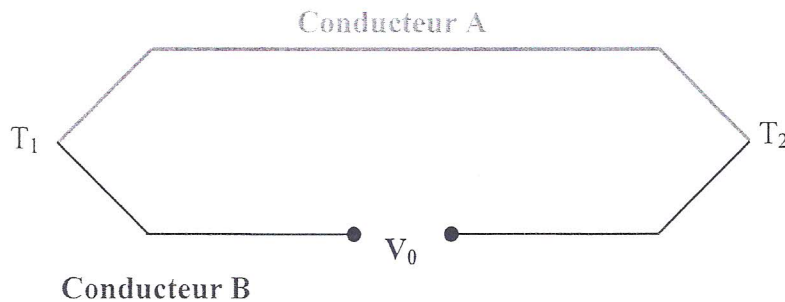


# CHAPITRE 6 : LES THERMOCOUPLES

## 6.1 PRINCIPE

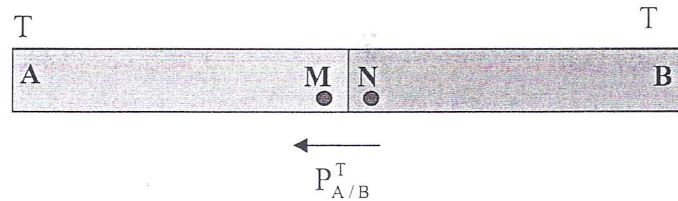
Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B de nature différente, dont les jonctions sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$  délivre une f.e.m  $V_0$  qui dépend d'une part de la nature de A et B, et d'autre part des températures des deux jonctions. En général, la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ( $T_1=T_{ref}$ ), tandis que l'autre jonction est placée dans le milieu dont on cherche à mesurer la température. La jonction à la température  $T_1$  est également appelée soudure froide et celle à la température  $T_2$  soudure chaude.



## 6.2 LES EFFETS THERMOELECTRIQUES

Le fonctionnement des thermocouples est basé sur plusieurs phénomènes thermo-électriques.

### 6.2.1 L'effet Peltier



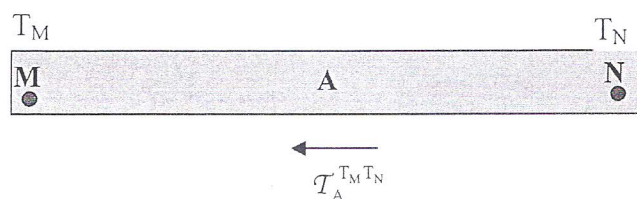
A la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température  $T$ , s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température, c'est la f.e.m de Peltier :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$

**Loi de Volta :** dans un circuit isotherme constitué de conducteurs différents, la somme des f.e.m de Peltier est nulle. On a donc :

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T$$

### 6.2.2 L'effet Thomson

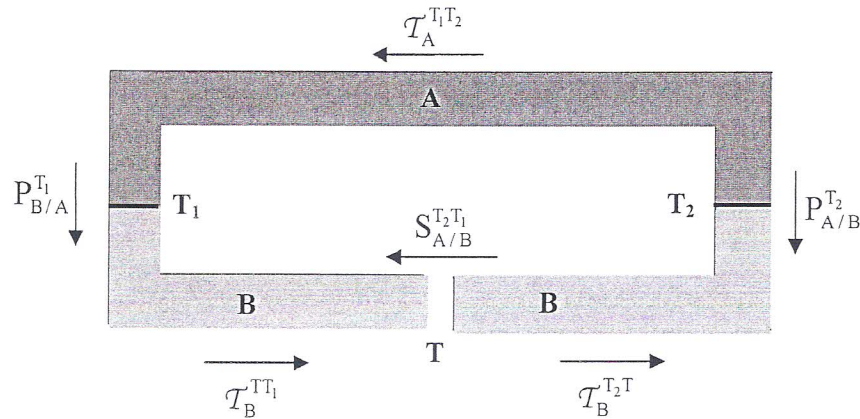


Entre deux points M et N de températures différentes  $T_M$  et  $T_N$  qui se trouvent à l'intérieur d'un conducteur A homogène, s'établit une force électromotrice, qui ne dépend que de la nature du conducteur et des températures  $T_M$  et  $T_N$ , c'est la f.e.m de Thomson :

$$\mathcal{E}_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} h_A dT$$

avec  $h_A$  le coefficient de Thomson du conducteur qui dépend de la température.

