

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 9 (1936)
Heft: V

Artikel: La caoutchouc des ballons-pilotes aux points de vue physique et chimique
Autor: Berger, P
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-110633>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Le caoutchouc des ballons-pilotes aux points de vue physique et chimique

par P. Berger.

(13. V. 36.)

Résumé. Chaque jour, on emploie sur les aéroports un grand nombre de ballons-pilotes. Avant le départ, beaucoup subissent déjà une dilatation volumétrique de 9000% qui passe à 18000% à 7000 mètres environ. Les notions chimiques actuelles permettent-elles de comprendre comment un tel agrandissement est possible ?

La péllicule exerce une surpression maximum sur le gaz à l'intérieur du ballon lorsqu'il n'est que peu gonflé. Pourquoi en est-il ainsi ? Les ballons éclatent souvent à une certaine altitude. Quelle en est la cause ? Les déchirures des ballons qui ont sauté se ressemblent généralement. Est-ce un hasard ?

Les hypothèses qui sont à la base des sondages du vent en altitude sont-elles justifiées par la connaissance des propriétés chimiques et physiques du caoutchouc ?

Telles sont les questions envisagées dans cette note.

I. Introduction.

Sur chaque aéroport, la direction D et la vitesse V_v du vent à différentes altitudes, sont déterminées à l'aide de ballons-pilotes en caoutchouc, gonflés à l'hydrogène.

Les mesures sont généralement effectuées 1 à 5 fois par jour sur les aérodromes; en Suisse, ces sondages sont exécutés journalièrement à Birsfelden, Cointrin et Dubendorf.

Lorsque ces ballons sont suffisamment gonflés, ils sont lâchés et suivis à l'aide d'un théodolite spécial, leurs positions sont repérées à des intervalles de temps égaux (par exemple de minute en minute).

Si l'on admet une vitesse ascensionnelle V constante, il est très facile de déterminer D et V_v . Une des conséquences de cette hypothèse (qui n'est pratiquement pas confirmée) est qu'à une altitude arbitraire h , la forme des ballons-pilotes ne doit pas changer d'une fois à l'autre. En effet, la résistance R que l'air oppose à leur ascension est exprimée par la formule classique :

$$R = -F = S \cdot \psi \cdot \varrho \cdot V^2$$

ψ = coefficient spécifique de forme.

ϱ = poids spécifique de l'air.

S = surface du cercle équatorial du ballon.

F = force ascensionnelle disponible du ballon au départ.

A une altitude quelconque h nous pouvons admettre que F a pris une nouvelle valeur F_h . Or si à cette hauteur le ballon est tantôt sphérique, tantôt ovoïde ou allongé comme un dirigeable, ψ et S changeront nécessairement et indépendamment l'un de l'autre, sans que le produit $S \cdot \psi$ reste constant, d'où variation de V . Il y a donc lieu de vérifier l'évolution de la forme des ballons pilotes provenant de différentes Fabriques. Au sol, ce contrôle se fait aisément en les gonflant jusqu'à éclatement.

La comparaison des forces ascensionnelles F dites nécessaires pour doter les ballons-pilotes d'une certaine vitesse ascensionnelle V , met en lumière d'importantes différences (supérieures à 100%) entre les résultats obtenus par divers auteurs.

J'ai pu montrer¹⁾ que les différentes surpressions Δp à l'intérieur des ballons, fabriqués par diverses Maisons, étaient pour le moins, partiellement responsables des écarts existant entre les vitesses ascensionnelles théoriques établies par différents auteurs. Les variations de cette surpression en fonction du volume des ballons sont compliquées. Le but de cette note est de rechercher les causes des variations de Δp et de trouver l'explication d'autres phénomènes (éclatement en quelques ou en nombreux morceaux; dentelure sur les morceaux déchirés; éclatement à altitude égale de plusieurs ballons lâchés consécutivement) fréquents dans la pratique des sondages.

II. Mesures des surpressions.

Un manomètre en U est intercalé entre le mano-détendeur du cylindre d'H comprimé et la balance spéciale qui sert à tarer la force ascensionnelle; après avoir gonflé un peu le ballon, le mano-détendeur est fermé et la pression à l'intérieur du ballon est mise en communication avec le manomètre en U, ouvert à l'une de ses extrémités. Une mesure est effectuée. Le manomètre est mis « hors circuit ». Le ballon est gonflé un peu plus et on recommence une nouvelle mesure.

Dans les tableaux 1—3 les surpressions Δp sont exprimées en mm d'eau, elles ne sont réduites ni à une température, ni à une pression de référence. La forme du ballon n'étant pas une sphère parfaite, il est inutile de mesurer son diamètre à plus de 1 cm. près.

Le but primitif était de connaître les variations de la surpression Δp dans le domaine de l'utilisation pratique (dilatation

¹⁾ Archives des Sc. phys. et nat. (5. pér.), 17, 1935, p. 213.

²⁾ Archives des Sc. phys. et nat. (5. pér.), 14, 1932, p. 251—260.

Tableau 1.

