

SERVICE GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE

MÉMOIRE N° 16

JALONS
GÉOTHERMIQUES

PAR

R. LEGRAND

Géologue en chef-directeur au Service Géologique de Belgique

IMPRIMERIE CENTRALE
du Ministère des Affaires économiques
Rue J.-A. De Mot, 24-26
1040 BRUXELLES

33.B.4.75



GEOHERMAL DATA

by R. LEGRAND

Summary : In the first chapter, the author presents all the geothermal data available from the "Archives de la Carte Géologique" by the Geological Survey of Belgium. The check-lists give firstly the localisation; afterwards, the data about the depth, the temperature in °C and the concerned geological formation; at last, the geothermal gradients (main, at intervals, and the mean).

The second chapter is dealing with the transformation of the data for further comparison.

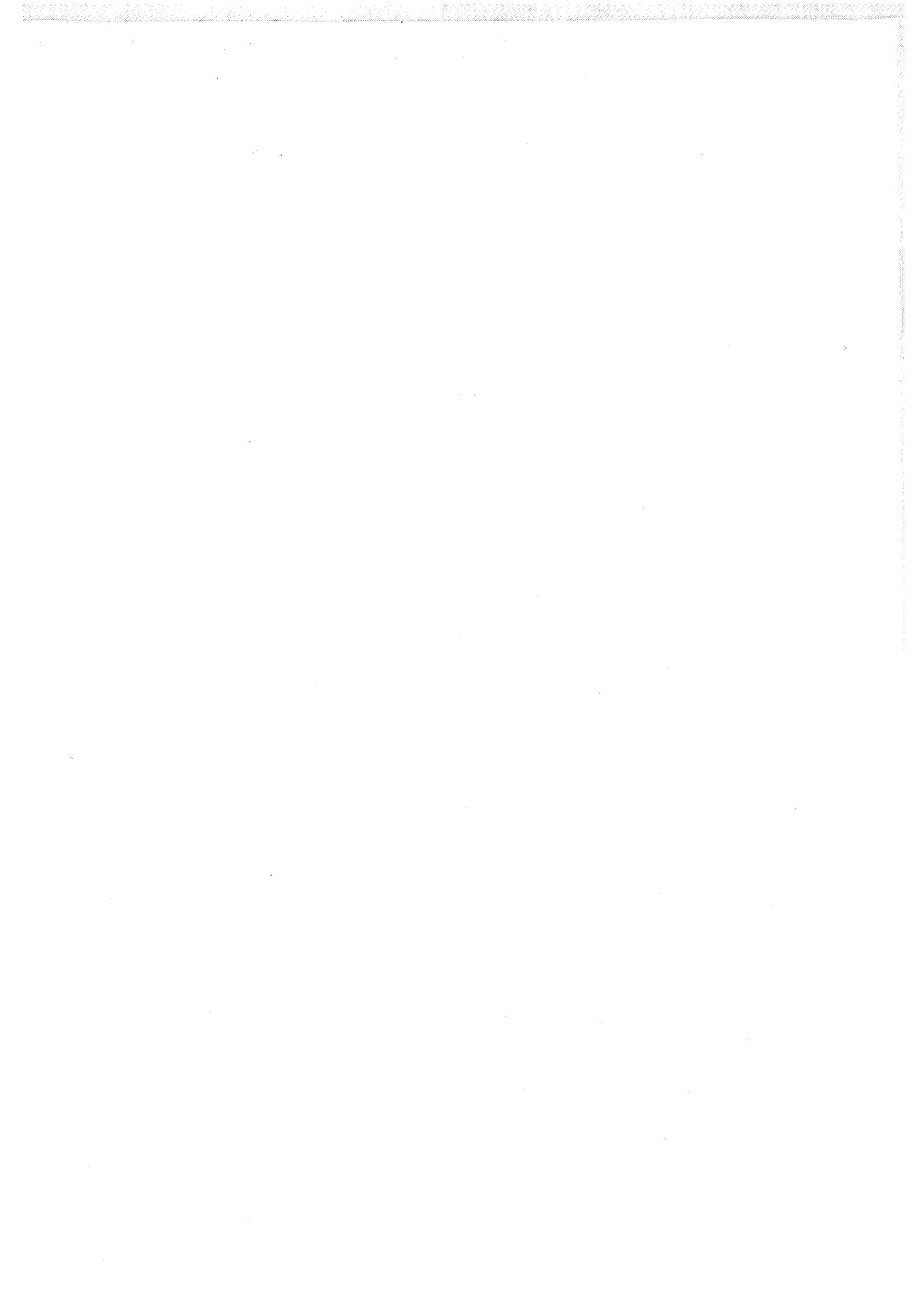
The uniformised data are used along the third chapter, making a set of sketch maps. It appears that the mean geothermal gradient is of 1°C each 33 m only to the depth of 1 500 m below the sea-level; downwards, it should become shorter.

This value is only a mean. Indeed, the "colder" areas of the Ardenne and the "Massif du Brabant" (older Paleozoic basement) contrast with the "warmer" areas of the Kempen and the Haine - Sambre - Meuse ridge (younger Paleozoic basement).

Some distortions of the geothermal flux yielded because of the flow of the fresh, brackish or briny, underground waters would not be neglected.

Geological Survey of Belgium
BRUSSELS

Augustus 1st 1974



JALONS GEOTHERMIQUES

R. LEGRAND.

INTRODUCTION

Avant propos

A la fin du siècle dernier, les géologues belges profitèrent du creusement de nombreux puits pour mesurer la température de l'eau des nappes aquifères. Ils en conclurent qu'à partir de dix mètres de profondeur la température était constante, les fluctuations saisonnières et annuelles de la température n'affectant que les premiers mètres. Ils en déduisirent une température moyenne de 10° pour le Nord du pays et de 8° en Ardenne, en proposant 9° pour la région comprise entre l'Ardenne et le sillon houiller de Haine, Sambre et Meuse, ainsi que pour la Gaume.

Au début du siècle, avec le creusement de puits dépassant la profondeur de 100 m, voire de 200 m, et influencés également par les données du sondage profond de Berlin, les géologues belges se rallièrent à un gradient géothermique moyen de 33 m. Cette grandeur était commode et correspondait à une augmentation de température de 3° par tranche de cent mètres d'approfondissement. On savait cependant que le gradient géothermique était de l'ordre de 60 m en Ardenne et pouvait descendre sous 30 m dans le Terrain Houiller, lorsque les mesures étaient effectuées suffisamment loin des travaux pour ne plus être affectées par le refroidissement causé par la ventilation.

Il n'y eut pas pourtant de synthèse à ce sujet. Les données thermiques sont éparpillées dans la littérature scientifique, le plus souvent à l'occasion des descriptions de sondages.

C'est pour combler cette lacune, qu'il y a plus de vingt ans, j'ai glané toutes les données, éparses dans la littérature et les Archives de la Carte géologique, pour en faire la synthèse et en extraire des conclusions. Mon directeur, A. GROSJEAN, eut la conscience de me faire remarquer l'insuffisance des données, la fluidité de leur valeur, d'où le caractère prématuré de mes conclusions.

De nouvelles données se sont accumulées depuis. Le moment a paru opportun à mon directeur, A. DELMER, de reprendre mon travail et d'en faire la mise au point actuel. Je le remercie sincèrement de la collaboration apportée à la recherche des données récentes.

Présentation

Le premier chapitre présente les observations à l'état brut sous forme de tableaux. Leur interprétation fait l'objet du chapitre suivant. D'innombrables mesures de température sont consignées aux Archives de la Carte géologique, à l'initiative de F. HALET. Les températures mesurées à la source et dans les puits peu profonds ont été rejetées de ce travail dont le but n'est pas de rechercher la température moyenne du lieu.

C'est pourquoi j'ai négligé délibérément la grosse majorité des données des Archives pour n'en retenir que les mesures concernant des puits profonds de cent mètres et plus. A quelques exceptions près, ces observations ont fait l'objet de publications. Le lecteur soucieux de retourner à la publication originale trouvera les références bibliographiques par le biais des Archives de la Carte Géologique, ce qui m'évite d'alourdir le travail par l'intercalation incessante des références.

La localisation des observations est assurée par les deux premières colonnes des tableaux. La première colonne indique le lieu où la mesure a été effectuée, tel qu'il a été publié dans la

littérature. C'est le plus souvent le nom d'une localité, mais ce peut être celui d'un hameau ou d'un lieu-dit. Sans constituer un accroc majeur aux règles des références bibliographiques, l'orthographe flamande a été modernisée.

La deuxième colonne donne l'indexation aux Archives de la Carte Géologique sous la forme habituelle. Le premier nombre correspond au numéro de la carte géologique, constituée par la juxtaposition de deux planchettes topographiques. A chacune de ces planchettes correspond un dossier spécifié W pour la planchette occidentale et E pour la planchette orientale de la carte géologique. Le second nombre correspond au numéro d'indexation des observations consignées dans le dossier mentionné. Lorsqu'il s'agit de sondages de recherche houillère, le numéro de répertoire sous lequel ils ont été publiés aux Annales des Mines est reporté dans la marge droite de la première colonne.

Les observations doivent comporter un certain nombre de paramètres pour être interprétables en données géothermiques. La première des indications est celle de la température moyenne du lieu. Pour cette valeur, j'ai utilisé la carte des températures moyennes de l'air à un mètre au-dessus du sol, pouvant varier d'un demi degré d'une année à l'autre, publiée par L. PONCELET et H. MARTIN ⁽⁰⁾. Cette carte (de leur page 190), complétée par les observations des stations qu'ils mentionnent (pages 49 à 77), est présentée en annexe.

Le deuxième paramètre est simple: c'est la cote du sol à l'aplomb de l'endroit de la mesure.

La troisième colonne des observations donne la profondeur à laquelle la température a été mesurée. Ici, un commentaire. Dans le cas de mesures effectuées au fond de charbonnages, la profondeur est donnée par rapport à l'orifice du puits quand il n'est pas possible de retrouver la cote du lieu situé à la verticale de l'endroit de la mesure. Dans le cas de température mesurée dans un sondage, il n'y a pas de difficulté à préciser au mètre près la position des thermomètres. Si la température a été mesurée dans l'eau au cours de pompage, à l'orifice du puits, deux cas se présentent. Dans l'ancien temps, dès qu'un sondeur constatait la rencontre d'une nappe aquifère, il arrêta le creusement et faisait une mesure de débit; d'où une précision quasi certaine sur la profondeur de la venue d'eau. A défaut de ce renseignement, on ne connaît que la profondeur du sondage et non de la venue d'eau. Dans ce cas, le nombre indiquant la profondeur est mis entre parenthèses dans la troisième colonne.

La quatrième colonne indique en degrés Celsius la température mesurée dans l'eau à l'orifice du sondage ou du puits, lors d'un pompage à débit constant. Ce paramètre peut être fonction du débit et dans ce cas, c'est la température la plus élevée qui est notée. Lorsque cette température est précédée d'un astérisque, cela signifie que la température a été mesurée dans la boue de forage et non dans l'eau.

La cinquième colonne donne la température mesurée au fond. Dans le cas de travaux de recherche houillère bien en avant des fronts d'exploitation, les thermomètres ont été groupés au fond d'un ou plusieurs trous de sonde, au front ou en paroi du bouveau, l'aération étant arrêtée durant plusieurs jours; les valeurs mesurées sont précédées d'un astérisque; cette valeur est la moyenne calculée sur des thermomètres à maximum dont le nombre, lorsqu'il est connu, est indiqué entre parenthèses dans la marge à gauche. Dans le cas de forages, la température est mesurée au moyen de thermomètres biseautés, à déversement de mercure donc, descendus rapidement après arrêt de la circulation de la boue et laissés au fond du forage plusieurs jours; si on a pris la précaution de rétablir la circulation des boues avant de relever rapidement les thermomètres, on peut avoir la certitude que la température mesurée correspond à celle du terrain du fond; la remise en circulation des boues avant la relevée des thermomètres est nécessaire pour éviter que les thermomètres (souvent trois bisautés à des hauteurs variant de dix degrés) ne soient influencés

⁽⁰⁾ L. PONCELET et H. MARTIN - *Esquisse climatographique de la Belgique*. - Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles 1947

éventuellement en cours de remontée par une température plus élevée provenant du terrain ou de venue d'eau plus chaude. Enfin dans les forages, on mesure de plus en plus la température de la boue en repos par la méthode Schlumberger permettant d'obtenir un enregistrement continu de la température sur toute la hauteur; cette méthode a l'avantage de localiser et mesurer les échanges de fluides marqués par des sauts brusques de température, mais présente le grand désavantage de mesurer davantage la conductivité thermique des boues que la valeur absolue de la température dans le terrain dont elle ne peut fournir qu'une idée parfois très relative (voir plus loin l'exemple de Grand-Halleux); lorsque les mesures de température ont été effectuées par cette méthode, la mention en est faite dans la marge droite de la toute première colonne.

Enfin, la dernière colonne des observations mentionne la formation géologique présente à la profondeur indiquée.



Chapitre I - Données géothermiques

Cote : o = 0 c = - 1000 f = - 2500
 a = - 250 d = - 1500 g = - 3000
 b = - 500 e = - 2000 h = - 3500

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t° _m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t°	Δ t° par 500m	t° en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$
					orif.	fond		g° total	g' partiel						
Woensdrecht	(5E)	10°0	+4	347		22°1	Lédien	28,7	25,6	o	10°				
"	N.B.27	"	"	370		23°0	Lédien	28,5	25,0	a	19°				
"	"	"	"	475		27°2	Yprésien	27,6	42,9	b	28°	b-o=18°	3°6	28m	
"	"	"	"	535		28°6	Yprésien	28,8	61,4						
"	"	"	"	670		30°8	Maastrichtien	32,2	11,9						
"	"	"	"	770		39°2	Sénonien	26,4	25,6						
"	"	"	"	870		43°1	Sénonien	26,3	21,7						
"	"	"	"	970		47°7	Namurien	25,7	34,9	c	49°	c-b=21°	4°2	24m	$\frac{c-b}{b-o} = 1,2$
"	"	"	"	1 200		54°3	Viséen	27,1							
Heibaart	129	7E178	+23	396		28°	Oligocène	21,4	200,0	a	22°				
"	"	"bis	"	596		29°	Landénien	30,6	22,9	b	29°	b-c=18°	3°6	28m	$\frac{c-b}{b-o} = 1,05$
"	"	"	"	1 465		67°	Famennien	25,4	43,3	c	48°	c-b=19°	3°8	26m	$\frac{d-c}{c-b} = 1,1$
"	"	"	"	1 638		71°	Silurien	26,6		d	69°	d-c=21°	4°2	24m	
Blankenberge	10E 30	9°8	+3	(248)	20°		Landénien	(18,4)		a	(24°)				
Het Zoute	11E 48	9°9	+10	402	18°		Landénien	(39,8)		a	(16°)				
Turnhout	120	17E225	+30	-				-		o	10°				$\frac{c-b}{b-o} = 1,3$
"	"	"	"	687		29°5	Maastrichtier	34,4		a	18°				
"	"	"	"	-				-	21,5	b	25°	b-o=15°	3°0	33m	$\frac{d-c}{c-b} = 1,2$
"	"	"	"	1 877		84°84	Namurien	24,9	17,1	c	45°	c-b=20°	4°0	25m	$\frac{e-d}{d-c} = 1,04$
"	"	"	"	2 185		102°86	Viséen (V3c)	23,4	57,1	d	69°	d-c=24°	4°8	21m	
"	"	"	"	2 225		103°56	Viséen (V3b)	23,7		e	94°	e-d=25°	5°0	20m	
Ostende	21E 41	9°6	+6	308		22°	Cambrien	24,8		a	20°				
"	" 122	9°6	+9	(350)	20°6		Cambrien	(27,5)		a	(19°)				
Bruges	23W145	9°8	+5	(212)	19°		Landénien	(20,7)		a	(22°)				
Hoboken	28W121	10°1	+6	(144)	15°		Lédien	(25,7)							
Zandhoven	39	29E144	+10	-				-		a	(20°)				
"	"	"	"	505	26°5		Landénien	(26,2)		b	(29°)				
Hoboken	43W 3	10°1	+7	(151)	15°		Lédien	(26,7)							
Bourg Léopold	118	47W251	+58	-				-		a	(20°)				
"	"	"	"	-				-		b	(29°)				
"	"	"	"	-				-		c	46°				
"	"	"	"	1 410		58°	Westphalien	29,0		d	63°				
Overmere	56W 8	10°2	+6	(195)	14°		Sénonien	(40,6)							
Zele	56E 5	10°2	+6	(193)	15°		Landénien	(33,3)							
Termonde	57W 13	10°2	+5	157	16°		Landénien	(25,1)							
Malines	58E 18	10°0	+7	(99)	12°		Yprésien	(39,6)							

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t ^o _m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t ^o	Δ t ^o par 500m	t ^o en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2^o}{\Delta t_1^o}$
					orif.	fond		g ^o total	g' partiel						
Booischoot	59E146	9°8	+13	-				-		a	(16°)				
"	"	"	"	-				-		b	(22°)				
"	"	"	"	-				-		c	34°				
"	"	"	"	1 327		42°	Silurien	41,2		d	47°				
Tessenderlo	61W120	9°5	+25	-				-		a	(18°)				
"	"	"	"	(425)	21°		Maastrichtien	(31,3)		b	(26°)				
"	" 128	9°5	+27	-				-		a	(18°)				
"	"	"	"	(426)	21°		Maastrichtien	(31,3)		b	(26°)				
Koersel 77	61E155	9°4	+37	-				-		a	(18°)				
"	"	"	"	478	21°		Maastrichtien	(34,1)		b	(25°)				
Beerlingen Puits II	" 157	9°4	+38	-				-		a	(18°)				
"	"	"	"	650		29°4	Westphalien	32,5		b	26°				
Heusden	62W291	9°3	+55	398	20°		Maastrichtien	(31,3)		a	(19°)				
Zwartberg Puits 74	63W153	9°4	+81	266	15°		Landénien	(38,6)		o	11°				
"	"	"	"	290	15°5		Landénien	(38,4)							
"	"	"	"	315	16°		Landénien	(38,5)							
"	"	"	"	340	16°		Maastrichtien	(41,0)		a	(18°)				
"	"	"	"	494	22°		Sénonien	(32,8)							
"	"	"	"	561	23°5		Westphalien	(33,2)		b	(26°)	b-o=15°	3°0	33m	
"	bouveau Est	9°4	+85	1 010		44°	Westphalien	29,2		c	(47°)	c-b=21°	4°2	24m	$\frac{c-b}{b-o} = 1,4$
Niel bij As 111	63E187	9°4	+88	-						a	(21°)				
"	"	"	"	-						b	(29°)				
"	"	"	"	-						c	(46°)				
"	"	"	"	1 611		63°5	Westphalien	29,8		d	63°				
Eisden Puits 81	64W176	9°4	+42	82		15°1	Oligocène	14,4		o	12°				
"	"	"	"	150		23°	Oligocène	11,0	8,7						
"	"	"	"	190		21°8	Landénien	15,3	-33,3						
"	"	"	"	225		21°3	Maastrichtien	18,9	-70,0						
"	"	"	"	270		19°2	Maastrichtien	27,6	-21,4						
"	"	"	"	368		22°8	Sénonien	27,5	27,2	a	20°				
"	"	"	"	440		23°7	Sénonien	30,8	80,0						
"	"	"	"	540		26°2	Westphalien	32,1	40,0	b	26°	b-o=14°	2°8	36m	
"	"	"	"	785		41°3	Westphalien	24,6	16,4						
"	"	"	"	845		49°8	Westphalien	20,9	7,1						
"	"	"	"	970		59°3	Westphalien	19,4	13,2	c	63°	c-b=37°	7°4	14m	$\frac{c-b}{b-o} = 2,6$
Langemark	66E 70	10°	+11	(145)	13°		Landénien	(38,7)							
Eke	70W 19	9°8	+ 9	(108)	12°		Landénien	(40,0)							
Alost	71E 2	10°	+15	(210)	16°		Cambrien	(32,3)		a	(18°)				
Lebbeke	72W 46	10°1	+11	(162)	14°5		Landénien	(36,8)		a	(17°)				
Vilvorde	73E 5	9°8	+16	(174)	14°6		Sénonien	(36,3)		a	(17°)				