### 6.2.3 L'effet Seebeck

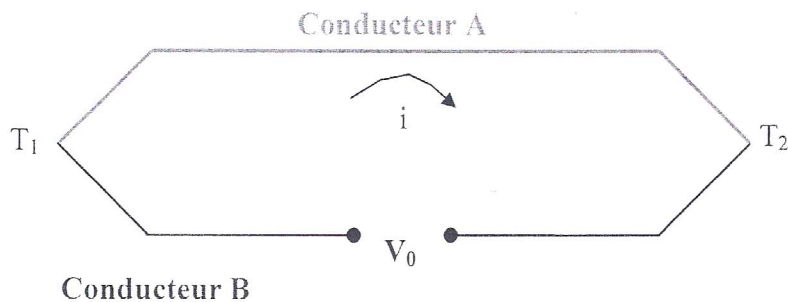


On considère le circuit électrique fermé ci-dessus, constitué des deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures  $T_1$  et  $T_2$ . Ce circuit constitue un couple thermoélectrique et est le siège d'une f.e.m dite de Seebeck  $S_{A/B}^{T_2 T_1}$  qui résulte des effets de Peltier et de Thomson qui s'y produisent :

$$S_{A/B}^{T_2 T_1} = (\mathcal{E}_B^{T_2 T_1} - \mathcal{E}_A^{T_2 T_1}) + (P_{A/B}^{T_2} - P_{A/B}^{T_1})$$

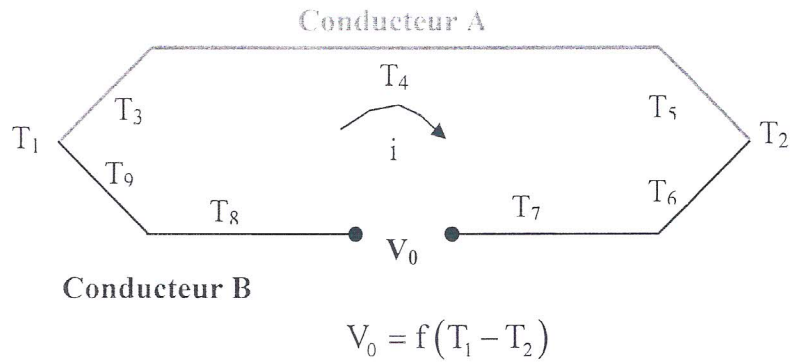
## 6.3 PRINCIPES PRATIQUES D'UTILISATION DES THERMOCOUPLES

1- Un thermocouple doit contenir au moins 2 matériaux et 2 jonctions



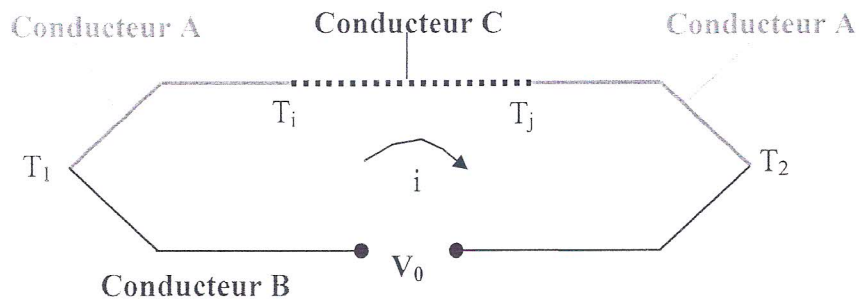
La différence de potentiel  $V_0$  est une fonction non linéaire de la différence de températures  $(T_1 - T_2)$  des deux jonctions.

2-  $V_0$  dépend uniquement de la nature des conducteurs A et B et de la différence de température  $(T_1 - T_2)$  des jonctions.



