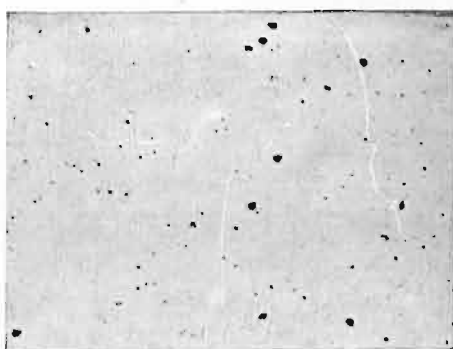


## SUR LA TREMPE DU FER CONTENANT DE L'OXYDULE DE FER

par MM. W. Broniewski et S. Mazgis

(Présentée à la séance de la Section Technologique de l'Académie des Sciences Techniques à Varsovie, le 11 mai 1938)

Le fer Armco contient les éléments ordinaires des aciers (*C, Mn, Si, P, S*) dans des proportions dont la somme ne dépasse pas 0,1 pour 100. Il contient en plus, comme impureté, une quantité, au moins égale, d'oxydes de fer, sous la forme d'oxydure,  $FeO$ , au-dessus de  $570^{\circ}$  et comme oxyde salin  $Fe_3O_4$ , à la température ordinaire (Chaudron, 1921). Ces oxydes apparaissent nettement sur les échantillons apprêtés pour la micrographie, avant l'attaque, sous l'aspect de cristallites gris, aux faces arrondies (fig. 1).



Recuit



Trempé à  $1450^{\circ}$

Fig. 1. Fer Armco après polissage. Cristallites d'oxydes de fer foncés sur fond clair de ferrite. A gauche, après recuit, à droite après trempé à  $1450^{\circ}$ .  $Gr = 200$ .

Il apparaît probable, que la proportion d'oxygène, contenue dans les oxydes dissous dans le fer à la température ordinaire, est inférieure à  $0,05\%$  <sup>1)</sup>.

La solubilité des oxydes n'est probablement pas la même pour les différentes modifications allotropiques du fer, mais les nombres expérimentaux diffèrent, à ce sujet, très sensiblement <sup>2)</sup>, de sorte qu'aucune conclusion ne peut être tirée même sur l'ordre de grandeur des solubilités en question.

Il nous avait paru intéressant de contribuer indirectement à l'étude de ce problème par la mise en solution dans le fer de ses oxydes à différentes températures et un saisonnement à la température ordinaire.

En fonction de ce traitement, ont été mesurées les propriétés mécaniques, la résistance électrique et la force électromotrice de dissolution.

<sup>1)</sup> Esser u. Cornelius, Stahl u. Eisen, 53 (1933) p. 534.

<sup>2)</sup> Voir particulièrement Benedicks et Löfquist, Non metallic inclusions in iron and steel, New York, 1931 p. 47; et Hansen, Der Aufbau der Zweistofflegierungen, Berlin, 1936 p. 703.

*Traitement et mesures.* Le fer Armco employé était d'origine française et avait la composition suivante:

	C	Si	Mn	P	S	Al	Somme
%	0,014	0,006	0,027	0,009	0,021	0,007	0,084

Les échantillons de ce fer manifestaient des inclusions d'oxydes (fig. 1) qu'on ne parvenait pas à faire disparaître, même par la trempe à 1450°. A mesure qu'on élevait la température de trempe, les inclusions d'oxydes subissaient seulement une agglomération et apparaissaient moins nombreuses mais plus volumineuses. Les oxydes étaient donc toujours en excès et leur mise en solution ne dépendait que des conditions de trempe.

Les échantillons avaient 5 mm de diamètre, 140 mm de longueur et subissaient le traitement thermique suivant.

*Recuit.* Échauffement de 30 min. à 800° suivi d'un refroidissement au four en 5 heures environs, jusqu'à la température ordinaire.

*Trempe* à l'eau de 20°. après un échauffement de 1 heure à des températures variables de 500° à 1450°. Jusqu'à 1000° l'échauffement se faisait au four à résistance électrique de nichrome, au-dessus de cette température au four de Tamman à tube de charbon comme résistance.

*Saisonnement* jusqu'à 42 jours à la température ordinaire, voisine de 18°, après trempe à différentes températures.

### Propriétés mécaniques.

Les paramètres suivants ont été établis:

$R$  — résistance à la traction en kg. par mm<sup>2</sup> sur fils de 5 mm de diamètre.

$Q$  — limite élastique, mesurée sur la courbe de traction enregistrée, donc admise égale à la limite de proportionnalité.

$A\%$  — allongement total à la rupture, mesuré sur éprouvette internationale, dont la distance entre les repères est  $n = 10$  fois son diamètre, soit 50 mm.

$a\%$  — allongement uniforme, calculé en mesurant le diamètre  $d_0$  de l'éprouvette avant l'essai et le diamètre  $d_1$  après rupture, au voisinage des repères.

On trouve alors

$$a\% = \left( \frac{d_0^2}{d_1^2} - 1 \right) 100$$

$b\%$  — allongement de striction, établi par la différence  $b\% = A\% - a\%$ .

$C\%$  — la striction, calculée en mesurant le diamètre de l'éprouvette avant l'essai ( $d_0$ ) et à l'endroit de la rupture ( $d_2$ ). On avait alors

$$C\% = \left( 1 - \frac{d_2^2}{d_0^2} \right) 100$$

$T$  — travail de rupture à la traction par cm<sup>3</sup> de l'éprouvette exprimé en kgm. Ce facteur peut être calculé<sup>1)</sup> très approximativement par la formule

$$T = 0.0025 (3R + Q) A\%$$

$M = \frac{R - Q}{Q}$ , coefficient pouvant donner des indications sur la malléabilité qui commence lorsque la valeur de  $Q$  se trouve dépassée et ne se poursuit que dans l'intervalle ( $R - Q$ ).

$K = \frac{R}{H}$ , coefficient de Brinell.

<sup>1)</sup> Broniewski, Przegląd Techniczny, 77 (1938) p. 148. Revue de Métall. 35 (1938) p. 333

TABLEAU I.

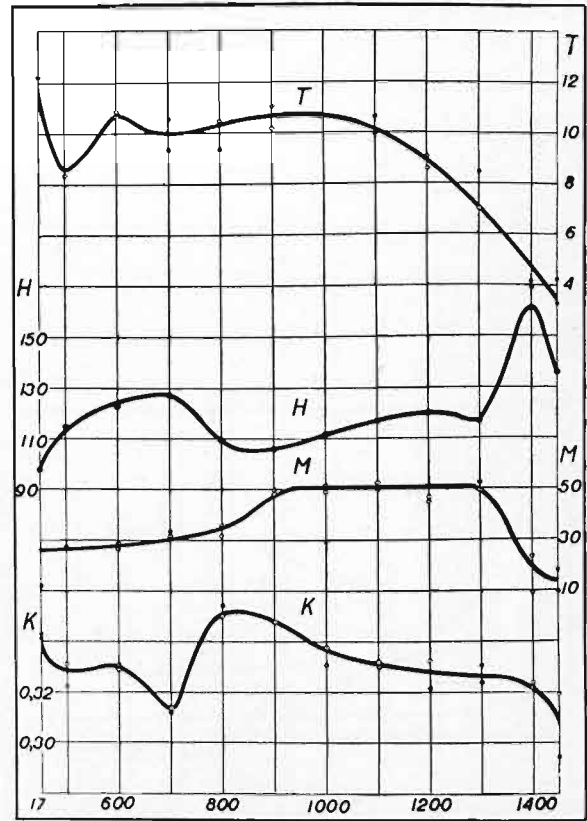
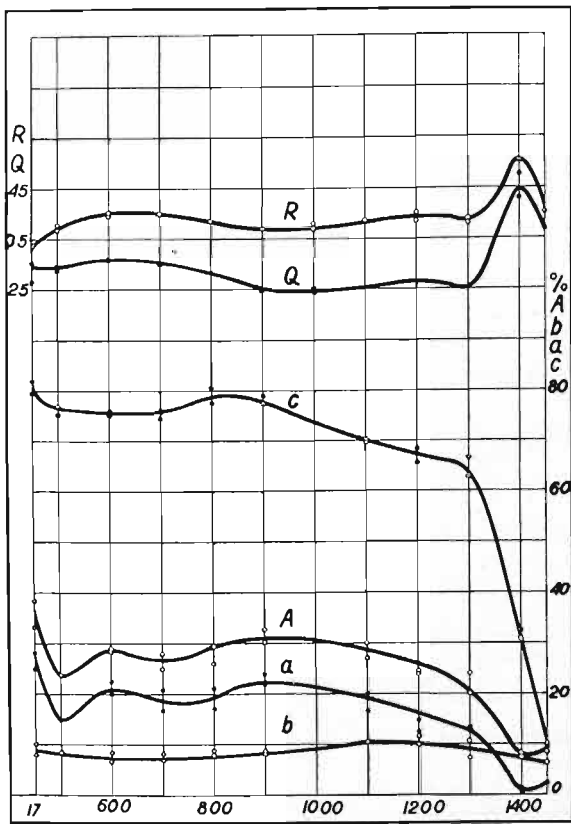
Propriétés mécaniques du fer oxydulé après trempe à 700°, 900°, 1000° et 1100° suivie d'un saisonnement.