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t° _m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t°	Δ t° par 500m	t° en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2^\circ}{\Delta t_1^\circ}$
					orif.	fond		g° total	g' partiel						
Aarschot	75W 1	9°7	+13	(138)	14°		Landénien	(27,6)							
"	" 12	9°7	+12	(159)	16°		Landénien	(22,4)		a	(21°)				
Zelem	76W 15	9°6	+26	(99)	14°		Bruxellien	(20,2)							
Diest	" 16	9°6	+20	(104)	13°5		Yprésien	(23,6)							
Webbekom	122 " 264	9°6	+23	-						a	(19°)				
"	"	"	"	516		27°5	Namurien	28,8		b	28°				
Halen	131 76E243	9°5	+25	-						a	(17°)				
"	"	"	"	1 291		43°8	Tournaisien	37,6		b	(23°)				
"	"	"	"	1 299		36°	"			c	37°				
"	"	"	"	1 366		32°	"			d	50°				
Wijvenheide	86 77W174	9°4	+37	-						a	(19°)				
"	"	"	"	-						b	(28°)				
"	"	"	"	-						c	(45°)				
"	"	"	"	1 639		65°8	Namurien	29,1		d	62°	d-c=17°	3°4	29m	
"	"	"	"	1 903		79°25	Namurien	27,2	19,6	e	86°	e-d=24°	4°8	21m	$\frac{e-d}{d-c} = 1,4$
Hasselt	" 183	9°4	+30	(221)	17°		Maastrichtien	(25,4)		a	(20°)				
"	77E263	9°4	+32	(199)	17°		Maastrichtien	(24,6)		a	(21°)				
Waterschei Puits I	78W205	9°4	+83	-						a	(21°)				
"	"	"	"	-						b	(29°)				
"	"	"	"	1 100		49°	Westphalien	27,8		c	48°				
Winteralag Puits I	78W206	9°4	+77	493		25°	Westphalien	31,6		o	12°				
"	"	"	"	540	(8)	27°94	Westphalien	29,1	16,0	a	20°				
" (travaux)	"	"	"	559		28°7	Westphalien	29,0	10,8						
"	"	"	"	572	(2)	29°1	Westphalien	29,0	32,5	b	29°	b-o=17°	3°4	29m	
"	"	"	"	600	(12)	30°61	Westphalien	28,3	18,5						
"	"	"	"	660	(4)	34°0	Westphalien	26,8	17,7						
"	"	"	"	696	(2)	31°0	Westphalien	32,2	-12,0						
" Puits II	" 207	9°4	+77	-						a	19°				
"	"	"	"	484		24°	Westphalien	33,15		b	27°	b-o=15°	3°0	33m	
Opgrimbe	49 78E 1	9°5	+47	-						a	(17°)				
"	"	"	"	530	20°5		Namurien	(38,8)		b	(24°)				
Eisden(dorp)	76 79W111	9°5	+44	300		20°8	Sénonien	26,5		o	11°				
"	"	"	"	344		21°8	Sénonien	28,0	44,0						
"	"	"	"	385		22°9	Sénonien	28,7	37,3						
"	"	"	"	420		24°8	Sénonien	27,5	18,4						
"	"	"	"	450		25°0	Sénonien	29,0	150,0						
"	"	"	"	555		31°1	Westphalien	25,7	17,2	b	31°	b-o=20°	4°0	25m	
"	"	"	"	615		34°5	Westphalien	24,6	17,6						
"	"	"	"	685		36°1	Westphalien	25,75	43,8						
"	"	"	"	773		39°2	Westphalien	26,0	28,4						
"	"	"	"	825		45°2	Westphalien	23,1	86,7						

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t° _m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t°	Δ t° par 500m	t° en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$
					orif.	fond		g° total	g' partiel						
"	"	"	"	905		49°2	Westphalien	22,8	20,0						
"	"	"	"	955		50°4	Westphalien	23,3	41,7						
"	"	"	"	1 100		59°8	Westphalien	21,9	15,4	c	54°	c-b=23°	4°6	22m	$\frac{c-b}{b-o} = 1,15$
Lendelede	83W 36	9°8	+24	(116)	12°		Landénien	(41,4)							
Stacegem	83E 11	9°7	+11	(114)	13°5		Sénonien	(25,9)							
Oudenaarde	84E 77	9°6	+10	(115)	13°5		Cambrien	(25,6)							
Nederzwalm	85W 3	9°5	+12	(97)	12°		Cambrien	(32,3)							
Anderlecht	88W 23	9°5	+24	(96)	12°2		Cambrien	(30°0)							
Laeken	" 28	9°5	+15	(107)	12°5		Sénonien	(30,6)							
Molenbeek	" 30	9°5	+25	(115)	12°		Cambrien	(37,1)							
Louvain	89E 1	9°6	+30	138	14°		Maastrichtien	(27,1)							
Kessel Lo	" 11	9°6	+18	158	13°5		Sénonien	(33,6)		a	(18°)				
Boutersem	90W 1	9°6	+69	(124)	11°		Landénien	(56,4)							
Geluwe	96E 62	9°9	+20	(98)	13°5		Landénien	(23,9)							
Saint-Gilles	102W 4	9°4	+77	(119)	10°5		Landénien	(79,3)							
Genval	116E139	9°3	+103	(98)	14°		Sénonien	(18,8)							
Bolland	122W260	9°0	+278	-						o	(15°)				
"	"	"	"	-						a	(21°)				
"	"	"	"	-						b	(26°)				
"	"	"	"	-						c	(37°)				
"	"	"	"	-						d	(48°)				
"	"	"	"	-						e	(59°)				
"	"	"	"	-						f	70°				
"	"	"	"	3 000		75°	Silurien	45,45							
Tournai	124E455	9°6	+47	-						g	81°		2°2	45m	
"	"	"	"	-						a	(18°)				
"	"	"	"	-						b	(26°)				
"	"	"	"	-						c	40°				
"	"	"	"	1 210		45°	Couvinien	34,2							
"	"	"	"	-						d	55°		2°9	34m	
Vieux Louze	125E298	9°5	+51	-						a	(17°)				
"	"	"	"	-						b	(23°)				
"	"	"	"	-						c	35°				
"	"	"	"	1 460		45°	Silurien	41,1							
"	"	"	"	-						d	47°		2°4	41m	
"	"	"	"	-						a	(19°)				
Tilleur	134W 47	9°5	+65	-						b	26°				
(Gosson, La Haye et Horlos)	"	"	"	-						c	41°				
Chaufontaine	134E211	9°2	+80	4	35°	37°3	Westphalien	33,9							
"	"	"	"	4	32°		Frasnien								
"	"	"	"	4	32°		Frasnien								
Val Benoit	" 218	9°5	+72	383		18°83	Westphalien	41,1		o	11°				
" (travaux)	"	"	"	507		25°03	Westphalien	32,6		a	17°				
"	"	"	"	602		28°33	Westphalien	32,0		b	27°	b-o=16°	3°2	31m	

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t _m ^o	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t ^o	△ t ^o par 500m	t ^o en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2^o}{\Delta t_1^o}$
					orif.	fond		g ^o total	g' partiel						
(recherches	"	9°4	+165	500		18°8	F. Eif./Westph.	53,2							
" Faille	"	"	+180	650		19°4	F. Eif./Westph.	65,0	250,0	b	19°	b-o=8°	1°6	63m	
Eifelienne)	"	"	"	"		19°2	F. Eif./Dévon.	66,3							
"	"	"	+185	672		19°1	F. Eif./Westph.	69,3	-73,0						
Chaufontaine 1	" 303	9°2	+80	0	19°										
" en 1965	"	"	"	40		18°3	Frasnien								
(Schlumb.)	"	"	"	50		18°4	"								
"	"	"	"	60		20°	"								
"	"	"	"	100		20°	"	9,3		o	20°				
"	"	"	"	110		19°5	"								
"	"	"	"	120		19°2	"								
"	"	"	"	130		19°	"								
"	"	"	"	140		19°	"								
"	"	"	"	150		18°9	"								
"	"	"	"	180		18°9	"								
"	"	"	"	200		18°8	"	20,8	-83,3						
"	"	"	"	220		18°8	"								
"	"	"	"	240		18°8	"								
"	"	"	"	250		18°2	"								
"	"	"	"	260		18°0	"								
"	"	"	"	270		18°9	"								
"	"	"	"	290		18°5	"								
"	"	"	"	300		18°4	"	32,6	-250,0	a	18°				
en 1966	"	"	"	0	19°5										
"	"	"	"	100		19°8	"	9,4		o	20°				
"	"	"	"	150		19°9	"								
"	"	"	"	200		19°9	"	18,7	1 000						
"	"	"	"	250		20°0	"								
"	"	"	"	300		20°1	"	27,5	500,0	a	20°				
"	"	"	"	350		20°8	"	30,2	71,4						
Soumagne	135W349	9°0	+257	160		11°	Namurien	80,0							
" (Schlumb.)	"	"	"	265		12°	"	88,3	105m	o	12°				
"	"	"	"	350		13°	"	87,5	85m						
"	"	"	"	430		14°	"	86,0	80m						
"	"	"	"	510		15°	"	85,0	80m	a	15°				
"	"	"	"	585		16°	"	83,6	75m						
"	"	"	"	650		17°	Westphalien	81,3	65m						
"	"	"	"	715		18°	"	79,4	65m						
"	"	"	"	775		19°	"	77,5	60m	b	19°	b-o=7°	1°4	71m	
"	"	"	"	825		20°	"	75,0	50m						
"	"	"	"	900		21°	"	75,0	75m						
"	"	"	"	950		22°	"	73,1	50m						

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t° _m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t°	Δ t° par 500m	t° en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$
					orif.	fond		g° total	g' partiel						
"	"	"	"	1 000		23°	Namurien	71,4							
"	"	"	"	1 045		24°	"	69,7	45 m						$\frac{c-b}{b-o} = 1,4$
"	"	"	"	1 090		25°	"	68,1	45 m						$\frac{d-c}{c-b} = 0,9$
"	"	"	"	1 135		26°	"	66,8	40,7						$\frac{e-d}{d-c} = 1,8$
"	"	"	"	1 257		29°	"	62,9	55,6	c	29°	c-b=10°	2°0	50m	
"	"	"	"	1 757		38°	Tournaisien	60,6	29,2	d	38°	d-c= 9°	1°8	56m	
"	"	"	"	2 195		53°	Emsien	49,9	63,4	e	54°	e-d=16°	3°2	29m	$\frac{f-e}{e-d} = 0,5$
"(thermom.)	"	"	"	2 512		58°5	Gedinnien	50,7		f	62°	f-e= 8°	1°6	63m	
Ensival 73/ 7	135E458	8°7	+151	(787)	13°		Viséen			a	(11°)				
"	"	"	"	908		13°	Namurien	211,0		b	12°	b-o= 2°	0°4	211m	$\frac{c-b}{b-o} = 1,0$
"	"	"	"	1 020		13°5	Viséen	212,5	223,0	c	14°	c-b= 2°	0°4	223m	
Harchies 32	139W 17	9°5	+ 24	378	15°		Crétacé	(51,1)		a	(15°)				
Baudour	139E120	9°5	+ 50	371		53°	Namurien	tunnel	incliné	(profondeur par rapport au départ à +71)					
Heppignies	142E112	9°4	+175	243		20°5	Viséen	21,9		o	17°				
Rieu du Coeur	151W453	9°5	+ 66	-						a	(20°)				
" Puits II	"	"	"	-						b	(27°)				
"	"	"	"	-						c	43°				
"	"	"	"	1 342		52°0	Westphalien	31,6		d	59°		3°1	32m	
Pâturages	" 671	9°5	+101	-						a	(20°)				
"	"	"	"	-						b	(27°)				
"	"	"	"	-						c	(42°)				
"	"	"	"	2 000		68°4	Westphalien	33,96		d	57°				
Epinois	152W327	9°4	+128	-						e	71°		2°94	34m	
"	"	"	"	-						a	(18°)				
"	"	"	"	-						b	(24°)				
"	"	"	"	-						c	(36°)				
"	"	"	"	2 000		56°	Westphalien	42,9		d	47°				
Fontaine -l'Evêque	152E196	9°5	+166	150		15°5	Westphalien	25,0	-45,0	e	59°		2°35	43m	
" Puits 3	"	"	"	186		14°3	"	38,8	52,5	o	15°				$\frac{c-b}{b-o} = 1,25$
sond. intér.	"	"	"	1 536		40°0	"	50,4	49,1	a	19°				
"	"	"	"	1 644		42°2	"	50,3	27,7	b	(23°)	b-o= 8°	1°6	63m	$\frac{d-c}{c-b} = 1,0$
"	"	"	"	1 777		47°0	"	47,4	16,4	c	33°	c-b=10°	2°0	50m	$\frac{c-b}{c-b} = 1,0$
"	"	"	"	1 900		54°5	"	42,2		d	43°	d-c=10°	2°0	50m	$\frac{e-d}{d-c} = 2,8$
" Puits 1	153W 39	9°5	+162	590		18°9	Westphalien	62,8	54,5	e	71°	e-d=28°	5°6	18m	
" (travaux)	"	"	"	650		20°0	"	61,9	85,7	a	16°				
"	"	"	"	710		20°7	"	63,4		b	20°	b-o= 8°	1°6	62m	$\frac{c-b}{b-o} = 0,75$
Monceau-Fontaine	" 40	9°5	+120	-						c	26°	c-b= 6°	1°2	86m	
" Puits 4	"	"	"	650	(16)	25°7	F.Centre/West.	40,1		a	(19°)				
										b	25°	b-c=13°	2°6	40m	

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t ^o _m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t ^o	Δ t ^o par 500m	t ^o en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2^o}{\Delta t_1^o}$
					orif.	fond		g ^o total	g' partiel						
Marcinelle	" 358	9°5	+175	859		27°	Westphalien	49,1		o	13°				
" Puits 10	"	"	"	974		28°	"	52,6	115,0	a	(18°)				
" Cerisier	"	"	"	1 053		31°	"	49,0	26,3	b	23°	b-o=10°	2°0	50m	
" (travaux)	"	"	"	1 072		31°	"	49,9	∞						
"	"	"	"	1 080		31°	"	50,2	∞						
"	"	"	"	1 100		31°	"	51,2	∞						
"	"	"	"	1 128		31°5	"	51,3	56,0						
"	"	"	"	1 153		31°5	"	52,4	∞						
"	"	"	"	1 181		31°7	"	53,2	140,0	c	32°	c-b= 9°	1°8	56m	$\frac{c-b}{b-o} = 0,9$
"	"	"	"	1 198		33°	"	51,0	13,1						
"	"	"	"	1 221		33°5	"	50,9	46,0						
"	"	"	"	1 235		33°7	"	51,0	70,0						
"	"	"	"	1 254		34°5	"	50,2	23,8	d	43°	d-c=11°	2°2	45m	$\frac{d-c}{c-b} = 1,2$
Jemeppe s/Sambre	154E286	9°5	+ 92	-				-		o	(14°)				
"	"	"	"	-				-		a	(25°)				
"	"	"	"	644	36°			(21,7)		b	(37°)				
Wépion (Schlumb.)	155W723	9°4	+153	153		15°1	Ordovicien	26,8		o	15°				
"	"	"	"	403		18°4	Trémadocien	44,8	75,8	a	18°				
"	"	"	"	653		22°5	Givétien	49,8	61,0	b	23°	b-o= 8°	1°6	63m	$\frac{c-b}{b-o} = 0,6$
"	"	"	"	1 153		28°4	Viséen	60,7	84,7	c	28°	c-b= 5°	1°0	100m	$\frac{d-c}{c-b} = 2,4$
"	"	"	"	1 653		40°0	Tournaisien	54,0	43,1	d	40°	d-c=12°	2°4	42m	$\frac{e-d}{d-c} = 1,7$
"	"	"	"	1 700		40°2	Tournaisien	55,2	235,0						
"	"	"	"	1 720		50°	Tournaisien	42,4	2,0						
"	"	"	"	2 153		60°1	Frasnien	42,5	42,9	e	60°	e-d=20°	4°0	25m	$\frac{f-e}{e-d} = 0,6$
" (thermom.)	"	"	"	2 300		60°	Silurien	45,45		f	(72°)	f-e=12°	2°2	45m	
Quévy	42 162W 3	9°4	+ 76	-						a	(15°)				
" Sucrerie	"	"	"	880		24°7	Eodévonien	47,5		b	19°	b-o= 8°	1°6	63m	$\frac{c-b}{b-o} = 1,1$
"	"	"	"	1 175		29°3	Namurien	59,0	64,1	c	28°	c-b= 9°	1°8	56m	$\frac{d-c}{c-b} = 1,4$
"	"	"	"	1 275		32°24	Namurien	55,8	33,8	d	41°	d-c=13°	2°6	38m	
Jeumont (France)	163W -	9°3	+146	-						a	(17°)				
"	"	"	"	-						b	(23°)				
"	"	"	"	-						c	(33°)				
"	"	"	"	-						d	(43°)				
"	"	"	"	-						e	(53°)				
"	"	"	"	-						f	(63°)				
"	"	"	"	-						g	(74°)				
"	"	"	"	-						h	(84°)				
Grand-Halleux	171W276	7°3	+321	338		98°	Famennien	48,9		i	94°		2°05	49m	
" (Schlumb.)	"	"	"	321		25°5	Cambrien	17,6		o	26°				
"	"	"	"	571		28°85	"	26,5	74,6	a	29°				$\frac{c-b}{b-o} = 0,9$

LOCALISATION		OBSERVATIONS						DONNEES							
Localité	index	t° m	cote	prof.	température		formation	gradient en m		cote	t°	Δ t° par 500m	t° en ° par 100m	g' en m par °	$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$
					orif.	fond		g° total	g' partiel						
"	"	"	"	821		32°7	"	32,3	64,9	b	33°	b-o= 7°	1°4	71m	$\frac{d-c}{c-b} = 1,1$
"	"	"	"	1 321		38°6	"	42,2	84,7	c	39°	c-b= 6°	1°2	83m	$\frac{e-d}{d-c} = 1,1$
"	"	"	"	1 821		45°7	"	47,4	70,4	d	46°	d-c= 7°	1°4	71m	
"	"	"	"	2 321		53°6	"	50,1	63,3	e	54°	e-d= 8°	1°6	63m	
(thermom.)	"	"	"	-			"			o	(12°)				
"	"	"	"	-			"			a	(16°)				
"	"	"	"	-			"			b	(20°)				$\frac{d-c}{c-b} = 1,9$
"	"	"	"	1 500		30°	"	66,1		c	27°	c-b= 7°5	1°5	66m	$\frac{e-d}{d-c} = 1,3$
"	"	"	"	-			"			d	41°	d-c=14°	2°8	36m	
"	"	"	"	2 100		51°	"	48,05	28,6	e	59°	e-d=18°	3°6	28m	
Martouzin-Neuville 27	185W407	8°5	+139	-			"			o	(12°)				
"	"	"	"	-			"			a	(19°)				
"	"	"	"	-			"			b	(25°)				
"	"	"	"	-			"			c	(38°)				
"	"	"	"	-			"			d	(52°)				
"	"	"	"	-			"			e	(65°)				
"	"	"	"	2 874		84°	Frasnien	38,07		g	91°	g-f=13°	2°6	38m	
Lasoye	221E 1	8°3	+275	(141)	9°		Keuper	(100,7)		o	(11°)				

Chapitre II - Transformation des observations en données

A - Gradient géothermique - g^0

Le gradient géothermique est l'expression, en mètres, de l'accroissement de profondeur nécessaire pour l'obtention d'un accroissement de température d'un degré Celsius. Pour le déterminer, il faut donc connaître l'augmentation de la température et la profondeur où elle a été mesurée. Il faut connaître la température avec la précision du dixième de degré, tant en profondeur qu'à la surface du sol, et la profondeur au mètre près pour que la valeur du gradient soit significative au mètre près. A plus de mille mètres de profondeur, la mesure de la température au degré près permet une précision satisfaisante de la valeur du gradient géothermique.