### 3- Loi des métaux intermédiaires :

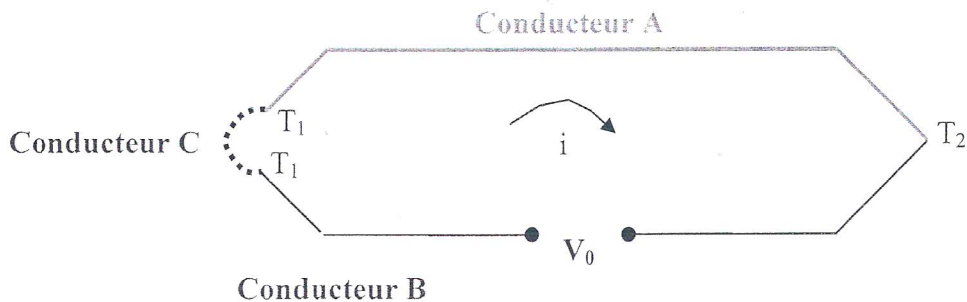
Quand on introduit un 3<sup>ème</sup> conducteur dans le circuit comprenant le couple A/B, la f.e.m ne change pas à condition que les extrémités du conducteur ajouté soient à la même température.



Les effets du conducteur introduit dans le circuit sont éliminés si  $T_i = T_j$ .

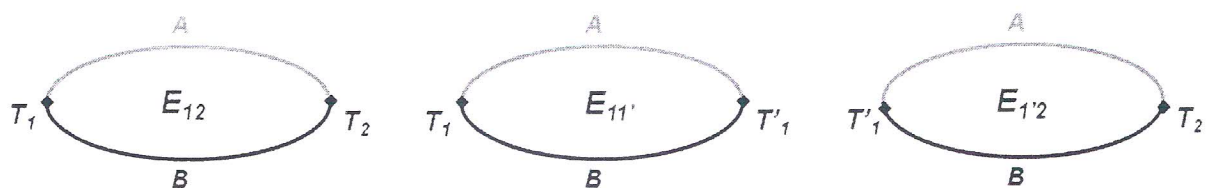
Ceci est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la même température.

### 4- L'insertion d'un conducteur dans une jonction n'affecte pas $V_0$ si ses deux extrémités sont maintenues à la température de la jonction.



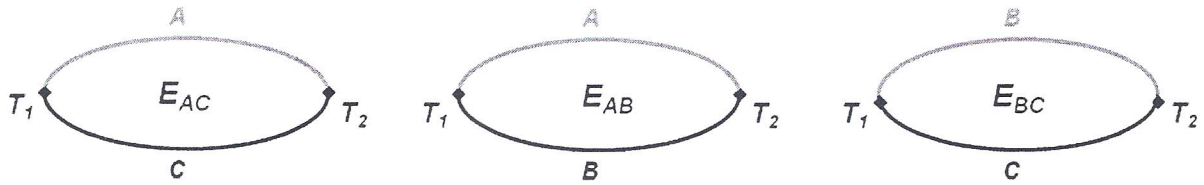
Ceci est valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à la température de la jonction.

### 5- Loi des températures successives :



On a donc  $E_{12} = E_{11'} + E_{1'2}$

### 6- Loi des métaux successifs :

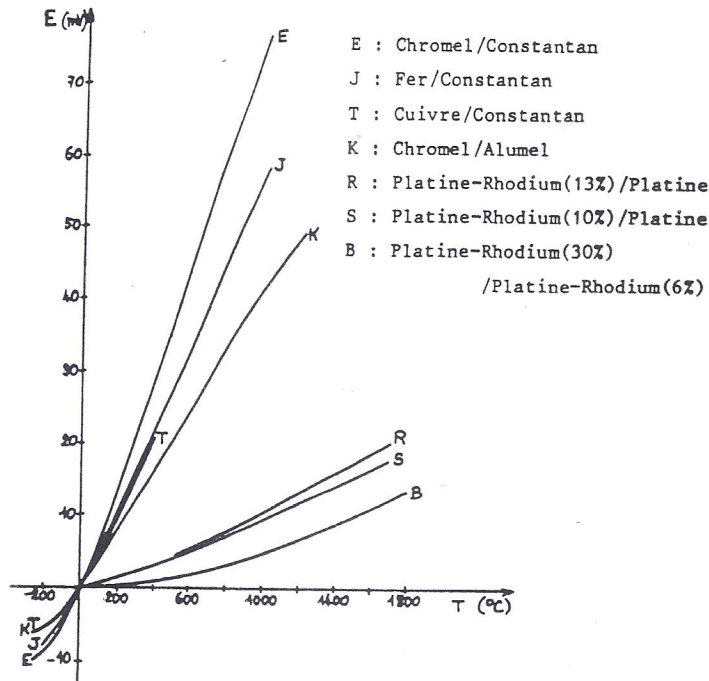


On a également  $E_{AC} = E_{AB} + E_{BC}$

Sur le plan pratique, si B est un métal de référence (Pb ou Pt) pour lequel il existe différentes tables de thermocouples correspondant à son association avec divers autres conducteurs. La connaissance à partir de ces tables des f.e.m de Seebeck délivrées pour son association avec des conducteurs A et C nous permettra d'en déduire la f.e.m délivrée par le thermocouple A/C dont la table de thermocouple peut ne pas être disponible.