Température de trempe	Saisonnement en jours	R	A %	a %	b %	c %	Q	H	K	M. 10 <sup>2</sup>	T
700°	0	39,8 40,0	25,0 28,0	16,8 21,0	8,2 7,0	75,8 74,7	29,7 30,5	128	0,512 0,515	33,9 52,2	9,3 10,5
	1	40,6 40,8	26,4 27,5	16,0 18,8	10,4 8,5	75,7 73,8	31,7 31,7	125	0,550 0,552	28,1 28,8	10,1 10,6
	5	39,6 41,1	26,8 26,0	18,0 16,8	8,8 9,2	76,4 74,0	30,7 31,4	127	0,515 0,524	28,9 30,7	10,0 10,1
	7	45,9 40,9	26,5 18,2	17,5 18,1	8,8	75,2 75,4	34,2 32,5	155	0,525 0,505	28,1 26,6	10,9 7,1
	14	45,0 42,6	25,5 21,4	14,1 12,0	9,4 9,4	71,7 72,8	34,3 35,3	154	0,521 0,518	25,5 27,9	9,6 8,6
	28	45,0 42,5	20,4 25,5	9,8 15,8	10,6 9,7	75,5 74,5	35,4 34,5	152	0,525 0,520	21,2 25,2	8,4 10,3
	42	42,1 42,8	21,1 24,0	12,6 15,6	8,5 10,4	74,0 74,2	35,7 36,7	158	0,505 0,510	17,9 16,6	8,6 9,9
900°	0	56,8 56,9	50,0 52,6	22,0 24,0	8,0 8,6	77,4 78,9	24,9 24,6	106	0,547 0,548	48,1 49,9	10,2 11,0
	1	57,2 56,8	29,8 52,1	15,5 15,8	14,7 18,8	76,5 78,7	24,2 24,0	115	0,529 0,526	49,5 49,6	10,2 11,0
	5	57,8 57,1	27,8 50,3	16,7 19,9	11,1 10,4	76,5 77,1	26,4 26,1	112	0,557 0,550	43,2 42,1	9,7 10,4
	7	57,9 57,1	29,2 28,4	16,8 18,0	12,4 10,4	76,5 76,7	27,5 26,8	115	0,554 0,527	38,8 58,6	10,5 9,8
	14	57,5 57,7	28,2 27,7	18,1 15,2	10,1 12,5	77,1 79,5	26,6 27,1	117	0,520 0,524	40,4 39,5	9,8 9,7
	28	57,7 58,6	25,7 25,5	15,5 17,7	8,2 7,8	75,6 76,5	28,0 29,9	150	0,289 0,297	54,4 29,0	8,4 9,3
	42	40,2 59,1	24,9 25,5	15,8 15,0	9,1 8,5	77,4 76,5	31,7 31,2	109	0,568 0,559	26,8 25,5	9,5 8,6
1000°	0	57,8 57,1	25,2 24,8	17,0 16,6	8,2 8,2	72,5 68,0	25,4 24,5	112	0,538 0,551	49,0 51,4	8,7 8,4
	1	57,5 57,8	22,4 22,0	12,5 14,6	9,9 7,4	75,1 68,6	26,0 26,1	151	0,285 0,289	45,6 45,0	7,7 7,7
	5	40,7 58,7	25,2 25,1	15,0 14,5	8,2 8,8	68,5 75,4	28,0 27,1	155	0,501 0,286	45,4 42,8	8,7 8,5
	7	58,0 40,0	22,6 19,6	12,7 9,5	9,9 10,5	75,8 68,2	25,9 28,5	158	0,276 0,291	46,7 41,5	7,9 7,5
	14	58,5 59,0	22,2 24,5	12,8 13,8	9,8 10,7	76,7 76,6	26,7 24,7	157	0,281 0,285	44,2 57,9	8,0 8,7
	28	58,4 40,0	25,2 25,9	15,5 14,9	9,9 9,0	69,7 72,2	25,2 27,1	142	0,270 0,282	52,4 47,6	8,1 8,8
	42	42,7 40,5	21,5 21,8	12,5 12,7	9,0 9,1	68,5 68,4	29,4 28,1	140	0,505 0,290	45,2 44,1	8,4 8,1
1100°	0	58,6 58,8	50,1 27,0	20,2 16,6	9,9 10,4	70,0 70,4	25,2 26,0	117	0,550 0,552	52,8 49,6	10,6 9,9
	1	58,7 59,1	26,5 24,9	15,8 15,8	10,5 11,1	65,9 61,4	25,0 25,4	126	0,507 0,511	55,1 54,1	9,5 8,9
	5	40,4 59,2	25,1 25,9	14,4 15,2	8,7 10,7	71,6 71,5	27,5 26,5	127	0,517 0,508	46,6 47,9	8,6 8,6
	7	58,9 59,9	18,8 19,4	8,2 9,5	10,6 9,9	67,0 56,2	28,7 28,8	127	0,506 0,514	55,3 38,5	6,8 7,2
	14	58,9 41,2	24,1 22,7	16,6 14,5	7,5 8,2	67,8 66,5	24,9 31,5	129	0,501 0,519	56,2 30,8	8,5 8,8
	28	41,4 42,5	16,9 16,9	8,5 9,0	8,4 7,9	66,2 60,8	34,5 35,0	119	0,546 0,554	20,0 28,2	6,7 6,7
	42	59,5 41,5	18,7 16,7	10,1 8,0	8,6 8,7	68,0 69,0	29,0 34,8	126	0,512 0,530	55,5 19,5	6,8 6,6

T A B L E A U II.

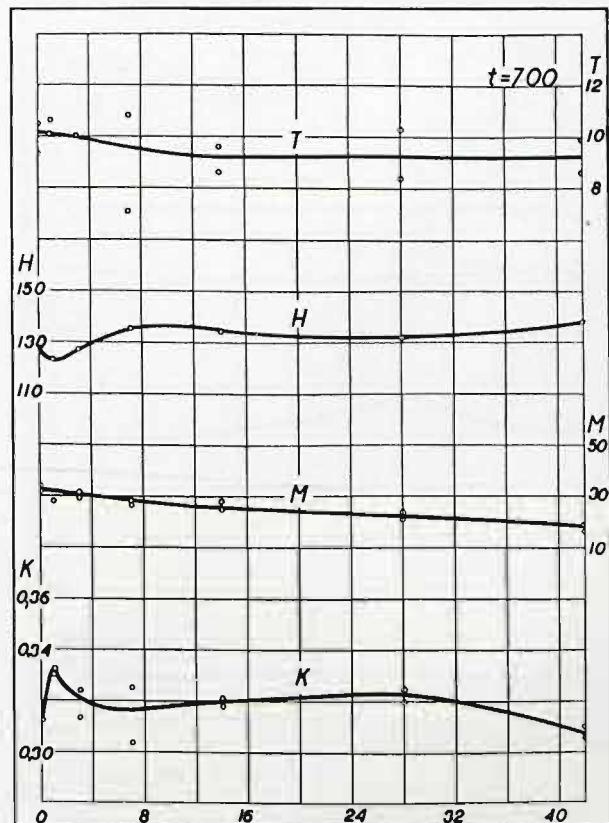
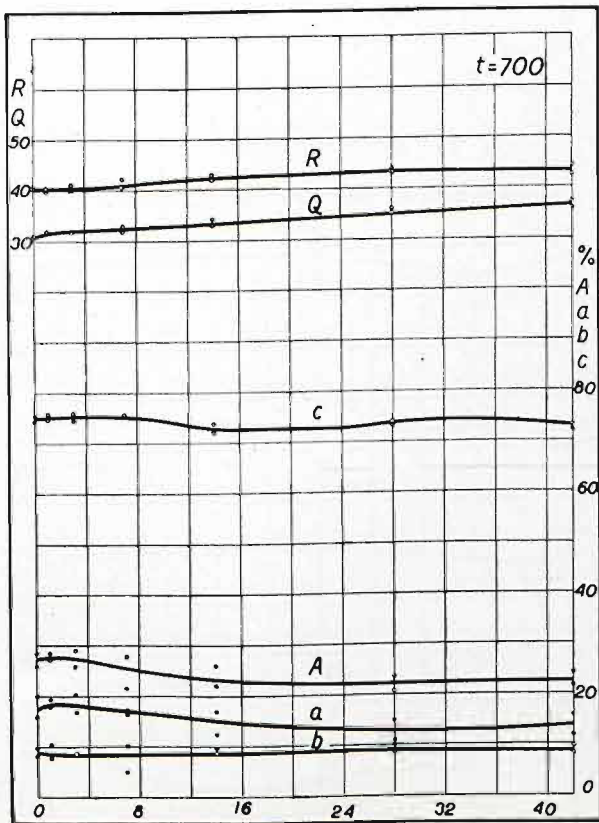
Propriétés mécaniques du fer oxydulé après trempe à 1200°, 1300°, 1400° et 1450° suivie d'un saisonnement.