Que représente un gradient géothermique? Tout simplement une moyenne valable en un lieu par rapport à une profondeur donnée. Prenons le cas de Woensdrecht: dans l'Eocène, à 350 m de profondeur, le gradient géothermique est de 29 m; mais par rapport au Maastrichtien, à 700 m de profondeur, le gradient s'élève à 32 m; dans le Viséen, à 1 200 m, le gradient diminue à 27 m. On voit que la conductivité thermique varie en fonction des formations qui se succèdent en profondeur. Il faut donc éviter de parler DU gradient géothermique d'UN lieu abstraction faite du contexte géologique.

Il existe de nombreux cas où l'on ne dispose que d'une mesure de température. Ainsi à Jeumont où on a mesuré 98° à 4 338 m de profondeur, LE gradient géothermique est de 49 m. On voit d'emblée que les formations traversées sont "froides", le gradient géothermique étant nettement plus élevé que 33 m, alors qu'à Woensdrecht où le gradient descend sous 30 m on se trouve en région "chaude".

La première colonne des tableaux précédents indique le gradient géothermique total, c.à.d. entre la profondeur indiquée et la surface du sol, en oblitérant dans cette grandeur moyenne les variations locales des formations supérieures. Les valeurs indiquées entre parenthèses sont déduites à partir de températures relevées à l'orifice. Dans une première ébauche, j'avais posé une perte de chaleur d'un degré par cent mètres de profondeur. Cette correction s'est avérée trop forte. Dans les tableaux présentés, j'ai adopté une correction d'un degré par deux cents mètres; cette correction est un peu forte pour des débits de 50 m³/h et trop faible pour des débits de moins de 10 m³/h. Il est nécessaire de se rappeler par la suite que ce sont des gradients déduits, obtenus par une correction introduite pour les ramener aux gradients réellement observés là où l'on dispose également d'information en profondeur.

B - Gradient partiel - g'

Lorsqu'on dispose d'une succession de mesures à des profondeurs différentes, il est utile de calculer le gradient des tranches de terrain entre deux ou plusieurs mesures. L'éventail des gradients partiels indique immédiatement la grande variabilité du flux thermique en fonction des formations géologiques.

Au sondage de Heibaart par exemple, on ne constate qu'un accroissement de un degré, en passant de l'Oligocène au Landénien, à travers une tranche de 200 m. De même à Marcinelle où dans le Westphalien on ne constate qu'une augmentation d'un demi-degré pour une tranche de 100 mètres; des mesures trop rapprochées n'appréciant pas le dixième de degré introduisent des gradients partiels infinis.

Les gradients partiels ont l'avantage de localiser les formations aquifères transférant la chaleur par convection (L'enregistrement continu Schlumberger est idéal à ce point de vue). C'est typiquement le cas du Maastrichtien et des calcaires et dolomies du Paléozoïque, où les gradients partiels sont toujours très grands et souvent négatifs. Cela sera discuté plus loin.

Le gradient partiel est une grandeur indispensable pour l'analyse du flux thermique dans son contexte géologique ainsi que pour rendre les données comparables entre elles.

C - Homogénéisation des données.

Les mesures de température sont relevées à des profondeurs quelconques. Il est impossible de les comparer entre elles si on ne peut les ramener à des niveaux de référence.

Ceux-ci ont été choisis arbitrairement de 500 m en 500 m à partir de la cote 0 en intercalant un plan supplémentaire à la cote - 250. Dans la troisième colonne, le niveau de référence est indiqué o pour la cote 0, a pour la cote - 250, b pour la cote - 500 et ensuite de c à i pour les plans successifs de - 1 000 à - 4 000, la cote étant toujours calculée par rapport au niveau de la mer.

La température calculée à un niveau indiqué est inscrite à côté de la lettre indice du niveau. La température est calculée à partir du gradient partiel enjambant le niveau considéré si on dispose de mesures entre deux intervalles, autrement à partir du gradient géothermique total. Dans ce dernier cas, et chaque fois que la température est interpolée au-delà d'un intervalle, la température est mentionnée entre parenthèses. A Jeumont par exemple, je peux calculer la température qu'il y aurait à - 3 000, à - 2 000 ou à - 1 000 si le gradient était invariable. Les températures déduites à ces cotes intermédiaires sont purement indicatives car on est assuré, par la complication du contexte géologique, que la réalité est certainement fluctuante. A fortiori, l'indication entre parenthèses est justifiée pour les températures calculées à partir de gradients déjà mentionnés entre parenthèses parce que déduits de températures mesurées à l'orifice, augmentées arbitrairement d'un demi-degré par cent mètres.

C'est à partir de ces valeurs calculées que les cartes synthétiques sont élaborées.

D - Accroissement moyen de la température

La quatrième colonne reporte les accroissements de température de 500 m en 500 m, de façon à éliminer les variations trop locales et à obtenir une moyenne valable pour un intervalle suffisant. Les valeurs calculées à la troisième colonne ayant été arrondies au degré, la différence reportée à la quatrième colonne peut parfois atteindre l'écart d'un degré, par rapport au calcul qui aurait été refait à la décimale près, puis arrondi au degré. Une telle minutie de calcul aurait souvent dépassé la précision des mesures.

E - Gradient moyen déduit - g''

Le gradient géothermique déduit en tranches successives de 500 m chaque fois que c'est possible, est inscrit dans la cinquième colonne qui l'exprime de deux manières différentes.

A droite, le gradient moyen est exprimé en mètres.

A gauche, figure l'accroissement de température par tranche moyenne de cent mètres (calculé sur un intervalle de 500 m).

F - Facteur de régularité

Dans l'éventualité d'un flux thermique émanant régulièrement de la profondeur à travers des formations géologiques de conductivité thermique uniforme (base du point de vue classique), le rapport des grandeurs, de tranche en tranche, serait égal à l'unité; sous cet angle, c'est un facteur de régularité.

Ainsi par exemple à Heibaart, $190/180$ donnant 1,05 doit se lire $190 \pm$ quelques dixièmes par rapport à $180 \pm$ quelques dixièmes est égal à $1 \pm$ un dixième. Autrement dit, à Heibaart, le

flux thermique est parfaitement régulier en moyenne, l'anomalie "chaude" de l'Oligocène compensant l'anomalie "froide" du Landénien.

A Turnhout par contre, le gradient géothermique diminue régulièrement avec la profondeur, passant d'une élévation de température de 3° par 100 m, à 4°, puis à 5° correspondant à un gradient de 20 m, très faible par rapport au gradient moyen de 33 m généralement accepté. Cette progression dans l'accroissement de température en fonction de la profondeur se caractérise par une succession de rapports supérieurs à l'unité.

A Eidsen Puits, l'accroissement brutal de la température dans le Houiller, traduit par un gradient anormal de 14 m, est illustré par le facteur exceptionnel de 2,6. L'écart du facteur par rapport à l'unité est franchement anormal et dans ce cas, ce facteur permet d'attribuer un coefficient à l'anomalie.

Chapitre III - Cartes géothermiques.

Il est aisé de présenter en cartes synthétiques les observations ainsi transformées en données comparables. Le fond des cartes est constitué par l'assemblage des cartes géologiques. Par surimpression, on obtient les cartes suivantes.

A - Carte au sol.

Ainsi qu'il a été dit (page 3), cette carte est la reproduction de la carte climatique de L. PONCELET et H. MARTIN de la température moyenne de l'air mesurée sous abri à un mètre au-dessus du sol durant une trentaine d'années. Cette carte a servi de référence pour le calcul de l'augmentation de la température à partir de la surface du sol et donc la détermination du gradient géothermique total.

B - Carte o à la cote O.

La plupart des températures inscrites à cette cote sont déduites à partir d'une profondeur nettement inférieure. Quelques températures seulement ont été mesurées vers cette cote en moyenne et haute Belgique.

En résumé synthétique, cette carte montre clairement que la température moyenne à la cote O est de 10° en basse Belgique, de 11° en moyenne Belgique et de 12° en haute Belgique où l'effet du relief paraît étonnamment faible. On peut donc dire qu'en Belgique, à la cote O, la température moyenne est de $\pm 11^\circ$. Les données sont très nombreuses en basse Belgique et sporadiques en haute Belgique.

L'anomalie régionale de la Campine n'est que partiellement expliquée par l'effet du relief et il s'y accentue une anomalie plus locale dans le Limbourg, non conforme à l'allure des formations géologiques.

Pour l'examen détaillé, il faut exclure deux exceptions signalées par un triangle: la source chaude de Chaudfontaine (variant de 34° à 36° au cours du temps d'après les références bibliographiques) et la mise au jour fortuite d'eau chaude rencontrée par les tunnels inclinés de Baudour.

On ne trouve aucune anomalie en basse Belgique.

En moyenne Belgique, la température déduite de 15° à Genval sera justifiée plus loin par la convection de la nappe captive du Crétacé du "synclinal" de la Hulpe.

Au sud du Massif du Brabant, les 17° à Heppignies témoignent de la convection de la nappe du Calcaire Carbonifère au Bord Nord du Bassin de Namur, ce cas illustrant par la suite l'exception de Baudour. A Fontaine l'Evêque, la température de 15° est à prendre telle quelle parce que mesurée à cette cote au front de travaux souterrains. Bolland peut servir d'exemple d'une température déduite d'un gradient fondé sur une seule mesure à 3 000 m. en région géothermiquement normale, et affecté par la correction d'altitude.

Grand Halleux illustre le cas d'une température déduite d'une mesure thermométrique effectuée en cours de creusement (12°T) en face d'une valeur très relative de 26° S relevée par la méthode Schlumberger dans une boue de forage, à la fin d'un creusement qui a duré des années.

A noter pour la suite les 10° d'Ensival et 11° de Lasoye.

C - Carte a à la cote - 250

Cette carte intermédiaire montre qu'à cette profondeur l'effet du relief est déjà oblitéré par la composition du sous-sol. Il ne faut pas trop insister sur la moyenne de 20° proposée pour la facilité, cette valeur n'intervenant pas dans les calculs ultérieurs.

A la côte, on constate un écart thermique positif avec une seule mesure en profondeur à Ostende. Les autres températures sont calculées à partir de très anciennes mesures effectuées à l'orifice avec des précisions assez relatives sur le (ou les) niveau aquifère qui, au Zoute, n'est certainement pas le Cambrien. On retrouve la région plus chaude de Campine avec l'anomalie plus locale en direction d'Hasselt appuyée par une mesure en travaux souterrains (indiqués par un x). La partie septentrionale du gisement houiller du Hainaut se marque par une bande étroite relativement plus chaude, la moitié des mesures provenant de travaux miniers (marqués x).

Dans le détail, il faut exclure la rencontre exceptionnelle d'eau chaude par les tunnels inclinés de Baudour. Il faut noter que le point froid d'Harchies se justifie par le fait que la température a été mesurée à l'orifice dans une eau provenant de la base de la nappe aquifère à la base du Crétacé moyen de la Fosse de la Haine. A noter également le point froid d'Ensival.

Grand Halleux présente l'opposition entre la température (16° T) déduite d'une mesure thermométrique et celle mesurée 29° S dans la boue par la méthode Schlumberger.

D - Carte b à la cote - 500.

L'isotherme de 25° reflète l'allure des Bassins Houillers. Les "vieux bassins" de Haine-Sambre et Meuse sont interrompus par la large voûte anticlinale transversale qui culmine au Samson et sont marqués vers le Sud par le "froid" de la Faille du Midi-Faille Eiffélienne. L'anomalie "chaude" de Jemeppe montre une fois de plus la convection de la nappe du Calcaire Carbonifère sous le Terrain Houiller et rejoint les cas de Heppignies et de Baudour.

En Campine, l'isotherme de 25° se superpose à la limite méridionale du gisement houiller. Le Bord Nord du Massif du Brabant est marqué par (22°) à Booischot (gradient du Silurien sans recouvrement Houiller) et par (23°) à Halen (gradient du Tournaisien sous le Houiller) tandis qu'à Webbekom où le Houiller n'a pas été percé on mesure 28°. A ne pas oublier que la température de (24°) inscrite à Opgrimbie est déduite d'une mesure à la surface et qu'il suffirait d'introduire une correction d'un degré par cent mètres (au lieu d'un demi-degré) pour obtenir (26°5) ce qui rentre dans la norme des mesures voisines. Il n'en reste pas moins qu'à Eisdén Village la température de 31° au toit du Terrain Houiller résulte d'un gradient plus faible que la norme.

A Ensival, le "froid" devient exceptionnel. A Grand Halleux, l'écart entre les résultats des deux méthodes de mesure reste aussi important.

La comparaison des cartes a et b permet de voir qu'en 500 m de profondeur la température moyenne passe de $11^{\circ} \pm 1^{\circ}$ à $25^{\circ} \pm 6^{\circ}$ et augmente donc de $14^{\circ} \pm 7^{\circ}$ témoignant d'un gradient moyen de 36 m pour la Belgique, entre des valeurs extrêmes de 26 m à Eisdén Village et de 70 m à Soumagne (méthode Schlumberger). Le gradient moyen est normal, celui de Eisdén Village est faible tandis que celui de Soumagne est anormalement grand.

E - Carte c à la cote - 1 000.

Cette carte reproduit les allures générales de la carte b en durcissant les contrastes. Non seulement on retrouve les régions "chaudes" des bassins houillers délimitées par l'isotherme 40°, mais on voit apparaître en Campine l'isotherme 50°. Au Sud du sillon houiller de Haine-Sambre et Meuse, l'isotherme 30° coïncide avec la trace de la Faille du Midi - Faille Eiffélienne.

A Grand Halleux, il y a toujours l'écart important du aux méthodes de mesure.

A Eisdén Puits, le gradient en Houiller est devenu exceptionnellement faible et la température dépasse 60°.

La comparaison des cartes b et c montre, dans une tranche plus inférieure de 500 m, que la température augmente en moyenne de 15° ce qui correspond à un gradient moyen de 33 m, qui est le gradient moyen classique. Le gradient devient faible à Woensdrecht où il est de 24 m et à Eisdén Village où il est de 22 m; il est anormalement faible à Eisdén Puits où, pour l'ensemble de la tranche de 500 m, il est de 14 m. A l'opposé, on trouve des gradients très grands à Quévy, Wépion et Grand Halleux, respectivement de 56 m, de 100 m (Schlumberger) et de 66 m (thermomètre biseauté). Le gradient très anormalement grand de Wépion indique une déperdition de chaleur par la nappe du Calcaire Carbonifère. Il est dépassé par le gradient exceptionnel de 223m à Ensival prouvant la pénétration rapide (géologiquement parlant) en profondeur, d'eaux froides superficielles.

F- Carte d à la cote - 1 500.

On retrouve les mêmes traits géothermiques majeurs se superposant aux mêmes allures géologiques d'ensemble. Faute d'observation, on ne peut prolonger l'isotherme 50° dans le synclinal Houiller de Liège. Si on veut préciser la carte d, on peut y ajouter l'isotherme 42° au front septentrional du Bassin de Dinant suivant la Faille du Midi - Faille Eifélienne.

En Campine, le raidissement des isothermes 50° et 60° contre le Massif du Brabant (Booischoot et Halen) accentue le contraste avec le Terrain Houiller. Heibaart est situé à proximité de l'isotherme 70°

A Grand Halleux, l'écart des deux méthodes s'atténue.

De - 1500 à -1000, en comparant les cartes d et c, l'augmentation globale de la température est de 15° ce qui correspond à nouveau à un gradient moyen de 33 m. On observe un gradient très faible de 21 m à Turnhout et un gradient élevé de 50 m à Fontaine-l'Evêque et à Jeumont (déduit).

G - Carte e à la cote - 2 000.

On ne dispose plus que de 11 observations au total à cette cote dont 3 sont déduites d'une profondeur nettement supérieure. A titre indicatif, cette carte mentionne les températures aux profondeurs f à i correspondant aux cotes de - 2 500 à -4 000

A Grand Halleux, les températures observées un peu plus haut par les deux méthodes sont égales, mais le grand écart des deux gradients en fonction du type de mesure provoque l'inversion des températures calculées à la cote - 2 000.