### 6.4 SENSIBILITE THERMIQUE D'UN THERMOCOUPLE

La f.e.m délivrée par un thermocouple est, sur de grands intervalles de température, une fonction non linéaire de cette dernière. A titre d'exemple, la figure ci-dessous présente la variation de la f.e.m en fonction de la température, pour différents types de thermocouples d'un usage courant. On considère cependant que cette variation est linéaire sur un intervalle restreint de température, dont la taille dépend de la précision recherchée.



La relation qui lie la f.e.m  $E$  (en  $\mu V$ ) d'un thermocouple à la température  $T$  (en  $^{\circ}C$ ) est une équation polynomiale de la forme :

$$E = \sum_{i=1}^n a_i T^i$$

avec :

- n l'ordre maximal du polynôme (généralement inférieur à 9)
- $a_i$  des coefficients propres au thermocouple considéré.

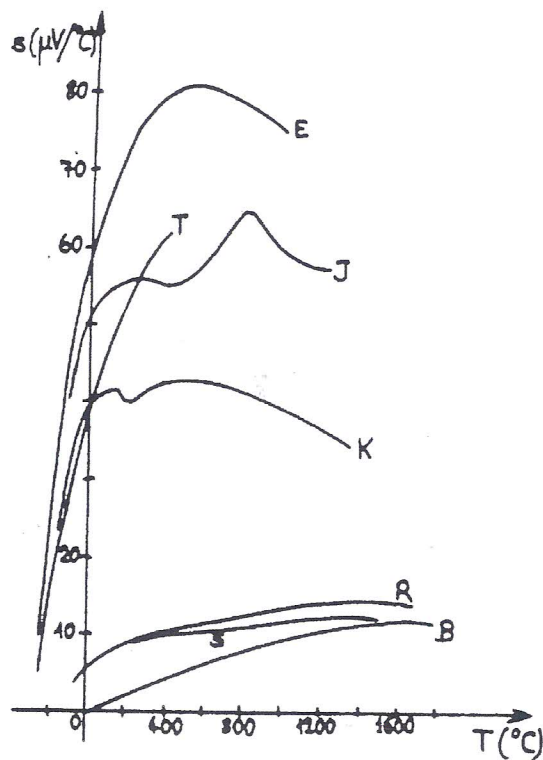
Par exemple, pour le thermocouple type B (Platine-30% Rhodium / Platine-6% Rhodium),  $n=8$  et les coefficients  $a_i$  sont les suivants :

$$\begin{array}{lll} a_0 = 0 & a_1 = -2.4674601620 \cdot 10^{-1} & a_2 = 5.9102111169 \cdot 10^{-3} \\ a_3 = -1.4307123430 \cdot 10^{-6} & a_4 = 2.1509149750 \cdot 10^{-9} & a_5 = -3.175800720 \cdot 10^{-12} \\ a_6 = 2.4010367459 \cdot 10^{-15} & a_7 = -9.0928148159 \cdot 10^{-19} & a_8 = 1.3299505137 \cdot 10^{-22} \end{array}$$

La sensibilité thermique  $S$  (en  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) d'un thermocouple, appelée également pouvoir thermoélectrique, est définie à une température  $T$  (pour  $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$ ) par :

$$S(T) = \frac{dS_{A/B}^{T \ 0^\circ\text{C}}}{dT}$$

La figure ci-dessous présente la variation de la sensibilité thermique en fonction de la température, pour les différents thermocouples précédents.



Par exemple, pour le thermocouple type J (Fer/Constantan)  $S(0^\circ\text{C}) = 52.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  et  $S(700^\circ\text{C}) = 63.8 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , tandis que pour le thermocouple type S (Platine-10%Rhodium / Platine)  $S(0^\circ\text{C}) = 6.4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  et  $S(700^\circ\text{C}) = 11.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

L'ordre de grandeur des sensibilités des thermocouples est très inférieur à celui des capteurs de température utilisant des résistances.