Température de trempe	Saisonnement en jours	R	A %	a %	b %	c %	Q	H	K	M . 10 <sup>2</sup>	T
1200°	0	39,9 38,6	24,5 24,0	14,6 12,3	9,9 11,7	65,5 68,3	27,1 26,6	120	0,333 0,322	46,9 45,2	9,0 8,5
	1	39,9 40,0	20,4 19,1	13,5 9,6	6,9 9,5	62,5 59,4	26,8 27,2	114	0,350 0,351	48,9 47,0	7,5 7,0
	3	40,0 38,3	19,4 20,6	10,5 12,1	9,1 8,5	64,1 65,3	27,8 26,9	112	0,358 0,342	44,1 42,4	7,2 7,3
	7	40,4 40,1	20,7 20,1	11,7 12,4	9,0 7,7	61,4 60,9	28,6 28,2	115	0,352 0,350	41,2 42,4	7,8 7,5
	14	40,9 40,2	18,7 20,5	9,5 12,2	9,2 8,3	58,3 57,9	29,5 29,0	133	0,307 0,301	38,6 38,6	7,1 7,7
	28	41,5 39,8	18,8 13,8	11,1 5,0	7,7 8,8	60,2 59,9	30,3 31,1	105	0,396 0,380	36,9 28,0	7,3 5,2
	42	40,9 41,2	15,9 14,6	7,9 5,9	8,0 8,7	69,0 63,0	31,8 32,5	111	0,368 0,371	28,6 26,8	6,2 5,7
1300°	0	37,9 38,7	20,3 23,7	12,7 15,0	7,6 8,7	62,8 66,6	25,4 25,3	118	0,320 0,327	48,9 52,9	7,1 8,4
	1	40,7 38,0	13,3 21,3	5,5 12,5	7,7 8,8	45,8 66,9	27,7 25,1	123	0,330 0,304	46,9 51,4	5,0 7,4
	3	34,6 59,3	20,4 13,6	12,4 6,1	8,0 7,5	42,0 55,3	22,2 26,4	142	0,244 0,277	55,9 48,8	6,4 4,9
	7	39,1 39,7	15,3 14,4	6,3 5,5	9,0 9,1	60,5 57,5	27,1 28,2	134	0,291 0,296	44,3 40,8	5,5 6,8
	14	40,4 39,2	12,8 12,6	3,5 4,0	9,5 8,6	13,5 12,6	33,3 29,2	147	0,274 0,266	21,1 34,4	5,0 4,6
	28	40,0 39,5	13,2 15,3	5,9 4,8	7,5 10,5	47,9 59,8	32,5 25,4	151	0,265 0,261	23,1 55,5	5,0 5,5
	42	37,2 38,3	12,5 14,4	5,3 5,9	7,2 8,5	51,6 62,2	28,0 28,5	168	0,221 0,228	32,9 34,4	4,4 5,2
1400°	0	52,1 52,0	8,2 7,8	2,0 0,9	6,2 6,9	32,4 30,8	47,8 43,2	161	0,324 0,323	9,1 20,4	4,2 3,9
	1	35,7 40,7	21,1 12,3	12,1 4,7	9,0 7,6	51,1 46,7	24,8 33,8	191	0,187 0,213	44,0 20,4	7,0 4,8
	3	38,3 38,6	9,0 13,9	1,7 4,0	7,3 9,9	59,0 56,0	30,1 30,4	178	0,215 0,217	27,4 27,1	3,3 5,1
	7	37,4 36,8	17,2 17,9	9,7 10,0	7,5 7,9	59,5 64,6	28,7 27,5	173	0,216 0,213	30,1 33,8	6,1 6,2
	14	37,3 37,1	16,4 18,5	8,2 8,0	8,2 10,5	60,8 57,9	28,6 27,9	174	0,215 0,213	30,4 33,0	5,8 6,4
	28	37,8 38,4	19,2 12,8	9,7 5,3	9,5 7,5	61,3 55,8	23,6 31,0	185	0,205 0,208	60,2 23,9	6,6 4,7
	42	40,8 40,2	12,4 12,9	4,0 3,1	8,4 9,8	56,5 51,1	33,1 32,8	166	0,247 0,243	23,3 22,6	4,8 4,9
1450°	0	43,5 40,1	10,0 8,3	2,2 2,0	7,8 6,3	40,6 9,6	36,9 36,7	136	0,320 0,294	18,0 9,1	4,2 3,3
	1	40,2 36,3	7,6 9,9	1,8 0,7	5,8 9,2	5,1 4,7	36,3 28,1	124	0,324 0,293	10,7 29,2	3,0 3,4
	3	39,2 38,9	10,5 11,2	2,2 0,9	8,3 10,3	4,1 5,7	30,2 30,5	125	0,313 0,311	29,8 27,5	3,9 4,1
	7	38,7 37,7	13,4 12,8	2,6 4,0	10,8 8,8	9,9 6,5	29,9 29,1	123	0,315 0,306	29,4 29,6	4,9 4,5
	14	38,4 35,8	16,8 15,7	8,4 6,4	8,4 9,3	39,0 26,0	30,4 27,6	147	0,261 0,243	26,5 29,7	6,1 5,3
	28	18,7 11,0	0,3 0,4	0 0	0,3 0,4	2,1 2,0	0 0	133	0,141 0,082		3,8 3,3
	42	35,3 36,6	11,7 11,4	3,0 5,8	8,7 5,6	15,0 17,3	25,9 27,5	123	0,287 0,297	36,3 33,1	3,9 3,9



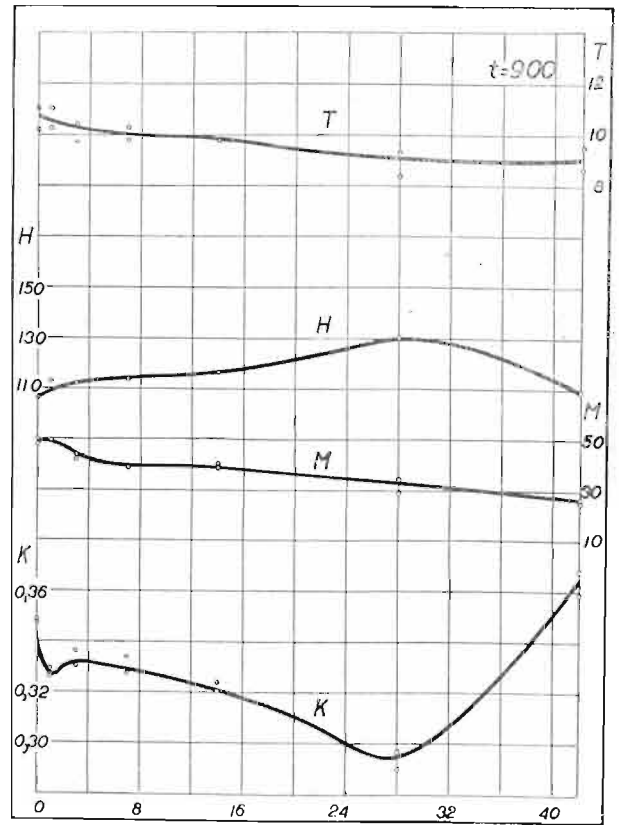
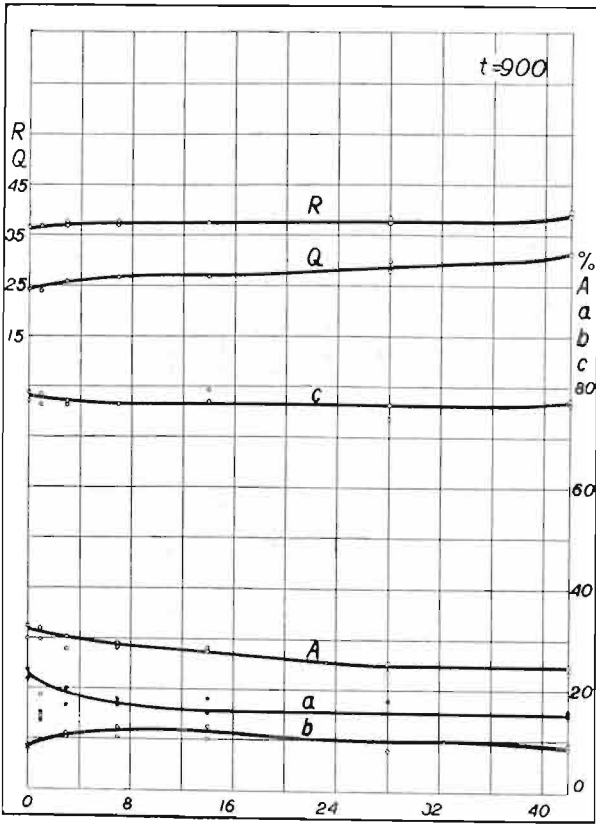
Température de trempé

Fig. 2. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à différentes températures.



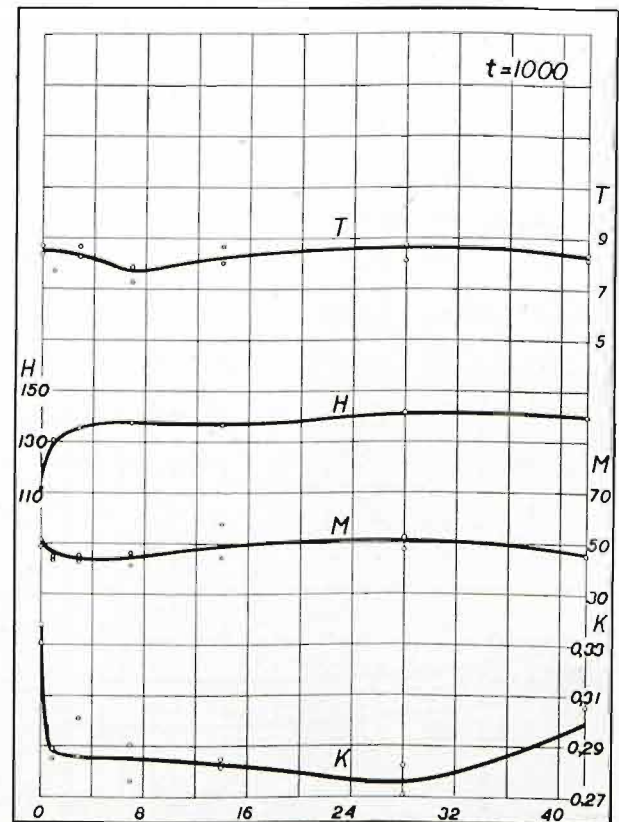
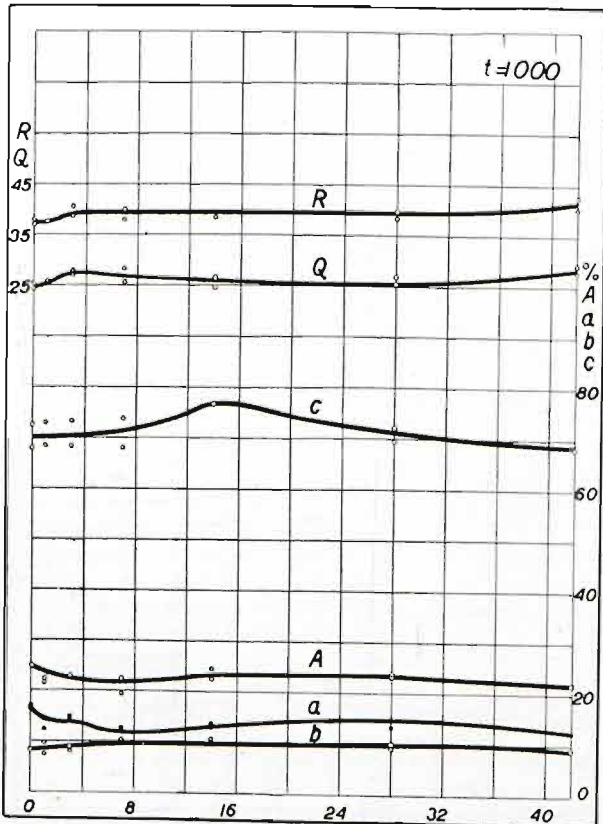
Saisonnement en jours

Fig. 3. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à 700° et soumis au saisonnement à 18°.