Pour l'interprétation de l'intervalle e - d, il faut écarter les données basées sur une seule mesure : Jeumont, Martouzin-Neuville et Bolland évidemment, mais aussi Pâturages et Epinois. Il ne reste plus qu'un maigre bouquet de six données. Le voici, ordonné :

Situation	Gradient partiel	Δt° par 100m
Fontaine l'Evêque	18m	5° 6
Turnhout	20m	5° 0
Wijvenheide	21m	4° 8
Wépion	25m	4° 0
Soumagne (Schlumberger)	29m	3° 2
Grand Halleux (thermomètre)	28m	3° 6
Grand Halleux (Schlumberger)	63m	1° 6

Les trois sites en Terrain Houiller autochtone concordent parfaitement : de - 1 500 à -2 000, on observe un gradient très faible de 20 m, c.à.d. que la température croît de 5° par 100m. Dans les massifs charriés ou plutôt sous eux, le gradient de ± 28 m est faible et correspond à une élévation de 305 par 100 m. A Soumagne, Wépion et Grand Halleux, il y a manque d'accord (en calcul de gradient) entre les mesures effectuées avec thermomètres biseautés au fond du forage et celles obtenues par la méthode Schlumberger (très relatives par suite de la conductivité thermique des boues et surtout des tubages).

On ne dispose donc en fait que d'une conclusion sûre et de portée limitée : il peut n'y avoir qu'apparence de diminution du gradient géothermique sous les massifs charriés, mais dans le Terrain Houiller autochtone, c'est une certitude, le gradient géothermique devient très faible, de l'ordre de 20 m ...en Campine et à Fontaine l'Evêque.

H – "Ecorché" du Paléozoïque

La toute première conclusion de la comparaison des cartes géothermiques est l'obligation de n'aborder l'étude géothermique que dans son contexte géologique. Le flux géothermique est intimement lié à ce contexte, abstraction faite d'autres préliminaires tels que conductivité ou convection.

C'est pourquoi il est nécessaire de présenter la carte des formations paléozoïques à la suite des précédentes.

I - Carte hypsométrique et altimétrique du Paléozoïque

Le Paléozoïque s'enfouit régulièrement vers le Nord sous le recouvrement Crétacé et Cénozoïque. Cette structure intervient dans l'interprétation des cartes géothermiques o, a, b et même c. Elle est présentée en avant-dernière annexe.

J - Conclusions à reporter.

Par la comparaison des cartes synthétiques établies à partir des données dont on dispose, on voit d'emblée que la répartition des données est irrégulière. Les observations sont plus abondantes dans les régions "chaudes" des gisements houillers. On ne peut donc aborder le problème par la statistique sans régulariser d'abord la dispersion inégale des données.

Cette difficulté est levée dans ce travail par le biais des isothermes, qui limitent de façon très convaincante les régions "chaudes" des gisements houillers autochtones, des régions "froides" du Massif du Brabant et de l'Ardenne, en soulignant par un dur contraste le charriage du Bassin de Dinant sur le Bassin de Namur.

La comparaison globale des isothermes, de carte en carte, permet de conclure que, jusque la cote - 1 500, le gradient géothermique moyen en Belgique est de 33m, correspondant à une élévation de température irrégulière dans le détail, de 30° par 100 m d'accroissement de profondeur. De - 1 500 à -2 000, il y a une diminution marquée du gradient géothermique dans le Terrain Houiller. Les données synthétisées ne permettent pas d'aller au-delà.

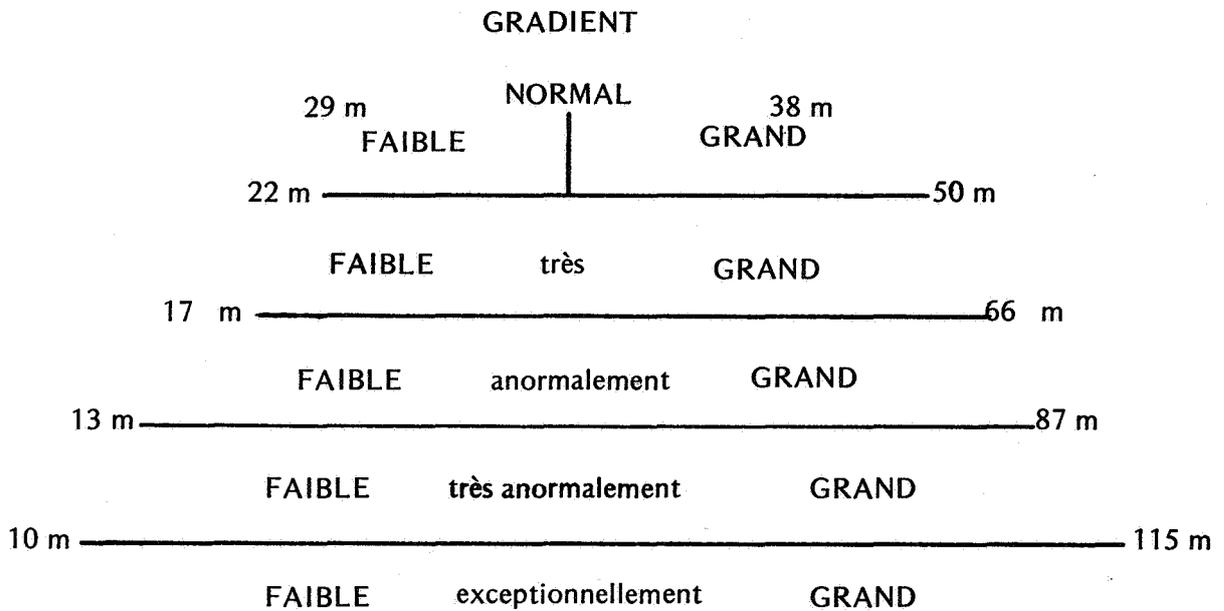
Il reste à expliquer les irrégularités de détail par le contexte géologique.

Si on a la curiosité de superposer les cartes géothermiques aux cartes, gravimétrique et tectonique, globales de la Belgique on reste songeur. Les régions "chaudes" correspondent aux anomalies gravimétriques positives et aux régions en subsidence, y compris le sillon géographique Haine-Sambre et Meuse qui descend encore actuellement (au moins depuis l'Eemien), tandis que les régions "froides" correspondent aux régions en surrection et aux anomalies gravimétriques négatives, en particulier l'Ardenne, le tout s'ordonnant dans le cadre des déformations épéirogéniques actuelles.

Chapitre IV - Echelle conventionnelle

Avant d'aborder l'étude des variations du gradient géothermique en fonction des formations géologiques, il convient de disposer d'un vocabulaire de référence. Personne ne s'est soucié jusqu'à présent de fixer un coefficient à un gradient qui s'écarte de la normale; on trouve dans la littérature des qualifications de grand ou de très grand et de faible ou de très faible, sans autre référence que l'estimation personnelle de l'écart par rapport à la norme acceptée de 33 m.

En conclusion du chapitre précédent, prenons cette valeur de 33 m du gradient géothermique pour centrer une échelle numérique proportionnelle. Il faut une base de référence pour fixer les échelons. Prenons un gradient de 10 m comme référence entre une anomalie et une exception. On obtient le tableau proportionnel suivant, présenté à la manière des météorologistes:



Chapitre V - Analyse par formations géologiques.

A - Oligocène

Ces terrains n'existent en profondeur qu'en Campine. Voici les données dont on dispose :

LOCALITE	g°	g'	g''	formation
Heibaart	21,4		200,0	Landénien
Eisden Puits	14,4	8,7		
Eisden Puits	11,0		-33,3	Landénien

A Heibaart, à près de 400 m de profondeur, le gradient géothermique mesuré dans l'Oligocène est très faible. A Eisden, de 80 m à 150 m, le gradient géothermique est anormal à très anormal, avec un gradient partiel exceptionnellement faible correspondant à une élévation de température de 80 pour 70 m.

Par rapport à la mesure suivante exécutée dans le Landénien, le contraste est absolument exceptionnel. A Heibaart, de 400 m à 600 m, on trouve le gradient exceptionnel de 200 m. Mais à Eisden, on obtient un gradient NEGATIF de - 33m! La théorie classique du flux géothermique n'avait pas imaginé que la température décroisse en profondeur.

Par suite de l'interposition de plusieurs niveaux argileux entre l'Oligocène et le Landénien, on ne peut envisager un circuit de convection aquifère entre ces deux formations.

En débutant l'analyse géothermique par formations, on vogue d'emblée dans l'exception.

B - Eocène

LOCALITE	DETAIL	g°	g'	g''	formation
Woensdrecht	Lédien	28,7			
Woensdrecht	Lédien	28,5	25,6		
Woensdrecht	Ypresien	27,6	25,0		
Woensdrecht	Yprésien	28,8	42,9		
Anvers	Lédien	(25,7)			
Hoboken	Lédien	(26,7)			
Malines	Yprésien	(39,6)			
Zelem	Bruxellien	(20,2)			
				61,4	Maastrichtien

On ne dispose que des données de Woensdrecht pour constater que le gradient géothermique total y est faible tant dans le Lédien que dans l'Yprésien. Les deux gradients déduits près d'Anvers sont faibles et celui de Zelem paraît très faible. Tous ces points sont situés dans l'influence de la région chaude de Campine. Par contre à Malines, à l'aplomb du Massif du Brabant, le gradient déduit à partir de l'Yprésien paraît grand.

Le gradient partiel dans le Lédien est faible; celui de l'Yprésien est grand. Le Lédien est constitué par un sable calcaireux aquifère; l'Yprésien est plus argileux.

Ces divers gradients indiquent un apport par convection émanant de régions plus septentrionales dans le Lédien. Par contre dans l'Yprésien, la grandeur du gradient n'implique pas de convection.

A Woensdrecht, la mesure suivante exécutée dans le Maastrichtien introduit un gradient partiel très grand indiquant le peu d'importance du flux thermique vertical.

C - Landénien (Paléocène)

LOCALITE	g°	g'	g'' formation
Heibaart	30,6		22,9 Famennien
Blankenberge	(18,4)		
Zoute	(39,8)		
Bruges	(20,7)		
Zandhoven	(26,2)		
Zele	(33,3)		
Termonde	(25,1)		
Zwartberg	* (38,6)	(48 m)	
Zwartberg	* (38,4)	(50 m)	
Zwartberg	* (38,5)		(∞) Maastrichtien
Eisden Puits	15,3		-70,0 Maastrichtien
Langemark	(38,7)		
Eke	(40,0)		
Lebbeke	(36,8)		
Aarschot	(27,6)		
Aarschot	(22,4)		
Lendelede	(41,4)		
Boutersem	(56,4)		
Geluwe	(23,9)		
Saint-Gilles	(79,3)		

Il n'y a que deux mesures directes. A Heibaart le gradient géothermique est normal, c.à.d. que le "froid" du Landénien à compensé le "chaud" de l'Oligocène. A Eisden où les tranches de mesure sont faibles le gradient anormalement faible le rattache à l'Oligocène, mesuré 40 m plus haut.

Le gradient partiel vers le bas indique qu'à Heibaart le sous-sol très profond présente un faible gradient. A Eisdén, 35 m plus bas, le gradient NEGATIF de -70 m accuse le Maastrichtien d'être l'origine d'un "froid" exceptionnel.

Il est très délicat de traiter des gradients déduits. Cependant, comme ils sont tous affectés de la même correction et tous, sauf Zwartberg et Zandhoven, proviennent de puits relativement peu profonds, on peut tenter d'ordonner la dispersion de valeurs aussi relatives.

Le gradient anormalement grand (79,3) de Saint-Gilles s'explique par la proximité de l'alimentation de la nappe aquifère du Landénien par les alluvions de la Senne. Le gradient très grand (56,4) de Boutersem s'explique également par la proximité relative de la zone d'alimentation. On trouve ensuite une succession de grands gradients : Lendeledé (41,4), Eke (40,0) Het Zoute (39,8), Langemark (38,7).

Les gradients paraissent normaux à Lebbeke (36,8) et à Zele (33,3).

Les gradients semblent faibles à Aarschot (27,6), Zandhoven (26,2), Termonde (25,1), Geluwe (23,9) et à Aarschot (22,4).

Ils sont très faibles à Bruges (20,7) et à Blankenberge (18,4).

Ainsi ordonnés, on voit que les gradients élevés se situent davantage vers le Sud et les gradients faibles davantage vers le Nord.

Le cas particulier de Zwartberg semble indiquer un gradient élevé dans le Landénien mais indique que le Maastrichtien sous-jacent reste à la même température impliquant une fois de plus la convection "froide" de la nappe aquifère de ce terrain.

D - Maastrichtien

LOCALITE	g°	g'	g''	formation
Woensdrecht	32,2		11,9	Séonien
Turnhout	34,4		21,5	Namurien
Tessenderlo	(31,3)			
Tessenderlo	(31,3)			
Koersel	(34,1)			
Heusden	(31,3)			
Zwartberg	* (41,0)		(25,7)	Séonien
Eisdén	18,9			
Eisdén	27,6	-21,4		
			27,2	Séonien
Hasselt	(25,4)			
Hasselt	(24,6)			
Louvain	(27,1)			

Au niveau du Maastrichtien, le gradient géothermique total est redevenu normal à Woensdrecht et à Turnhout, le "froid" du Maastrichtien compensant le "chaud" constaté dans les formations supérieures en Campine, tandis qu'il reste dans la région chaude de Eisdén "très faible" au sommet de la nappe aquifère pour n'être plus que "faible" 45 m plus bas par suite d'un refroidissement de plus de 2°.

Le seul gradient partiel intraformationnel dont on dispose dans le Maastrichtien, à Eisden, indique que la convection dans la nappe est régie par la densité, une lame froide s'écoulant sous une lame chaude, le gradient partiel étant nettement négatif.

Le gradient partiel intraformationnel est suivant les cas, faible, très faible et très anormalement faible, indiquant de toute façon une conductivité thermique très faible des formations inférieures qui retiennent bien mieux la chaleur que le Maastrichtien susjacent

De ceci et des données venant d'au-dessus, le Maastrichtien est typiquement une formation avec circuit aquifère de convection.

Les gradients faibles observés à Hasselt et Louvain indiquent la zone méridionale d'évacuation de la chaleur par la lame aquifère supérieure.

E - Sénonien

LOCALITE	G°	g'	g'' formation
Woensdrecht	26,4	25,6	
Woensdrecht	26,3		21,7 Namurien
Overmere	(40,6)	80,0 (Sable de Vaals)	
Zwartberg	* (32,8)		(44,5) Westphalien
Eisden Puits	27,5	44,0	
Eisden Puits	30,8		40,0 Westphalien
Vilvorde	(36,3)	37,3	
Eisden Dorp	26,5		
Eisden Dorp	28,0	18,4	
Eisden Dorp	28,7		
Eisden Dorp	27,5	150,0 (Sable de Vaals)	
Eisden Dorp	29,0		17,2 Westphalien
Stacegem	(25,9)		
Laeken	(30,6)		
Kessel Lo	(33,6)		
Genvval	(18,8)		
Harchies (Albien)	(51,1)		

En préliminaire, il faut rappeler que la craie tuffacée du Maastrichtien n'existe qu'à l'Est d'une ligne Wavre-Anvers; à l'Ouest de cette ligne, la transgression Landénienne a érodé totalement le Maastrichtien et, plus à l'Ouest encore, le sommet du Sénonien.

Il n'y a pas de données concernant l'assise d'Aix-la-Chapelle, Cp1 de la Carte Géologique, présente à l'Est de la Meuse seulement. Dans la partie occidentale de la Campine, à la base de l'assise de Herve, il y a un niveau de sable à lentilles de grès prolongeant les "Sables de Vaals" qui affleurent en Hollande.

Il faut éliminer deux anomalies au tableau précédent: le gradient si grand d'Harchies provient du classement par densité (dans l'Albien) à la base de la nappe du Crétacé et pourrait dénoter une alimentation vers le bas à partir du Bord Nord de la Fosse de la Haine (page 21); et le gradient très faible à Genval où la convection chaude du Maastrichtien vient se perdre dans le Sénonien fissuré de la nappe captive du "synclinal" de la Hulpe.

Il faut traiter à part les sables de Vaals, à la base de l'assise de Herve Cp2. A Eidsen, Puits et Village, leur gradient géothermique total est de 30 m, leur gradient intraformationnel est très anormalement grand tandis que le gradient intraformationnel vis-à-vis du Houiller est disparate, le Westphalien étant plus refroidi au Puits et plus chaud au Village.

Plus haut, les craies et marnes du Sénonien ont un gradient géothermique total de 27 m ce qui est faible, un gradient intraformationnel de 28 m ce qui est également faible et évidemment un gradient très anormalement grand par rapport aux sables de Vaals.

Il y a perte de chaleur par convection de la nappe aquifère des sables de Vaals et le contraste des gradients semble indiquer qu'une lame d'eau plus froide se déplace sous une lame d'eau chaude dans une épaisseur de stampe d'une cinquantaine de mètres. La convection l'emportant sur la conduction de l'eau, il faut postuler que des bancs de gres servent d'écrans entre les deux courants qui peuvent atteindre une vitesse de l'ordre du mètre par jour. Les craies du Sénonien sont réchauffées à leur base par la lame montante du courant des sables de Vaals et refroidies à leur sommet par la lame descendante du tuffeau Maastrichtien.

F - Jurassique

La seule donnée que l'on a est déduite en Gaume, à Lasoye. Le gradient très anormalement grand de 100 m indique qu'on y est dans la zone d'infiltration de la nappe du Jurassique (le puits a atteint le Keuper) vers le sous-sol profond du Bassin de Paris.

G - Terrain Houiller

LOCALITE	g^o	g'	g''	formation
<u>Campine</u>				
Woensdrecht	25,7		34,9	Viséen
Turnhout	24,9		17,1	Viséen
Bourg Léopold	29,0			
Beerlingen	32,5			
Zwartberg	29,2			
Niel	29,8			
Eidsen Puits	32,1			
		13,0		
Eidsen Puits	19,4			
Webbekom	28,8			
Wijvenheide	29,1			
		19,6		
Wijvenheide	27,2			
Waterschei	27,8			
Winterslag Puits I	31,6			
		18,6		

Winterslag Puits I	26,8	-12,0 ?	
Winterslag Puits I	32,2 ?		
Winterslag Puits II	33,2		
Opgrimbie	(38,8)		
Eisden Village	25,7	19,0	
Eisden Village	21,9		
<u>Liège</u>			
Tilleur	33,9		
Val Benoit	41,1	23,1	
Val Benoit	32,0		
Val F. Eifélienne/W	53,2	573 m	
Val F. Eifélienne/W	69,3		
<u>Herve</u>			
Soumagne (Schlumb.)	80,0	61 m	
Soumagne	62,9		55,6 Tournaisien
Ensival	211,0		223 m Viséen
<u>Hainaut</u>			
Rieu du Coeur	31,6		
Pâturages	34,0		
Epinois	42,9		
Fontaine l'Evêque Puits 3	25,0	44,9	
Fontaine l'Evêque Puits 3	42,2		
Fontaine l'Evêque Puits 1	62,8	66,7	
Fontaine l'Evêque Puits 1	63,4		
Monceau Fontaine	40,1		
Marcinelle	49,1	52,7	
Marcinelle	50,2		
Quévy	59,0	33,8	
Quévy	55,8		

Le cas du Terrain Houiller (Westphalien et Namurien) doit être examiné de façon régionale.

