

H. BOUASSE

Z. CARRIÈRE

Sur les courbes de traction du caoutchouc vulcanisé

Annales de la faculté des sciences de Toulouse 2^e série, tome 5, n° 3 (1903), p. 257-283

http://www.numdam.org/item?id=AFST_1903_2_5_3_257_0

© Université Paul Sabatier, 1903, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Annales de la faculté des sciences de Toulouse » (<http://picard.ups-tlse.fr/~annales/>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

SUR LES

COURBES DE TRACTION DU CAOUTCHOUC VULCANISÉ,

PAR MM. H. BOUASSE ET Z. CARRIÈRE.

Nous devons préciser le but que nous avons poursuivi en étudiant le caoutchouc. Il ne peut entrer dans notre esprit d'étudier toutes les espèces de caoutchouc. Leur nombre est indéfini; elles peuvent différer par l'arbre qui fournit la gomme et le mode d'extraction, par la quantité de soufre introduit et par le procédé de vulcanisation. Nous serions d'abord amenés à caractériser ces espèces par des constantes, et c'est justement l'existence de ces constantes que nous discuterons et que l'expérience nous montrera de plus en plus douteuse.

Il ne nous est pas possible d'étudier *en général* les propriétés du caoutchouc, sans passer en revue les espèces et sans retomber, par conséquent, dans les difficultés précédentes. Nous nous limiterons donc à étudier *un échantillon de caoutchouc*, il est plus que probable que les autres caoutchoucs présenteraient qualitativement les mêmes phénomènes; mais ce n'est pas sûr, et d'ailleurs assez indifférent pour le but que nous poursuivons.

Nous considérons ce caoutchouc comme le substratum de certaines lois, comme possédant certaines propriétés caractéristiques que nous nous proposons de classer. Nous l'avons choisi, après un grand nombre de physiciens, comme sujet d'étude, parce que ces propriétés sont chez lui extraordinairement grossières et comme caricaturales; mais elles se retrouvent dans bien des corps à un moindre degré; et l'on peut espérer que des phénomènes, débrouillés dans ce cas extrême, pourront être plus facilement classés dans d'autres cas où ils ne sont plus aussi nettement tranchés.

Notre échantillon de caoutchouc a été fourni par une des premières usines de France comme ne contenant que de la gomme et du soufre: nous le possédons sous forme de cordes de 4^{mm} de diamètre et nous en avons utilisé plusieurs kilogrammes. Sa densité est 0,985; sa surface est grise et contient un excès de soufre pulvérulent. Nous n'avons pas cherché à savoir d'où provenait la gomme ..., par quel procédé on l'avait vulcanisée Nous n'aurions eu que de vaines précisions, sans intérêt, du moment que nous ne pouvions pas assister à toute la série des manipulations.

La plus élémentaire discrétion empêche de demander à un industriel de révéler ses secrets de fabrication, et ensuite de les publier, *à supposer qu'il les communique*. Si d'ailleurs on veut bien se mettre à notre point de vue, on comprendra que nous ne regrettons que médiocrement de n'avoir pu satisfaire notre curiosité.

Nous ne voulons pas donner comme résultat de notre travail que tel caoutchouc de telle origine, après telle préparation dans telles conditions, présente telles propriétés. Nous voulons conclure qu'il est possible de rencontrer des corps, *peu importe leur nom et leur composition*, qui présentent certains phénomènes que nous étudions et classons. Il y a des chances pour qu'on reproduise ces phénomènes en utilisant du caoutchouc; mais admettons, par impossible, que l'échantillon que nous avons étudié soit seul au monde à les présenter, ils n'en perdraient pas leur intérêt. Et, à supposer bien entendu que nos observations soient correctes, une théorie n'aurait pas le droit de les négliger.

Nous savons que de telles opinions sont encore considérées comme paradoxales : ce n'est pas une raison pour qu'elles soient erronées. Il peut sembler bizarre d'étudier un corps qui présente de si nombreuses et de si importantes applications, comme le substratum de certaines lois curieuses : mais chacun a son rôle dans la Science : il faut bien que quelques-uns s'occupent des phénomènes indépendamment de leur utilité.

APPAREIL POUR DÉCRIRE LES COURBES DE TRACTION.

La figure 1 représente schématiquement l'appareil que nous avons employé pour décrire les courbes de traction. Suivant un principe auquel on doit toujours se conformer, les charges sont imposées d'une manière continue et les longueurs sont observées par une méthode qui permet de les déterminer à tout instant.

Le principe de la mise en charge est le déroulement ou l'enroulement d'une chaînette de cuivre pesant à peu près exactement 50^g par mètre. Elle est contenue dans le vase V, passe sur un cylindre de bois R, de 20^{cm} de diamètre, glisse sur une gouttière *cb* et tombe dans le cornet du clinquant E. On peut, par des procédés mécaniques appropriés et qu'il est inutile de décrire, donner au cylindre R des mouvements de rotation uniformes dans un sens ou dans l'autre, changer instantanément ce sens, ou arrêter brusquement. Par un entraînement direct par poulies, ou en utilisant un entraînement par vis tangente et friction, on peut obtenir la mise en charge de 1^m de chaîne en un nombre de secondes variant de 5 à 120. Tous les mètres, la chaîne porte un anneau de fil rouge.

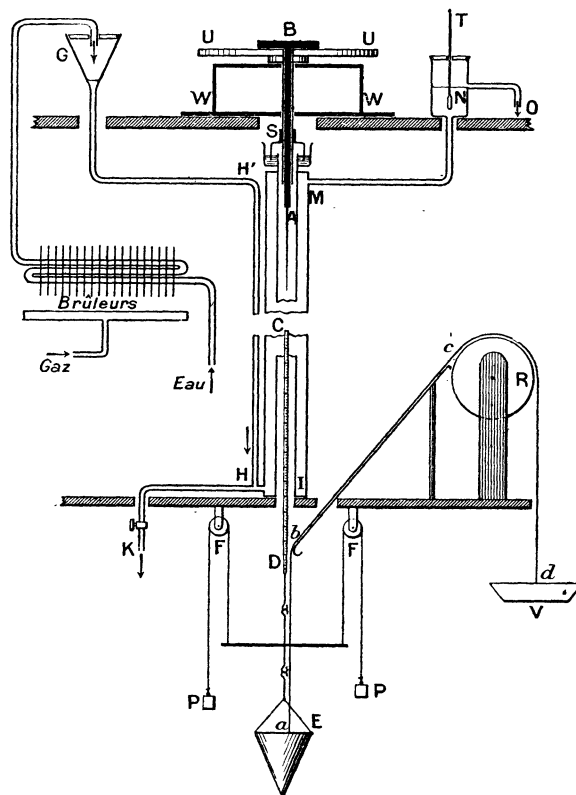
On observe avec une lunette le passage de ces fils, et simultanément, dans la même lunette, on lit la position d'une règle en bois mince DC qui est suspendue à la corde de caoutchouc étudié : la longueur de la corde en expérience est ainsi

connue à $\frac{1}{10}$ de millimètre près, approximation généralement plus que suffisante.

Le cornet E est équilibré par des contrepoids P rattachés par des fils passant sur des poulies d'aluminium très légères et très mobiles FF.

Après des efforts infructueux pour trouver un mode d'attache parfaitement correct, nous avons dû nous résigner à pincer les extrémités de la corde de caout-

Fig. 1.



chouc dans des pinces de bijoutier. Le serrage doit être considérable lorsqu'on veut pouvoir allonger de 6 ou 7 fois la longueur initiale sans que la corde échappe. Mais l'expérience montre qu'une fois desserrée la corde reprend bien son diamètre primitif et ne semble pas avoir souffert. Une des pinces (non représentées) est invariablement fixée à la pièce BA qui entre à frottement doux dans le tube servant d'axe au disque gradué UU. L'autre pince est reliée par un crochet à la règle CD. Pour mettre la corde en expérience, on la fixe à ses pinces, on introduit le tout par en haut après avoir accroché la règle. On peut aisément régler cette dernière en azimut grâce au disque UU. Nous avons d'ailleurs installé l'appareil comme il vient d'être dit, en vue d'expériences sur la torsion.

La pince et la règle que supporte toujours le caoutchouc pèsent ensemble 61^g : nous désignerons cette charge par P_0 .

Nous avons effectué des expériences à des températures autres que la température ordinaire.

