourmarier ne sont absolument pas démonstratifs.

Les progrès réalisés grâce aux analyses isotopiques de l'oxygène et du deutérium des eaux permettent de démontrer l'origine météorique des eaux si

$$\delta^2\text{H} \text{ ‰} = 8 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰} + 12$$

Or dans le cas de Chaudfontaine, nous obtenons (voir teneurs isotopiques à l'annexe I).

Sources	$\delta^2\text{H} \text{ ‰}$	$8 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰} + 12$	Δ
P 6	- 51,50	- 52,5	1,0
Graulich	- 50,90	- 51,4	0,5
Fourmarier	- 51,40	- 51,7	0,3
Marguerite	- 51,00	- 51,5	0,5
	- 51,10	- 50,9	0,2
Prince Albert	- 51,10	- 51,6	0,5
P 3	- 52,30	- 52,6	0,3

Au P 3 qui capte des eaux dans les alluvions de la Vesdre, donc certainement d'origine météorique, nous avons une différence de 0,3, donc nous devons admettre, en tenant compte de l'imprécision de l'équation, que les eaux thermales de Chaudfontaine sont **d'origine météorique**.

La composition isotopique en oxygène 18 et en deutérium des eaux thermales sont bien groupées auprès des valeurs moyennes.

$$\delta^2\text{H} \text{ ‰} = - 51,2 \quad \text{écart type : } 0,24$$

$$8 \delta^{18}\text{O} \text{ ‰} = - 7,95 \quad \text{écart type : } 0,07$$

L'origine météorique des eaux étant démontrée, il nous reste à élaborer une théorie pour expliquer leur thermalisme.

Un isotope de l'hydrogène, le tritium, va nous permettre de structurer notre théorie.

Méthode du tritium

La teneur en tritium ou ^3H est évaluée en T.U. dont les valeurs sont données au tableau I.

Ces valeurs très variables vont de 86,8 à < 1,2, ce qui nous permet de classer les eaux suivant leur âge, les plus anciennes de teneur inférieure à 1,2 ayant fait un trajet souterrain d'au moins 25 ans (1).

86,8 : **P 3** - eau captée dans la nappe aquifère des alluvions de la Vesdre.

11,9 : **Fourmarier** - eau chaude d'origine profonde avec un léger mélange d'eau provenant des nappes superficielles.

Marguerite - eau captée à 321 m de profondeur dans les calcaires du Frasnien.

9,8 : **Prince Albert de Liège** - eau chaude d'origine profonde avec un léger mélange d'eau des nappes superficielles.

< 1,2 : **P 6** - eau chaude d'origine profonde.

Graulich - eau chaude d'origine profonde.

(1) Le tritium ayant une demi-vie de 1,226.10 années.

De ces données nous pouvons élaborer le schéma suivant (fig. 7) :