En Campine, la température s'accroît régulièrement vers la bas suivant un gradient intraformationnel très faible de 19 m. Autrement dit le gradient géothermique total qui est normal au sommet devient nettement faible en profondeur, la moyenne étant centrée sur 28 m. A Woensdrecht, le gradient infraformationnel est normal par rapport au substratum Viséen non aquifère; à Turnhout, il est presque anormalement faible à cause de l'intense circulation aquifère du Viséen

(A Winterslag, la mesure de 31° à 696 m inversant les gradients résulte vraisemblablement d'une erreur de transcription; si on lit 35° tout redevient normal).

Dans le synclinal de Liège, le gradient intraformationnel de 23 m est également assez faible et le gradient géothermique total sur la moyenne des mesures est de 35 m ce qui est normal. Au contact de la Faille Eifélienne se produit un froid brutal avec un gradient de contact exceptionnel de près de 600 m, amenant le gradient géothermique total à 61 m ce qui est très grand et correspond au gradient de l'Ardenne.

Le Houiller du Pays de Herve est nettement froid avec un gradient partiel très grand de 61m (Schlumberger) pour un gradient géothermique anormalement grand de plus de 70 m montrant que la température croît davantage vers le bas à Soumagne. Le gradient intraformationnel de 56m confirme l'accroissement de température vers le bas. Il faut en conclure que le sommet du Houiller du Pays de Herve est anormalement refroidi. Le sondage d'Ensival constitue une exception remarquable avec un gradient géothermique de 211 m et un gradient intraformationnel de 223 m par rapport au Viséen sous-jacent, températures exceptionnellement froides relevées dans l'autochtone sous le Massif charrié de la Vesdre (o).

Dans le Hainaut, il faut distinguer. Le bassin de Charleroi se caractérise par un gradient géothermique moyen de 48 m et un gradient intraformationnel de 54 m, le premier gradient étant grand et le second très grand. Dans le bassin de Mons on trouve le gradient géothermique normal de 33 m. Enfin à Quévy, on trouve un gradient intraformationnel normal de 34 m sous le Dévonien charrié par la Faille du Midi qui est responsable du gradient géothermique très grand de 57 m. Ce chiffre rejoint celui de 61 m de la Faille Eifélienne à Liège.

En résumé, en Campine où le recouvrement postérieur est important, le gradient géothermique est faible; ce gradient est normal à Liège et à Mons, mais grand à Charleroi; au contact de la Faille du Midi - Faille Eifélienne, ce gradient devient très grand; il est anormalement grand dans le Massif de Herve et exceptionnellement grand sous le massif de la Vesdre. Le gradient intraformationnel est très faible en Campine, faible à Liège et devrait l'être à Mons sous la couverture "froide" du Crétacé; il est très grand à Charleroi. Le gradient intraformationnel est disparate parce que, on le verra, fonction de la convection sous-jacente du Calcaire Carbonifère.

H - Calcaire Carbonifère

LOCALITE	g ^o	g'	g''	formation
Woensdrecht	27,1	57,1	29,2	Emsien
Turnhout	23,4			
Turnhout	23,7			
Halen	37,6			
Soumagne (Schlumb.)	60,6			
Ensival	212,5	21,6	42,9	Frasnien
Heppignies	21,9			
Jemeppes	(21,7)			
Wépion (Schlumb.)	60,7			
Wépion	42,4			

En Campine, à Woensdrecht où le Viséen paraît compact, on trouve un faible gradient de 27 m fonction de la couverture; à Turnhout où on rencontre le sommet d'une lame chaude de convection dans le Viséen le gradient est faible et plus faible que celui du recouvrement, le gradient intraformationnel très grand de 57 m s'expliquant aisément par la circulation fissurale de

(^o) J.M. GRAULICH et G. VANDENYEN - Le sondage d'Ensival-Lambertmont - Service Géologique de Belgique, Professional Paper 1973 n°7.

la même lame chaude. A la limite du Massif du Brabant, Halen offre un gradient normal, presque élevé, de 38m.

Au Bord Nord du Bassin de Namur, dans le Hainaut, on trouve le gradient presque très faible de 22 m indiquant une remontée d'eau chaude.

A Wépion (Schlumb.) et à Soumagne (Schlumb.), où les situations tectoniques sont compliquées, on déduit des gradients très grands de 60 m bien qu'on y constate un gradient intraformationnel presque très faible de 22 m. Le gradient intraformationnel paraît presque faible par rapport à l'Eodévonien imperméable et grand par rapport au Néodévonien perméable pouvant constituer le même circuit de convection (o) (oo).

Enival reste d'un froid exceptionnel montrant la pénétration en profondeur d'une branche froide d'alimentation.

Ici, les gradients indiquent la variation régionale des circuits aquifères.

I - Néo - et Mésodévonien

LOCALITE	détail	g ^o	g'	g''	formation
Heibaart	Famennien	25,4	∞	43,3	Silurien
Chaufontaine	Frasnien	32,6			
Wépion (haut)	Givétien	49,8S			
Wépion (bas)	Frasnien	42,5S			
Jeumont	Famennien	48,9		* ∞ S/T	Viséen
Martouzin	Frasnien	38,1			

Chaque cas constitue un cas d'espèce. A Heibaart, le faible gradient est le reflet de l'anomalie chaude de la Campine causée apparemment par les formations supérieures puisque le gradient intraformationnel au Silurien est grand.

A Chaufontaine (ooo), après avoir rencontré une venue d'eau chaude entre 60 m et 100 m, la température est la même à 300 m qu'au début du forage, d'où le gradient intraformationnel infini. C'est un cas d'exception à ne pas retenir pour l'étude du gradient géothermique normal.

A Wépion, en mesures Schlumberger S, de part et d'autre du coeur du synclinal renversé en Calcaire Carbonifère, on trouve un gradient géothermique élevé, avec un gradient intraformationnel anormalement grand vis-à-vis du Calcaire Carbonifère avec circulation aquifère, tandis qu'en dessous il devient infini vis-à-vis du Silurien où la température est relevée cette fois au thermomètre T. Un cas de plus illustrant l'écart du aux méthodes.

A Jeumont, sous le Bassin de Namur recouvert par un épais biseau Eodévonien du Bassin de Dinant, on retrouve un gradient géothermique total élevé, comme à Wépion.

A Martouzin-Neuille, le gradient géothermique total est à peine grand, dans des empilements d'écaillés tectoniques de Frasnien, montrant que la dépression de la Famenne est relativement moins froide que l'Ardenne.

I - Eodévonien

LOCALITE	g ^o	g'
Val Benoît F. Eif./Dévon.	66,3	63,4
Soumagne (Schlumb.) Emsien	49,9	
Soumagne (Thermom.) Gedinnien	50,7	

^(o) J.M. GRAULICH - Le sondage de Wépion - Serv. Géol. de Belgique, Mém. n° 2, 1961.

^(oo) J.M. GRAULICH - Soumagne et Bolland (à paraître).

^(ooo) J.M. GRAULICH - Sondages pour l'étude hydrologique des eaux chaudes à Chaufontaine - Serv. Géol. de Belgique, Professional Paper 1967, n° 11.

En omettant tous les sondages peu profonds dont on avait déduit un gradient géothermique de 60m, il ne reste plus grand chose.

Au val Benoît, on constate à la même profondeur qu'il fait légèrement plus froid à la lèvre Dévonienne de la Faille Eifélienne qu'à la lèvre en Houiller. Mais la distance horizontale est si courte entre les deux mesures!

A Soumagne, après avoir observé par la méthode Schlumberger une diminution continue et régulière du gradient géothermique, la mesure effectuée au thermomètre à la base du sondage fait remonter ce gradient, faisant déduire un gradient intraformationnel très grand, alors que le gradient total oscille à la limite entre grand et très grand.

K - Siluro-cambrien

LOCALITE	FORMATION	g ⁰	g'
Heibaart	Silurien	26,6	
Booischot	Silurien	41,2	
Bolland	Silurien	45,5	
Tournai	(Couvinién)	34,2	
Leuze	Silurien	41,1	
Wépion (Schlumb.)	Ordovicien	26,8	75,8
Wépion (Schlumb.)	Trémadocien	44,8	
Grand Halleux (T)	Cambrien	66,1	66,1 à 1.500 m
Grand Halleux	Cambrien	48,1	28,6 à 2.100 m
Ostende	Cambrien	24,8	
Ostende	Cambrien	(27,5)	
Alost	Cambrien	(32,3)	
Oudenaarde	Cambrien	(25,6)	
Nederzwalm	Cambrien	(32,3)	
Anderlecht	Cambrien	(30,0)	
Molenbeek	Cambrien	(37,1)	

On voit d'emblée qu'il faut nuancer en fonction des régions et des formations.

Commençons par le Silurien. A Heibaart en région "chaude" le gradient total reste faible bien que s'accroissant car le gradient partiel par rapport au Famennien est grand.

A Tournai, la mesure a été effectuée au niveau du Couvinién, très peu épais, la sonde thermométrique n'ayant pu atteindre le Silurien immédiatement sous-jacent. Par suite de l'uniformité lithologique et de la conductivité de la boue, il faut considérer le gradient mesuré comme caractéristique du Silurien. Ce gradient est absolument normal. De plus, les essais de pompage ont montré l'absence totale d'eau sous le Tournaisien. Le gradient peut donc être considéré comme valable pour la presque totalité des formations susjacentes.

Leuze, Booischot et Bolland sont trois sondages où n'a été exécutée qu'une seule mesure de température : le gradient est également grand dans les trois sondages.

A Wépion, par la méthode Schlumberger, on trouve le même gradient élevé dans le Trémadocien tandis que le gradient paraît faible dans l'Ordovicien 250 m plus haut, le gradient intraformationnel paraissant anormalement grand; la composition du terrain ne semble pas justifier de tels écarts.

Pour le Cambrien, on ne dispose que des renseignements de Grand Halleux en Ardenne : la mesure supérieure indique un gradient à limite de très grand et d'anormalement grand, ce à

quoi on s'attendait en Ardenne, mais ce qui est troublant, c'est que la seconde mesure thermométrique montre qu'à plus de 2 000 m le gradient n'est plus que grand par suite d'un gradient intraformationnel tout juste faible démontrant un accroissement plus rapide de la température à plus grande profondeur.

Sur le Massif du Brabant, Ostende thermal justifie son nom avec un gradient faible. Ailleurs il paraît normal (sans oublier qu'il est déduit).

Chapitre VI – Bilan de l'analyse par formations

FORMATION	REGION	g^0	g'	g''
Oligocène		17 m	9 m	exceptionnel.grand
Eocène		28 m	29 m	- très grand
Landénien (Paléocène)		± normal	50 m	exceptionnel.grand
Maastrichtien		33 m	négatif	très faible
Sénonien (craie)		27 m	28 m	très faible ou grand
"sable Vaals (Cp2 inf.)		30 m	115 m	
Jurassique		(100 m)		
Houiller	Campine	28 m	19 m	- normal très faible
	Liège	35 m	23 m	(Woensdrecht)(Turnhout)
	F. Eif.	61 m	573 m	
	Herve	(71 m)	(61m)	- très grand
	Ensival	211 m		- except. grand
	Hainaut			
	Mons	33 m		
	Charleroi	48 m	54 m	
	F. Midi	57 m	34 m	
Calcaire carbonifère	Campine	25 m	57 m	-
	Brabant	38 m		-
	Hainaut	22 m		
	Bord Sud	(60 m)	(22 m)	(grand) (normal)
	Ensival	212 m		(Wépion)(Soumagne)
Néo- et Mésodévonien	Campine	25 m		grand
	Sud Namur	49 m		- anormalement grand
	Famenne	38 m	38 m	
Eodévonien	F. Eif.	66 m		
	Soumagne	50 m	*63 m	inconnu
Siluro-Ordovинien	Campine	27 m		
	ailleurs	42 m	(76 m)	inconnu
Cambrien	Ostende thermal	25 m		substratum inconnu
	Brabant	(31 m)		
	Ardenne	66 m	66 m	. . .jusque 1 500 m
		48 m	29 m	. . .à 2 100 m

Les cartes géothermiques ont déblayé le terrain, avec les moyens du bord, c.à.d. en utilisant trop souvent des gradients déduits de mesures effectuées à des profondeurs trop éloignées des intervalles considérés. Dans l'analyse des variations liées aux formations géologiques, il faut faire passer au second plan le gradient géothermique total. En effet, le g^0 est une grandeur délicate à manier car il oblitère les variations des formations supérieures tout en subissant leur contrecoup ainsi que les variations de flux venant de profondeur. Pour l'analyse par formations, il faut utiliser les gradients intraformationnels g' d'autant plus valables que l'écart est suffisamment grand entre les mesures, et les gradients partiels extraformationnels g'' à condition de pouvoir suivre leur variation de formation en formation avec un écart suffisant, ni trop grand ni trop petit.

A - gradient intraformationnel négatif.

C'est le cas du Maastrichtien à Eidsen. La formation se refroidit rapidement de 1^0 par 21m d'approfondissements; mais elle refroidit de plus le Landénien susjacent qui perd 1^0 par 70 m. Par contre, la température augmente assez rapidement au sommet du Sénonien, de 1^0 par 27 m.

Le Maastrichtien refroidit donc considérablement son environnement. A l'intérieur de la nappe aquifère, l'eau la plus froide se classe par densité sous une eau moins froide pouvant indiquer un courant différentiel (fig. 1).

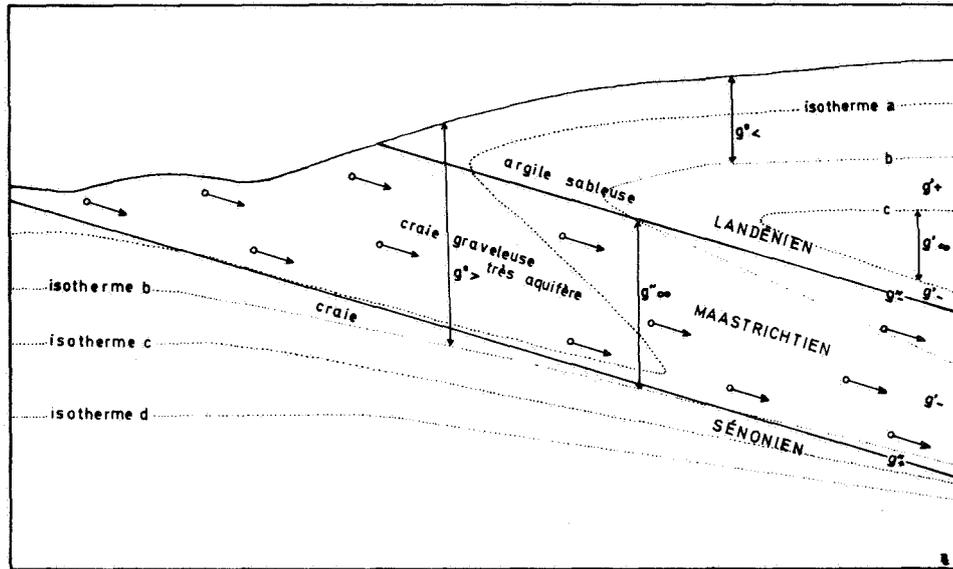


Fig. 1. - Branche froide d'infiltration.

Il existe un second cas illustrant un gradient négatif. A Halen, un approfondissement de 67 m dans la dolomie du Tournaisien amène une diminution de 4° de l'eau à l'orifice, mesurée dans les mêmes conditions de débit, d'instruments et d'opérateurs (fig. 2).

On ne peut citer Chaudfontaine comme troisième cas car c'est une venue d'eau chaude locale qui vient perturber l'équilibre géothermique.

B - Gradient intraformationnel exceptionnellement grand.

Un gradient intraformationnel de plus de 500 m est observé dans le Houiller du synclinal de Liège au contact immédiat de la Faille Eifélienne qui juxtapose le Dévonien inférieur au Sud suivant une surface inclinée à 70° Sud. Il est difficile d'y admettre une pénétration d'eau froide en profondeur. On est acculé à proposer le dégazage du "grisou" (méthane CH₄) dont la détente depuis des millénaires aurait causé une lame froide dans les microfissures de la zone broyée par le charriage. Laissons parler le chimiste (°).

Un second gradient exceptionnel est observé à Ensival. Ce gradient de plus de 200 m s'explique par la pénétration rapide en profondeur, avec un réchauffement très lent, de l'eau de la Vesdre en branche inférieure de convection (voir fig. 1) refroidissant le Houiller et le Calcaire Carbonifère du gisement autochtone de Theux sous les massifs charriés (voir J.M. GRAULICH). Les gradients géothermiques et le gradient extraformationnel sont concordants indiquant un flux "exceptionnellement froid" régulier.

C - Gradient intraformationnel anormalement grand

On dispose de deux gradients intraformationnels de 80 m et de 150 m dans les sables de Vaals à la base du Sénonien au-dessus du Houiller de Campine alors que les gradients extraformationnels proches de part et d'autre sont très faibles. Cette disposition géothermique peut s'expliquer aisément par une convection laminaire à double sens, la branche descendante froide se réchauffant sur le Houiller tandis que la branche ascendante chaude réchauffe le Sénonien, le schiste Houiller et la craie Sénonienne étant tous deux de mauvais conducteurs thermiques (fig. 2).

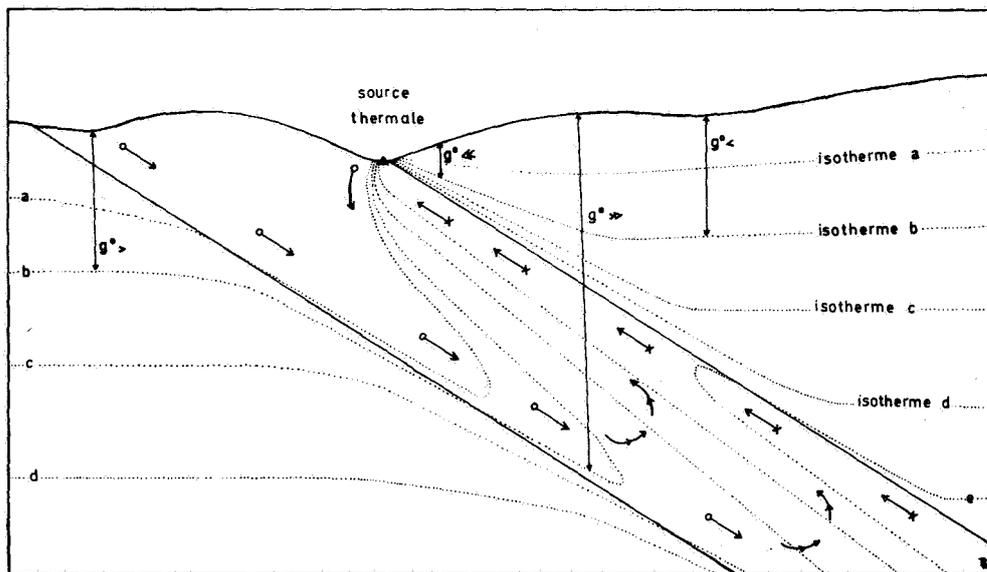


Fig. 2 - Convection interne.