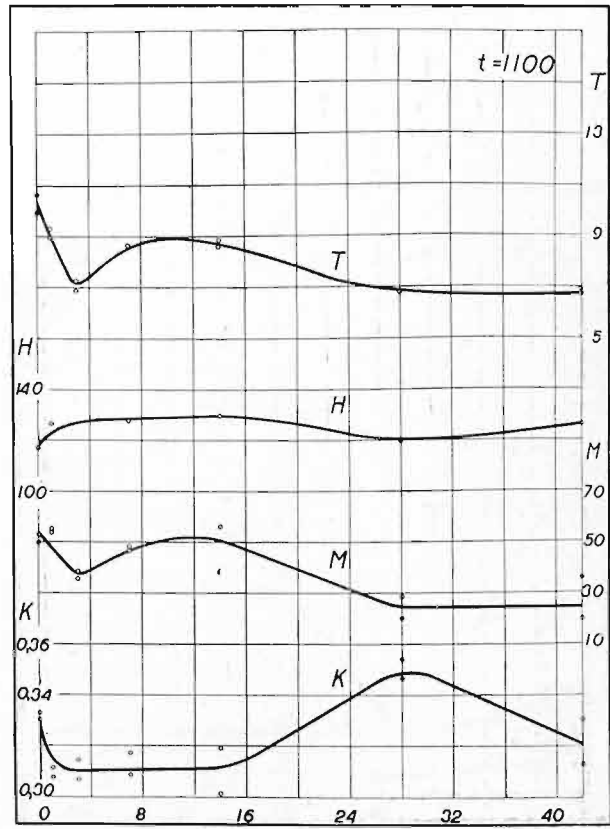
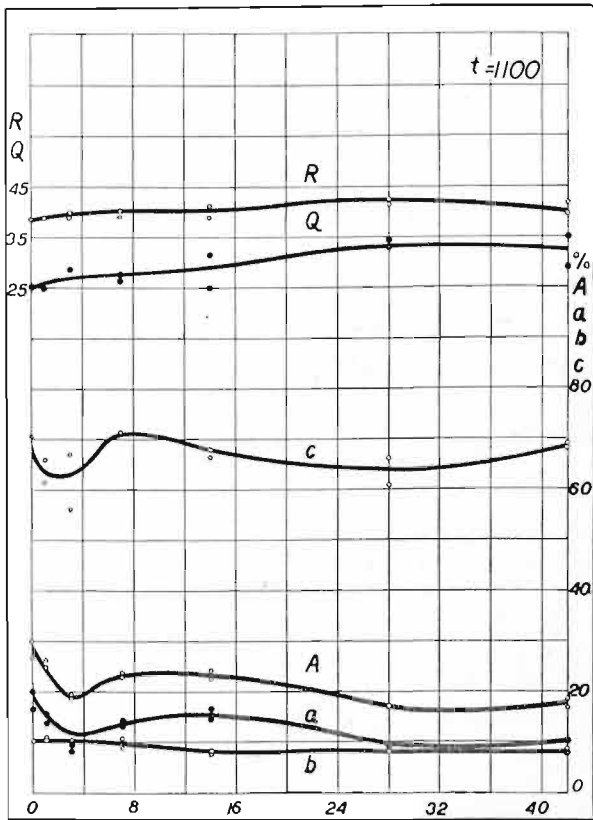
*Saisonnement en jours*

Fig. 4. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à 900° et soumis au saisonnement à 18°.

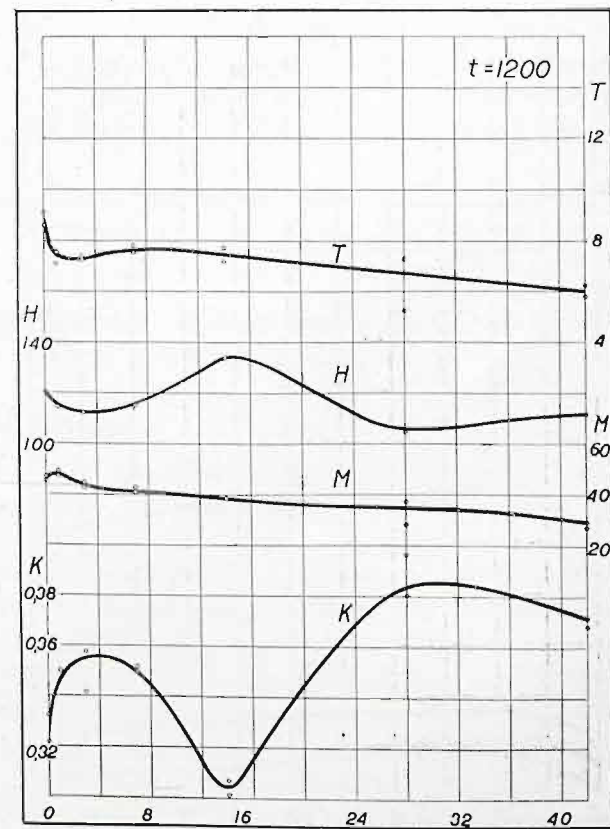
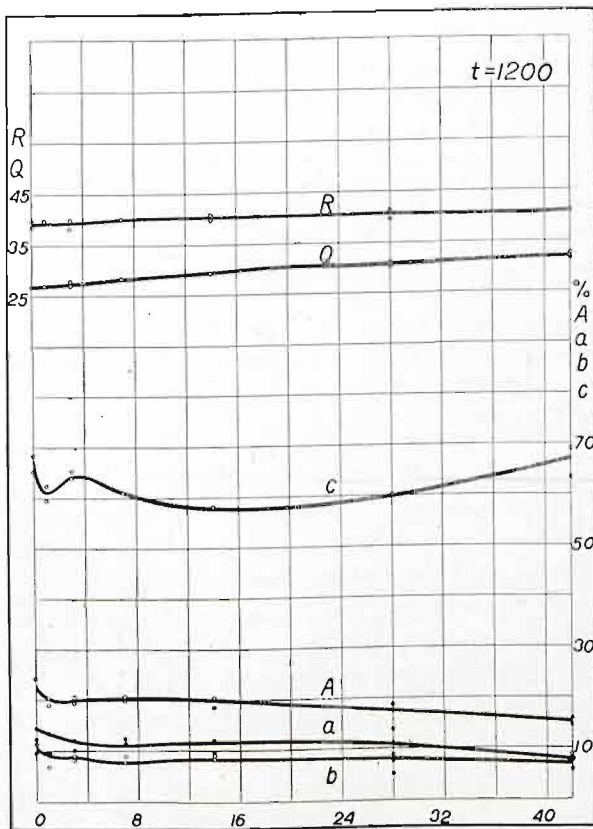


*Saisonnement en jours*

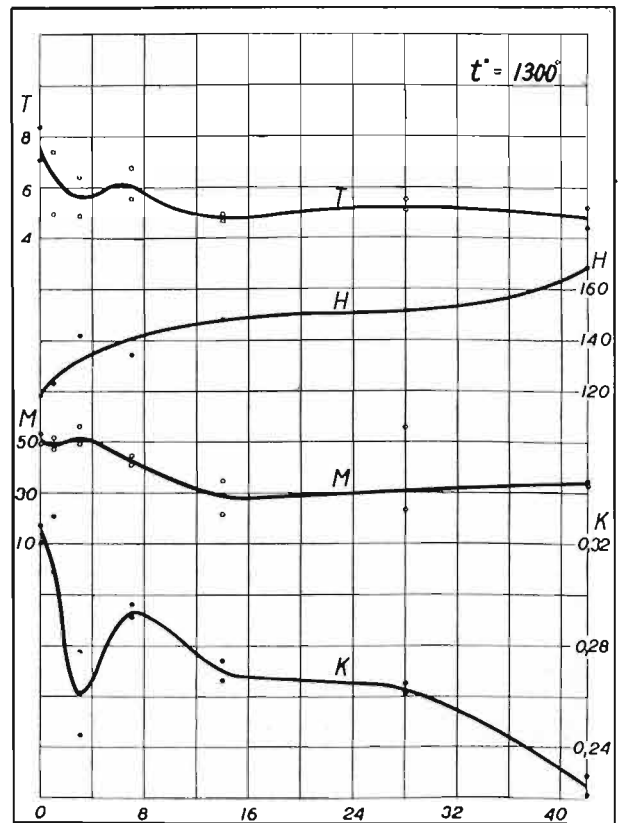
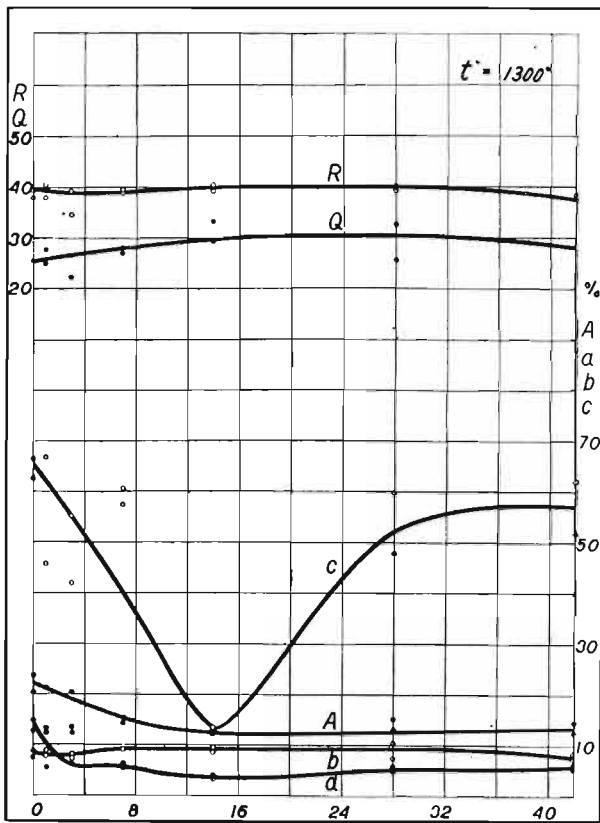
Fig. 5. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à 1000° et soumis au saisonnement à 18°.