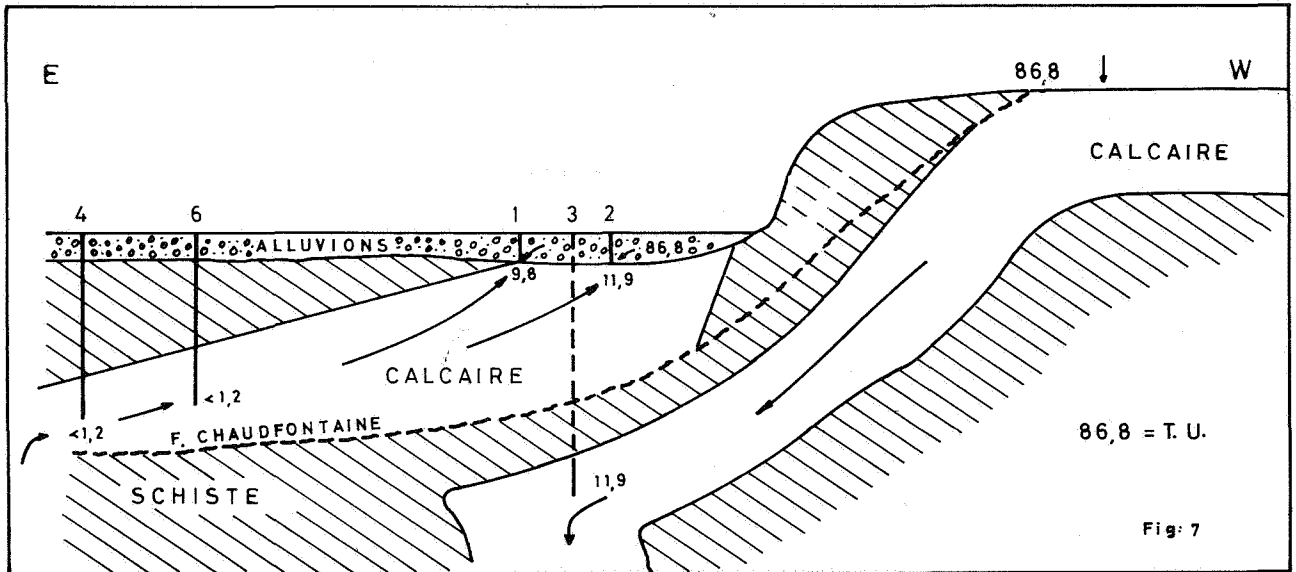


Fig. 7 - Coupe géologique schématisée avec les différents captages et leur teneur en tritium (T.U.).

Les eaux les plus anciennes, donc ayant fait le plus long trajet souterrain, passent par le P 6 et le captage Graulich (T.U. < 1,2). En continuant vers l'Ouest, elles se mélangent légèrement aux eaux superficielles. (T.U. = 86,8) et sourdent au captage Prince Albert de Liège (T.U. = 9,8) et ce mélange est un peu plus prononcé au captage Fourmarier (T.U. = 11,9).

Dans toutes ces valeurs, il n'y a qu'une anomalie apparente, celle du sondage Marguerite qui capte à 321 m de profondeur une eau avec une teneur en tritium de 11,9 T.U. Ne pouvons-nous pas trouver là, une preuve que l'eau du captage Marguerite est une eau descendante qui a percolé dans les terrains pendant une dizaine d'années, ce qui corrobore une de nos hypothèses du chapitre sur l'anomalie géothermique de Chaudfontaine : le massif calcaire du Frasnien situé sous la faille de Chaudfontaine et alimentant le captage Marguerite est refroidi par une eau descendante.

Chimisme des eaux

D'après la théorie de J. Delecourt, qui a résisté à la critique, le trajet souterrain de l'eau dans le sens du courant peut se diviser en zones qui sont de l'amont vers l'aval :

- 1 - Zone des eaux dures d'infiltration.
- 2 - Zone des échanges de base.
- 3 - Zone des eaux douces sodiques.
- 4 - etc.

Dans la zone des échanges de base, la concentration en m (Ca + Mg) diminue alors que la concentration en m (Na + K) augmente.

Si nous prenons le cas de la Source Marguerite et du P 6 nous avons : (voir analyses chimiques à l'annexe II).

	Marguerite	P 6
m (Ca + Mg)	5,20	4,72
m (Na + K)	1,38	2,13

nous avons une diminution de la concentration en m (Ca + Mg) dans le sens source Marguerite vers le P 6 et une augmentation de la concentration en m (Na + K) dans le même sens.

Donc dans le trajet souterrain, la source Marguerite se situe en amont de la source du P 6.

Méthode du C¹⁴

L'Institut de Radiohydrométrie de Munich a déterminé la teneur en C¹⁴ du H CO₃ contenu dans les eaux provenant des sondages Marguerite et Graulich. Les résultats sont exprimés en % moderne.

Eau du sondage Marguerite : 21,6 ± 1,0

Eau du sondage Graulich : 6,2 ± 0,4

Les isotopes en géologie doivent être maniés avec prudence, j'ai donc demandé l'avis de Madame Dauchot, Chef de Travaux à l'Institut Royal du Patrimoine Artistique qui m'a été recommandée pour ses compétences en la matière.

Madame Dauchot, que je remercie, m'a communiqué que les teneurs en C¹⁴ permettent de calculer un âge "apparent" parcequ'il faut tenir compte, pour avoir l'âge "réel" de la dissolution des roches calcaires formant le réservoir car ce processus modifie de façon importante la concentration en C¹⁴ dans les eaux. Mais un calcul approximatif donne :

Eau du sondage Marguerite : 12.600 ans avant 1950 (B.P.)