Il est très difficile de maintenir à une température constante, même grossièrement, l'eau renfermée dans une enceinte de $1^m,40$ de hauteur : il est à peu près impossible d'agiter, tant à cause des difficultés mécaniques à vaincre, qu'à cause des trépidations qui résulteraient de cette agitation.

D'ailleurs, le refroidissement et le réchauffement demanderaient un temps considérable. Nos expériences sont basées sur un principe tout différent.

La corde est entourée d'un tube de laiton de $0^m,04$ de diamètre : un autre tube de $0^m,06$ de diamètre coaxial au premier, forme avec lui une enceinte dans laquelle on fait circuler un courant d'eau chaude ou froide. L'eau arrive à la partie inférieure de l'enceinte par le tube GH et sort par le tube MN. Un robinet K permet la vidange : le trop plein s'écoule en O et est amené dans les égouts. La température de l'eau est prise par le thermomètre T. L'ensemble du tube HH' et des tubes concentriques formant l'enceinte est entouré d'une couche de corde d'amiante pour éviter un trop grand rayonnement extérieur.

Une chicane S, formée d'une gouttière circulaire remplie d'huile et d'un chapeau glissant à frottement sur l'axe du disque UU, empêche un courant d'air froid de s'établir autour du caoutchouc, sans gêner les mouvements de rotation.

Reste à chauffer l'eau qu'on enverra dans l'enceinte. Nous avons utilisé des appareils du commerce, robustes et bon marché, que l'on emploie aujourd'hui couramment. Avec un débit de plus de 1^l à la minute, ils échauffent l'eau d'une quarantaine de degrés : en en mettant deux en série, nous avons obtenu un débit de plus de 1^l par minute, avec un échauffement de 70° à 80° . Ils se composent essentiellement d'un tube de cuivre deux fois replié sur lui-même et entouré d'ailettes en cuivre : une rampe de brûleurs chauffe le tout. L'encombrement de ces appareils est très petit : ils sont longs d'une trentaine de centimètres : les ailettes ont $0^m,07$ de diamètre. Pour que la température soit constante à 1° près, il faut régler la pression d'arrivée du gaz : on fait varier la température en modifiant le débit.

Les cordes employées ont généralement de $0^m,15$ à $0^m,30$ de longueur. Sans sortir du tube, elles s'allongent d'un peu plus de 1^m . Le caoutchouc pouvant prendre jusqu'à 7 à 8 fois sa longueur primitive, dans quelques cas particuliers la corde a comme longueur initiale une douzaine de centimètres. Il y a avantage, tant au point de vue de la précision que de la définition des déformations subies, à prendre cette longueur aussi grande que possible.

On s'aperçoit immédiatement, rien qu'à regarder la corde d'un même paquet, que le diamètre n'est pas constant : cette circonstance augmente beaucoup la

difficulté des comparaisons numériques, d'autant plus que l'homogénéité de la matière à la surface et au centre est très imparfaite. Les expériences devant être le plus souvent exécutées sur des bouts différents pour avoir un sens, ce n'est que par leur répétition que l'on parvient à assurer certaines conclusions.

Notations. — Nous appellerons L_0 la longueur initiale de la corde, L sa longueur actuelle. Nous poserons $\Lambda = L : L_0$.

Les charges seront données en mètres de chaîne : dire qu'un cycle est de $n\pi$ signifiera que la variation de charge est de n fois le poids π de 1^m de chaîne, soit sensiblement 50 n -grammes.

La charge étant prise comme variable, nous appellerons amplitude l d'un cycle la différence entre les longueurs initiale et finale, avant et après l'imposition de la charge.

Toutes les courbes sont construites en portant les longueurs en abscisses et les charges en ordonnées.

A moins d'indications contraires, la charge croît proportionnellement au temps à raison de 1^m en 27 secondes, soit approximativement 100^g en 54 secondes.

Les longueurs L_0 , L , l sont toujours données en dixièmes de millimètre.

Nous appelons T_0 et T_1 les temps écoulés à charge constante aux extrémités des cycles.

Historique. — L'historique de la question sera très bref, non que le nombre des gens qui ont tiré sur du caoutchouc ne soit considérable; mais ils se sont placés à un point de vue qui n'est pas le nôtre.

Le premier Mémoire qu'il vaille la peine de citer est celui de Villari (*Pogg. Ann.*, t. CXLIII, 1871).

L'auteur trace la courbe de traction du caoutchouc, mais, *comme tous ceux qui l'ont suivi*, les charges sont installées à la main, sans précautions spéciales. Il trouve un point d'inflexion.

Sa principale préoccupation est de calculer le module d'élasticité pour lequel il donne une définition inadmissible, à supposer qu'il ait la prétention d'exprimer par ce module un paramètre, constant ou variable peu importe, mais caractéristique de la longueur ou de la charge actuelle d'un caoutchouc donné. Nous reviendrons là-dessus dans un prochain Mémoire.

Imbert (*Thèse de Marseille*, 1880) allonge des lames de caoutchouc; sa technique n'est pas meilleure que celle de Villari. Il retrouve le point d'inflexion. Nous ne discuterons pas ici les conséquences qu'il tire de ses expériences.

Cantone (*R. Istituto lombardo*, t. XXXI, 1898) décrit des cycles selon une technique tout aussi rudimentaire : il semble encore que son objectif principal soit le calcul du module d'élasticité.

Ainsi la forme générale des courbes de traction du caoutchouc est connue depuis longtemps; la technique a toujours été défectueuse.

On a mêlé à l'étude de ces courbes des considérations sur le module d'élasticité dont le moindre défaut est de ne pas avoir de sens, comme il ressortira à l'évidence du présent travail. Quand on se sera rendu compte de la variabilité extraordinaire des courbes avec la technique, on se demandera comment il a pu venir à l'idée de calculer le module d'élasticité d'après les propriétés de ces courbes.

Enfin, personne n'a étudié systématiquement comment les cycles se fixaient, comment la température intervenait sur cette fixation, ..., questions qui font l'objet principal de notre Mémoire.

RÉSULTAT DES EXPÉRIENCES.

1. *Allongement permanent.* — Nous avons cherché tout d'abord à nous rendre compte des charges que les cordes supportent et des allongements permanents qui peuvent en résulter. Les cordes se rompent toujours aux points d'attache. Les pinces fixent assez correctement la partie utilisée, mais diminuent la charge de rupture. En prenant le caoutchouc doublé dans un nœud coulant qui se serre automatiquement à mesure que la tension croît, on augmente la charge de rupture, mais la partie utilisée se trouve assez mal déterminée. On tourne cette difficulté en mesurant les allongements entre deux repères tracés à l'encre sur la surface du caoutchouc. Nous n'avons pas pu employer généralement cette technique, parce qu'elle exige deux expérimentateurs, est plus compliquée que celle que nous avons précédemment exposée et ne peut pas être employée quand on veut élever la température du caoutchouc. D'ailleurs les courbes obtenues avec l'une ou l'autre technique ne diffèrent pas sensiblement.

Chaque expérience est faite sur un caoutchouc différent :

Première série : la charge est maintenue 24 heures.

Charges.	200g.	500g.	1000g.	1500g.
Λ_1	1,268	2,600	4,744	6,624
Λ_2	1,012	1,016	1,036	1,044
Λ_3	1,008	1,012	1,020	1,030

Λ_1 est la longueur un peu avant la décharge; Λ_2 est la longueur 10 minutes après la décharge; Λ_3 24 heures après, et Λ_4 7 jours après :

Deuxième série : la charge est maintenue 2 jours.

Charges.	200g.	500g.	1000g.	1500g.
Λ_1	1,332	3,100	5,544	7,184
Λ_2	1,028	1,068	1,104	1,112
Λ_3	1,012	1,030	1,056	1,068
Λ_4	1,008	1,018	1,044	1,056

Troisième série : la charge est maintenue 10 jours.