Saisonnement en jours  
 Fig. 6. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à 1100° et soumis au saisonnement à 18°.

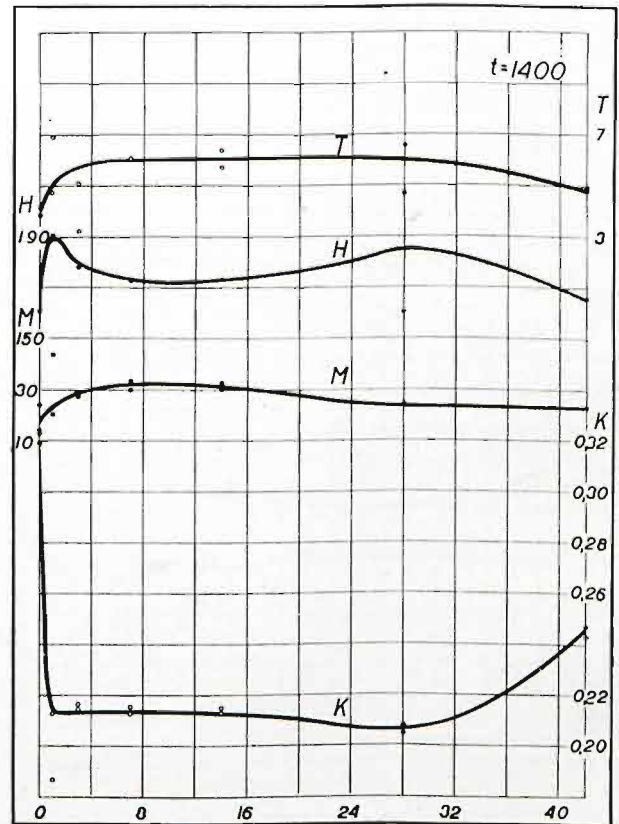
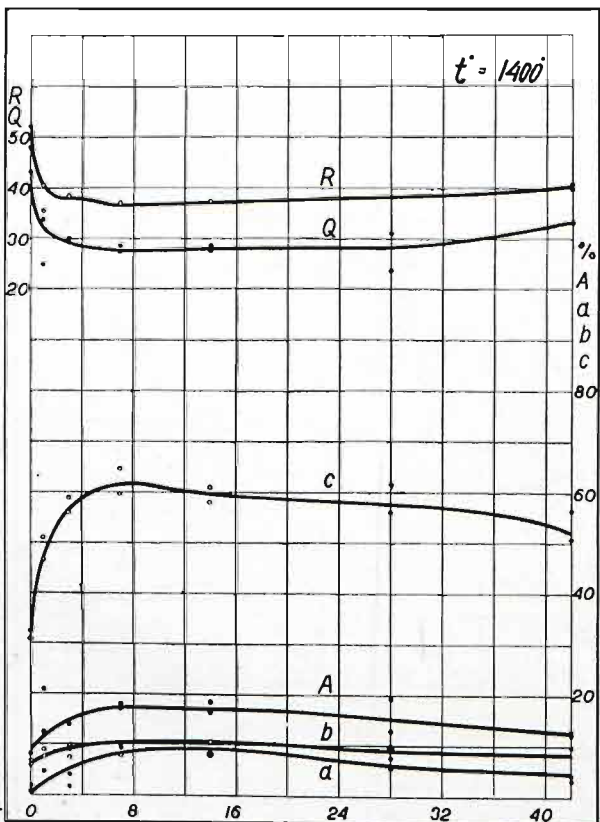


Saisonnement en jours  
 Fig. 7. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à 1200° et soumis au saisonnement à 18°.



Saisonnement en jours

Fig. 8. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à  $1300^\circ$  et soumis au saisonnement à  $18^\circ$ .



Saisonnement en jours

Fig. 9. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à  $1400^\circ$  et soumis au saisonnement à  $18^\circ$ .



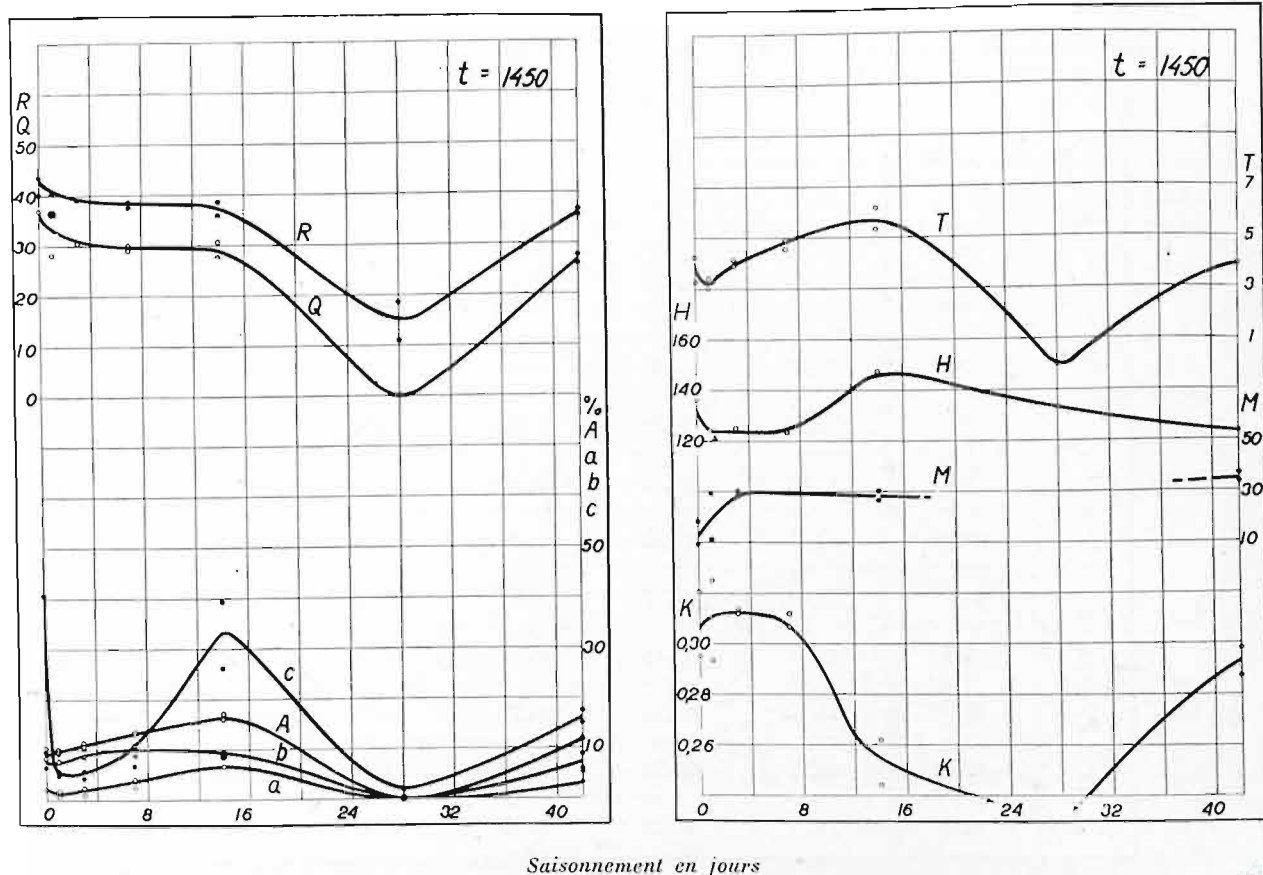


Fig. 10. Propriétés mécaniques du fer oxydulé trempé à  $1450^{\circ}$  et soumis au saisonnement à  $18^{\circ}$ .

Les essais de traction étaient faits sur une machine Amsler de 10 t.

L'allongement, ainsi que les diamètres  $d_0$ ,  $d_1$  et  $d_2$  des éprouvettes étaient mesurés à l'aide d'un microscope sur vis micrométrique (1 division = 0,01 mm). Les empreintes microscopiques de dureté étaient mesurées au microscope avec échelle sur l'oculaire (1 division = 0,005 mm).

Le métal recuit manifeste les propriétés mécaniques suivantes:

R	A%	a%	b%	C%	Q	H	K	M.10 <sup>2</sup>	T
55,5	38,5	28,5	10,2	82	26,6	98	0,545	25,8	12,2

Les résultats des mesures mécaniques, en fonction de la trempe et du saisonnement, indiqués aux tableaux I et II, sont reproduits sur les figures de 2 à 10.

### Propriétés électriques.

La résistance électrique spécifique et la force électromotrice de dissolution ont été mesurés à la température ambiante, de  $18^{\circ}$  environ, en fonction de la température de trempe et du temps de saisonnement.