<i>F</i>	\emptyset	A*	B*	C*	D**	E**	F**	G**	H**	I**	J**	K*	L**
<i>T</i>	19	19	15	15	15	—	—	19	19	19	19	19	21
<i>p</i>	727	727	724	724	724	—	—	721	717	726	726	726	721
<i>ta</i>	4	6	7	9	9	11	10	10	10,5	11	11	11	11
<i>co</i>	ve	bl	bl	ro	ro	ro	ro	ro	ro	ro	ro	ro	ro
<i>dc</i>	65	75	81	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
<i>n</i>	16	10	17	15	27	—	—	—	—	—	—	—	—
84											70		
86											15		
91											450		500
95											630	800	440
98											650		
100	280										490	590	800
120												550	570
135												530	
145												470	
150		330		500								445	
165												410	420
170												390	375
185													
190	240												
240													
266													
300													
0	—	240	280	400	340	330	300	310	335	390			375
5												380	340
10		340	305	360				310	—	405			365
15		480											
20		580	500	520									440
25		660											
30	~750	sau	790		388	240		360					490
35		sau						420	395				
50													
60													
75													

Remarques:

Ballons A, B, C, forme très variable; avant éclatement les ballons avaient la forme d'une poire. A l'éclatement, l'enveloppe fut déchirée en lanières.

Ballons D, E, les ballons restent sphériques, l'éclatement donne des lanières.

Ballons F, G, H, I, employés pour les sondages. Ballon F réchauffé 48 heures dans de l'eau à 30—35°.

Ballons J, K, les mesures furent interrompues, le manomètre ne suffisant pas.

Avant le gonflage, le ballon K fut réchauffé 10 minutes, à l'air à 40°.

Ballon L, employé pour le sondage, réchauffé 20 minutes dans de l'eau à 30°.

Tableau 1 (Suite).

<i>F</i>	\emptyset	M*	N*	O*	P+	Q ⁺	R**	S**	T++	U**	V+
	<i>T</i>	18,5	18,5	15	15	15	15	20	20	20	—
	<i>P</i>	727	727	724	724	724	727	721	725	725	—
	<i>ta</i>	12	12	18	26	31	32	31	48	57	—
	<i>co</i>	ve	ve	ro	ro	bl	ro	ro	ro	ro	—
	<i>dc</i>	140	140	140	x	200	x	x	30	30	—
	<i>n</i>	22	3	3	6	3	—	—	—	—	—
	125			430							
	160		250				100				
	170										
	180	210									
	190		210				230				
	200										
	220		180								
	250	190				195					
	260					170					
	190										
0	—	170	160	230	30	150	190	210	128	100	26
10		160									
20		145	210			122	170		124		30
25				200	35						
30		150			35						
40			207						120	83	32
50		160	300	250		120	158				
70		187	200	sau	37		156		115	75	33
80		200	208		37		156				
100		233	235		37		158	175	113	71	33
120		268	sau		35	107	162				
140		315									
150		sau			34	100	170		110	65	32
180					36		182		109	64	32
200					35	100	sau		107	63	32
300					32	102			108	64	29
400					30	110			113	65	sau
500					29	sau			125	69	
600					sau				sau	74	
700										80	
800											85

Remarques:

M, N = variations importantes de forme au cours du remplissage.

O = ballon conservé pendant un an.

Q = un défaut local a provoqué sa rupture prématurée.

R, S = ballon employé pour sondage, réchauffé 15 minutes dans l'eau à environ 30°.

S = ballon employé pour sondage.

Tableau 2.

\emptyset	petits ballons: 7 gr. (W)								ballons moyens: 28 gr. (X)			
		I	II	III	IV	V	VI	VII	I	II	III	IV
	G, H_1	H_0 00	20	40	67	82	98	111	90	27	46	61
90		405	x	260	240	250	240	x				
100		x	420	405	390	380	400	400				
110		435	390	360	360	348	362	362				
120		396	363	324	324	322	320	320				
140		348	314	285	285	285	276	276	150	x	x	x
150		—	—	—	—	—	—	—	360	x	x	x
160		316	282	262	262	256	250	250	x	x	x	x
170		—	—	—	—	—	—	—	x	318	x	305
180		290	258	243	240	238	233	233	386	329	x	327
190		—	—	—	—	—	—	—	373	314	310	312
200		268	242	229	224	220	218	218	360	300	297	299
220		247	227	216	214	210	208	208	—	—	—	—
225		—	—	—	—	—	—	—	328	272	268	270
240		x	216	209	206	203	202	202	—	—	—	—
250									300	253	248	250
275									274	237	233	235
300									254	224	219	220
325									240	213	209	206
350									232	207	204	200
	D, H_2	x	30	46	72	90	101	115	12	35	50	67
350									202	193	193	188
325									198	192	192	189
300									206	201	202	197
275									218	213	214	208
250									234	228	228	223
240		x	183	200	206	193	202	202	—	—	—	—
225		—							253	246	246	240
220		220	179	194	194	184	191	191	—	—	—	—
200		216	186	195	195	189	194	194	276	271	271	266
190		—							290	283	284	279
180		225	201	205	204	198	204	204	306	296	289	292
170		—							295	280	277	272
160		240	216	217	216	209	215	215	252	250	242	235
150		—							166	160	150	150
140		260	235	233	240	225	228	227	40	20	20	0
120		290	271	263	256	250	256	254				
110		320	300	295	284	278	290	285				
100		370	365	360	340	330	330	300				
90		255	220	250	205	160	195	190				
	$- ; H_3$	15	35	55	80	95	109	124	25	45	60	78

Dans le tableau 2, les abréviations suivantes sont employées:

 G = gonflage

I premier cycle

 D = dégonflage

II = deuxième cycle etc.