## 6.5 PRINCIPAUX TYPES DE THERMOCOUPLES ET LIMITES D'EMPLOI

Thermocouples	Gamme de Températures	f.e.m (mV)	Précision
Cuivre / Constantan <b>Type T</b> (diamètre 1.63 mm)	-270 à 370°C	-6.258 19.027	à ± 2% de -100°C à -40°C ± 0.8% de -40°C à 100°C ± 0.75% de 100°C à 350°C
Fer / Constantan <b>Type J</b> (diamètre 3.25 mm)	-210 à 800°C	-8.096 45.498	à ± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 800°C
Chromel / Alumel <b>Type K</b> (diamètre 3.25 mm)	-270 à 1250°C	-5.354 50.633	à ± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Chromel / Constantan <b>Type E</b> (diamètre 3.25 mm)	-270 à 870°C	-9.835 66.473	à ± 3°C de 0°C à 400°C ± 0.75% de 400°C à 1250°C
Platine-Rhodium (10%) / Platine <b>Type S</b> (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.236 15.576	à ± 2.5°C de 0°C à 600°C ± 0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (13%) / Platine <b>Type R</b> (diamètre 0.51 mm)	-50 à 1500°C	-0.226 17.445	à ± 1.4°C de 0°C à 538°C ± 0.25% de 538°C à 1500°C
Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%) <b>Type B</b> (diamètre 0.51 mm)	0 à 2760°C	0 à 12.426	± 0.5% de 870°C à 1700°C

## 6.7 COMPARAISON THERMOCOUPLE/THERMOMETRES ELECTRIQUES

	THERMOCOUPLE	RTD	THERMISTANCE
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ simple</li> <li>✓ robuste</li> <li>✓ peu coûteux</li> <li>✓ mesures ponctuelles</li> <li>✓ rapide</li> <li>✓ gamme de températures large</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ très stable</li> <li>✓ très précis</li> <li>✓ meilleure linéarité que le thermocouple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ très sensible</li> <li>✓ faible encombrement</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ non linéaire</li> <li>✓ stabilité faible</li> <li>✓ sensibilité faible</li> <li>✓ nécessite une température de référence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ coûteux</li> <li>✓ lent</li> <li>✓ sensibilité faible</li> <li>✓ erreurs par auto-échauffement (effet Joule)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ non linéaire</li> <li>✓ gamme réduite de températures</li> <li>✓ stabilité faible</li> <li>✓ fragile</li> <li>✓ auto-échauffement</li> </ul>

THERMOCOUPLE TYPE R

PLATINE - 13% RHODIUM / PLATINE

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 0	0	- 51	- 100	- 145	- 188	- 226					
+ 0	0	54	111	171	232	296	363	431	501	573	647
100	647	723	800	879	959	1041	1124	1208	1294	1380	1468
200	1468	1557	1647	1738	1830	1923	2017	2111	2207	2303	2400
300	2400	2498	2596	2695	2795	2896	2997	3099	3201	3304	3407
400	3407	3511	3616	3721	3826	3933	4039	4146	4254	4362	4471
500	4471	4580	4689	4799	4910	5021	5132	5244	5356	5469	5582
600	5582	5696	5810	5925	6040	6155	6272	6388	6505	6623	6741
700	6741	6860	6979	7098	7218	7339	7460	7582	7703	7826	7949
800	7949	8072	8196	8320	8445	8570	8696	8822	8949	9076	9203
900	9203	9331	9460	9589	9718	9848	9978	10109	10240	10371	10503
1000	10503	10636	10768	10902	11035	11170	11304	11439	11574	11710	11846
1100	11846	11983	12119	12257	12394	12532	12669	12808	12946	13085	13224
1200	13224	13363	13502	13642	13782	13922	14062	14202	14343	14483	14624
1300	14624	14765	14906	15047	15188	15329	15470	15611	15752	15893	16035
1400	16035	16176	16317	16458	16599	16741	16882	17022	17163	17304	17445
1500	17445	17585	17726	17866	18006	18146	18286	18425	18564	18703	18842
1600	18842	18981	19119	19257	19395	19533	19670	19807	19944	20080	20215
1700	20215	20350	20483	20616	20748	20878	21006				