La résistance électrique était déterminée en comparant, à l'aide d'un potentiomètre, la chute du potentiel due au passage d'un courant d'intensité constante par l'échantillon mesuré et par une résistance connue (0,001  $\omega$ ). La force électromotrice de dissolution était déterminée à l'aide d'un électromètre à quadrants, calibré par un élément Weston. La force électromotrice de dissolution était rapportée à une électrode au mercure; comme électrolyte servait une solution normale de chlorure ferrique. Ont été marquées les valeurs maxima et minima de la f. e. m. de dissolution, observées en 24 heures.

Le résultat de ces mesures est indiqué aux tableaux III et IV et reproduit sur les figures de 11 à 17.

T A B L E A U III.

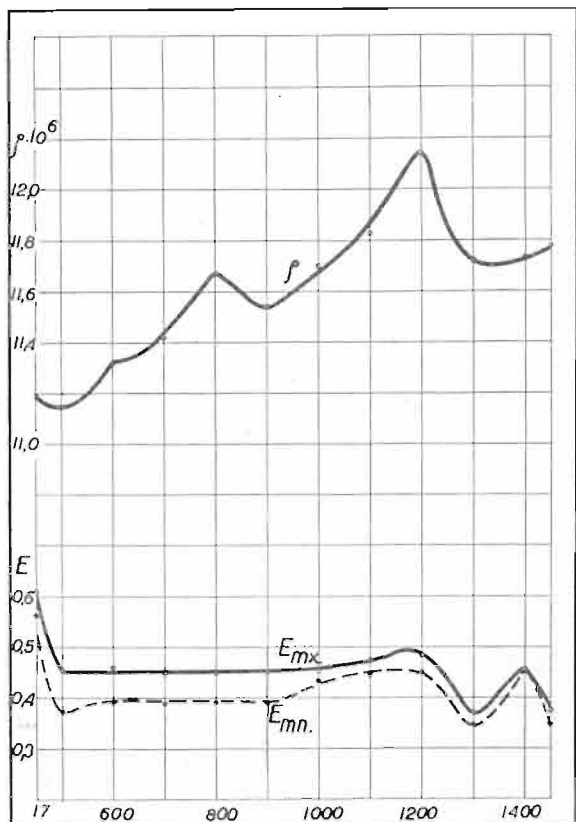
Résistance électrique en microhmes par  $\text{cm}^2$  du fer oxydulé après trempé suivie d'un saisonnement.

		Saisonnement en jours				
		0	7	14	28	42
recuit		11,19				
Température de trempé	500°	11,15	11,22	11,21	11,31	11,35
	600°	11,32	11,26	11,26	11,58	11,40
	700°	11,42	11,56	11,41	11,58	11,60
	800°	11,67	11,36	11,55	11,52	11,55
	900°	11,54	11,47	11,45	11,55	11,57
	1000°	11,70	11,52	11,55	11,72	11,38
	1100°	11,85	11,57	11,61	11,57	11,87
	1200°	12,14	11,45	11,90	11,58	11,65
	1300°	11,72	11,56	11,78	11,95	11,82
	1400°	11,73	11,52	11,73	11,81	11,96
1450°	11,77	11,45	11,55	11,85	11,65	

T A B L E A U IV.

Force électromotrice de dissolution en millivolts du fer oxydulé après trempé suivie d'un saisonnement.

		Saisonnement en jours									
		0		7		14		28		42	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
recuit		609	565								
Température de trempé	500°	456	372	653	571	650	607	519	470	407	349
	600°	462	395	616	569	655	605	514	461	405	347
	700°	448	390	613	572	644	607	511	461	407	337
	800°	451	390	611	567	647	606	517	465	394	339
	900°	452	389	608	569	652	605	500	466	444	345
	1000°	453	433	430	336	625	604	520	321	448	339
	1100°	474	446	423	328	636	608	524	340	447	340
	1200°	485	451	436	340	647	606	527	330	442	342
	1300°	371	347	430	336	644	604	529	332	453	425
	1400°	456	451	429	340	572	526	499	455	436	345
1450°	375	347	427	336	567	517	522	460	447	364	



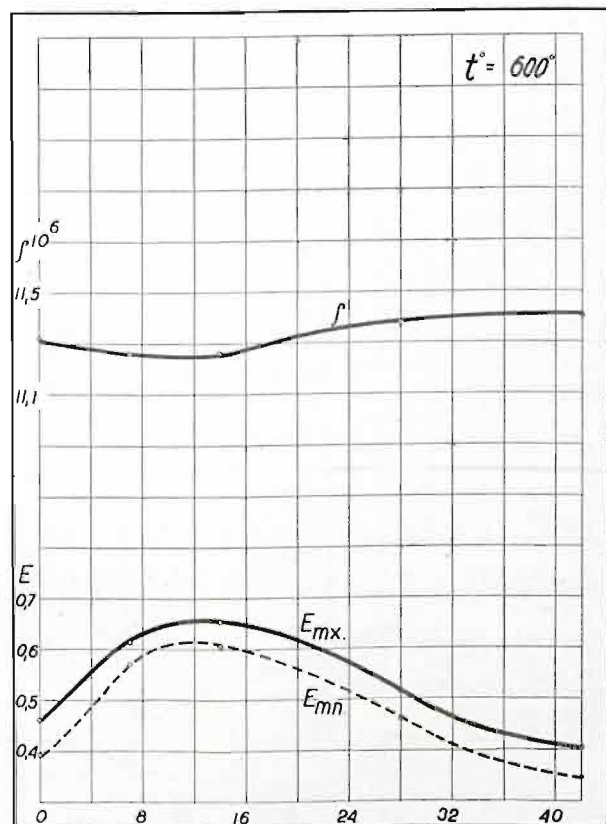
Température de trempé

Fig. 11. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé en fonction de la température de trempé.



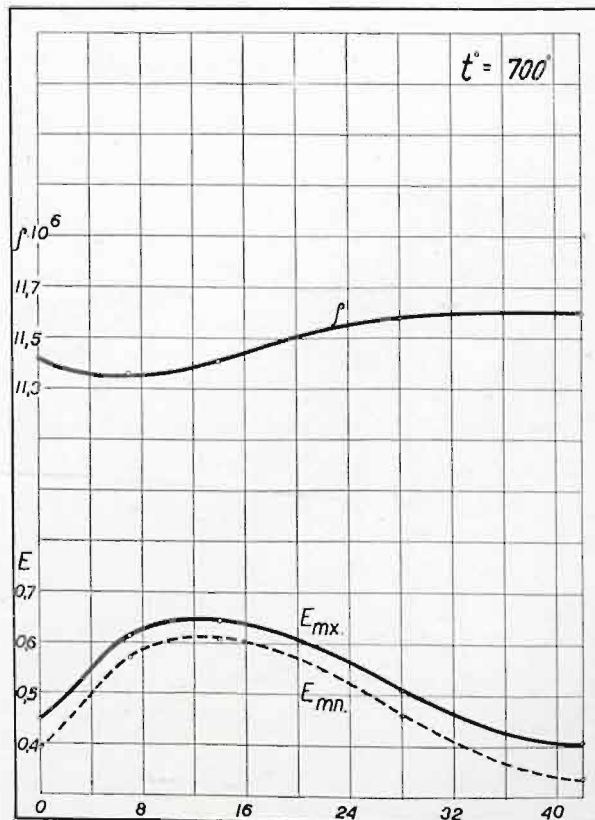
Saisonnement en jours

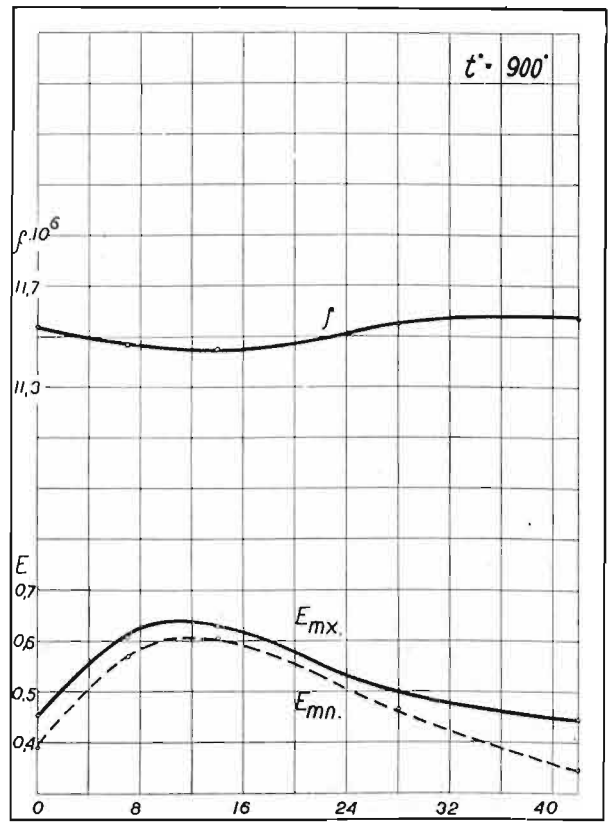
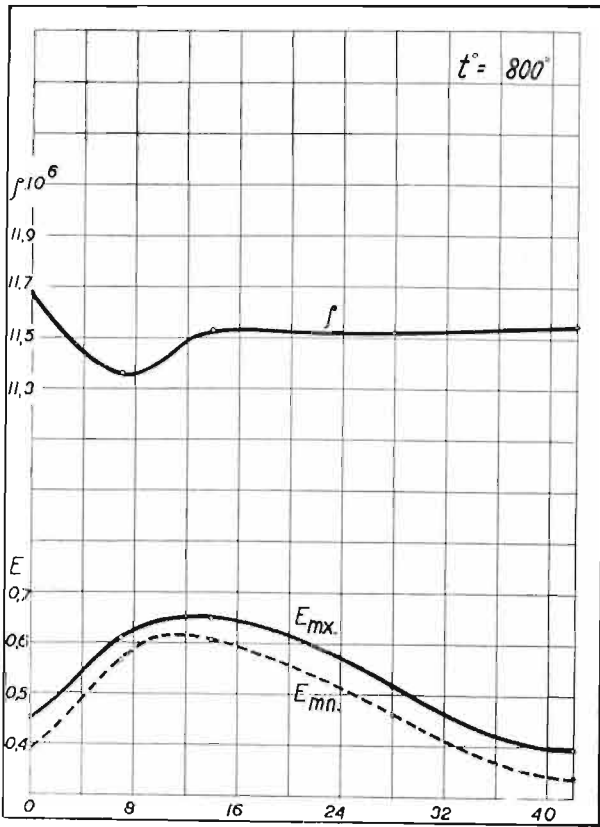
Fig. 12. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé trempé à  $500^\circ$  et saisonné à  $18^\circ$ .