 H_0 = heure du début du premier gonflage,
prise comme origine de temps. \emptyset = diamètre en mm. H_1, H_2, H_3 , = temps en minutes écoulé depuis H_0
 $H_2 - H_1$ = durée du gonflage Δp = en mm. d' H_2O $H_3 - H_2$ = durée du dégonflage

progressive) des ballons-pilotes; c'est la raison pour laquelle dans le tableau 1, les valeurs de Δp ne sont données qu'en fonction de diamètres \varnothing de plus en plus grands. Les variations de Δp , au début du gonflage, pourraient être attribuées à la relaxation du caoutchouc et n'apparaîtraient que sur le premier cycle d'étirage. Pour élucider cette question, deux nouvelles séries de mesures furent faites:

- des ballons furent gonflés et vidés alternativement plusieurs fois consécutivement (tableau 2);
- pendant plusieurs heures, un ballon fut doté d'une force ascensionnelle disponible, maintenue constante; pendant ce temps Δp fut mesuré (tableau 3).

La température (T) et la pression (P) de l'air au cours des mesures, la tare (ta), la couleur (co), et la demi-circonférence (dc) du ballon non gonflé, de même que le nombre (n) de morceaux de l'enveloppe après l'éclatement, sont donnés en haut du tableau 1. Les nombres des colonnes \varnothing et F représentent le diamètre (en mm) du ballon plus ou moins gonflé et la force ascensionnelle disponible (en gr.). Les abréviations employées sont:

bl = blanc, ro = rouge, ve = vert, sau = sauté.

Les astéries désignent la provenance:

* désigne une fabrique,

** désigne une autre fabrique, etc.

Tableau 3.

H	0	*	*	*	*	*	*	7	42	110	190
\varnothing	80	102	125	146	176	204	226				
Fd								10	10	10	10
Δp	115	450	392	330	280	252	236	222	214	212	212

Dans le tableau 3, les abréviations suivantes sont employées:

H = temps (en minutes) écoulé depuis le début du gonflage

\varnothing = diamètre du ballon en mm.

Fd = force ascensionnelle disponible en gr.

Δp = surpression exprimée en mm. d' H_2O

III. Déchirures.

Si les ballons éclatent, étant relativement peu étirés, une dentelure se produit sur le bord de la déchirure. Cette dentelure est symétrique par rapport au point où la déchirure a commencé, elle a le caractère d'une sinusoïde d'amplitude et de période croissantes; la partie de la déchirure la plus éloignée du point de symétrie a une forme quelconque. Au voisinage du point de symétrie, la période de cette courbe «sinusoïdale» est en général

d'autant plus courte que le ballon est fortement gonflé. Si le caractère de la déchirure reste le même, quelle que soit la provenance du ballon, son allure change cependant un peu comme le montre la fig. 1 [en (a) déchirure d'un ballon moderne; en (b) déchirure d'un ballon qui avait éclaté en 1930].

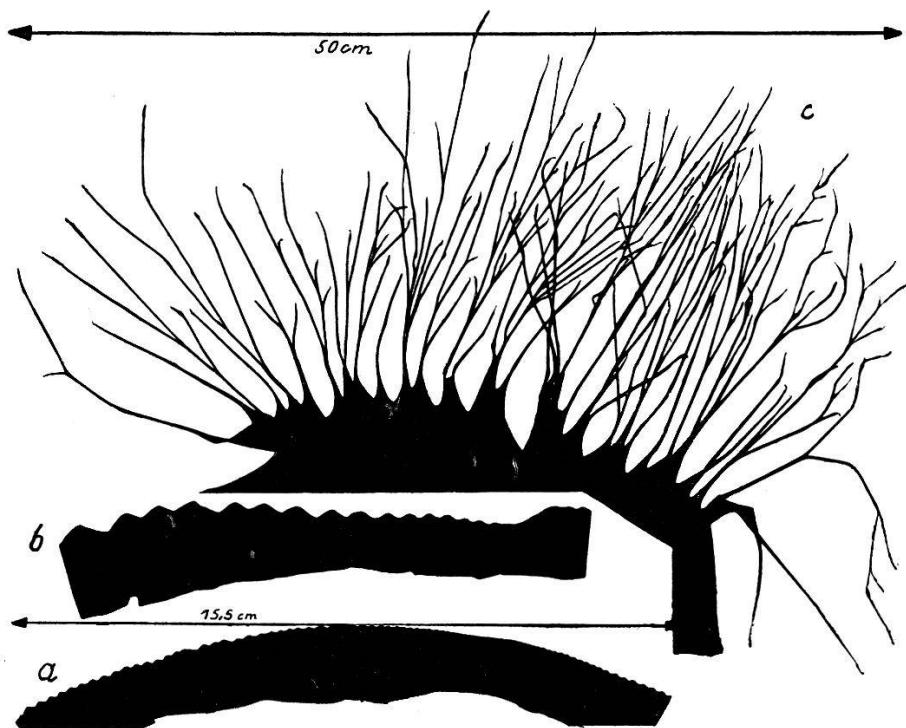


Fig. 1.