THERMOCOUPLE TYPE S

PLATINE - 10% RHODIUM / PLATINE

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 0	0	- 53	- 103	- 150	- 194	- 236					
+ 0	0	55	113	173	235	299	365	432	502	573	645
100	645	719	795	872	950	1029	1109	1190	1273	1356	1440
200	1440	1525	1611	1698	1785	1873	1962	2051	2141	2232	2323
300	2323	2414	2506	2599	2692	2786	2880	2974	3069	3164	3260
400	3260	3356	3452	3549	3645	3743	3840	3938	4036	4135	4234
500	4234	4333	4432	4532	4632	4732	4832	4933	5034	5136	5237
600	5237	5339	5442	5544	5648	5751	5855	5960	6064	6169	6274
700	6274	6380	6486	6592	6699	6805	6913	7020	7128	7236	7345
800	7345	7454	7563	7672	7782	7892	8003	8114	8225	8336	8448
900	8448	8560	8673	8786	8899	9012	9126	9240	9355	9470	9585
1000	9585	9700	9816	9932	10048	10165	10282	10400	10517	10635	10754
1100	10754	10872	10991	11110	11229	11348	11467	11587	11707	11827	11947
1200	11947	12067	12188	12308	12429	12550	12671	12792	12913	13034	13155
1300	13155	13276	13397	13519	13640	13761	13883	14004	14125	14247	14368
1400	14368	14489	14610	14731	14852	14973	15094	15215	15336	15456	15576
1500	15576	15697	15817	15937	16057	16176	16296	16415	16534	16653	16771
1600	16771	16890	17008	17125	17243	17360	17477	17594	17711	17826	17942
1700	17942	18056	18170	18282	18394	18504	18612				

THERMOCOUPLE TYPE B

PLATINE - 30% RHODIUM / PLATINE - 6% RHODIUM

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	- 2	- 3	- 2	0	2	6	11	17	25	33
100	33	43	53	65	78	92	107	123	140	159	178
200	178	199	220	243	266	291	317	344	372	401	431
300	431	462	494	527	561	596	632	669	707	746	786
400	786	827	870	913	957	1002	1048	1095	1143	1192	1241
500	1241	1292	1344	1397	1450	1505	1560	1617	1674	1732	1791
600	1791	1851	1912	1974	2036	2100	2164	2230	2296	2363	2430
700	2430	2499	2569	2639	2710	2782	2855	2928	3003	3078	3154
800	3154	3231	3308	3387	3466	3546	3626	3708	3790	3873	3957
900	3957	4041	4126	4212	4298	4386	4474	4562	4652	4742	4833
1000	4833	4924	5016	5109	5202	5297	5391	5487	5583	5680	5777
1100	5777	5875	5973	6073	6172	6273	6374	6475	6577	6680	6783
1200	6783	6887	6991	7096	7202	7308	7414	7521	7628	7736	7845
1300	7845	7953	8063	8172	8283	8393	8504	8616	8727	8839	8952
1400	8952	9065	9178	9291	9405	9519	9634	9748	9863	9979	10094
1500	10094	10210	10325	10441	10558	10674	10790	10907	11024	11141	11257
1600	11257	11374	11491	11608	11725	11842	11959	12076	12193	12310	12426
1700	12426	12543	12659	12776	12892	13008	13124	13239	13354	13470	13585
1800	13585	13699	13814								

THERMOCOUPLE TYPE J

FER / CUIVRE-NICKEL

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-7890	-8096									
- 100	-4632	-5036	-5426	-5801	-6159	-6499	-6821	-7122	-7402	-7659	-7890
- 0	0	- 501	- 995	-1481	-1960	-2431	-2892	-3344	-3785	-4215	-4632
+ 0	0	507	1019	1536	2058	2585	3115	3649	4186	4725	5268
100	5268	5812	6359	6907	7457	8008	8560	9113	9667	10222	10777
200	10777	11332	11887	12442	12998	13553	14108	14663	15217	15771	16325
300	16325	16879	17432	17984	18537	19089	19640	20192	20743	21295	21846
400	21846	22397	22949	23501	24054	24607	25161	25716	26272	26829	27388
500	27388	27949	28511	29075	29642	30210	30782	31356	31933	32513	33096
600	33096	33683	34273	34867	35464	36066	36671	37280	37893	38510	39130
700	39130	39754	40382	41013	41647	42283	42922	43563	44207	44852	45498
800	45498	46144	46790	47434	48076	48716	49354	49989	50621	51249	51875
900	51875	52496	53115	53729	54341	54948	55553	56155	56753	57349	57942
1000	57942	58533	59121	59708	60293	60876	61459	62039	62619	63199	63777
1100	63777	64355	64933	65510	66087	66664	67240	67815	68390	68964	69536
1200	69536										



