



# Olympiades de physique Paris 2004

## C'est gonflé !

ou : Que se passe-t-il lorsque l'on gonfle un ballon de baudruche?

Travail réalisé par des élèves de Terminale S du Lycée Jean Rostand

Maud SARAZIN  
Sandrine MOSSER  
Gaëtan BLANCK

Plan du compte rendu

## I. Introduction

## II. Expériences d'étirement d'une portion de caoutchouc d'un ballon

1. Première série
2. Deuxième série

## III. Expérimentation du gonflage de ballons

### A. Première approche

1. Mesure au pressiomètre
2. Nouveau capteur, le manomètre à eau
3. Principe de la mesure des pressions

### B. Mesures au manomètre à eau

1. Phase de gonflage
2. Points d'équilibres
3. Phase de dégonflage

## IV. Interprétation microscopique des phénomènes se produisant lors du gonflage d'un ballon

## V. Etude de la perméabilité de la membrane d'un ballon en fonction de différents gaz

1. Expérience avec l'air
2. Expérience avec l'hélium
3. Expérience avec le dihydrogène
4. Constatations

## VI. Conclusion

---

### Remerciements :

Nous tenons à remercier M. Humbert proviseur par intérim de notre lycée, M. Roger Legras professeur à l'université catholique de LOUVAIN, M. Michel Renaud expert dans la fabrication de gant en caoutchouc chez MAPA, M. Plumeré Pierre responsable du laboratoire de la raffinerie de REICHESTETT (Compagnie Rhénane de Raffinage) qui nous a permis de réaliser les expériences de gonflage avec différents gaz ainsi que M. Schlosser qui nous a encadré.

---

## I. Introduction

Cette idée d'étude sur les ballons a germé dès mi-2002 suite à une proposition de M.Schlosser, notre professeur de sciences physiques en classe de seconde dans l'option physique et chimie de laboratoire.

En classe de première S, il nous fallait décider d'un sujet de TPE. Nous nous sommes alors rappelés cette proposition et trouvions original et intéressant de nous pencher sur un problème pour lequel nous n'avions que des idées préconçues, d'autant plus qu'il n'est pas traité dans les revues de vulgarisation scientifique, et encore moins dans les manuels scolaires.

Dans notre prime jeunesse nous avons fait l'expérience (tout comme vous sans doute) que gonfler un ballon n'est pas aussi facile qu'il n'y paraît. A ce moment là, l'aide d'une personne plus âgée nous était indispensable pour amorcer le gonflage. Pourquoi n'avions nous pas le souffle nécessaire au départ ? A quoi sont dues ces difficultés ? Que se passe t-il lors du gonflage d'un ballon ?

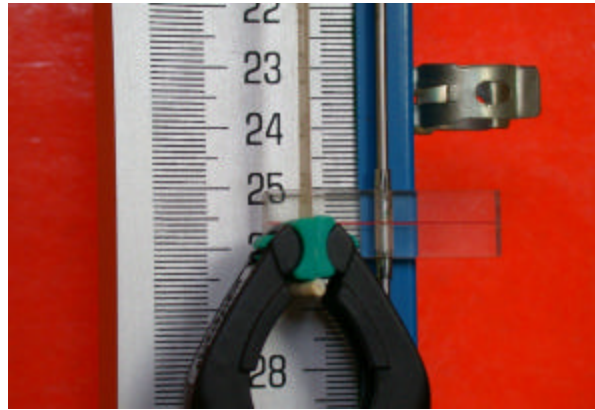
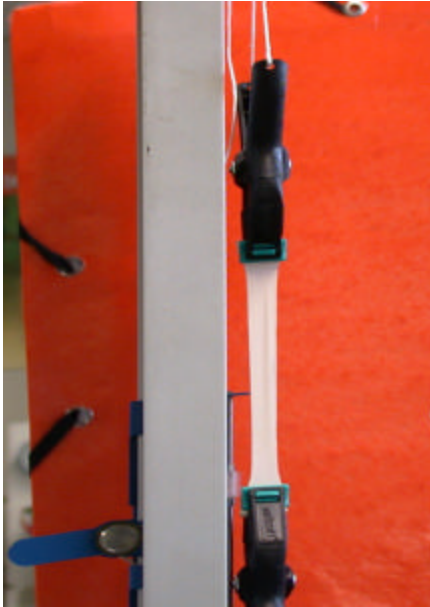
## II. Expériences d'étirement d'une portion de caoutchouc d'un ballon