Si les ballons sont très dilatés au moment de l'éclatement, la déchirure est souvent accompagnée de nombreuses lanières (ballons A, B, C, D et E du tableau 1). Ce phénomène ne se produit pas seulement au sol, à température normale, mais aussi à haute altitude, par basse température; la fig. I (c) en est une preuve. Ce ballon a éclaté vers 10000 m en mars 1936; il fut lâché à Dubendorf et retrouvé à Peterzell (depuis plusieurs mois, le poste météorologique de l'aéroport de Zurich attache une carte à chaque ballon-pilote sur laquelle la date du sondage est mentionnée; il demande que les morceaux retrouvés lui soient retournés).

Le tableau 4 donne quelques détails sur les dentelures des déchirures. Les titres des colonnes (étant trop longs pour être écrits en entier) sont donnés ici:

Colonne 1 = échantillon No.

2 = longueur en mm. de la demi-déchirure dentelée

3 = longueur en mm. de la période de la «sinusoïde», à 2 cm. du point de symétrie

4 = amplitude en mm. de la «sinusoïde», à 2 cm. du point de symétrie

5 = longueur en mm. de la période maximale

6 = amplitude maximale en mm.

Tableau 4.

1	2	3	4	5	6	déchirures
1	90	3	1	12	4	circulaires
2	50	7	2	8	3	circulaires
3	190	5	2	17	6	rectilignes
4	140	8	2	12	3	rectilignes
5	95	1	0,8	7	3	rectilignes
6	110	1	0,4	6	3	rectilignes
7	140	1,5	0,4	4	2	rectilignes
8	95	1,0	0,8	7	3,5	rectilignes
9	150	1,0	0,4	6	2,0	rectilignes

Les échantillons 1—4 correspondent à des ballons qui avaient éclaté en 1930; les autres sont de 1935.

IV. Eclatements prématurés.

Au cours des sondages, malheureusement il arrive assez souvent que les ballons éclatent prématûrement. Il ne faut cependant pas oublier que déjà au départ ils ont subi une dilatation volumétrique de plus de 8000% pour les ballons de 11 à 32 gr. Si un ballon a éclaté trop tôt et si un second sondage est fait immédiatement après, il arrive que le deuxième ballon saute à la même hauteur que le premier, de même un troisième. Je n'ai pas eu le loisir de lâcher un quatrième ballon dans ces cas spéciaux, mais je suppose qu'il aurait eu le même sort. L'éclatement prématué de deux ou trois ballons quasi à la même altitude exclut le hasard, à mon point de vue.

V. Composition du caoutchouc.

Les diverses fabriques qui livrent des ballons-pilotes, n'indiquent pas la composition chimique du caoutchouc vulcanisé qu'elles emploient.

VI. Constitution chimique du caoutchouc.¹⁾

J'admet sans autres les remarquables résultats obtenus ces dernières années par les chimistes; dans les grandes lignes leurs conclusions sont que;

1. L'élasticité remarquable du caoutchouc, formé de restes d'isoprène, a son siège dans les molécules.

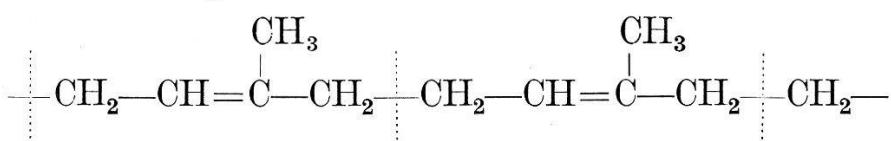
¹⁾ Je remercie bien vivement M. le Dr. CASTAN, chimiste, pour l'intérêt qu'il a porté à cette étude et pour les nombreux conseils qu'il a bien voulu me donner.

2. Le caoutchouc, légèrement vulcanisé, se compose d'un système réticulaire à grandes mailles, dû à la vulcanisation, dans lequel se trouve encore du caoutchouc pur; il y a donc lieu d'analyser l'un et l'autre.

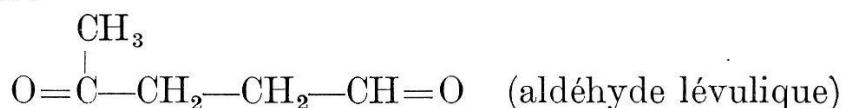
Pour comprendre les phénomènes signalés aux paragraphes II, III et IV, il est nécessaire d'analyser la constitution du caoutchouc.

VII. Caoutchouc non vulcanisé¹⁾.

Sa composition chimique est exprimée par la formule $(C_5H_8)_n$; les valences se répartissent de la manière suivante:



Sous l'influence de l'ozone (formé ou désagrégé par des rayons ultraviolets de différentes longueurs d'ondes) ces restes d'isoprène se transforment en ozonide, qui décomposé par H_2O donne principalement:



La suppression des doubles valences entre les atomes de C peut être une cause de la disparition de l'élasticité. Les atomes ont pour ϕ : C = 1,54 Å; H = 2,58 Å. La distance entre les atomes de C et de H est de 1,08 Å. Les sphères d'action des atomes de H ne peuvent se pénétrer; elles pourraient ainsi limiter le degré de rotation possible entre les atomes de C, liés entre eux, par simple valence. On admet que des restes d'isoprène forment des chaînes flexibles, à valences principales, en configuration-cis; cette hypothèse est en harmonie avec les röntgénogrammes. Les atomes de C forment le « squelette » des chaînes, ceux d'H les enveloppent. La forme en spirale de la molécule de caoutchouc est actuellement rejetée.