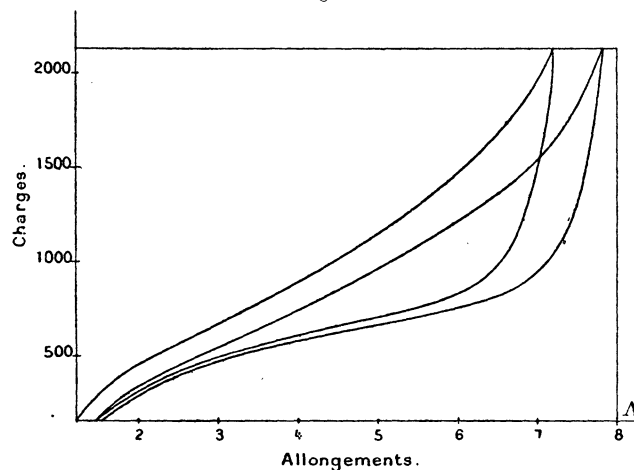
Charges.	200g.	500g.	1000g.	1500g.
Λ_1	1,310	2,912	5,804	7,258
Λ_2	1,036	1,104	1,160	1,160
Λ_4	1,020	1,052	1,092	1,108

Ces expériences montrent que l'allongement, que l'on est tenté d'appeler permanent, croît avec la charge et avec la durée d'application : mais la question est de savoir s'il ne diminue presque indéfiniment en maintenant le fil assez longtemps sous charge nulle.

La corde de 4^{mm} que nous avons employée (pure gomme et soufre) supporte encore des charges plus considérables; nous sommes parvenus à lui faire subir, pendant quelques minutes, 2700g, qui produisaient une longueur $\Lambda = 8,2$.

2. *Courbe de charge et de décharge continuées jusqu'aux plus fortes charges.* — Nous avons tracé, d'après la technique précédente, quelques courbes de charge et de décharge. La figure 2 représente deux parcours complets entre 3π

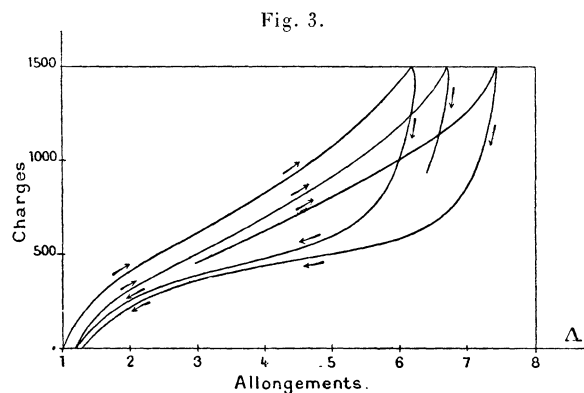
Fig. 2.



et 43π , soit sensiblement entre 150g et 2150g. L'allure de ces courbes est tout à fait caractéristique.

On remarquera à quel point elles se relèvent pour les fortes charges. Le rapport des valeurs maxima et minima des allongements qui correspondent à un même accroissement de charge atteint 6 sur la courbe de charge du second cycle. Au début de la courbe de décharge, il y a encore allongement pour le premier cycle; la courbe est sensiblement verticale pour le second.

3. *Mode de fixation des cycles de traction d'amplitude constante.* — Cycles de 30π , parcourus sans arrêt aux extrémités $T_0 = T_1 = 0$. On trace 8 courbes



complètes. La figure 3 représente la première, une partie de la seconde et une partie de la huitième.

Amplitudes. — $\Lambda_0 = 1$ au début du premier cycle. Voici les Λ_1 aux extrémités des divers cycles et les Λ_0 de retour :

Λ_1	6,16	6,68	6,90	7,04	7,17	7,27	7,36	7,43
Différences.	52	22	14	13	10	9	7	
Λ_0	1,20	1,23	1,25	1,25	1,28	1,28	1,28	1,28

L'amplitude des cycles croît d'abord beaucoup, puis de moins en moins et tend vers une limite.

Elle n'est pratiquement atteinte qu'après le huitième cycle. Ce résultat rentre dans la propriété générale d'accommodation. On remarquera que la limite inférieure est à peu près immédiatement atteinte et que le cycle ne s'allonge que par un déplacement de son extrémité supérieure. La charge de 30π est considérable pour la corde employée et l'allonge de plus de six fois sa longueur initiale.

Inclinaison au début de la courbe de charge. — $L_0 = 1470$. On donne ci-dessous l'allongement pour les deux premiers mètres de chaîne :

173	214	222	236	239	230	250	266
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

A mesure que le numéro d'ordre du cycle croît, la courbe est au début de plus en plus inclinée.

Tangente d'inflexion sur la courbe d'aller. — Elle a lieu pour 10π environ. L'allongement est alors par mètre, pour les cycles successifs,

351	390	403	410	416	422	424	428
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

La tangente d'inflexion est de plus en plus inclinée.

Inclinaison à la fin de la courbe de charge. — Voici les allongements pour les deux derniers mètres :

319 246 225 223 221 222 221 214

Ainsi, bien que l'amplitude croisse à mesure que le numéro d'ordre du cycle augmente, la corde est de moins en moins déformable pour les charges finales. Ce fait est d'accord avec le suivant.

Inclinaison du début de la courbe de décharge. — Si l'on maintient la charge constante à partir d'un point quelconque de la courbe de charge, il y a un allongement dont la vitesse, d'abord très grande, diminue rapidement. Si, au lieu de maintenir la charge constante, nous la diminuons, il y a simultanément une tendance à l'allongement, du fait que la longueur actuelle ne correspond pas d'une manière stable à la charge actuelle, et une tendance au raccourcissement du fait que la charge diminue. La première tendance l'emporte toujours au voisinage de l'extrémité du cycle : mais l'allongement peut cesser presque immédiatement. On n'observe que l'effet total produit par la décharge de π .

Pour le premier et le deuxième cycle, il y a allongement très net quand on décharge de π ; pour le troisième, le fil a la même longueur à l'extrémité de la courbe de charge et après décharge de π ; au delà du sixième, il y a raccourcissement sensible.

Tangente d'inflexion sur les courbes de décharge. — L'inflexion a lieu pour une charge égale à 9π : le raccourcissement est, par mètre de chaîne :

822 1012 1015 1055 1115 1093 1124 1137

La tangente d'inflexion est de plus en plus inclinée.

Inclinaison à la fin de la courbe de décharge. — Voici les raccourcissements pour les deux derniers mètres de chaîne :

342 360 352 370 410 376 381 385

La variation de l'inclinaison de retour est faible.

Enfin, voici, pour fixer les idées, le premier cycle complet : on donne les allongements produits par l'adjonction de 2π :

Courbe de charge.....	{	173	257	382	558	694	736	733	673
	{	624	582	535	507	444	377	319	
Courbe de décharge.....	{	94	83	78	99	124	162	228	370
	{	734	1156	1644	1182	718	472	342	

Pour le caoutchouc, la déformation permanente est relativement faible. Il ne faut pas se laisser tromper par la grandeur des Λ_0 : ils indiquent un allongement du quart de la longueur, mais cet allongement est loin d'être tout entier permanent. En abandonnant la corde longtemps sous charge nulle, elle n'aurait conservé qu'un allongement permanent très inférieur à $\frac{1}{40}$ (voir n° 1).

L'expérience précédente montre à quel point les parcours réagissent les uns sur les autres; donc il y a une transformation interne plus ou moins permanente du caoutchouc qui résulte de la déformation.

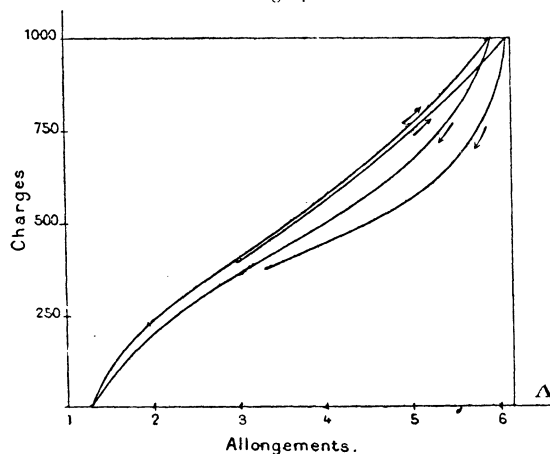
4. *Cycles fixés. Influence de la vitesse de charge et de décharge.* — Les expériences sont croisées sur un même fil : la vitesse est constante dans chaque série et variable d'une série à l'autre. Les cycles sont de 20π ; la vitesse V est de 1^m en $4^s, 5$; la vitesse v est de 1^m en 68^s . $T_0 = T_1 = 0$.