Eau du sondage Graulich : 22.655 ans avant 1950 (B.P.)

Si même ce ne sont que des âges "apparents", cette méthode du C¹⁴ confirme les résultats obtenus par la méthode du tritium. Dans le trajet souterrain, les eaux de la source Marguerite sont plus jeunes que les eaux de la source Graulich.

Conclusion

S'il est encore trop tôt pour tirer des conclusions sur la composition isotopique du soufre de SO₄ dans les eaux (1), nous pouvons noter la grande différence entre le captage Marguerite (+ 2,6) et le captage P 6 (+ 9,7) qui peut s'expliquer par l'historique différent de ces deux venues d'eau (2).

Une conclusion s'impose donc : l'eau du captage Marguerite est une eau descendante alors que celle du P 6 est une eau montante.

Le schéma de la fig. 7 nous permet de suivre une partie du trajet souterrain.

L'eau tombant sur la colline située entre la Vesdre et l'Ourthe s'infiltré dans les calcaires du Frasnien et descend en profondeur pour atteindre le captage Marguerite. Ce trajet est très lent, car d'après la teneur en tritium au captage Marguerite, l'eau met environ une bonne dizaine d'années pour parcourir un trajet souterrain moyen de 1,5 km, soit donc une vitesse de 150 m par an (1,7 cm/h).

Ce trajet d'entrée peut être complété par le trajet de sortie de l'eau qui va d'Est en Ouest, du captage P 6 à la source Prince Albert de Liège.

Entre le trajet d'entrée, surface vers source Marguerite et le trajet de sortie P 6 vers source Prince Albert de Liège, nous devons trouver la jonction qui descend suffisamment en profondeur pour donner à l'eau son thermalisme.

Le sondage 134 E/324 (P.P. 1978/4) a atteint la profondeur de 1229 m.

(1) - Cette composition s'exprime par l'excès relatif de l'isotope 34 par rapport à l'isotope 32 qu'il présente vis-à-vis d'une troilite provenant de la météorite de Canon Diablo.

(2) - D'après une communication de L. Dejonghe, la composition isotopique du soufre de la baryte de précipitation synsédimentaire d'âge frasnien varie entre 26,1 et 28,1.

Il a recoupé :

- de 7,30 à 341,90 m : le massif charrié constitué de Famennien à 341,90 m : la Faille Eifélienne
- de 341,90 à 395,95 m : un lambeau de poussée constitué de calcaire du Carbonifère et de schiste du Namurien.
- de 395,95 à 794,10 m : un massif en dressant renversé avec plis et failles constitué de schiste et de grès du Namurien (zone H ?).
- de 794,10 à 796,80 m : la Faille de la Rochette.
- de 796,80 à 1229,00 m (base du sondage) : une série en plateaux constituée de schiste et grès du Namurien (zones R et H).
Le sommet de la zone H se situe à 1006,50 m.

Dans le massif de Herve, les zones H et E ont une épaisseur de :

- à Bolland : 122 m
- à Soumagne : 167 m
- à Soiron : 174 m

Or au sondage 134 E/324 on a encore foré sous le sommet de la zone H une épaisseur de 220 m sans atteindre les calcaires du Viséen, ce qui peut s'expliquer par une faille de redoublement dans la portion de sondage presque exclusivement exécutée au trépan de 1008 à 1229 m.

Les dressants constitués de Namurien inférieur recoupés par le sondage 134 E/324 de 395,95 à 794,10 m postulent l'existence de dressants de calcaire du Carbonifère à peu de distance au Sud de celui-ci (fig. 8). Par le biais de la Faille Eifélienne, ces dressants de calcaire carbonifère peuvent se trouver en contact avec les calcaires du Frasnien du massif charrié.

Ainsi notre jonction entre le captage Marguerite et le P 6 peut être établie. (Fig. 9). Par les calcaires du Frasnien, les eaux parcourent le trajet allant de la surface au sondage Marguerite, ces calcaires étant en contact, par la faute de la Faille Eifélienne, sur les dressants des calcaires carbonifères, les eaux peuvent descendre à une profondeur supérieure à 1229 m (voir sondage 134 E/324) et atteindre une température suffisante pour remonter par les calcaires du Carbonifère et toujours par le jeu de la Faille Eifélienne, passer des calcaires du Carbonifère aux calcaires du Frasnien et continuer leur trajet via le P 6, le captage Graulich et enfin sourdent en surface au contact des calcaires et des schistes du Frasnien aux captages Prince Albert et Fourmarier.