Les restes d'isoprène pourraient avoir deux formes: l'une ramassée, l'autre allongée. La forme ramassée serait caractérisée par 3 contacts, deux à deux de 6 atomes d'H appartenant à 3 atomes de C. Sous cette forme, les chaînes seraient en vrac; peut-être pourraient-elles se recroqueviller en spirale.

¹⁾ a) H. MEYER u. H. MARK, Der Aufbau der hochpolymeren organischen Naturstoffe, Akad. Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig 1930, p. 189—204;
b) MARK jr., Die Struktur des Kautschuks u. d. Mechanismus d. Elastischen Dehnung (Chem. Zentralblatt 1935, Nr. 23, Bd. I, 3531) (Amer. chem. Soc. **56**, 2757—2770, 1934).

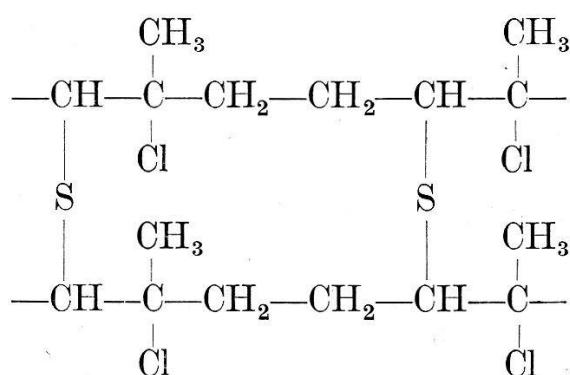
La contraction semble due aux forces de van der Waals des atomes d'H et aussi aux doubles liaisons. Pour obtenir la forme allongée, il faut fournir un certain travail contre ces forces de van der Waals. Si l'allongement est suffisant, les chaînettes sont parallèles, mais plus ou moins systématiquement décalées, il faut en prendre 6 (formant un corps élémentaire, parallélépipède de: $8,1 \cdot 8,3 \cdot 12,3$ Å de côté) pour retrouver la même symétrie.

L'étude röntgénographique d'un film de caoutchouc indique qu'il est amorphe à l'état normal. Si ce film est suffisamment étiré (au moins 80%) on obtient un diagramme de corps cristallin, dont les cristallites (parallélépipèdes d'environ $600 \cdot 500 \cdot 150$ Å) forment de petits domaines épars à l'intérieur desquels les atomes sont symétriquement distribués. L'analyse des diagrammes pris sous divers angles montre que les cristallites ne sont pas seulement orientées dans le sens de la traction, mais aussi dans deux autres directions, perpendiculaires entre elles et perpendiculaires à la première. La résistance à la rupture, parallèle à l'axe de tension, est plus grande que dans les autres qui lui sont perpendiculaires. Lors de l'étirage du caoutchouc, le dégagement de chaleur, dû à l'effet Joule, croît avec l'allongement, de même que l'intensité des interférences. Si la traction diminue, peu importe que ce soit par variation de température ou par diminution de longueur, les interférences disparaissent.

La quantité de chaleur (10 cal par gr.) dégagée au cours d'une extension complète d'une éprouvette de caoutchouc est égale à celle libérée lors de la formation des cristallites.

VIII. Caoutchouc vulcanisé.¹⁾

Au cours de la vulcanisation, les molécules de chlorure de soufre s'additionnent sur les doubles valences des chaînes d'isoprène et établissent des ponts de soufre entre ces chaînes.



¹⁾ Sur l'élasticité du caoutchouc par K. H. MEYER et C. FERRI (Helv. Chimica Acta 1935, volume 18, p. 570—589).]

On peut admettre que le caoutchouc faiblement vulcanisé se compose :

- a) d'un système réticulaire irrégulier et clairsemé de chaînes d'isoprène reliées entre elles par des ponts de soufre.
- b) de très nombreuses chaînes d'isoprène encore « libres ».

Ces ponts de soufre diminuent la possibilité de glissement des molécules les unes par rapport aux autres.

La tension du caoutchouc légèrement vulcanisé et étiré varie suivant l'allongement Δl et la température :

- a) $\Delta l < 10\%$: la tension diminue si la température augmente.
- b) $\Delta l = 10\%$: la tension est indépendante de la température.
- c) $\Delta l > 10\%$: la tension augmente si la température croît.

Ces propriétés spéciales seraient dues à la dilatation thermique ordinaire et à la propriété particulière du caoutchouc de se contracter.

IX. Relaxation.

La tension du caoutchouc pur étiré diminue avec le temps (les chaînes d'isoprène glissent peu à peu les unes par rapport aux autres; en vrac leurs forces attractives sont faibles); c'est le phénomène de la relaxation. La vulcanisation a pour effet de la limiter; la relaxation est plus rapide à haute qu'à basse température. Le phénomène inverse existe. Si on diminue brusquement l'allongement, on constate que la traction augmente de nouveau peu à peu. Ces deux effets peuvent s'expliquer ainsi :

Sous l'effet de la traction, toutes les chaînes sont orientées, en particulier celles du système vulcanisé. Les autres sont d'abord entraînées par frottement, puis orientées et peu à peu, l'une après l'autre elles glissent et se remettent en vrac.