Voici les amplitudes successives mesurées sur la courbe de charge :

V.....	7980	8080	8175	8250	8290
v.....	8678	8791			
V.....	8709	8630	8660	8660	
v.....	9031	9067			
V.....	8935				

Prenons comme abscisses les numéros d'ordre des cycles et comme ordonnées les amplitudes. Tous les points v sont sur une courbe, tous les points V sur une courbe plus basse. Exception faite pour les cycles d'amplitude 8709 et 8935 qui sont les premiers des séries V : les points correspondants sont trop hauts. La distance des courbes est 300 en moyenne. Donc, toutes choses égales d'ailleurs, l'amplitude diminue quand la vitesse croît.

Fig. 4.



La forme des cycles est également modifiée : la figure 4 représente à droite un

cycle à vitesse V ; à gauche, un cycle à vitesse v . L'épaisseur du dernier cycle est beaucoup plus petite que l'épaisseur du premier. Par exemple, pour le cycle (V) d'amplitude 8290, la différence maxima des abscisses (allongements) qui correspondent à une même ordonnée (à une même charge) est 850; pour le cycle (V) d'amplitude 8660, elle est 840. Pour les cycles (v) d'amplitudes 8791 et 9067, elle est au contraire 1746 et 1831. La différence entre les cycles porte principalement sur les courbes de retour.

Voici, pour fixer les idées, les courbes qui correspondent au cycle (V) d'amplitude 8660 et au cycle (v) d'amplitude 9067. $L_0 = 1870$, on donne les allongements produits par l'adjonction de 2π :

V.	Charge.....	370	650	940	1140	1190	1110	1000	860	760	640
	Décharge.....	310	440	680	990	1190	1380	1230	1090	780	570
v.	Charge....	421	688	972	1218	1208	1121	1010	900	800	729
	Décharge.....	118	302	442	770	1325	1819	1769	1187	850	528

5. Fixation des cycles : d'une série à l'autre on prend T_0 comme variable.

— On fixe des cycles de 15π sans arrêt au bout ($T_1 = 0$), mais avec un arrêt T_0 variable avec le fil. On appelle 1000 l'allongement sur la première courbe de charge; on donne les raccourcissements et les allongements pour les autres parcours en fonction de celui-là. Voici le résultat des expériences :

$T_0 = 0$	Allongements.....	1000	1017	1028	1039	1043
	Raccourcissements..	970	1010	1027	1038	1043
$T_0 = 30$ minutes.	Allongements.....	1000	1023	1036	1044	1051
	Raccourcissements..	968	1011	1023	1035	1039
$T_0 = 1$ heure...	Allongements.....	1000	1025	1037	1043	1051
	Raccourcissements..	969	1011	1023	1028	1037
$T_0 = 24$ heures..	Allongements.....	1000	1020	1032	1039	1046
	Raccourcissements..	968	1004	1016	1025	1033

Voici maintenant les moyennes des parcours aller et des parcours retour :

$T_0 = 0$	985	1014	1028	1039	1043
$T_0 = 30$ minutes.....	984	1017	1030	1040	1045
$T_0 = 1$ heure.....	985	1018	1030	1035	1044
$T_0 = 24$ heures....	984	1012	1024	1032	1040

Ces moyennes sont à peu près les mêmes pour tous les fils. Ce résultat fort remarquable prouve à quel point la transformation qui résulte d'un parcours est stable, et à quel point aussi le fait que le fil a supporté une fois une certaine charge n'amène pas un état déterminé de la matière, la transformation continuant à se produire, à mesure que croît le nombre des parcours, quel que soit l'intervalle qui les sépare.

6. *Cycles fixés.* On laisse le fil se reposer un certain temps sous charge nulle; on fixe à nouveau le même système de cycles. — Voici le résultat des expériences pour deux fils et des cycles de 15π et de 8π .

Cycles de 15π . — Ils sont parcourus sans arrêt aux extrémités du cycle. Après quatre parcours, on laisse se reposer le fil sous charge nulle, en le retirant de l'appareil. On recommence la fixation au bout d'un temps T. Le Tableau suivant donne l'allongement sur la courbe de charge et le raccourcissement sur la courbe de décharge, par rapport à l'allongement sur la courbe de charge du premier cycle de la première série que nous appelons 1000 :

		Charge.....	1000	1015	1029	103
		Décharge.....	962	1009	1027	1038
T = 1 jour..	{	Charge.....	1040	1035	1042	1047
		Décharge.....	1014	1033	1039	1046
T = 11 jours.	{	Charge.....	1053	1048	1060	1062
		Décharge.....	1026	1045	1059	1062
T = 8 jours.	{	Charge.....	1075	1066	1074	1077
		Décharge.....	1051	1064	1072	1075

La fixation se traduit par la tendance à l'égalité des allongements sur la courbe de charge et des raccourcissements sur la courbe de décharge. La transformation de la matière se continue même lorsque le caoutchouc a subi seize parcours. On peut se demander ce que serait devenu l'allongement si les seize parcours avaient été faits d'affilée : il semble bien qu'il ne différerait pas beaucoup de celui que l'on a obtenu en espaçant les séries. Assurément, la moyenne des allongements de charge et de décharge pour le premier parcours de chaque série est plus petite que la même moyenne pour le dernier parcours de la série précédente; $1027 < 1038$, $1040 < 1046$, $1063 < 1075$. Mais, outre que ces différences sont petites, les courbes qui représentent ces moyennes en fonction du numéro d'ordre du parcours sont assez rapidement montantes au début de chacune des séries, et faiblement à la fin.

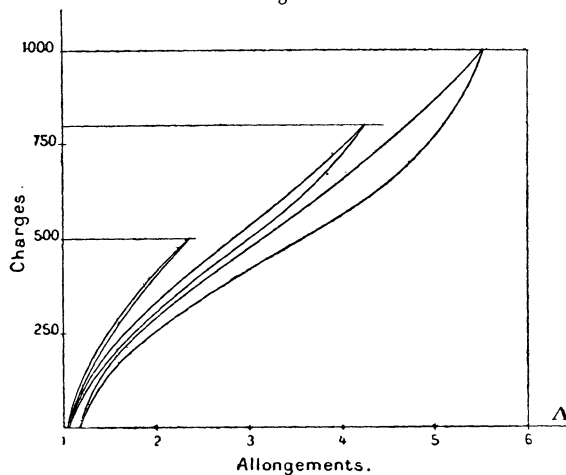
Cycles de 8π . — Même technique :

		Charge.....	1000	997	1011	1015
		Décharge.....	951	992	1007	1011
T = 1 jour..	{	Charge.....	1041	1023	1026	1031
		Décharge.....	999	1013	1024	1026
T = 11 jours.	{	Charge.....	1040	1035	1038	1045
		Décharge.....	1000	1026	1036	1043
T = 8 jours.	{	Charge.....	1051	1035	1046	1048
		Décharge.....	1010	1031	1044	1046

Mêmes conclusions.

7. *Cycles fixés, d'amplitudes variables, ayant une extrémité commune.*
Cycles décrits entre 0 et $n\pi$. — Nous allons d'abord fixer les cycles *sur des fils différents* qui n'ont pas antérieurement servi. La figure 5 montre le résultat de

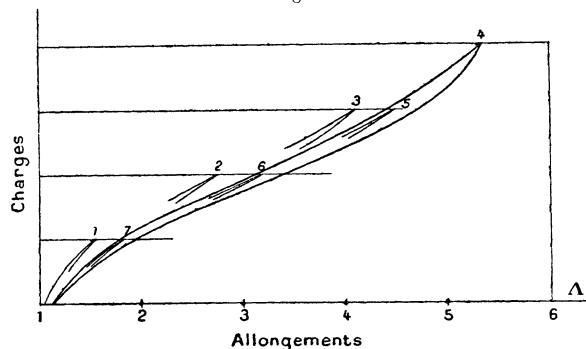
Fig. 5.



l'expérience. Les cordes ne sont jamais absolument comparables, mais les différences sont si grandes qu'on ne peut pas les imputer aux inégalités inévitables. Quand on fixe un parcours étendu, les parties du cycle qui correspondent aux faibles charges se trouvent notablement plus voisines de l'horizontalité que les parties correspondantes des petits cycles. Cependant, les déformations permanentes restent toujours faibles.

Le résultat est plus intéressant quand les cycles sont fixés *sur la même corde*, parce qu'on peut faire plus sûrement les comparaisons numériques (*fig. 6*).