Les géothermomètres

Dans la littérature il est question de plusieurs méthodes basées sur le chimisme des eaux pour déterminer la température atteinte par les eaux en profondeur et ainsi connaissant le gradient géothermique, calculer le point le plus bas du trajet souterrain. Mais chacune de ces méthodes géothermiques présente des limites d'application qui les rendent d'utilisation difficile et demandent une grande expérience que nous avons trouvée auprès de M.P. Oustièrre du B.R.G.M. Le tableau suivant donne les résultats obtenus pour les différents géothermomètres couramment utilisés (les concentrations sont exprimées en mole/litre).

Ce tableau est accompagné des considérations suivantes :

“On peut éliminer immédiatement l'équilibre avec la chalcédoine (t_2) qui donne une température négative. Il faut surtout noter la discordance importante entre les géothermomètres d'équilibre avec le quartz (t_1) et d'équilibre avec les feldspaths (t_3). Ce cas se produit le plus souvent lorsque la composition chimique de l'eau est perturbée, lors de sa remontée, par la formation de minéraux argileux ou par la dissolution de minéraux courants dans les roches sédimentaires (chlorures, carbonates). Lorsque ce schéma est réalisé, on a montré que le thermomètre Na/K et, a fortiori, le thermomètre Na-K-Ca sont inutilisables. Ainsi la température du réservoir ne peut être approchée que par la température t_1 , d'équilibre avec le quartz, c'est-à-dire 52° C”.

	Formule	Température obtenue	
		n° 396	n° 310
t ₁	$t_{\text{SiO}_2(\text{quartz})} = \frac{1.322}{0,435 - \log(\text{SiO}_2)} - 273$	52° C	52° C
t ₂	$t_{\text{SiO}_2(\text{chalcédoine})} = \frac{1.015}{0,11 - \log(\text{SiO}_2)} - 273$	- 2° C	- 2° C
t ₃	$t_{\text{Na/K}} = \frac{908}{0,70 + \log(\text{Na/K})} - 273$	204° C	198° C
t ₄	$t_{\text{Na-K-Ca}} = \log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + \beta \log \frac{\sqrt{\text{Ca}}}{\text{Na}} = \frac{1.647}{T} - 2,24$		
	avec $\beta = 1/3$ pour $t > 100^\circ \text{C}$	150° C	150° C
	avec $\beta = 4/3$ pour $t < 100^\circ \text{C}$	42° C	45° C

Cette valeur est un maximum qui est atteint si toute la silice dissoute est à l'état de quartz et d'après J. Boulegue et d'autres (Seminar on Geothermal Energy EUR 5920 Vol. II p. 458) l'estimation directe de la température par cette méthode donne des résultats par excès car la teneur en silice dissoute ne dépend pas uniquement de la température mais aussi du pH.

Pour vérifier cette température d'équilibre avec la quartz, Mr. P. Oustrière m'a signalé une méthode récente basée sur le rapport Na/Li (Fouillac C., Michard G. - 1981 - Sodium/Lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. - Geothermics, 10, 1, 55-70).

Avec les concentrations en Na de $2,33 \cdot 10^{-3}$ et en Li de $4,32 \cdot 10^{-6}$ en mole/litre introduites dans l'équation établie pour les eaux de faible salinité :

$\log \text{Na/Li} = 1000/T - 0,38$ avec T en ° K, nous obtenons une température de 48° C.

Nous pouvons donc admettre que l'eau de Chaudfontaine a atteint une température de 50° C.

A l'aplomb du sondage n° 396, la température au niveau de la faille Eifélienne (- 450 m) est de 27° C (voir fig. 5).

Sous la faille Eifélienne, c'est-à-dire dans le Silésien du Massif de Herve le degré géothermique est de 47 m (Sondage de Soumagne), donc pour une augmentation de température de 27° C à 50° C, il faut une augmentation de profondeur de $(50 - 27) \times 47 = 1.081$ m donc l'eau doit atteindre $1.081 + 450 = 1.531$ m. D'après la coupe de la fig. 8, les eaux circulant dans un niveau karstique du Tournaisien peuvent aisément descendre à cette profondeur et ce niveau karstique existe réellement, car au sondage de Soumagne, une caverne de 3,80 m de hauteur a été rencontrée dans le Tournaisien à 1.723,10 m.