Si la traction cesse, les longues chaînes du système vulcanisé se contractent. Par frottement, elles entraînent les autres, les compriment et ensuite les chaînes libres glissent à nouveau et permettent une nouvelle contraction.

X. Interprétation des faits.

Il est utile de rappeler ici que les résultats obtenus à l'aide d'une lamelle de caoutchouc pourraient être généralisés pour un ballon-pilote¹⁾. Cette analyse le confirme également.

La fig. 2 représente la surpression Δp :

1^o en fonction de r^2 (courbe continue) exprimée en dm^2 ;

¹⁾ Archives sc. phys. et nat. 1932, p. 263, 5e pér. 14.

2^o en fonction de la traction t_s par mm² de la section (courbe pointillée); cette traction est exprimée en % de sa valeur initiale; pour les 2 ballons I et Q.

Dans une analyse antérieure¹⁾ il a été établi que la surpression Δp provoquait une certaine tension du caoutchouc. La relation mathématique entre ces 2 grandeurs est:

$$f_c = \frac{\Delta p \cdot r}{2} \quad ^{2)} \quad (\text{la tare est négligée})$$

f_c = traction par unité de longueur l sur un grand cercle.

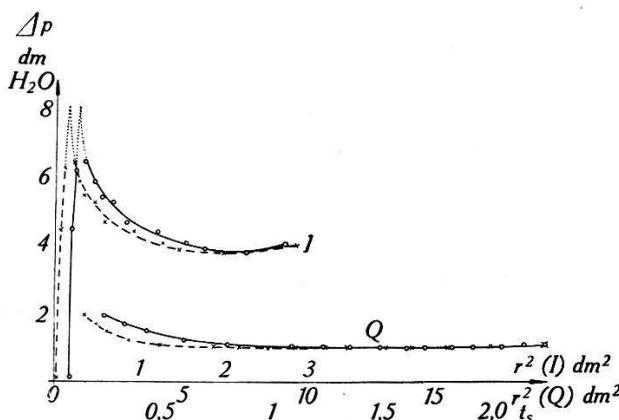


Fig. 2.

Connaissant f_c , il suffit de déterminer l'épaisseur δ de la pellicule du ballon pour obtenir t_s . Au cours d'un essai, δ ne peut être mesuré mais est aisément calculé à partir de δ_0 (épaisseur de la pellicule le ballon n'étant pas encore gonflé) et de la surface S du ballon. Nous avons:

$$S_0 \delta_0 = S \cdot \delta$$

$(S_0 = \text{surface du ballon non dilaté})$

d'où

$$\delta = \frac{4 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot \delta_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{r_0^2 \delta_0}{r^2}$$

le produit $l \cdot \delta$ est la surface sur laquelle s'opère la traction f_c ; pour avoir t_s , il suffit de diviser f_c par $l \cdot \delta$, or $l = 1$, d'où

$$t_s = \frac{\Delta p \cdot r}{2 \cdot \delta} = \frac{\Delta p \cdot r^3}{2 r_0^2 \delta_0} = C \cdot \Delta p \cdot r^3$$

$(C = \text{constante}) = \frac{1}{2 r_0^2 \delta_0}$

¹⁾ Archives sc. phys. et nat. 1932, p. 259, 5e pér. 14.

²⁾ Cette équation est de forme identique à celle qui exprime la pression à l'intérieur d'une bulle de savon.

Les mesures de δ_0 ne présentent pas toutes la précision désirable; pour cette raison t_s n'est pas exprimé en gr/mm².

La courbe I de la figure 2 peut être divisée en 3 secteurs;

1er secteur: entre l'origine et Δp maximum.

2ième secteur: entre Δp maximum et Δp minimum.

3ième secteur: à droite de Δp minimum.

La courbe Q correspond à la seconde partie du deuxième et au troisième secteur.

Au cours d'un cycle, les variations de t_s sont difficiles à expliquer. Les quelques notes suivantes ne sont qu'une tentative d'interprétation des faits.

Dès le début une certaine force est nécessaire pour:

- a) dérouler les chaînes en vrac;
- b) étendre celles qui sont vulcanisées et qui entraînent les autres par frottement, puis maintenir les restes d'isoprène à l'état allongé;
- c) vaincre les résistances au glissement des chaînes les unes par rapport aux autres;
- d) en chaque point du ballon, orienter les chaînettes étirées parallèlement au plan qui est tangent.

En un endroit quelconque de l'enveloppe, pour une raison également quelconque (par exemple épaisseur de l'enveloppe), les chaînes pourraient s'orienter parallèlement à un axe. Il semble possible qu'il puisse exister temporairement plusieurs plages géométriquement organisées, avec chacune son axe propre d'orientation. Au gonflage, tous ces axes auraient la tendance à devenir parallèles et à s'orienter verticalement, car le ballon se dilatant, tire de plus en plus sur son point d'attache. Les forces a—d agiraient seules pour de très faibles allongements seulement; elles changeraient la position relative des restes d'isoprène mais ne modifieraient pas l'édifice moléculaire; ensuite cet édifice se transformerait plus — ou tout au moins aussi — facilement que ne se produirait un nouveau glissement des chaînettes. C'est dès ce moment que les forces de VAN DER WAALS, de même que la rotation des valences simples des atomes de C joueraient un rôle. A partir d'un allongement un peu plus grand, les atomes de C et de H seraient de plus en plus sollicités à s'écartier de leur position naturelle d'équilibre. Dès que ce degré d'étirage est atteint une certaine cristallisation n'est pas exclue. D'autre part, sous l'effet d'un allongement moyen important, certaines chaînes d'isoprène trop étirées peuvent se rompre ou glisser simplement et provoquent ainsi un affaiblissement relatif de t_s .