Fig. 6.



On a fixé successivement sur une corde neuve des cycles de 5π , 10π , 15π , 20π , 15π , 10π , 5π . On n'a tracé sur la figure que le cycle 20π en entier, et l'on

s'est contenté des extrémités des autres pour éviter un encombrement de lignes inutiles.

Comme il est à peu près certain qu'un petit cycle fixé n'influe pas sensiblement sur la forme fixée d'un grand cycle décrit postérieurement, les cycles 1, 2, 3, 4 se disposent dans la figure 5 comme ils le faisaient pour des cordes différentes dans la figure 4. Mais il n'en est plus de même des cycles 5, 6, 7. L'influence du grand allongement et de la transformation qui en résulte se fait sentir : les parcours sont beaucoup plus inclinés.

Voici les amplitudes pour les divers cycles et leurs différences :

	Cycles de			
	5 π .	10 π .	15 π .	20 π .
Croissants.....	789	2623	4739	6711
Décroissants.....	1055	3176	5238	
Différences.....	334	447	501	

Si la différence absolue des amplitudes est plus grande pour les cycles de 15 π que pour ceux de 5 π , la différence relative est, au contraire, plus grande pour ces derniers.

Les cycles 5, 6, 7 sont plus voisins de l'horizontalité que les cycles correspondants 3, 2, 1; mais ils sont aussi plus minces; voici les différences maxima des abscisses correspondant à une même charge :

	Cycles de			
	5 π .	10 π .	15 π .	20 π .
Croissants.....	61	167	286	533
Décroissants.....	61	148	236	

8. *Cycles fixés d'amplitude variable, ayant une extrémité commune, décrits entre 20 π et $n\pi$.* — On va d'une traite à la charge de 20 π et l'on fixe des parcours entre cette charge et les charges 15 π , 10 π , 5 π et 0. Chaque expérience est faite sur une corde neuve.

$L_0 = 1870$ pour tous les fils. Voici leurs longueurs aux divers passages par la charge 20 π , c'est-à-dire aux extrémités des quatre cycles qui ont été décrits. On donne de plus la différence des longueurs pour le premier et le quatrième passage :

Cycle 20-0.	7367	7921	8131	8266	899
Cycle 20-5.	7474	7960	8132	8252	778
Cycle 20-10.	7171	7330	7411	7475	304
Cycle 20-15.	7402	7557	7637	7688	286

Si les cordes étaient identiques, les nombres de la première colonne seraient égaux; ils diffèrent peu.

Ce Tableau montre que les cycles se fixent inégalement vite et d'autant plus vite qu'ils sont plus petits : la limite à laquelle tend la longueur est elle-même d'autant plus petite que le cycle est plus petit. Il ne faut pas oublier que le petit cycle correspond tout entier aux charges les plus grandes. Il était naturel que le cycle 0-5 se fixât plus vite que le cycle 0-20; il l'est beaucoup moins que le cycle 15-20 se fixe plus vite que le cycle 0-20. On aurait pu croire qu'en revenant aux faibles charges le fil se reposerait et retournerait aux grandes avec un allongement moins augmenté.

Nous trouvons ici un premier exemple d'un fait général qui se présentera sous bien des formes. Une variation de la charge facilite toujours l'allongement. Nous verrons qu'en un temps donné la corde peut s'allonger moins sous une charge constante égale à $n\pi$ que sous une charge variable entre 0 et $n\pi$ (comparer au n° 1 du Mémoire *Sur la réactivité du caoutchouc*).

Comparons maintenant les inclinaisons moyennes des parties correspondantes des cycles : on donne dans le Tableau suivant la moyenne des allongements sur les courbes de charge et de décharge des cycles fixés, entre 20π , 15π , 10π et 5π :

Allongement moyen entre	Cycle 20-0.	Cycle 20-5.	Cycle 20-10.	Cycle 20-15.
20-15.....	1507	1461	1229	984
15-10.....	2486	2384	2089	
10- 5.....	2520	2439		
5- 0.....	1378			

Les nombres diminuent de gauche à droite sur une même ligne. A mesure que le cycle est plus petit, il est moins horizontal, quelles que soient les parties correspondantes des cycles que l'on compare.

9. *Comparaison entre un grand cycle fixé et des cycles fixés de petite amplitude compris dans le grand.* — On commence par fixer un cycle de 24π (I); puis, sur le même fil, on fixe successivement des cycles de 6π ayant pour extrémités inférieures 0, 6π , 12π , 18π (série I), 12π , 6π , 0 (série II). On fixe enfin à nouveau le cycle de 24π (II). On compare les inclinaisons et les positions des petits cycles aux inclinaisons et aux positions des parties correspondantes des grands. On donne dans le Tableau suivant les allongements pour les cycles I et II entre 0 et 6π , 6π et 12π , etc. sur les courbes de charge et de décharge et les amplitudes des petits cycles correspondants :

Allongements entre	Cycle I.		Cycle II.		Série I.	Série II.
	Charge.	Décharge.	Charge.	Décharge.		
0 et 6π ..	1465	1801	1553	1844	1489 (90)	1545 (130)
6π et 12π ..	2799	3459	2911	3760	2623 (1837)	2717 (1967)
12π et 18π ..	2350	2368	2475	2430	2037 (4835)	1727 (6049)
18π et 24π ..	1747	712	1846	744	678 (8151)	

La corde avait une longueur $L_0 = 1700$: on donne entre parenthèses la position des extrémités inférieures des deux séries de cycles fixés. Enfin, voici pour les grands cycles fixés les allongements qui correspondent aux charges 0, 6π , 12π , 18π , 24π sur les courbes de charge et de décharge :

Cycle I. .	100	1565	4364	6714	8461	7749	5381	1922	121
Cycle II..	159	1712	4623	7098	8944	8200	5770	2010	166

Comparons d'abord entre eux les petits cycles des séries I et II. Les premiers ne diffèrent des seconds que par rapport aux opérations qui les ont précédés. On pourrait croire qu'après la fixation d'un cycle de 0 à 24π , c'est-à-dire après que le fil a déjà subi les plus fortes charges, le fait de fixer le petit cycle 18π - 24π modifie assez peu le parcours fixé 12π - 18π . Cependant, l'origine de ce cycle dans la première série est 4835 et son amplitude 2037; l'origine du même cycle de la série II est 6049 et son amplitude est 1727. *La différence entre ces cycles est de même nature et du même ordre qu'entre les parties correspondantes des courbes d'aller et de retour* : c'est ce que montre immédiatement le Tableau suivant.

On donne les cycles rapportés à la même origine :

Série I. {	Charge.....	0	407	780	1124	1468	1765	2037
	Décharge...	0	463	873	1234	1548	1814	
Série II. {	Charge.....	0	362	672	990	1262	1512	1727
	Décharge...	0	409	812	1111	1368	1579	

Le cycle de la série II forme un croissant plus incurvé que l'autre, de même que la courbe de décharge est, pour les mêmes charges, plus incurvée que la courbe de charge.

Les cycles ne semblent pas tendre l'un vers l'autre, autant qu'il est possible de juger d'une pareille question. Voici quelles sont les longueurs pour 18π , quand on fixe le cycle de la série I et quand on fixe le cycle de la série II :

Série I.....	6840	6855	6874	6870
Série II.....	8253	7782	7767	7769

Le déplacement est très rapide d'abord, mais ensuite si lent qu'il est impossible de prévoir que les cycles puissent venir se confondre par la répétition.

Nous arrivons donc fatalement à cette conclusion : entre deux charges données, *il existe une infinité de cycles fixés qui dépendent des opérations antérieures*; et cela alors même que, pendant les opérations qui séparent les deux fixations, la corde n'a pas subi des charges plus fortes que celles qu'elle a subies avant la première fixation. On comprend l'importance de cette dernière proposition. Si, entre les deux fixations, le fil subissait des charges qu'il n'a jamais subies, on pourrait dire que les différences tiennent à une modification permanente due à ces charges, *à une sorte d'écroutissage qui, une fois acquis, ne peut être supprimé par d'autres déformations*. Il n'en est pas de même ici; les cycles de la série I, où l'on procède par déplacement vers la droite, sont toujours différents des cycles de la série II, où l'on procède par déplacement vers la gauche, alors même qu'on recommence plusieurs fois la série entière des opérations.