La transmissivité

La transmissivité T est le produit du coefficient de perméabilité k et de l'épaisseur de l'aquifère et peut se calculer par la méthode de Theis sur la courbe de remontée de l'eau dans un puits soumis préalablement à un pompage à débit constant.

Lors de différents essais, les résultats suivants ont été obtenus :

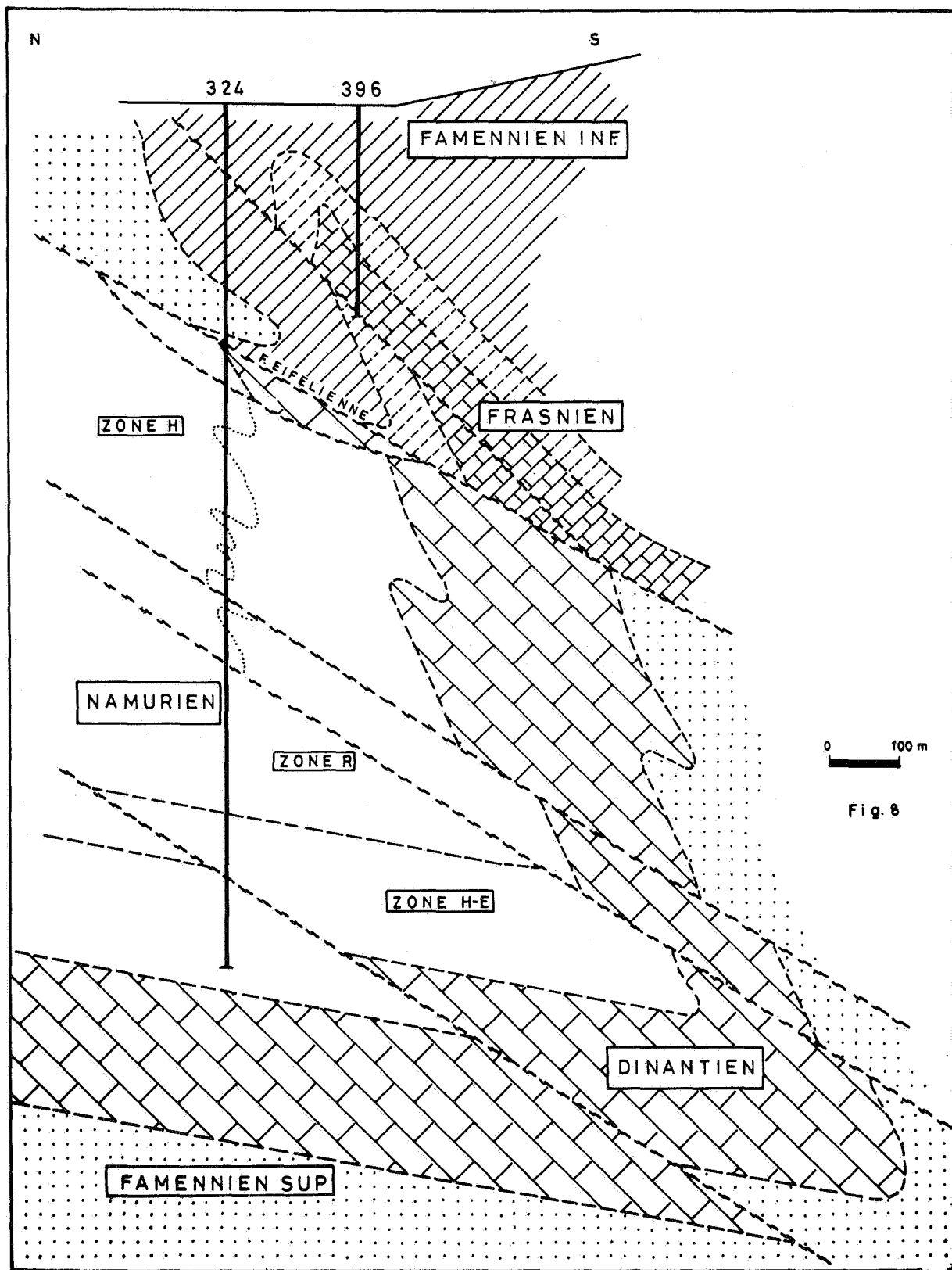


Fig. 8 - Coupe géologique passant par les sondages 324 et 396.