Saisonnement en jours

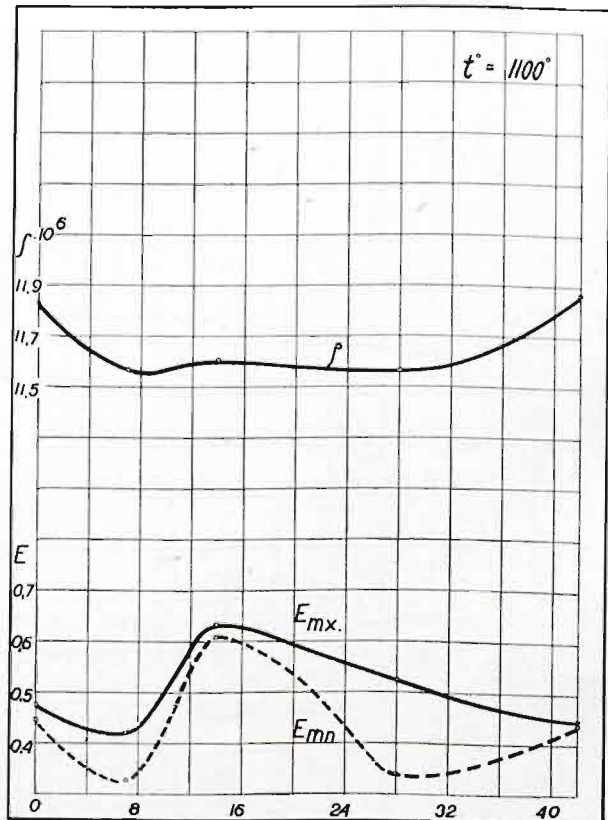
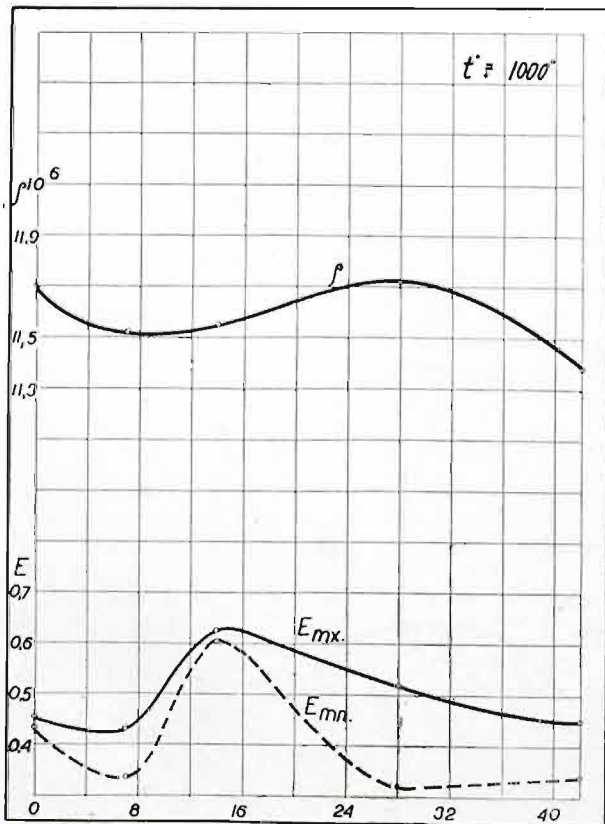
Fig. 13. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé saisonné à  $18^\circ$  après trempé à  $600^\circ$  et à  $700^\circ$ .





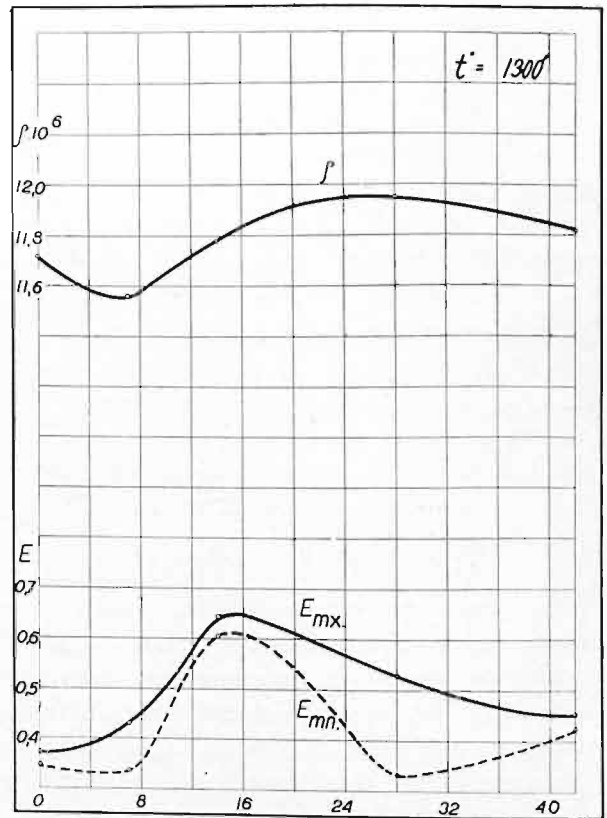
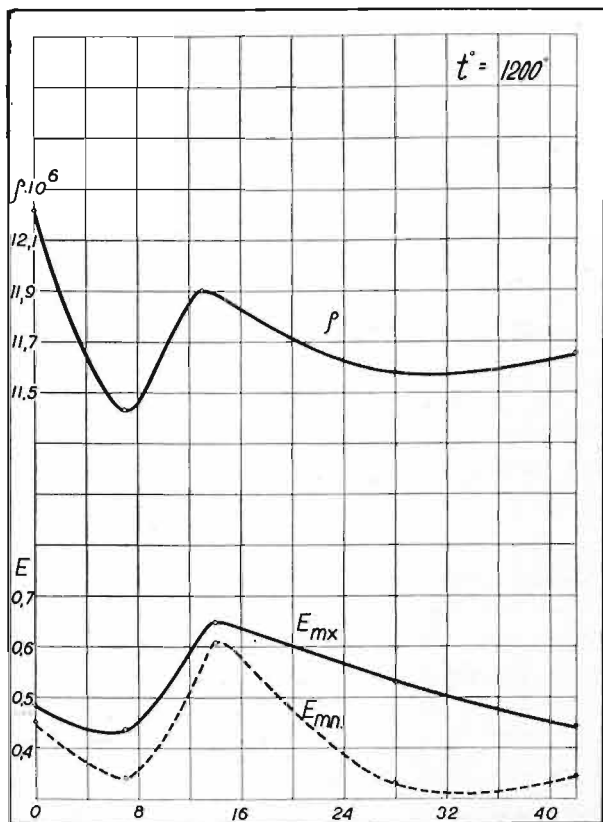
Saisonnement en jours

Fig. 14. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé saisonné à 18° après trempe à 800° et 900°.



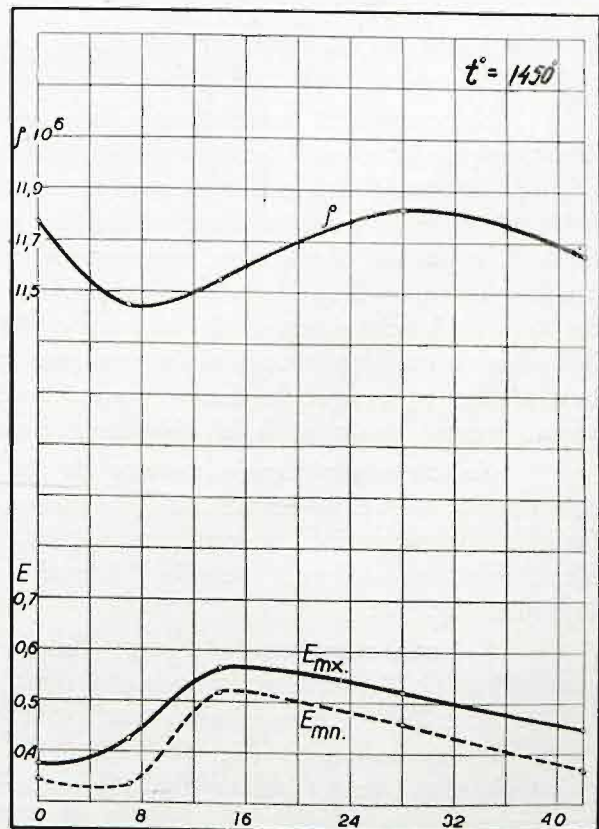
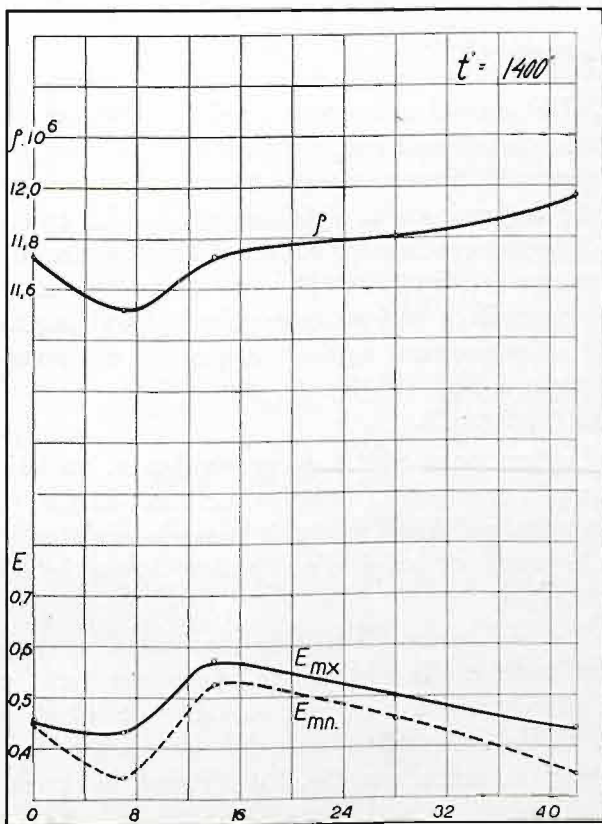
Saisonnement en jours

Fig. 15. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé saisonné à 18° après trempe à 1000° et 1100°.