Il ne faudrait pas croire que les différences constatées tiennent à un mode incorrect de comparaison. Il suffit de construire une courbe avec les amplitudes moyennes des petits cycles fixés en ordonnées et les *allongements* qui correspondent à l'une de leurs extrémités en abscisses, pour voir qu'il existe encore une différence considérable entre les séries I et II. Les points obtenus, comme il vient d'être dit, se placent sur deux courbes nettement différentes.

Comparons maintenant les petits cycles aux parties correspondantes des grands : nous constaterons que les petits cycles sont toujours plus redressés, soit qu'on fasse la comparaison entre les mêmes charges, soit qu'on la fasse entre les mêmes allongements.

10. *Courbes de traction décrites avec arrêts intermédiaires.* — On a réalisé deux vitesses de charge : V correspond au passage de 1^m de chaîne en 2^s, 35; v au passage de 1^m de chaîne en 92^s. On décrit des cycles de 20π . Avec la première vitesse, il faut 94^s pour la charge et la décharge; avec la deuxième, il faut 61^m 20^s. On s'arrange, au moyen de huit arrêts égaux, de manière que l'opération à grande vitesse dure exactement le même temps que l'opération à petite vitesse. Ces arrêts sont donc de 7 minutes et demie environ.

Ils sont disposés de telle sorte que, pour tous les parcours, $\int P dt$ soit le même : il suffit pour cela qu'ils aient lieu pour $2,5\pi$; $7,5\pi$; $12,5\pi$ et $17,5\pi$. Ainsi, dans le parcours à grande vitesse, $\frac{1}{8}$ du temps total se passe, par exemple, à la charge de 7^m, 5; dans le parcours à petite vitesse, ce même temps se répartit régulièrement entre des charges variant linéairement en fonction du temps entre 5^m et 10^m de chaîne.

On compare les parcours ainsi obtenus. On donne, dans le Tableau suivant,

les allongements dans le parcours sans arrêt v pour les charges qui ont été indiquées ci-dessus; au-dessous, on donne, dans le parcours avec arrêt, les allongements pour les mêmes charges au commencement et à la fin de l'arrêt :

Courbe de charge.

$v \dots$	579	2467	4822	6762
$V \dots$	530-569	2352-2529	4730-4849	6659-6851

Courbe de décharge.

$v \dots$	692	2653	5309	7104
$V \dots$	661-792	2602-2720	5230-5300	7033-7000

Ainsi, autant qu'il est possible de l'espérer dans de telles expériences, les deux courbes chevauchent l'une sur l'autre, de manière que la petite horizontale à charge constante se trouve précisément sur la courbe décrite à petite vitesse uniforme. L'abscisse de la courbe v est intermédiaire entre les abscisses de la courbe V qui correspondent à la même charge. Exception seulement au début des courbes de charge et de décharge et encore cette exception tient à ce que le cycle n'est jamais absolument fixé, et aussi qu'il faut un certain temps pour changer les vitesses.

Les deux dernières lignes du Tableau doivent être lues de droite à gauche. Donc, pendant le premier arrêt ($17,5\pi$), il y a un allongement consécutif à l'arrêt. Pour les autres arrêts, il y a raccourcissement. Ce sont des phénomènes tout à fait analogues à ceux que l'un de nous a trouvés pour les courbes de torsion des fils métalliques. Nous reviendrons d'ailleurs sur ces phénomènes.

Cette expérience a une grande importance théorique. On est toujours tenté d'exagérer l'importance des perturbations, des petites irrégularités dans la vitesse de charge, etc. C'est un moyen commode pour rejeter sur l'inévitable les irrégularités de ses expériences. Or, on ne peut imaginer un dérèglement plus systématique que le précédent, et l'expérience prouve que son effet total est à peu près négligeable; le parcours conserve, en somme, même forme et même amplitude. Voici, par exemple, les amplitudes de quatre parcours; le premier, le second et le quatrième sont à la vitesse v , le troisième est à la vitesse V :

7230	7255	7269	7329
------	------	------	------

La suite régulière aurait donné, pour le quatrième, une amplitude voisine de 7283; la différence est de 46, soit 1:160. Mais le croisement n'est pas parfait; car il faut un certain temps pour changer les vitesses. De plus, l'influence des irrégularités de charge serait de moins en moins grande, à mesure que les arrêts

deviendraient plus courts et se répartiraient sur la courbe entière. On peut dire que leur action est rigoureusement nulle.

PARCOURS APRÈS RECUIT ET A TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

11. *Phénomènes entre 100° et 150°.* — L'expérience la plus grossière prouve que le caoutchouc se transforme considérablement au voisinage de 150°. Nous avons tenu à savoir quels sont les phénomènes, l'expérience ayant prouvé qu'ils restent analogues à des températures plus basses. Rendons-nous compte de ce que deviennent les propriétés mécaniques générales.

Le fil est placé dans une étuve sous charge faible; on le laisse prendre la température ambiante pendant 15 minutes; on charge alors d'un poids connu et l'on détermine la vitesse d'allongement sous charge constante. Elle diminue beaucoup moins vite qu'elle ne fait à basse température. Toutes choses égales d'ailleurs, elle augmente plus vite que la charge et croît très rapidement avec la température.

Pour avoir une idée de la variation de l'élasticité, on recommence l'expérience précédente; mais, à des intervalles réguliers, on supprime et l'on remet 100^g: on détermine l'amplitude du cycle ainsi décrit. On fait la même expérience à froid sur un autre fil et l'on compare. Voici, pour 140° et pour des charges totales P, les rapports R des allongements à chaud et à froid quand l'expérience a été réalisée plusieurs fois,

$$P = 100^g, \quad R = 1,28; \quad P = 200^g, \quad R = 1,54; \quad P = 300^g, \quad R = 2,00.$$

Ainsi, la transformation de la matière entraîne une diminution d'élasticité.

Il y a plus, à mesure que le fil s'allonge à chaud par l'effet de la tension, l'allongement et le raccourcissement pour une variation donnée de charge augmentent beaucoup plus vite que ne le veut la variation de section à supposer invariables les propriétés de la matière.

Enfin, comme nous l'avons déjà dit, il y a un allongement permanent. Il dépend de la charge et du temps que le fil est maintenu dans l'étuve. En 30 minutes sous 300^g à 140°, il atteint, par exemple, les deux tiers de sa longueur initiale. Dans les mêmes conditions, sous 300^g, la longueur du fil était 3,8 fois la longueur initiale. L'allongement élastique était donc encore plus de 3 fois l'allongement permanent.

L'expérience suivante montre que la matière se transforme par le fait, non seulement d'une température élevée, mais encore d'un allongement à cette température.

Plaçons le fil dans l'étuve, imposons-lui un certain allongement invariable et

déterminons comment varient les tensions en fonction du temps. Elles diminuent d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement. Mais voici qui est plus curieux.

A mesure qu'on part d'un allongement plus grand, le diamètre du fil est plus petit. Considérons l'instant où pour tous les fils, inégalement allongés au début, la tension est la même. Si la matière qui les forme était aussi la même, la variation de tension serait plus rapide pour le fil d'abord le plus allongé, puisque son diamètre est plus petit : or, c'est le contraire qu'on observe. Donc le fait de s'allonger à haute température transforme la matière de manière à la rendre plus apte à supporter des charges. Par exemple, à 143° , si la tension initiale est telle que le fil supporte au début 100° , en moins de 8 minutes la tension passe de 100° à 50° . Si la tension initiale est telle que le fil supporte au début 400° , il faut 45 minutes pour que la tension passe de 100° à 50° . Tandis que, dans le premier cas, on arrive en 45 minutes à la tension de 10° , on n'y arrive jamais si la tension initiale est 400° ; le fil a le temps de se durcir.

Il est difficile de préciser la nature des transformations éprouvées à haute température : la matière devient plus visqueuse, mais peu à peu le soufre en excès s'incorpore au caoutchouc, qui devient dur et cassant. La coupure du fil n'est plus collante.