Cela pourrait se présenter aussi dans la nappe du Maastrichtien d'après l'examen des gradients géothermiques mais n'est pas démontré par des gradients partiels.

D - Gradient intraformationnel grand

Il y a celui de (76 m) (Schlumberger) entre l'Ordovicien et le Trémadocien du sondage de Wépion, en roches non aquifères, inexplicable par convection.

Il y a celui de 66 m à Grand-Halleux, dans la note des formations "froides" imperméables du Cambrien d'Ardenne.

Encore une fois un gradient intraformationnel par Schlumberger (61 m) dans le Houiller de Soumagne et extraformationnel de (56 m) au Tournaisien sousjacent indiquant une région "froide" ou "refroidie" par convection froide dans le Calcaire Carbonifère. A Soumagne de plus, on voudrait déduire un gradient intraformationnel grand dans l'Eodévionien en comparant la température mesurée à hauteur de l'Emsien par la méthode Schlumberger et dans le Gedinnien au moyen du thermomètre; cela cadrerait avec ce que l'on sait du gradient dans le Paléozoïque ancien.

En Campine à Turnhout, il n'y a que 40 m de distance entre deux mesures très précises dans le Calcaire Carbonifère justifiant un gradient g' de 57 m; on se trouve dans un réseau de fissures et de grottes dans la même branche chaude de la convection de la nappe captive du Calcaire Carbonifère, le sommet de la nappe diffusant sa chaleur vers le haut.

Dans le Landénien à Zwartberg, le gradient g' est grand mais les mesures sont peu précises, assez proches et prises dans la boue de forage.

Enfin le bassin houiller de Charleroi pose un problème avec les grands gradients intraformationnels observés à Fontaine-l'Évêque, Puits 1 et 3, et à Marcinelle; le Houiller à Charleroi paraît nettement plus "froid" que celui de Mons, de Liège et surtout de Campine.

E - Gradient intraformationnel normal

A la limite de la normalité, on peut retenir le sondage de Martouzin-Neuville où l'on ne dispose que d'un gradient géothermique total mais les formations, tectoniquement compliquées, appartiennent toujours au Frasnien; il est regrettable de ne disposer que d'une mesure car il est vraisemblable qu'une série de mesures auraient reflété la complication tectonique.

En profondeur, le Cambrien de Grand Halleux présente un gradient g' normal ce qui était plutôt imprévu, personne ne soupçonnant une diminution de gradient en profondeur.

A Quévy sous la Faille du Midi, le gradient g' en Houiller est absolument normal. Dans le Houiller de Liège, le gradient g' est presque faible.

Dans le Sénonien, les gradients intraformationnels relevés sont assez disparates mais leur moyenne est normale; le gradient extraformationnel g'' vers le haut, par rapport au Maastrichtien est normal à Zwartberg et Eisden, mais faible à Turnhout et très anormalement faible à Woensdrecht où il implique un refroidissement par le Maastrichtien; le gradient extraformationnel g'' vers le bas, vers le Houiller est grand à Zwartberg et à Eisden Puits, tandis qu'il est faible à Woensdrecht et à Eisden Village, des complications étant introduites par les sens divers de la convection aquifère des sables de Vaals.

Enfin pour l'ensemble de l'Eocène à Woensdrecht le gradient g' est normal, mais le gradient extraformationnel g'' est très grand vis-à-vis du Maastrichtien sous-jacent.

F - Gradient intraformationnel faible

Au coeur du pli renversé de Wépion, le gradient g' du Calcaire Carbonifère est tout juste faible alors que le gradient extraformationnel g'' par rapport au Néodévonien sous-jacent est grand et qu'il est anormalement grand par rapport au Néodévonien susjacent; le coeur du synclinal couché en Calcaire Carbonifère est donc "tiède" par rapport à son environnement mais l'accroissement de la température vers le bas à l'intérieur du Calcaire Carbonifère n'indique aucune convection thermique de la nappe mais seulement une conduction plus forte. (Attention, données Schlumberger!).

Le Terrain Houiller de Campine offre à trois reprises le gradient intraformationnel g' concordant de 19 m. Quelque chose est particulier à ce terrain: la teneur de la houille en matières volatiles? Pour la deuxième fois il faut passer la parole au chimiste.

G - Gradient intraformationnel anormalement faible

A Eisden Puits, le gradient g' est anormalement à très anormalement faible de 13 m. La géologie n'offre pas à première vue d'explication à cette anomalie et la chimie non plus. Il n'y a pas de convection aquifère dans le Terrain Houiller. Reste à retenir le voisinage relatif de la faille bordière Feldbiss et la possibilité d'une convection chaude sous le Houiller de la nappe du Calcaire. Rien n'étaye cette hypothèse.

H - Gradient exceptionnellement faible

A Eisdén Puits, on trouve un gradient exceptionnel g' de 9 m dans l'Oligocène le gradient géothermique g^0 étant très anormalement faible. On se trouve typiquement dans la branche chaude d'un circuit de convection drainant l'Oligocène du Limbourg oriental vers la Meuse (fig. 3). Y aurait-il là un début d'explication à l'anomalie calorifique de profondeur, malgré le net "refroidissement" Maastrichtien?

I - Conclusions à reporter

Dans l'analyse géothermique par formations géologiques, on voit d'emblée que le gradient géothermique total g^0 oblitère dans une moyenne les fluctuations prononcées de la réalité.

Il se confirme en gros que les formations vieilles de plus de 350 millions d'années sont "froides" avec un gradient interne élevé tandis que le Terrain Houiller est relativement plus "chaud". Il l'est nettement moins dans les régions où la houille contient moins de 14% de matières volatiles, "houille maigre"; il est "chaud" à "très chaud" là où la houille contient de 25% à 40% de matières volatiles, "houille grasse". On ne peut donc négliger le "rang" d'évolution de la houille ce qui est un aspect chimique de la géothermie.

Il apparaît que le Sénonien, l'Eocène et par déduction d'ensemble, le Paléocène (Landénien) présentent des gradients normaux.

Toutes les formations aquifères sont anormales au point de vue de la régularité du gradient géothermique. Il y a évidence d'une part de courants de convection dans les nappes aquifères et d'autre part de variations régionales dans les circuits de convection. L'ensemble des mesures prises au hasard indiquent par leurs valeurs désordonnées que le problème de la distribution thermique au sein des nappes, tant en verticale qu'en horizontale, est loin d'être cerné d'assez près (fig. 3).

Chapitre VII - La convection des nappes aquifères (fig. 3)

A) Les nappes dessalées ("agressives" et "dures")

1) Nappe de la Gaume

On n'y dispose que d'une seule donnée géothermique. Le sondage de Lasoye confirme l'opinion généralement admise que l'eau du Jurassique de Belgique s'écoule en profondeur vers le Bassin de Paris. On se trouve dans la branche froide d'alimentation d'une convection (fig. 1).

2) Convection de la Vesdre

Dans la région de la Vesdre, on constate la pénétration d'eau froide dans le substratum Carbonifère autochtone à Ensival (schéma fig. 1). L'eau s'équilibre à 38° dans le Calcaire Carbonifère à Soumagne et Bolland. L'eau chaude sourd à Chaudfontaine à 35° dans le calcaire... Frasnien (fig. 2).

Si, du point de vue géothermique, on croit trouver un circuit thermique, dans la réalité tectonique il en va tout autrement: on ne voit vraiment pas un circuit aquifère possible partant sous le Massif de la Vesdre, s'équilibrant sous le Bassin de Herve et jaillissant dans une autre formation d'une écaïlle tectonique au front du Bassin de Dinant (voir travaux de J.M. GRAULICH).

3) Bord Sud de la Basse-Sambre

Dans le Calcaire Carbonifère renversé du Bord Sud du Bassin de Namur, sous le charriage du Bassin de Dinant, l'eau tiède rencontrée au sondage de Wépion indique, vu son faible gradient par rapport au gradient très grand des formations encaissantes, un apport de chaleur extérieur. On peut imaginer une pénétration de la nappe dans l'anse de Jamioulx et le massif d'Ormont. L'exutoire chaud de la nappe se situe sous le lit de la Meuse, le niveau de l'eau du sondage de Wépion fluctuant suivant le niveau de la Meuse (voir J.M. GRAULICH). Pour accepter ce point de vue, il faut supposer une circulation aquifère qui se joue de la complication tectonique des écaïlles renversées.

4) Bord Nord du Hainaut

Dans la nappe du Calcaire Carbonifère, il faut distinguer l'écoulement superficiel des eaux dures, bicarbonatées calciques, qui se fait d'Est en Ouest, depuis la mise en charge à Namur vers la cote 150 jusqu'à l'exutoire à l'Escaut à Kain à la cote 13 (°). Cet écoulement est mentionné en flèches pointillées à la figure 3. Le réchauffement par convection thermique est indiqué en flèches pleines.

(°) R. LEGRAND et collab. - *Essaim de puits naturels à Kain.*
- Bull. Soc. belge Géol., Bruxelles 1967, t. LXXVI, p.66, fig. III.

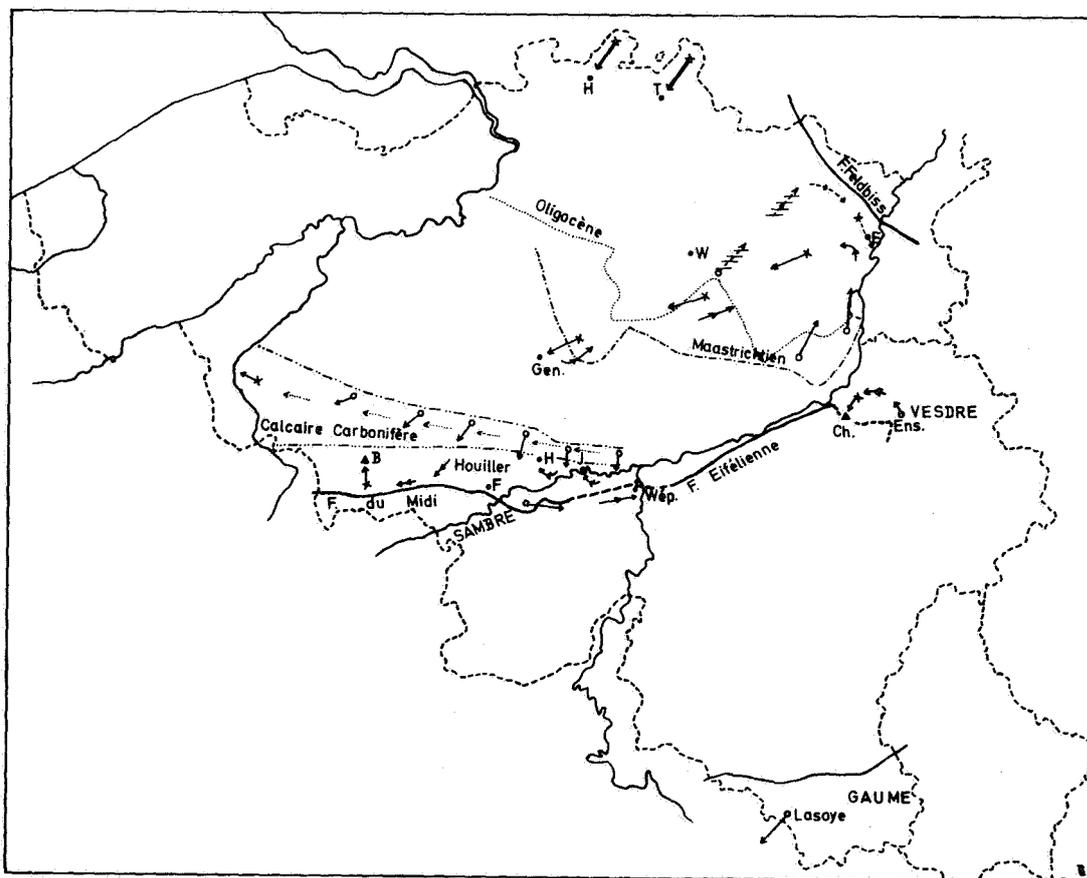


Fig. 3 - Convection des nappes aquifères.

En trouant le Terrain Houiller, les sondages d'Heppignies et de Jemeppe sur Sambre ont atteint la nappe du Calcaire Carbonifère aux eaux en voie de réchauffement respectivement à 250m (20°) et à 650 m (36°), calciques carbonatées, dont la température a baissé rapidement avec la mise en exploitation. Le débit de 300 m³/h à Jemeppe dépasse largement le courant naturel, l'eau s'étant refroidie en quelques mois à 20°.

Il faut bien associer à cette nappe les eaux chaudes sulfatées, à salinité de 1,7 gr/l, de Baudour. Ces eaux ont pénétré à grande profondeur, de 1 500 m à 2 000 m d'après leur température, en s'enrichissant en sels (surtout Na Cl) par l'expulsion de saumures de grande profondeur (voir plus loin). La rencontre de ces eaux à Baudour est purement fortuite et on aurait vraisemblablement eu le même résultat en forant des tunnels inclinés à Hautrage ou à Bernissart, au Sud de la Faille Bordière (°).

5) Nappe de l'Oligocène de Campine

Pour expliquer l'anomalie exceptionnellement chaude de l'Oligocène de la région d'Eisden, il est difficile d'accepter un circuit de convection (en flèches tiretées) s'alimentant en branche froide à la Gette vers la cote 25, pour déboucher en branche chaude à la Meuse à la cote 40.

(°) R. LEGRAND - *Le Massif du Brabant - Service Géologique de Belgique, 1968, mém. n° 9, pp. 26-36.*

Cette proposition va à l'encontre des lois de l'écoulement et de la mise en charge des nappes souterraines. Il convient une fois de plus de faire appel à la géochimie en invoquant l'expulsion d'eau de l'Oligocène sous l'effet du tassement et du début de la lapidification. Il s'agit une fois encore d'un travail s'étendant sur une durée d'ordre géologique et non d'une convection à l'échelle du temps humain.

6) Nappe du Maastrichtien.

Dans le Nord Est du pays, la nappe du Maastrichtien est très active dans les échanges thermiques, paraissant en général plus froide que l'environnement, avec une branche chaude très nettement marquée en direction d'Hasselt. Cette branche se dilue de filets en filets à la rencontre d'eaux plus froides, mais l'apport de chaleur dû à cette nappe est encore sensible dans le "synclinal" fermé de La Hulpe, emprisonné sous une couverture imperméable (voir cartes o et a).

L'apport de calories du N.E. vers le S.W. se dissipe en cours de route de sorte qu'une lame froide retourne en fermant le circuit en direction de la Feldbiss (du type fig. 2).

Ce circuit presque fermé est commandé par la mise en charge au niveau de la Meuse entre Visé et Maastricht.

B) Les nappes salées

Au bord méridional de la Campine, une série de sondages ont atteint le Calcaire Carbonifère dont l'eau renferme 3,5 gr/l de Na Cl alors que l'eau du Maastrichtien ne renferme que 0,5 gr/l de NaHCO_3 , cas assez rare d'eau douce près de la "zone d'échanges" chimiques où les cations C^{++} sont déjà remplacés par les cations C^+ alors que l'anion largement dominant reste le HCO_3^- . L'eau du Calcaire est tiède, de l'ordre de 32° à l'orifice sans mesure précise.

A Haelen, où le Calcaire Carbonifère a été atteint sous 250 m de Terrain Houiller, l'eau de la dolomie du Tournaisien pompée au débit constant de 45 m³/h sort à 36° lorsque le sondage l'avait atteinte à 1 299 m, mais la température descend à 32° lorsque le sondage fut arrêté à 1 366 m. L'eau est chlorurée sodique à 9 gr de sels au litre. Le gradient intraformationnel est fortement négatif, la température s'abaissant de 4° pour un approfondissement de 67 m, indiquant une convection interne de type fig. 2.

La rencontre d'eau chaude à Baudour est accidentelle. Cette eau renferme 1,7 gr/l de sels; elle est sulfatée calcique, légèrement magnésienne. A proprement parler, au point de vue qualité c'est une "eau dure"; mais au point de vue quantité de salinité c'est une "eau séléniteuse" comme les eaux du Terrain Houiller. Il s'agit donc de la branche montante (fig. 1 inversée) d'une convection de la nappe du Calcaire Carbonifère, d'eau "agressive" bicarbonatée calcique dans sa branche descendante d'alimentation, qui a inversé les anions HCO_3^- et SO_4^{--} , devenant une eau "dure" en franchissant la base du Terrain Houiller, sans atteindre le seuil de "salinité" (°).

C) Les saumures

A de multiples reprises, des travaux miniers profonds ou des sondages profonds ont rencontré des saumures, "eaux sursalées perconnées secondes" de J. DELECOURT (voir réf. - in R. LEGRAND). Ces saumures posent plusieurs problèmes géochimiques.

La solubilité de Na Cl est d'environ 300 gr/l et dépend très peu des variations de température et de pression.

Pourquoi toutes les saumures rencontrées en profondeur ont-elles, en Belgique, une salinité totale comprise entre 125 et 150 gr/l, à Na Cl dominant bien sûr?

(°) R. LEGRAND - L'évolution géochimique de l'eau - Bull. Soc. belge Géol., Bruxelles, 1962, t. LXXI, pp. 105-130.

Pourquoi le Ca^{++} coexiste-t-il en solution avec des teneurs appréciables de SO_4^- et de CO_3^- ? Une réponse à cette question est fournie par l'analyse équivalente:



La caractéristique de toutes les saumures rencontrées est que la teneur en é Mg^{++} est égale ou légèrement supérieure à la somme des Anions⁻ et qu'ainsi le Ca^{++} est maintenu en solution par l'excès de Cl^- . La rencontre de telles eaux en profondeur est associée à la dolomitisation actuelle, fissurale ou en cavernes, du Calcaire Carbonifère. Encore un problème de géochimie.

On a rencontré de telles saumures en branches chaudes de convection fermée au sommet du Calcaire Carbonifère de la Campine à Heibaart et à Turnhout. Une telle saumure a été également rencontrée sous les travaux à Fontaine l'Evêque, à 1 800 m de profondeur, dans les grès sous-jacents à la veine "Gros Pierre"; dans ce cas il s'agit plutôt d'une eau presque prisonnière que d'un circuit ouvert. On ne dispose pas de mesures de température pour les autres cas.

Chapitre VIII - Valorisation de la chaleur géothermique.

Il n'y a pas lieu d'espérer retirer du sous-sol de la Belgique de l'eau à l'état de vapeur, comme en Islande ou en Toscane. On ne peut donc disposer de la chaleur latente de condensation de 540 calories/mole.

Que nous reste-t-il? Des eaux chaudes de basse énergie thermique tantôt dessalées et potables, tantôt salées et inutilisables comme eaux industrielles.

A - Eaux potables

Le circuit de la Vesdre avec sources tièdes à Chaudfontaine est valorisé du point de vue hydrothérapeutique. On ne peut prélever davantage sans abaisser la température, ce qui du point de vue hydrothérapeutique est prohibé, l'eau devant sourdre à la température du corps humain.