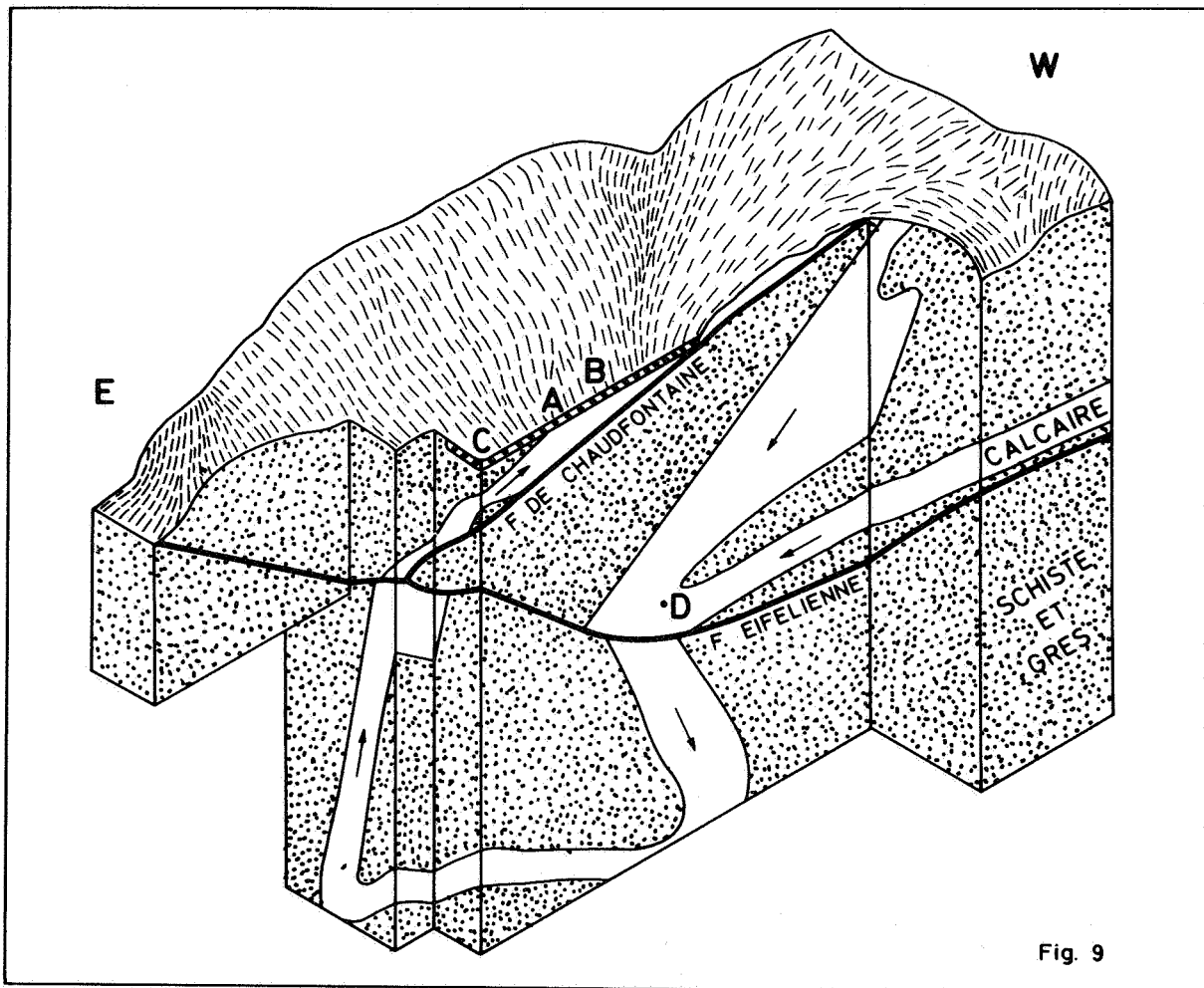


Fig. 9 - Bloc-diagramme illustrant la circulation des eaux en profondeur.
 A : Prince de Liège, B : Fourmarier, C : Graulich D : Venue d'eau au sondage Marguerite.