Si la dilatation est suffisante (pour le moins, au delà de Δp minimum), il pourrait se produire un nouveau changement dans l'édifice moléculaire; ce serait la déformation des angles tétraédriques du C.

Après avoir été très dilaté, si on laisse le ballon se contracter à nouveau, à cause de la relaxation, il est naturel que la pression soit moins forte que précédemment.

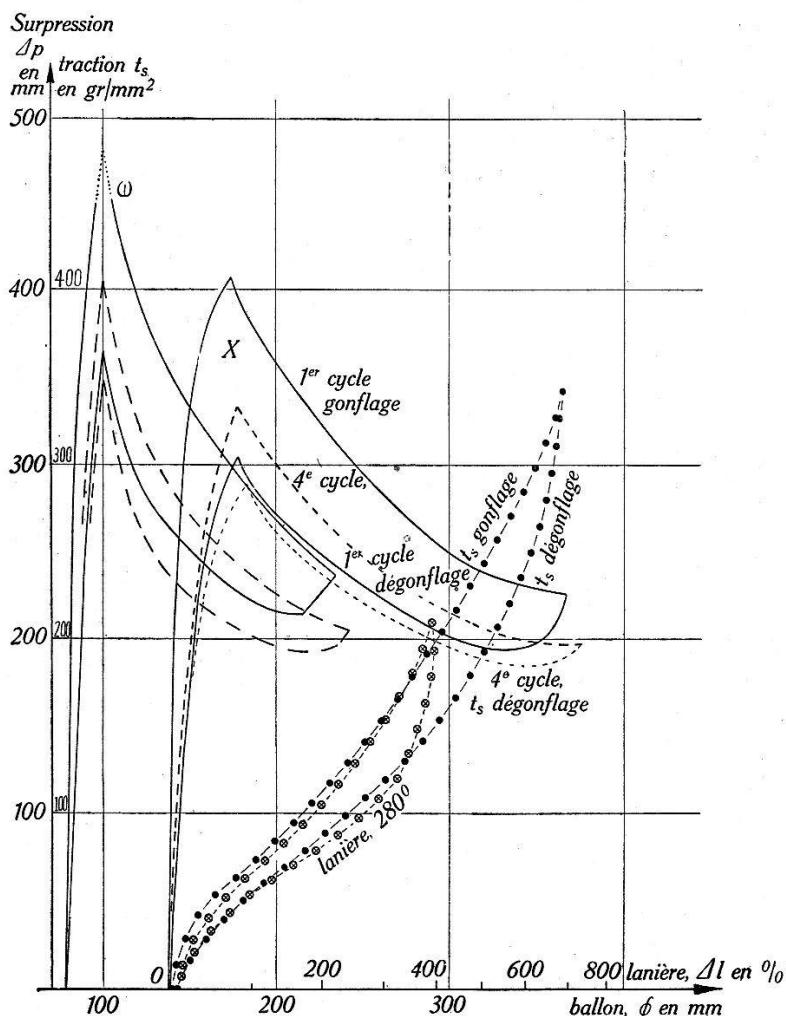


Fig. 3.

En résumé; les variations étranges de Δp se ramènent aisément à celles déjà étudiées de t_s à l'aide de l'équation:

$$\Delta p = t_s \cdot C \cdot r^3;$$

la traction opèrerait alternativement sur les restes d'isoprène, puis sur l'édifice moléculaire ou sur les 2 à la fois.

La fig. 3 représente: les Δp des premiers et quatrièmes cycles de gonflage et dégonflage des ballons W, X en fonction du diamètre ϕ ; les tractions t_s par mm^2 dans la pellicule du ballon X et dans une lanière en fonction des allongements Δl ; les Δp et les t_s sont portés en ordonnées; les ϕ et les Δl en abscisses.

Remarquons que les variations de Δp sont d'autant plus grandes que le rayon de courbure du ballon est petit; le « coude » en *C* de la lanière correspond au Δp maximum du ballon-pilote. Les variations de la traction en fonction de l'allongement de la lanière ont même caractère que celles correspondant à la dilatation du ballon; les différences proviennent probablement de la composition chimique des deux échantillons employés et des températures différentes au cours des expériences.