L'eau tiède de Wépion pourrait être valorisée au lieu de la laisser perdre sous la Meuse à 1 ou 2 km en aval. Posons un débit de 50 m³/h. à 40° comme base d'utilisation (A noter qu'en un bref pompage l'eau arrivait à 27°). En effet si on veut prendre 100 m³/h. ou 200 m³/h. on sollicitera trop directement la Meuse en inversant le courant et en introduisant de l'eau froide. A Wépion, la température moyenne du lieu est d'environ 10°. Avec le débit préconisé et la température prévisible, on dispose donc de $\Delta t^{\circ} 30^{\circ}$ soit $30 \times (50 \times 10^6)$ calories/heure ou $1,5 \times 10^9$ cal/h. Comme d'autre part la combustion du charbon dégage 94,4 kilocal/mole en charbon pur, on voit que la quantité de charbon nécessaire à l'obtention d'une telle quantité de chaleur est de 200 kg/h. Ainsi l'exploitation continue journalière de 1 200 m³ à 40° économiserait 5 tonnes de charbon. De ces données, on peut calculer les hectares de serres que l'on pourrait chauffer. De plus l'eau convient non seulement pour l'arrosage des plantes mais, après refroidissement, peut être introduite dans les canalisations d'eau potable: en effet, c'est une eau, à 400 mgr/l de résidu salin, calcique (et magnésienne plus que sodique) carbonatée (avec sulfate et chlorure), du type d'eau dure neutralisée, à la limite de la zone d'échange des cations (voir GRAULICH - Wépion, et LEGRAND - Evolution de l'eau).

Le cas de Jemeppe sur Sambre illustre le refroidissement rapide lié à un débit excessif. L'eau jaillissant à 300 m³/h à 36° comme eau dure neutralisée, s'est modifiée en peu de mois en eau dure agressive à 20°

L'eau chaude de Baudour est inexploitée.

A Webbekom près de Diest, l'eau du Maastrichtien sert à l'alimentation du bassin de natation. Ce n'est pas un usage à étendre inconsidérément.

B - Eaux salées

A Turnhout, la nappe du Maastrichtien est salée et devenue impropre comme eau potable. Elle est utilisée pour le bassin de natation de la ville. Sans dilapider la nappe précieuse du Maastrichtien, un tel usage peut être bénéfique, empêchant la "zone de salure" de s'étendre vers le Sud en fonction des prélèvements intensifs qui y mettent cette nappe en dépression.

C - Saumures

On a rencontré une saumure à 103° à 2 200 m sous Turnhout, tandis qu'à Jeumont, il faut atteindre 4 500 m pour obtenir une température de 100°. L'allure des isothermes en Campine indique la possibilité de rencontrer des saumures à 100° dans le Calcaire Carbonifère du Nord Est de la Campine mais au Sud de la Faille Feldbiss. Il s'agit simplement d'une question de profondeur avec la chance, aléatoire mais raisonnable, d'une circulation suffisante dans le Calcaire.

Ces saumures posent un problème d'exploitation. Elles ne sont pas vaporisables par suite de l'excès de salinité et si on en rencontrait à une température suffisamment élevée pour vaporiser l'eau à la pression atmosphérique, la précipitation intense des sels dissous colmaterait presque immédiatement la venue. Il faut donc épuiser leur chaleur dans un fluide de transfert, puis réinjecter la saumure refroidie dans le sous-sol profond (elles ne peuvent être rejetées dans les rivières), à 1 ou 2 km de distance pour rétablir le circuit du fluide vecteur de la chaleur. C'est ce qu'on réalise en France à Melun avec l'eau du Dogger pour le chauffage urbain.

Chapitre IX - Jalons géothermiques - Conclusions générales.

Les données géothermiques disponibles en Belgique (chapitre I) sont transformées en données comparables (chapitre II) de façon à pouvoir dresser des cartes géothermiques (chapitre III) dont on peut déduire que le gradient géothermique moyen est de 33 m en Belgique jusque la cote - 1 500. Sous cette profondeur il semblerait que le gradient soit plus petit. Les cartes géothermiques illustrent la relation directe avec la géologie profonde: les massifs calédoniens de l'Ardenne et du Brabant constituent des régions "froides" par rapport aux gisements houillers et plus particulièrement à ceux dont la houille a une teneur de plus de 20% en M.V. qui sont des régions "chaudes".

L'analyse des variations des gradients en fonction des formations géologiques (chapitre V) montre le danger d'utiliser un gradient global. A côté de formations à flux géothermique "normal", il y a surtout beaucoup de variations de détail. Il y a d'un côté les formations qui dégagent encore de la chaleur telle que le Houiller (évolution de la houille - exothermique) et le Néogène (lapidification - exothermique); de même pour le refroidissement le long de la Faille du Midi - Faille Eifélienne (fuite du CH₄ par détente - endothermique), points de vue nécessitant un développement géochimique escamoté dans cette note descriptive. D'autre part, le bilan des variations du flux géothermique (chapitre VI) fait apparaître le rôle primordial des formations aquifères, montrant clairement que les convections aquifères l'emportent sur la conduction spécifique des terrains.

Les convections aquifères (chapitre VII) offrent quelques chances de valorisation de la chaleur géothermique (chapitre VIII). On peut raisonnablement espérer que son utilisation rationnelle grâce aux fluides naturels (en général des eaux salées ou des saumures) permette d'alimenter quelques bassins de natation ou des hectares de serres ou même le chauffage de l'une ou l'autre agglomération, en économisant, pour la Belgique, un millier de tonnes d'équivalent charbon par jour.

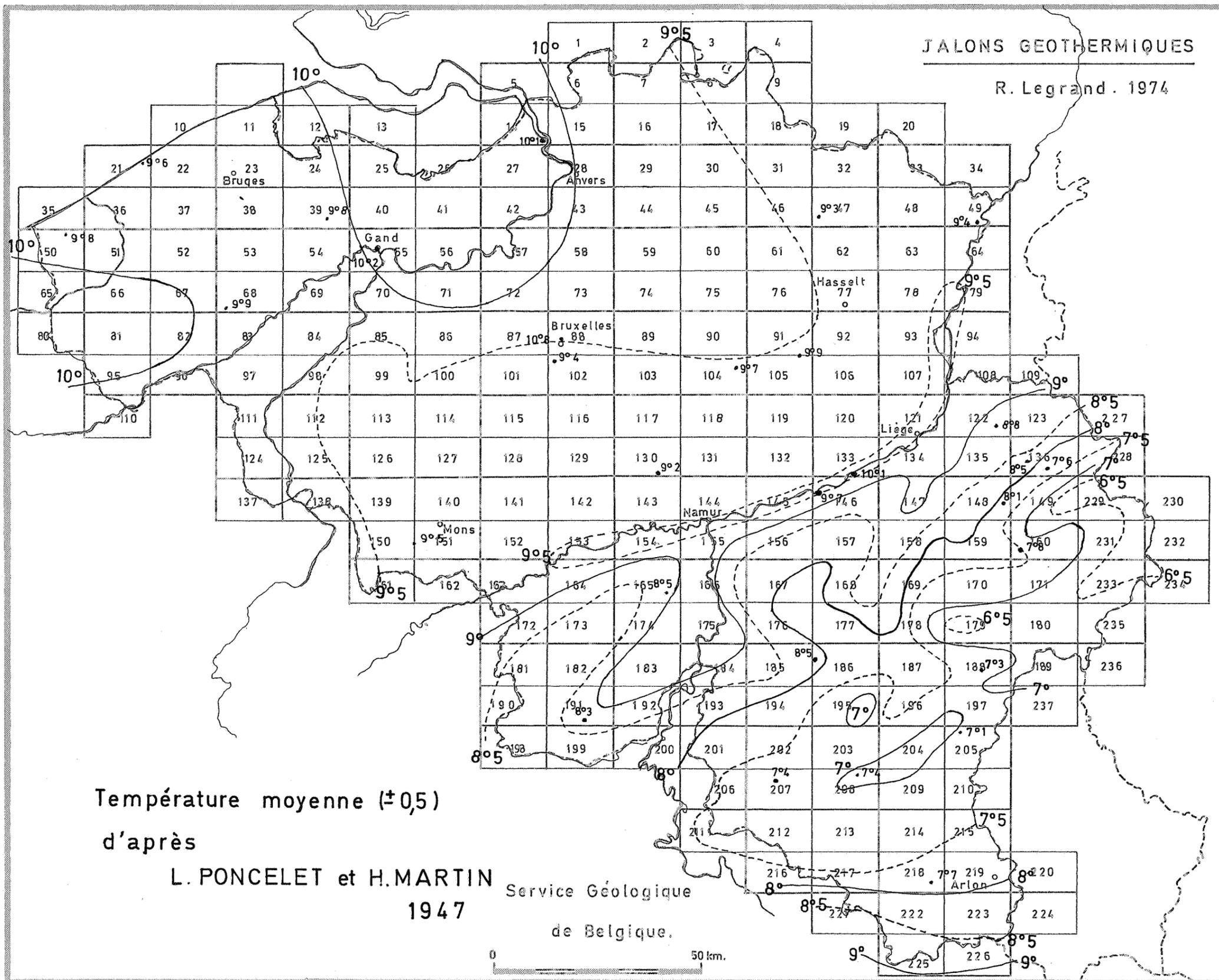
On ne dispose pas de mesure directe du flux géothermique en Belgique. En prenant comme base la valeur, proposée par les géophysiciens, de 1,6 microcalorie par cm² et par seconde, on calcule que le flux géothermique normal quotidien pour la Belgique, dont la surface est de 30 000 km², équivaldrait à la combustion de 5 000 tonnes d'équivalent charbon calculé en carbone pur, soit la production journalière d'un siège de charbonnage.

La valorisation de l'énergie géothermique devrait dépasser la récupération du flux naturel, en allant rechercher à plus grande profondeur l'énergie de plus haute enthalpie accumulée au cours des siècles, à condition de disposer d'un fluide vecteur de la chaleur, utilisable en circuit souterrain profond. Cette valorisation artificielle dépasse le cadre de cette étude qui se limite aux données.

Ce n'est qu'une première ébauche, une pose de jalons.

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand . 1974



Température moyenne ($\pm 0,5$)

d'après

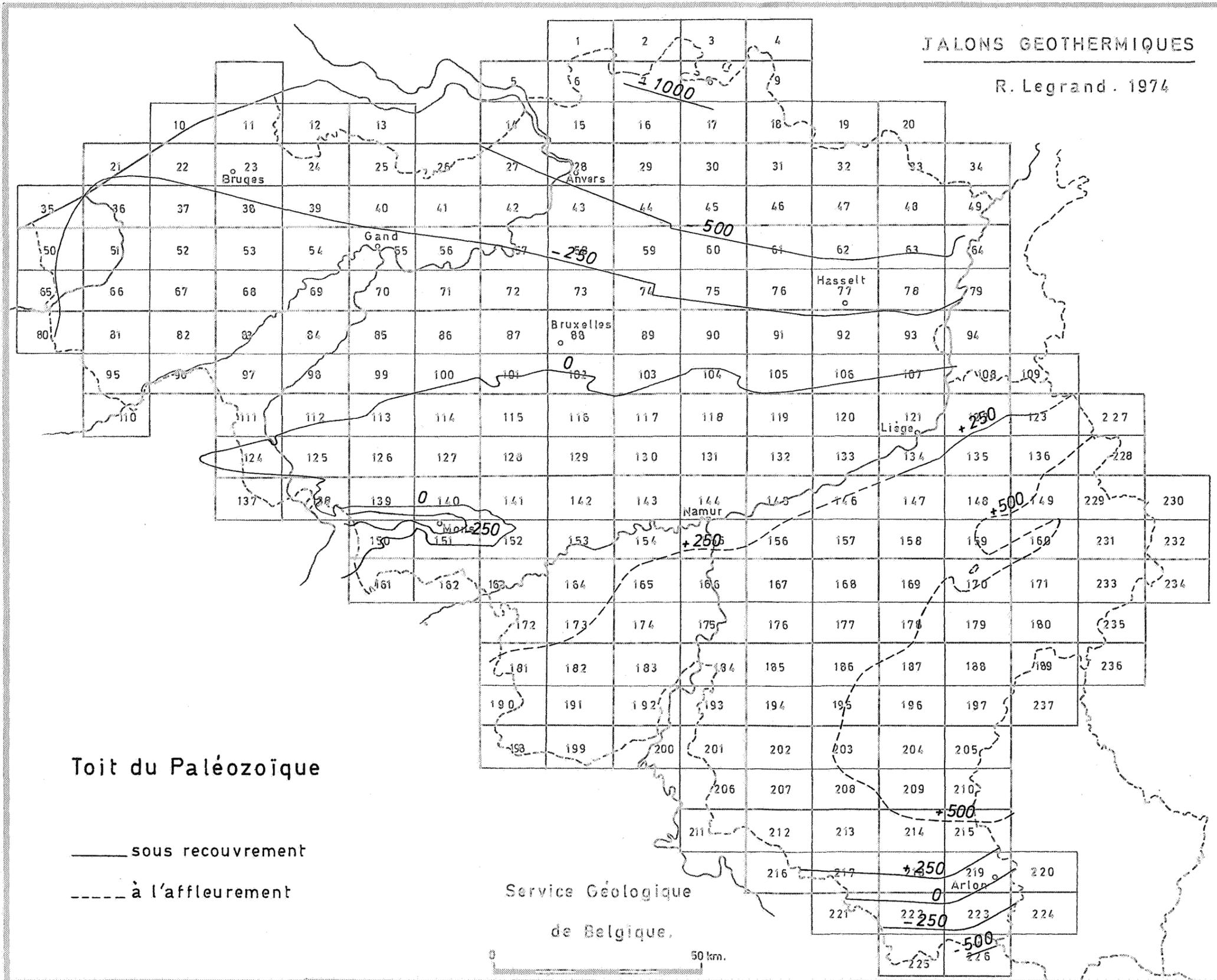
L. PONCELET et H. MARTIN
1947

Service Géologique
de Belgique.

0 50 km.

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand . 1974



Toit du Paléozoïque

—— sous recouvrement

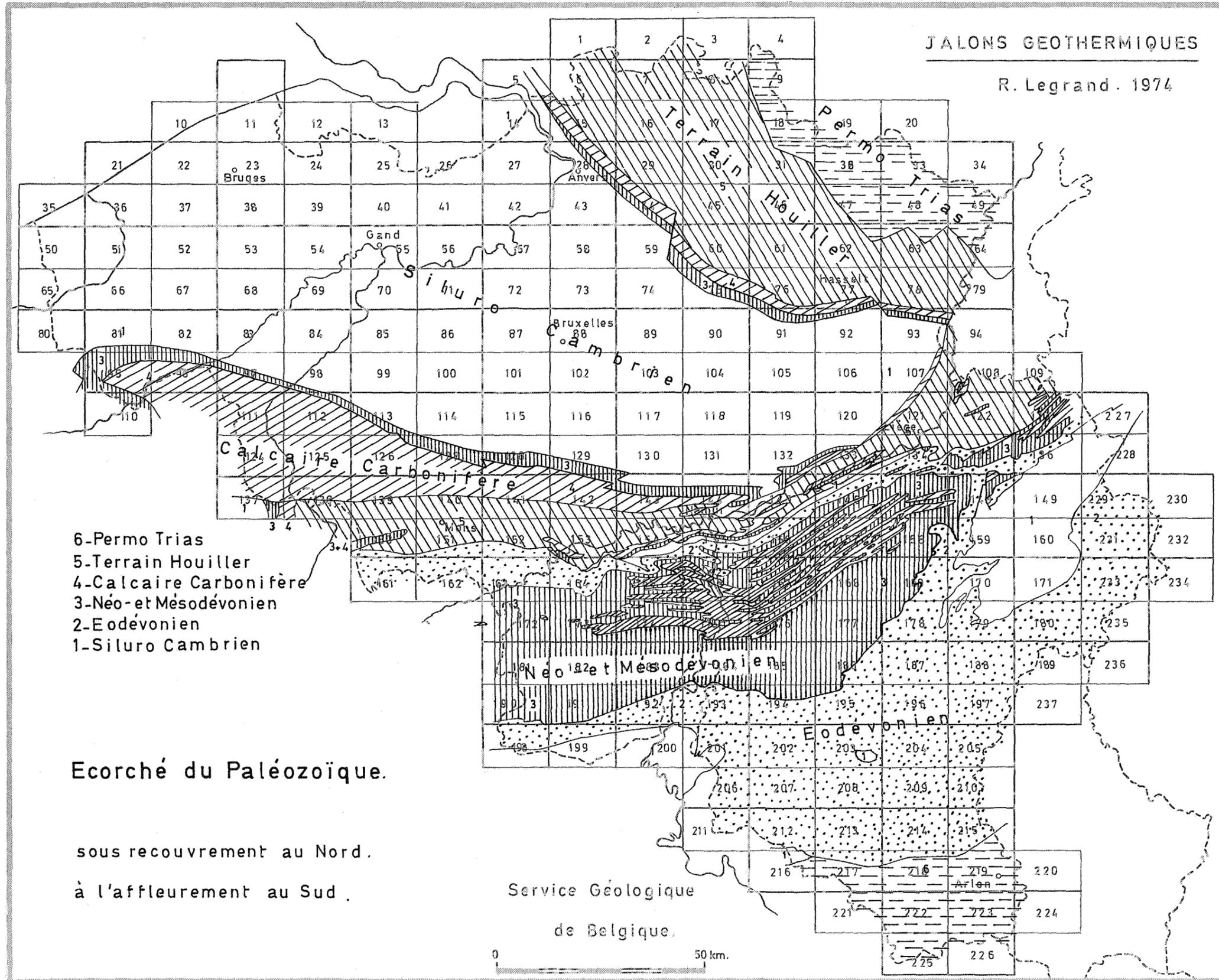
- - - - à l'affleurement

Service Géologique
de Belgique.

0 50 km.

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand . 1974



- 6-Permo Trias
- 5-Terrain Houiller
- 4-Calcaire Carbonifère
- 3-Néo- et Mésodévonien
- 2-Eodévonien
- 1-Siluro Cambrien

Ecorché du Paléozoïque.