12. *Effet d'un recuit entre 100° et 150° . — Influence de la durée du recuit.*

— Les fils sont préparés par 5 cycles de 5π : on les porte dans l'étuve à 148° , on les maintient un temps variable et l'on recommence à décrire 5 cycles de 5π , 4 minutes après leur sortie de l'étuve. On compare les amplitudes l et l' des derniers cycles des deux séries :

	Durée du recuit				
	0 ^h , 5.	1 ^h .	2 ^h .	4 ^h .	23 ^h .
$(l' - l) : l$	0,36	0,09	-0,26	-0,57	-0,81

Les cordes deviennent de plus en plus noires à mesure qu'elles séjournent davantage dans l'étuve. La surface diffère de l'intérieur, elle semble solidifiée. Après un séjour de 23 heures, la corde est gercée et fragile. On s'explique ainsi aisément le résultat obtenu pour les amplitudes.

Influence du temps écoulé depuis la sortie de l'étuve. — Étuve à 149° . Même préparation. Durée du recuit, 30 minutes :

	Temps après la sortie de l'étuve					
	0 ^h .	0 ^h , 5.	1 ^h .	2 ^h .	24 ^h .	48 ^h .
$(l' - l) : l$	0,35	0,33	0,31	0,27	0,08	0,08

Donc, l'état produit par le recuit, même à haute température, n'est pas permanent; une transformation se produit ensuite, qui dure des heures. La matière tend probablement vers un état limite.

Influence de l'amplitude du cycle sur l'effet du recuit. — Durée uniforme du recuit, 32 minutes. La corde est portée dans l'étuve 3 minutes après la sortie de l'appareil d'essai et refroidie pendant 57 minutes avant le second essai. On décrit 5 fois le cycle pour le fixer dans les deux essais :

	Cycles de					
	π .	3π .	5π .	10π .	16π .	20π .
$(l' - l) : l \dots\dots\dots$	0,39	0,33	0,28	0,19	0,03	0,03

L'allongement relatif du cycle diminue à mesure que l'amplitude du cycle augmente.

Les cycles sont plus aplatis après qu'avant le recuit; ils renferment une aire plus petite, quand le caoutchouc est recuit.

13. *Effet d'un recuit à 100°.* — A 100° le soufre ne fond pas encore, le caoutchouc se transforme moins profondément et moins vite qu'à 150°.

Influence de la durée du recuit. — Les fils sont préparés comme précédemment par 5 cycles de 5π ; on les recuit le lendemain et l'on fixe à nouveau le même cycle 4 minutes après la sortie de l'étuve. L'amplitude du cycle augmente :

	Durée du recuit			
	0 ^h , 5.	1 ^h .	2 ^h .	4 ^h .
$(l' - l) : l \dots\dots\dots$	0,31	0,34	0,41	0,52

L'effet est considérable et augmente avec la durée du recuit. L'aspect des cordes n'a pas changé. On s'explique que le résultat soit opposé à celui que l'on avait observé à 150°.

Influence du temps écoulé depuis la sortie de l'étuve. — Préparation : 5 cycles de 5π . Recuit le lendemain pendant 30 minutes. On fixe le même cycle des temps variables après la sortie de l'étuve :

	Temps écoulé					
	0 ^h .	0 ^h , 5.	1 ^h .	2 ^h .	4 ^h .	24 ^h .
$(l' - l) : l \dots\dots\dots$	0,33	0,27	0,23	0,13	0,07	0,07

L'état acquis par le recuit n'est pas permanent. Il est curieux que les variations soient du même ordre après un recuit à 100° ou un recuit à 150°.

Influence de l'amplitude du cycle sur l'effet du recuit. — On fixe les cycles par 5 parcours. On recuit 30 minutes; on fixe à nouveau le cycle 65 minutes après la sortie de l'étuve :

	Cycles					
	π .	3π .	5π .	10π .	15π .	20π .
$(l' - l) : l$	0,34	0,23	0,22	0,16	0,12	0,11

Contrairement à ce qui se passe à 150°, les cycles sont moins aplatis après le recuit qu'avant. En d'autres termes, la différence maxima des abscisses, pour une même charge, est plus grande quand le fil est recuit.

14. *Effet d'un recuit à 59°.* — On admettait généralement que le caoutchouc pouvait être chauffé jusqu'à 80° sans subir de modification permanente. Nous allons voir à quel point cette hypothèse est erronée.

Influence de la durée du recuit. — Même technique qu'au n° 11 :

	Durée du recuit						
	30 ^m .	1 ^h .	2 ^h .	4 ^h .	24 ^h .	51 ^h .	96 ^h .
$(l' - l) : l$	0,17	0,20	0,20	0,20	0,15	0,10	0,03

L'effet est de même sens qu'à 100°. Il y a tout d'abord accroissement de l'effet produit, puis diminution. Il ne résulte pas du tout de ces expériences que la transformation de la matière soit plus petite après 96 heures de chauffe qu'après 30 minutes. Le réactif que nous employons est complexe; rien ne dit que la même amplitude ne peut pas correspondre à des matières très différentes. Selon toute probabilité, un recuit prolongé ne détruit pas l'effet d'un recuit de courte durée : il en produit un autre, qui se traduit par des phénomènes inverses.

Influence du temps écoulé depuis la sortie de l'étuve. — Même technique qu'au n° 11.

On donne aussi, dans le Tableau suivant, la variation relative $(e' - e) : e$ de l'épaisseur du cycle, c'est-à-dire de la différence maxima des abscisses pour une même charge :

	Temps écoulé				
	0 ^h .	1 ^h .	4 ^h .	25 ^h .	50 ^h .
$(l' - l) : l$	0,17	0,15	0,12	0,09	0,08
$(e' - e) : e$	0,29	0,20	0,25	0,13	0,13

Ainsi, l'effet du recuit diminue non seulement en ce qui touche l'amplitude des cycles, mais encore leur épaisseur : ils s'aplatissent à mesure qu'augmente le temps écoulé depuis la sortie de l'étuve jusqu'à l'essai.

Influence de l'amplitude du cycle. — Même technique qu'au n° 11 :

	Cycles de					
	π .	3π .	5π .	10π .	15π .	20π .
$(l-l) : l \dots\dots\dots$	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07

De même, le rapport des épaisseurs des cycles avant et après le recuit, grand pour de petits cycles, diminue à mesure que l'amplitude augmente. Le cycle est toujours moins aplati après le recuit qu'avant.

15. *Effet d'un refroidissement dans la neige carbonique.* — Nous avons répété des expériences analogues aux précédentes en remplaçant le recuit par un refroidissement dans l'anhydride carbonique solide. On fixait des cycles de 5π et de 15π . On conservait la moitié des fils comme témoins, l'autre moitié était maintenue 45 minutes, soit dans un tube métallique complètement entouré de neige carbonique tassée, soit à même la neige. En fixant à nouveau les cycles, on trouve les mêmes résultats pour les deux groupes. L'effet du refroidissement est donc nul.

16. *Cycles fixés à des températures différentes.* — Il faut tenir compte, dans les expériences suivantes, des faits précédemment observés. Puisque le recuit produit une modification plus ou moins permanente, les comparaisons doivent porter sur des phénomènes qui se produisent à chaud et à froid après un premier recuit. On supposera donc que le caoutchouc a été porté antérieurement pendant quelque temps à la température la plus élevée qu'il doit subir ensuite.

On fixe à 60° un cycle de 23π . $L_0 = 1520$.

Voici les amplitudes sur les courbes de charge et de décharge :

7770		7902		8002		8050
	7530		7872		7981	
						8039

On laisse reposer 20 heures sous charge nulle. On croise alors systématiquement des cycles à 12° et à 60° . Voici les amplitudes sur les courbes de charge et de décharge.

$12^\circ \dots\dots\dots$	8143		8290	
		7960		8262
$60^\circ \dots\dots\dots$	8207		8173	
		8119		8159
$12^\circ \dots\dots\dots$	8589		8583	
		8392		8551

Les cycles à froid sont moins redressés que les cycles à chaud.

L'effet de la température est plus marqué sur l'aire du cycle. Déterminons la différence maxima des abscisses des courbes de charge et de décharge pour les mêmes charges. Voici d'abord les résultats pour les cycles à 60° que l'on fixe au début de la série :

820 275 260 204

Voici maintenant les résultats pour les cycles croisés :

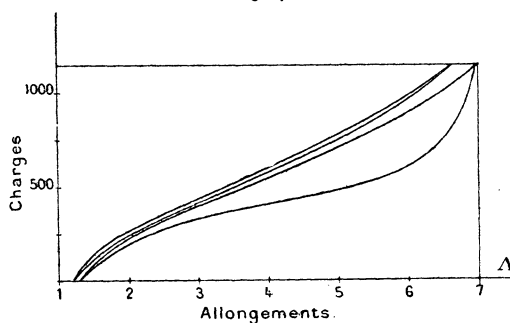
12.....	1981	2335
60.....	295	209
12.....	2400	2418

La figure 7 donne un cycle à 12° et un cycle à 60°. Le cycle à 60° est beaucoup plus aplati.