Saisonnement en jours

Fig. 16. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé saisonné à  $18^{\circ}$  après trempé à  $1200^{\circ}$  et  $1300^{\circ}$ .



Saisonnement en jours

Fig. 17. Résistance électrique  $\rho$  et f. e. m. de dissolution  $E$  du fer oxydulé saisonné à  $18^{\circ}$  après trempé à  $1400^{\circ}$  et  $1450^{\circ}$ .

### Effets de la trempe.

Nous voyons (fig. 11) que la résistance électrique se trouve réduite par une trempe à 500°, relativement à sa valeur à la température ambiante, mais que la trempe à 600° élève sensiblement cette valeur. On pourrait interpréter ce fait, en admettant que la solubilité de  $Fe_3O_4$  diminue avec la température et que la solubilité de  $FeO$ , devenue stable vers 570°, est supérieure à celle de  $Fe_3O_4$ .

D'autres courbes comme  $E$  (fig. 11),  $A$ ,  $a$ ,  $T$  et  $K$  (fig. 2) manifestent aussi des points singuliers soit à 500, soit à 600°, en corrélation probable avec la stabilisation de  $FeO$ .

Un maximum de la résistance électrique se produit pour la trempe à 800° et un minimum pour la trempe à 900°, ce qui pourrait être dû à une solubilité supérieure du  $FeO$  dans le fer  $\beta$  que dans le fer  $\gamma$  apparaissant vers 900° (fig. 11).

Le minimum de dureté ( $H$ , fig. 2) aux environs de 900° paraît confirmer cette supposition.

Avec l'élévation de la température de trempe, la résistance électrique augmente pour passer par un maximum pour une trempe aux environs de 1200° (fig. 11). On pourrait donc supposer à cette température une solubilité maxima de  $FeO$  dans le fer  $\gamma$ . Pourtant, certaines propriétés mécaniques, comme la dureté, la résistance à la traction et la limite élastique (fig. 2) manifestent pour la trempe à 1400° un maximum bien plus accentué qu'à 1200° et une chute sensible, après une trempe à 1450°, dans le domaine du fer  $\delta$ . Dans ces conditions, il ne paraît pas aisé de préciser, sur la base de ces données, la solubilité relative de  $FeO$  dans le fer  $\gamma$  et le fer  $\delta$ , de sorte qu'il semble probable que le changement du réseau atomique au passage  $\gamma \rightarrow \delta$  peut influencer la résistance électrique et certains paramètres mécaniques dans une mesure aussi forte, que la solubilité de l'oxyde qui cesse d'être le facteur principal des points singuliers sur les diagrammes<sup>1)</sup>.

### Effets du saisonnement.

*Saisonnement après trempe du fer  $\alpha$ .* L'effet du saisonnement, après la trempe du fer  $\alpha$ , apparaît le plus nettement sur le diagramme de la force électromotrice de dissolution ( $E$ , fig. 12 et 13), qui passe par un maximum, après 12 jours environ, probablement par suite d'un dépôt très fin d'oxyde de fer, précipité à partir de la solution solide. La chute de la f. e. m. de dissolution, correspondante à l'agglomération du dépôt fin, est marquée aussi par une élévation de la résistance électrique ( $\rho$ , fig. 12 et 13) qui a une tendance de varier en sens inverse de la courbe  $E$ . Les propriétés mécaniques (fig. 3) sont moins influencées que les propriétés électriques par le saisonnement après trempe. Il est pourtant à remarquer que la dureté varie, après trempe à 700° ( $H$ , fig. 3), d'une façon approximativement analogue à la résistance électrique ( $\rho$ , fig. 13).

*Saisonnement après trempe du fer  $\beta$ .* La trempe à 800° met en évidence, au saisonnement, la même forme des diagrammes que la trempe et le saisonnement du fer  $\alpha$ , mais les particularités y sont plus nettement accentuées. Ainsi, on voit pour la résistance électrique un minimum sensible, formé après 8 jours et suivi d'un palier à partir de 15 jours (fig. 14).

*Saisonnement après trempe du fer  $\gamma$ .* La résistance électrique manifeste, au saisonnement de 8 jours, un minimum dont l'amplitude est la plus forte après une trempe à 1200° (fig. 16). Ce minimum est suivi d'un maximum à position variable de 42 à 14 jours de saisonnement (fig. 14 — 16). La f. e. m. de dissolution n'atteint son maximum qu'en passant par un palier (fig. 15) ou même par un minimum (fig. 16). Parmi les para-

<sup>1)</sup> Suivant MM. Sauvage et Delmas, le fer Armco, trempé à 1450° donne  $R=54$  kg/mm<sup>2</sup> et  $H=185$  kg/mm<sup>2</sup> (Feszczenko-Czopiwski, Metaloznawstwo, 1930, vol. I, p. 238). Ces nombres sont supérieurs aux nôtres.

mètres mécaniques, la résistance à la traction et la limite élastique s'élèvent par le saisonnement après trempe du fer  $\gamma$ . Par contre, l'allongement à la traction s'abaisse dans les mêmes conditions, de sorte que le travail de rupture à la traction ( $T$ ) apparaît, en définitive, réduit par le saisonnement après trempe.

La dureté se trouve ordinairement augmentée par le saisonnement du fer  $\gamma$  mais sa valeur passe parfois par un maximum aux environs de 15 jours (fig. 6 et 7).

La striction, qui change peu par le saisonnement, passe, après trempe à 1500°, par un minimum très accentué aux environs de la quinzaine.

*Saisonnement après trempe du fer  $\delta$ .* La trempe du fer  $\delta$  influence la résistance électrique et la force e. m. de dissolution d'une façon semblable à la trempe du fer  $\gamma$  (fig. 11 et 17). Le saisonnement, après trempe du fer  $\delta$ , réduit la résistance à la traction et la limite élastique (fig. 9), contrairement à ce qui avait lieu pour le fer  $\gamma$ . Comme l'allongement subit, de même, une réduction, après avoir passé par un maximum, on voit que le saisonnement du fer  $\delta$  trempé ne produit aucune amélioration du métal.

Il est à remarquer que la striction, qui au saisonnement de 8 jours, après trempe à 1500° passait par un minimum accentué (fig. 8), passe par un maximum au saisonnement analogue du fer  $\delta$  (fig. 9 et 10).

### R é s u m é <sup>1)</sup>.

1. Le fer Armeo qui contient, de règle, un excès d'oxyde de fer, peut subir la trempe, par passage en solution de cet oxyde et un saisonnement, par précipitation de cet oxyde. Dans notre étude, la température de la trempe variait de 500° à 1450°; le temps de saisonnement ne dépassait pas 6 semaines.

2. En fonction de la température de trempe et du temps de saisonnement a été étudiée la variation de la résistance, électrique de la f. e. m. de dissolution, de la dureté et des paramètres de traction.

3. La résistance électrique, la f. e. m. de dissolution et, dans une certaine mesure, la dureté paraissent donner quelques indications sur la solubilité des oxydes de fer dans ce métal.

4. L'effet de la trempe n'est pas régulier et devrait être rapporté non seulement à la température, mais aussi à la modification allotropique du fer dissolvant l'oxyde. D'une façon générale, la trempe augmente la dureté, la résistance à la traction et la résistance électrique, elle diminue la striction, l'allongement à la rupture, le travail de rupture et la f. e. m. de dissolution. Le saisonnement, après trempe, accentue ordinairement l'effet de la trempe. On trouve ainsi, par exemple:

	$R$	$Q$	$A\%$	$b\%$	$C\%$	$H$	$T$
après recuit	33	27	38	10	82	98	12,2
après trempe à 700°	40	30	27	7	75	128	10,0
après saisonnement	42	36	22	9	74	158	9,9

5. L'effet du saisonnement, comme celui du revenu des aciers au carbone, fait passer certains paramètres par des maxima et des minima. Par exemple, après une trempe à 1100° aussi bien l'allongement que la striction passent par un minimum au bout de 5 jours de saisonnement et par un maximum après 8 jours.

6. Etant donné que ni la présence du carbone, ni le traitement désoxydant ordinaire des aciers ne fait pas complètement disparaître les oxydes dont une partie persiste en état d'équilibre stable, on peut se demander si les effets de trempe et surtout ceux du revenu, observés dans les aciers au carbone, ne sont pas produits par deux réactions distinctes, bien que simultanées, dues au carbone et aux oxydes de fer.

<sup>1)</sup> C. R. Acad. Sc., Paris, 207 (1938) p. 342.