THERMOCOUPLE TYPE T

CUIVRE / CUIVRE-NICKEL

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E. I. P. T. 1968) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-5603	-5753	-5889	-6007	-6105	-6181	-6232	-6258	-5261	-5439	-5603
- 100	-3378	-3656	-3923	-4177	-4419	-4648	-4865	-5069	-2788	-3089	-3378
- 0	0	- 383	- 757	-1121	-1475	-1819	-2152	-2475			
+ 0	0	391	789	1196	1611	2035	2467	2908	3357	3813	4277
100	4277	4749	5227	5712	6204	6702	7207	7718	8235	8757	9286
200	9286	9820	10360	10905	11456	12011	12572	13137	13707	14281	14860
300	14860	15443	16030	16621	17217	17816	18420	19027	19638	20252	20869
400	20869										

THERMOCOUPLE TYPE E

NICKEL-CHROME / CUIVRE-NICKEL

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E.I.P.T.) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-8824	-9063	-9274	-9455	-9604	-9719	-9797	-9835	-8273	-8561	-8824
- 100	-5237	-5680	-6107	-6516	-6907	-7279	-7631	-7963	-4301	-4777	-5237
- 0	0	- 581	-1151	-1709	-2254	-2787	-3306	-3811			
+ 0	0	591	1192	1801	2419	3047	3683	4329	4983	5646	6317
100	6317	6996	7683	8377	9078	9787	10501	11222	11949	12681	13419
200	13419	14161	14909	15661	16417	17178	17942	18710	19481	20256	21033
300	21033	21814	22597	23383	24171	24961	25754	26549	27345	28143	28943
400	28943	29744	30546	31350	32155	32960	33767	34574	35382	36290	36999
500	36999	37808	38617	39426	40236	41045	41853	42662	43470	44278	45085
600	45085	45891	46697	47502	48306	49109	49911	50713	51513	52312	53110
700	53110	53907	54703	55498	56291	57083	57873	58663	59451	60237	61022
800	61022	61806	62588	63368	64147	64924	65700	66473	67245	68015	68783
900	68783	69549	70313	71075	72835	72593	73350	74104	74857	75608	76358
1000	76358										

THERMOCOUPLE TYPE K

NICKEL-CHROME / NICKEL-ALUMINIUM

Force électromotrice en  $\mu\text{V}$ . Température en  $^{\circ}\text{C}$  (E.I.P.T. 1968) Jonction de référence à  $0^{\circ}\text{C}$

d'après la Norme NF C 42-321

$^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
- 200	-5891	-6035	-6158	-6262	-6344	-6404	-6441	-6458	-5550	-5730	-5891
- 100	-3553	-3852	-4138	-4410	-4669	-4912	-5141	-5354	-2920	-3242	-3553
- 0	0	- 392	- 777	-1156	-1527	-1889	-2243	-2586			
+ 0	0	397	798	1203	1611	2022	2436	2850	3266	3681	4095
100	4095	4508	4919	5327	5733	6137	6539	6939	7338	7737	8137
200	8137	8537	8938	9341	9745	10151	10560	10969	11381	11793	12207
300	12207	12623	13039	13456	13874	14292	14712	15132	15552	15974	16395
400	16395	16818	17241	17664	18088	18513	18938	19363	19788	20214	20640
500	20640	21066	21493	21919	22346	22772	23198	23624	24050	24476	24902
600	24902	25327	25751	26176	26599	27022	27445	27867	28288	28709	29128
700	29128	29547	29965	30383	30799	31214	31629	32042	32455	32866	33277
800	33277	33686	34095	34502	34909	35314	35718	36121	36524	36925	37325
900	37325	37724	38122	38519	38915	39310	39703	40096	40488	40879	41269
1000	41269	41657	42045	42432	42817	43202	43585	43968	44349	44729	45108
1100	45108	45486	45863	46238	46612	46985	47356	47726	48095	48462	48828
1200	48828	49192	49555	49916	50276	50633	50990	51344	51697	52049	52398
1300	52398	52747	53093	53439	53782	54125	54466	54807			