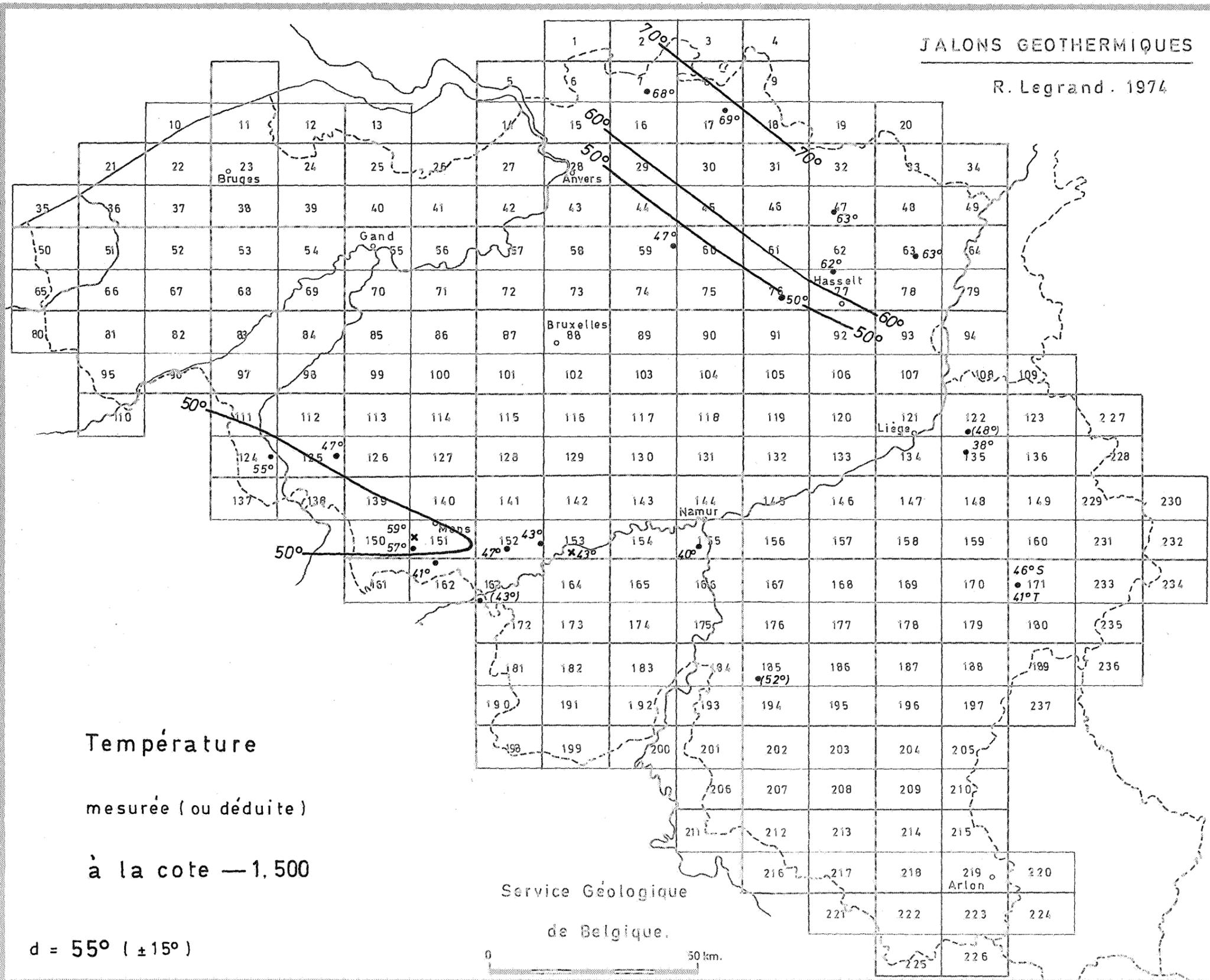
sous recouvrement au Nord.
à l'affleurement au Sud.

Service Géologique
de Belgique.

0 50 km.

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand, 1974



Température
mesurée (ou déduite)
à la cote -1,500

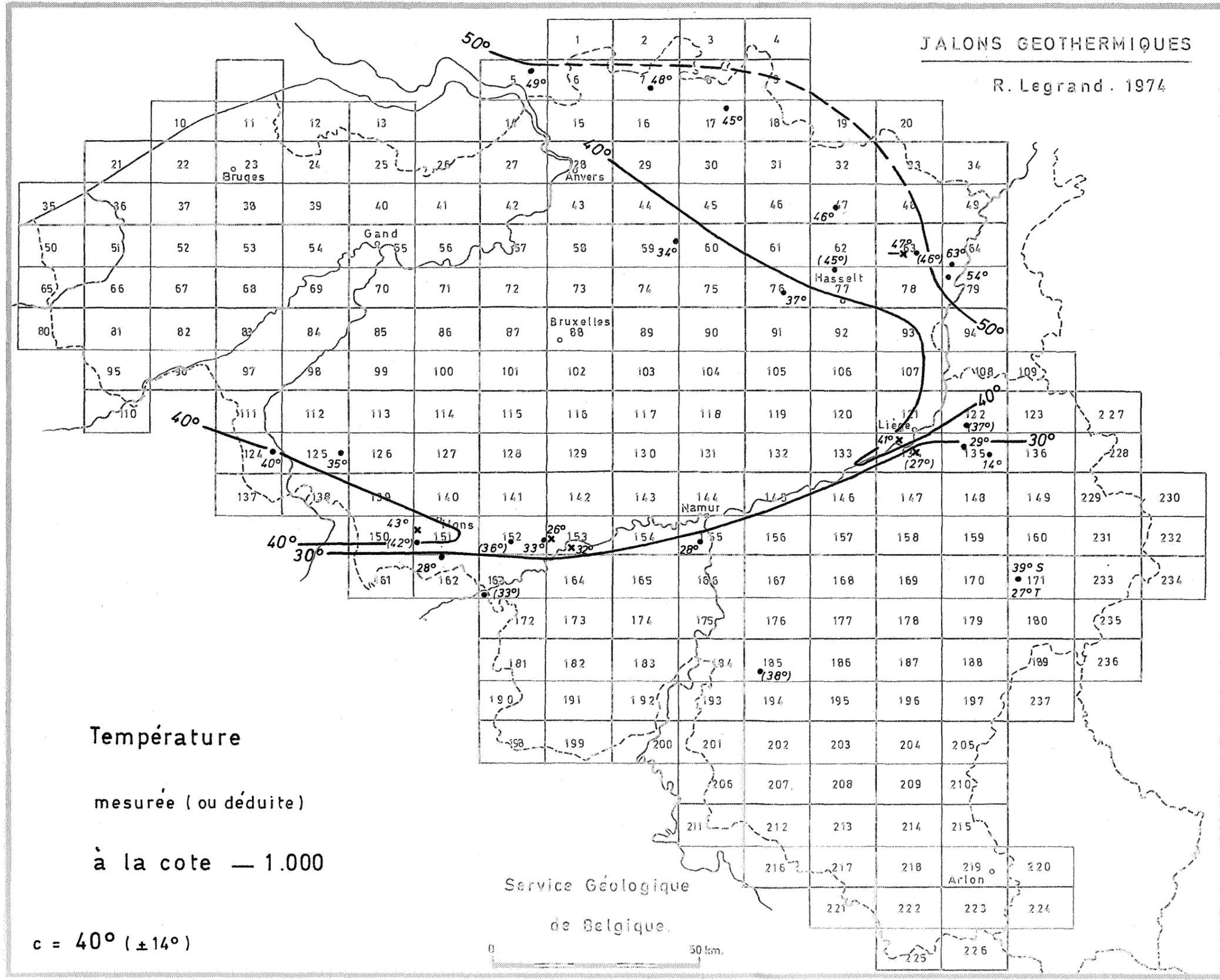
$d = 55^\circ (\pm 15^\circ)$

Service Géologique
de Belgique.

0 50 km.

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand . 1974



Température
mesurée (ou déduite)
à la cote — 1.000

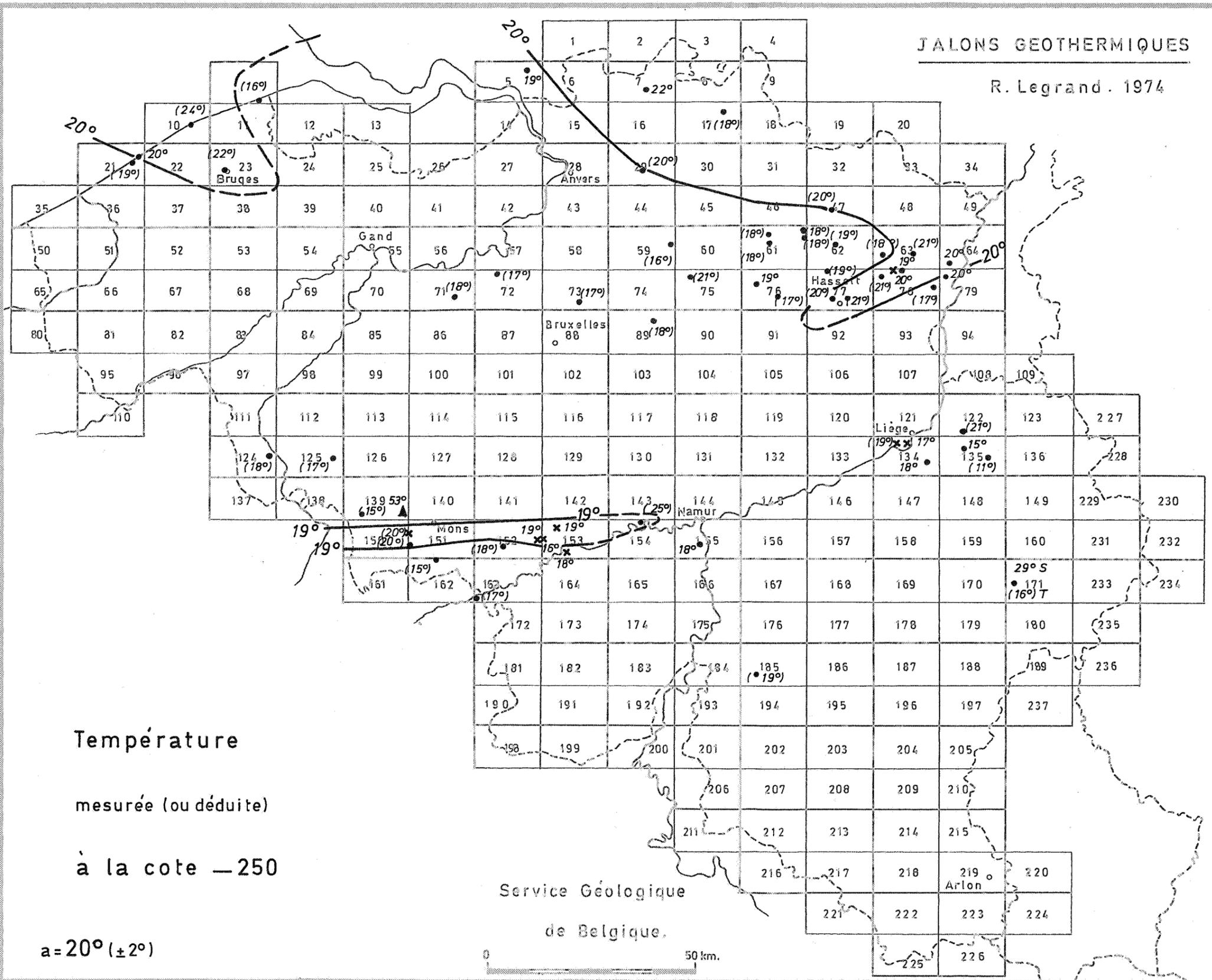
$c = 40^{\circ} (\pm 14^{\circ})$

Service Géologique
de Belgique.



JALONS GEOTHERMIQUES

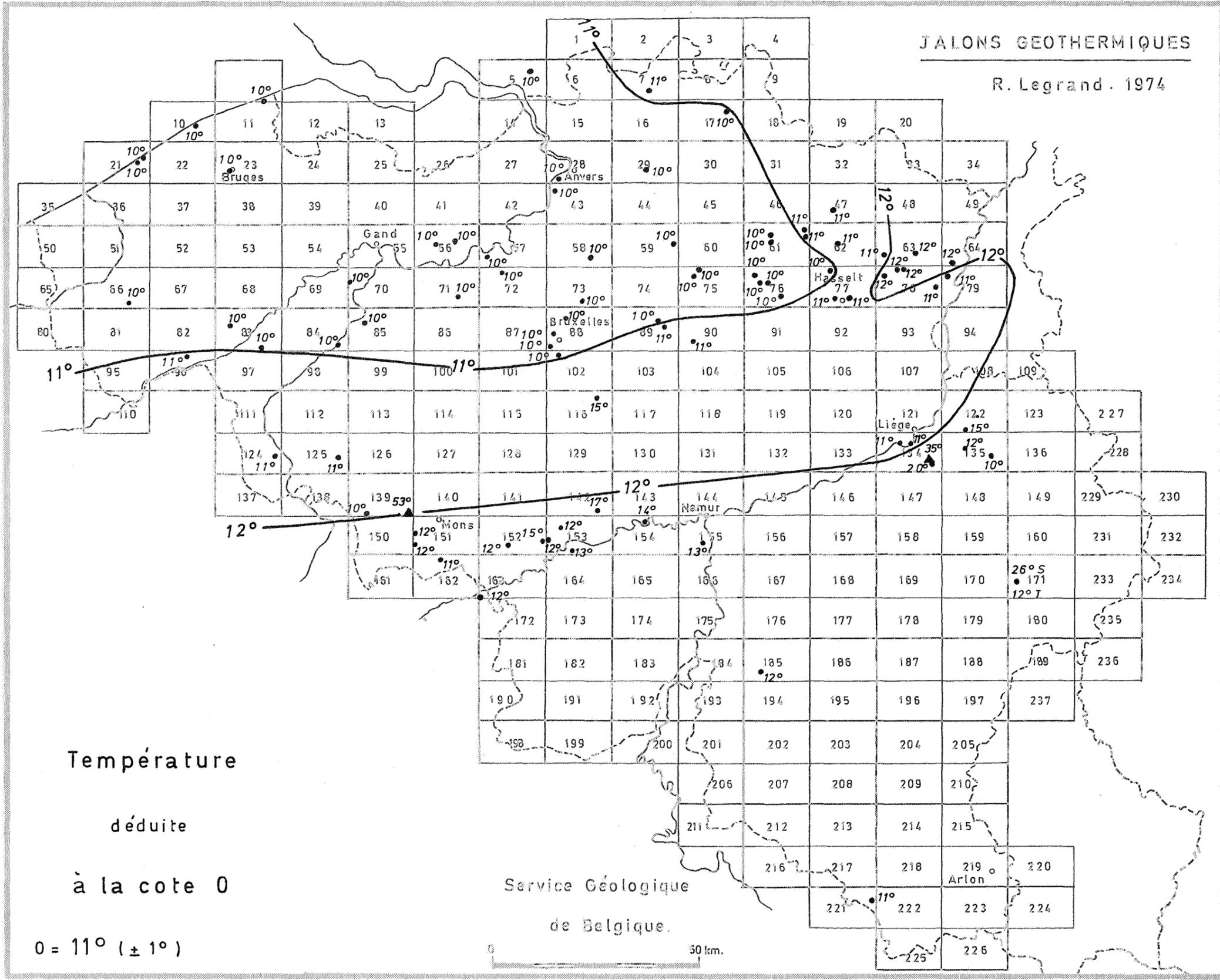
R. Legrand . 1974



$a = 20^{\circ} (\pm 2^{\circ})$

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand . 1974



Température

déduite

à la cote 0

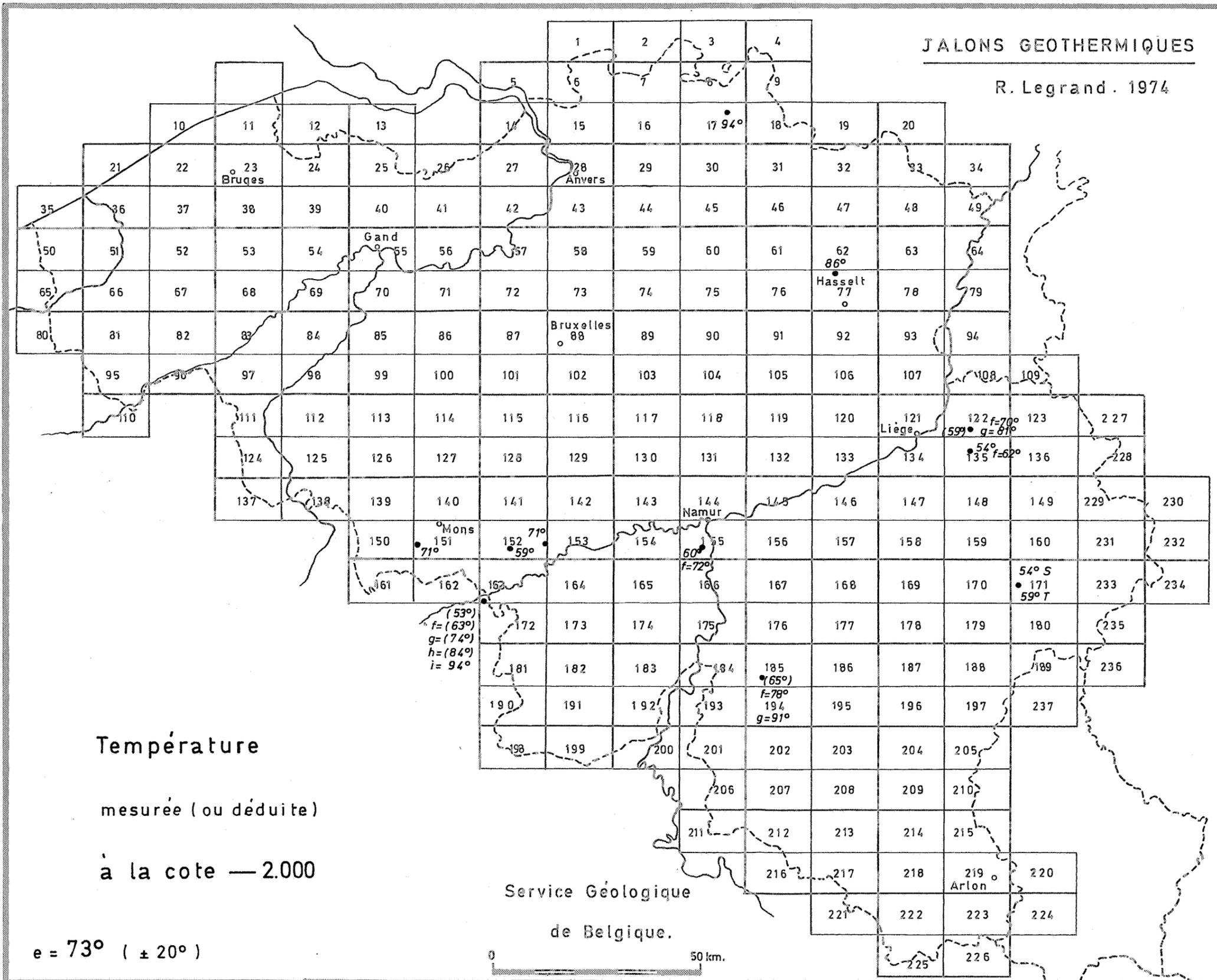
0 = 11° (± 1°)

Service Géologique
de Belgique.

0 50 km.

JALONS GEOTHERMIQUES

R. Legrand . 1974



Température
mesurée (ou déduite)
à la cote — 2.000

$e = 73^\circ (\pm 20^\circ)$

Service Géologique
de Belgique.

0 50 km.