L'expérience suivante montre quelles erreurs l'on ferait en ne tenant pas compte du recuit.

$L_0 = 1885$, cycles de 12π . On fixe les cycles à froid (10° environ). On décrit

Fig. 7.



4 parcours ; voici, de 2^m en 2^m de chaîne, les allongements pour le premier, le troisième et le quatrième :

I.	{	Charge	0	252	651	1223	2018	2917	3829
	{	Décharge	170	535	1098	1856	2651	3394	
III.	{	Charge	197	488	960	1681	2548	3420	4206
	{	Décharge	208	618	1177	1972	2849	3640	
IV.	{	Charge	208	506	1000	1723	2591	3471	4268
	{	Décharge	217	614	1220	2011	2871	3671	

On chauffe à 62° ; voici les 3 premiers parcours à cette température :

V.	{	Charge	88	412	911	1643	2582	3588	4637
	{	Décharge	177	571	1130	»	2885	3827	
VI.	{	Charge	177	520	1048	1822	2762	3775	4786
	{	Décharge	192	598	1205	1960	2939	3928	
VII.	{	Charge	192	540	1084	1870	2823	3848	4832
	{	Décharge	190	617	1212	2047	2986	3971	

Voici les amplitudes pour tous ces cycles :

10°	3829	3931	4009	4060
62°	4549	4609	4640	

On pourrait conclure sans précaution, et l'on a souvent conclu, que l'effet de l'élévation de la température était d'allonger le parcours et d'augmenter son épaisseur, ce qui résulte de la comparaison des cycles IV et V. Mais déjà le cycle VII est plus aplati que le IV.

L'expérience a été continuée. Après ces deux séries, on en a fait sept autres alternativement à 10° et à 62°; elles se composaient seulement de deux parcours et il s'écoulait 1 heure entre le début des parcours. Comme ceux-ci exigent 22 minutes environ, il restait 38 minutes pour amener le fil à la température indiquée. On donne les six derniers parcours, qui sont les XVI, ... et XXI :

XVI.	10°...	{	Charge	177	538	1109	1960	3038	4138	5140
		{	Décharge	296	777	1498	4421	3481	4427	
XVII.	10°...	{	Charge	296	663	1274	2150	3218	4279	5229
		{	Décharge	317	808	1522	2463	3531	»	
XVIII.	62°...	{	Charge	200	560	1134	»	2948	3987	4950
		{	Décharge	240	658	1294	2138	»	»	
XIX.	62°...	{	Charge	240	607	1189	1999	2997	4025	4988
		{	Décharge	246	675	1275	2090	3122	4101	
XX.	10°...	{	Charge	204	578	1181	2051	3148	4251	5272
		{	Décharge	317	816	1544	2502	3550	4521	
XXI.	10°...	{	Charge	317	697	1324	2229	3319	4357	5359
		{	Décharge	330	840	1560	2530	3618	4578	

Voici les amplitudes pour tous ces cycles :

10°	4963	4933
62°	4950	4748
10°	5068	5042

Il suffit de retrancher les nombres placés l'un sur l'autre pour le même cycle, pour voir à quel point le cycle fixé à chaud est plus aplati. Voici les différences pour les parcours XIX et XXI :

Fac. de T., 2^e S., V.

Différences.	{	XIX.....	16	68	86	91	123	76
		XXI.....	13	143	236	301	299	221

Même pour les séries régulièrement croisées, il faut ne comparer que des cycles véritablement correspondants pour avoir des résultats réguliers. Ainsi, le premier cycle à chaud a une amplitude supérieure au précédent cycle à froid. Enfin, il ne faut jamais oublier que croiser des expériences revient à imaginer un ensemble périodique où interviennent plusieurs variables, et que les phénomènes dépendent de l'ensemble tout entier.

Si donc on fait varier l'une quelconque des conditions formant l'ensemble périodique, les résultats se trouvent modifiés. Il serait donc absurde de dire que les amplitudes d'un cycle donné varient dans tel rapport quand la température passe de θ_0 à θ_1 sans spécifier tout ce qui définit l'ensemble périodique, sans dire par exemple quel est le nombre des parcours, quel temps s'écoule entre leur description aux deux températures, etc.

17. Voici une expérience faite à 14° et 100° qui montre qu'à cette dernière température la transformation de la matière est déjà considérable.

$L_0 = 1870$. Cycle de 10π .

Il s'écoule 45 minutes entre le parcours des cycles; la température est modifiée aussitôt le parcours effectué.

Il faut environ 30 minutes pour que le fil atteigne la température définitive; mais comme la description du parcours exige moins de 10 minutes, on a largement le temps.

On donne, dans le Tableau suivant, les allongements de 2^m en 2^m de chaîne :

I.	$100^\circ \dots$	{	Charge	0	292	719	1332	2150	3137
			Décharge	170	532	2049	2689	2418	
II.	$14^\circ \dots$	{	Charge	153	518	1081	1910	2920	3970
			Décharge	249	711	1300	2220	3158	
III.	$100^\circ \dots$	{	Charge	158	490	983	1690	2591	3601
			Décharge	337	760	1322	2050	2853	
IV.	$14^\circ \dots$	{	Charge	317	744	1409	2360	3472	4612
			Décharge	417	950	1704	2690	3692	
V.	$100^\circ \dots$	{	Charge	317	700	1290	2116	3158	4304
			Décharge	563	1068	1719	2579	3500	

On constate, comme précédemment, que le cycle à chaud a une amplitude moindre que le cycle à froid. Voici ces amplitudes, prises sur les courbes de charge :

14°		3817		4295
100°	3137		3443	3987

Mais il y a un allongement subpermanent assez grand à chaud pour que les

parcours soient alors plus épais. Voici, d'une part, les épaisseurs maxima ; d'autre part, les distances des points de départ et de retour à charge nulle. Les parcours sont très loin d'être fermés :

⁰ 14.....		320	330	
100.....	357		360	486
14.....		96	100	
100.....	170		179	246

18. *Influence de la vitesse sur la forme des cycles à chaud.* — Pour des raisons que l'on comprendra quand nous aurons étudié la réactivité, il était important de savoir si à chaud la vitesse influe sur la forme des cycles. Les expériences ont été faites à 70°. La vitesse V est de 1^m de chaîne en 4 secondes et demie, la vitesse ν est de 1^m en 68 secondes. Les cycles sont de 18π .

On croise sur le même fil. On donne, dans le Tableau suivant, les amplitudes des parcours sur les courbes de charge. $L_0 = 1874$:

V.....	7070	7150	7210	7305	7340	7375	7420
ν	7631	7719					
V.....	7701	7660	7700	7690	7700		
ν	7912	8008					
V.....	7947	7890	7920	7910	7885	7870	

Il est incontestable que la vitesse influe cependant beaucoup moins à chaud qu'à froid.

Nous retrouvons, d'ailleurs, pour les premiers parcours des séries V, les mêmes particularités qu'à froid. Pour bien se rendre compte de la variation due à la vitesse, on construira une courbe en prenant les amplitudes comme ordonnées et le numéro d'ordre des parcours comme abscisses.

De même qu'à froid, l'épaisseur des cycles est moindre à grande vitesse qu'à petite ; mais, sur l'épaisseur aussi, l'influence de la vitesse est considérablement moindre à chaud qu'à froid.

La comparaison de la manière suivant laquelle les cycles se fixent dans les différentes séries V est intéressante. Dans la première, l'amplitude va constamment en augmentant ; dans les autres, elle diminue d'abord beaucoup pour rester à peu près stationnaire. Ici encore, les expériences à grande et à petite vitesse réagissent les unes sur les autres, et la méthode des expériences croisées se présente avec une complexité qui la rend assez hasardeuse. Nous avons un ensemble périodique d'opérations, et l'on ne peut pas distraire une seule de ces opérations sans modifier les résultats de l'ensemble entier.