Examinons les déchirures:

La fig. 1b nous montre un cas typique: la déchirure s'est produite sur un parallèle, donc perpendiculaire à l'axe d'étirage maximum; ce ballon était arrimé dans le bureau. Elle correspond aux conclusions tirées des expériences faites en laboratoires. Les dentelures sont-elles dues à la cristallisation ou sont-elles la conséquence de la vibration de l'air au cours du déchirage? Actuellement il n'est pas possible de trancher cette question, mais en tout cas, la déchirure a eu lieu dans le sens de la moindre résistance probable. Les lanières de la fig. 1c ne sont-elles pas des « dentelures » très déformées? Ces lanières ne restent pas planes; elles sont toutes enroulées du côté intérieur du ballon, soit en spirale, soit sur un bord. A la base de ce morceau (la moitié seulement est représentée) il y a une 30e de larges bandes qui se ramifient ensuite en près de 300 étroites lanières. Les restes du ballon représentés en 1^e permettent de croire que les propriétés du caoutchouc sont différentes sur les deux faces de la pellicules. Les hypothèses précédentes n'expliquent pas ce fait, mais ne serait-il pas dû à la méthode de fabrication? Ces lanières matérialisent-elles en quelque sorte les fibres du caoutchouc? Les éclatements prématurés des ballons-pilotes, aux diverses altitudes ne semblent pas provoqués par une cause unique. A haute altitude (supérieure à 10000 m. par exemple) les éclatements répétés des ballons, à un niveau constant, semblent dûs à l'ozone formée par les rayons ultra-violets. D'après REGENER¹⁾ la masse totale de l'ozone, pour nos latitudes se répartit dans l'atmosphère de la manière suivante:

$$\begin{aligned} & 12-14\% \text{ jusqu'à } 10 \text{ km.}; \quad 36\% \text{ jusqu'à } 20 \text{ km.}; \\ & \quad 70\% \text{ jusqu'à } 30 \text{ km.} \end{aligned}$$

avec une concentration maximale vers 24000 mètres.

La désagrégation du caoutchouc par l'ozone serait d'autant plus grande que ce phénomène dure longtemps. Des essais en laboratoire ont confirmé cette hypothèse. Ceci nous expliquerait

¹⁾ Beiträge zur Physik der freien Atmosphäre, **22**, 1935, p. 257.

pourquoi les ballons qui montent vite atteignent des altitudes plus grandes que ceux qui se déplacent lentement.

La suppression des doubles valences entre les atomes de C pourrait être une des causes de la disparition de l'élasticité du caoutchouc. A faible altitude, les importantes inversions thermiques sont peut-être responsables des éclatements prématurés. Elles expliqueraient aussi pourquoi les ballons lâchés à courts intervalles éclatent souvent à la même hauteur. Dans certains cas, il se pourrait que l'élévation de température, au sein de l'inversion, provoque une augmentation suffisante de t_s pour que le ballon saute. Le caoutchouc est très sensible à la température comme le prouve le « remède » employé si fréquemment sur les aéroports. Si un ballon se dilate irrégulièrement, on applique simplement la main à l'endroit où il se distend. La chaleur de la main est suffisante pour provoquer une augmentation de la tension du caoutchouc en cet endroit; par la suite le ballon se dilate normalement. On admet aussi souvent que les couches d'ozone sont une des causes de formation de zones de température relativement élevées. Dans ces cas, les deux effets mentionnés ci-dessus s'additionneraient. La relaxation du caoutchouc vulcanisé des ballons-pilotes employés en 1935, est donnée dans le tableau 5.

Tableau 5.

Durée de l'étirage en min.	10	20	30	40	50	60	70
Allongement Δl en % . .	4,0	5,5	6,25	6,75	7,14	7,50	7,75
Variation de Δl	4,0	1,5	0,75	0,50	0,29	0,27	0,25

Sous l'effet d'une surpression quasi-constante, les ballons-pilotes se dilatent plus vite à l'origine du sondage que dans la suite. Un ballon-pilote étant gonflé, si un sondage doit être remis de 15 à 30 minutes pour une raison quelconque (grain par exemple), il est donc probable que son volume augmentera par suite de la relaxation, à moins que les pertes par diffusion viennent compenser exactement l'augmentation de volume.

La variation de la relaxation est donc une cause qui doit modifier la vitesse ascensionnelle.

XI. Eclatement.

Un examen rapide de la ligne n du tableau 1 permet de constater que les ballons n'éclatent pas tous de la même manière. Il semble qu'il soit possible de les grouper en deux catégories:
a) ballons qui éclatent en quelques morceaux seulement par suite d'un défaut local de la pellicule (courbe a de la fig. 4);

b) ballons qui éclatent en plusieurs morceaux dont quelques uns sont déchirés en lanières. Ces cas semblent correspondre aux ballons-pilotes dont l'enveloppe est très homogène (courbe *b* de la fig. 4). La tare en gr. des ballons pilotes est portée en ordonnée sur la fig. 4.

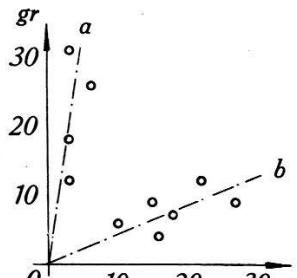


Fig. 4.

XII. Conclusions.

Les variations de Δp peuvent se ramener à celles déjà étudiées de t_s .

Les connaissances chimiques actuelles permettent de se former quelques idées sur les causes des variations de Δp . L'influence de l'ozone sur le caoutchouc est peut-être la raison pour laquelle les sondages thermiques sont arrêtés généralement à une altitude inférieure à 32—34 km.

Certaines couches d'inversion à basse altitude sont probablement responsables des éclatements prématurés répétés. La relaxation du caoutchouc modifie la vitesse ascensionnelle, de même que toutes les inversions thermiques. Cette vitesse dépend aussi de Δp . Elle n'est donc pas constante; au cours des sondages elle est encore fortement modifiée par les composantes verticales des courants ascendants ou descendants (le foehn, par exemple).

Station centrale suisse de météorologie, Zurich.