Sources	Date	Débits m ³ /h	Rabat. m.	Transmissivité en 10 ⁻⁶ m ² /sec.
Marguerite	01/74	28,8	17,6	290,0
	12/76	9,2	7,5	240,0
	01/77	21,0	15,5	240,0
Graulich	11/78	10,2	46,5	12,0
	01/80	12,2	43,0	15,4
P 6	01/80	5,4	67,0	5,9

Nous voyons que dans une nappe karstique, la transmissivité obtenue par cette méthode n'a qu'une valeur locale limitée au puits testé et ne caractérise pas la nappe aquifère, le coefficient de perméabilité des calcaires pouvant passer de valeur infime à une presque-infinie.

Conclusions

Chaudfontaine est un don d'une grande faille de charriage, la Faille Eifélienne qui, dans cette zone très limitée, met en contact les calcaires du Frasnien du massif charrié sur les dressants du calcaire carbonifère du Massif de Herve. En passant par le réseau karstique du calcaire du Frasnien à celui du calcaire du Carbonifère, l'eau descend jusqu'à 1.500 m de profondeur et atteint une température de 50° C. Cette eau chaude, au pouvoir ascendant, remonte par un autre réseau karstique dans les calcaires du Carbonifère puis du Frasnien via la Faille Eifélienne pour arriver en surface à la source Prince Albert de Liège en modifiant au cours des siècles la température des terrains ambiants et ainsi créer l'anomalie géothermique de Chaudfontaine.

Remerciements

Ce m'est un devoir agréable de remercier mes amis Gilbert Sérésiat et Nicolas Berleur, Directeurs à Chaudfontaine Monopole, pour l'aide qu'ils m'ont apporté en faisant exécuter les mesures et analyses indispensables à la réalisation de cette synthèse.

Annexe 1 - Teneurs isotopiques

Sources	Dates	T.U. ± 2	δ 2H en ‰	δ 18O en ‰	δ 34S(SO4) en ‰
	Etalons		SMOW	SMOW	troilite
Belles Fontaines P 3	30/7/76		- 51,9		
	4/4/78	86,8 ± 5,7	- 52,3	- 8,08	
P 6	9/2/77		- 51,0		
	4/4/78	< 1,2	- 51,5	- 8,06	+ 9,7
	30/7/76		- 51,1		
Fourmarier	4/4/78	11,9 ± 1,0	- 51,4	- 7,96	
	30/8/76		- 50,4		
Marguerite	4/4/78	11,5 ± 0,9	- 51,0	- 7,94	+ 2,6
	24/1/79	12,3 ± 1,1	- 51,1	- 7,86	
	30/7/76		- 50,8		
Prince Albert	4/4/78	9,8 ± 0,8	- 51,1	- 7,95	
	30/7/76		- 50,1		
Graulich	24/1/79	< 1,2	- 50,9	- 7,92	
Vesdre (rivière)	30/7/76		- 51,7		
	9/2/77		- 53,9		

Les sources thermales sont : P 6, Fourmarier, Marguerite, Prince Albert et Graulich.
Les analyses datées du 4/4/78 et du 24/1/79 ont été effectuées par "Institut für Radiohydrométrie de München". Les autres par le département Minaqua de la Société Industrielle des Conduites d'Eau.

Annex II - Analyses chimiques

Réalisées par le Laboratoire Delvaux-Maillet à Héverlée.
Les résultats sont exprimés en mg/litre.

	P 6 N° 310	Graulich N° 396	Marguerite N° 303
Rés. évaporation	387	394	380
Cendres sulfatées	484	470	451
NO ₂	0	0	0
NO ₃	0	0	0
Cl ⁻	39	39	30,5
SO ₄	38,7	34,2	44,6
Ca ²⁺	60,8	64	70,4
Mg ²⁺	20,16	20,2	20,16
Na ⁺	46,24	42,1	29,6
K ⁺	4,67	4,49	3,46
SiO ₂	14	14	12
Fl	0,45	0,45	0,20
HCO ₃	323,3	311,1	302
pH	6,9	7,25	7