Pour répondre à notre question nous nous sommes intéressés dans un premier temps à l'influence de l'élasticité du caoutchouc. Dans cette optique, nous avons eu l'idée d'étudier le comportement d'un échantillon de caoutchouc découpé sur un ballon et soumis à un étirement vertical.

### 1. Première série :

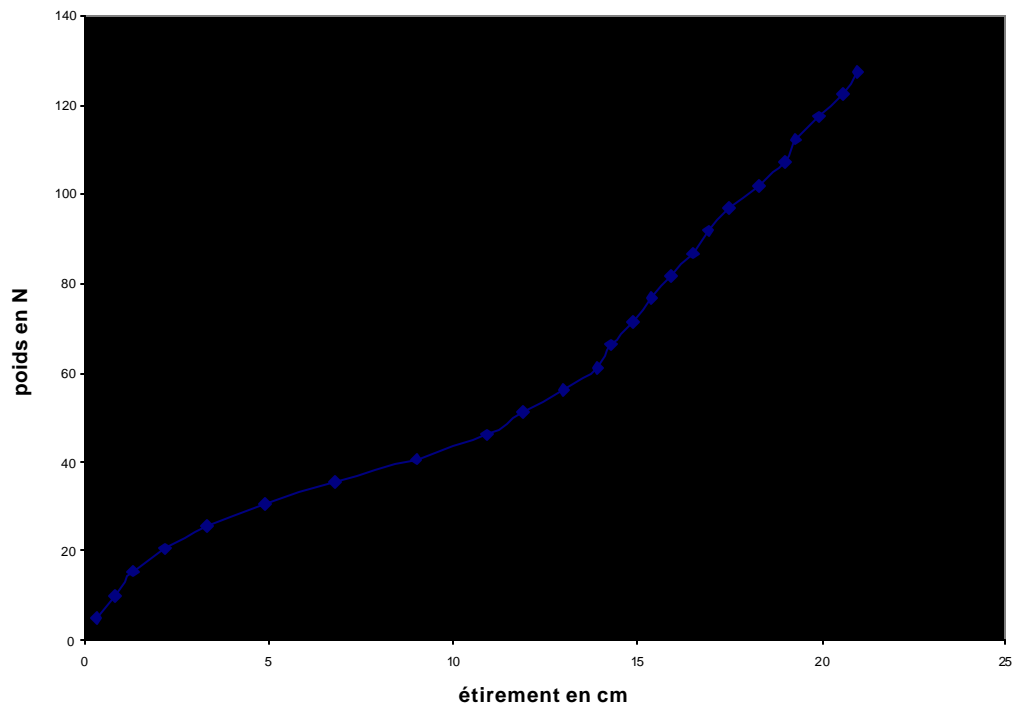
#### a. Mesures

Nous avons attaché à l'aide de deux pinces un échantillon de caoutchouc de quelques centimètres. Ce montage est fixé verticalement devant une règle graduée. Les masses sont suspendues à l'extrémité inférieure du montage, celles-ci étant rajoutées au fur et à mesure. La lecture s'effectue grâce à un onglet augmentant la précision de celle-ci.



Après plusieurs séances d'essais, nous obtenons la courbe suivante montrant l'extension de notre échantillon en fonction des masses attachées. De toutes nos mesures nous avons retenu celle-ci car elle est précise, étendue et présente très bien la caractéristique des courbes obtenues.

**Poids exprimé en fonction de l'étirement  
de l'échantillon de caoutchouc**

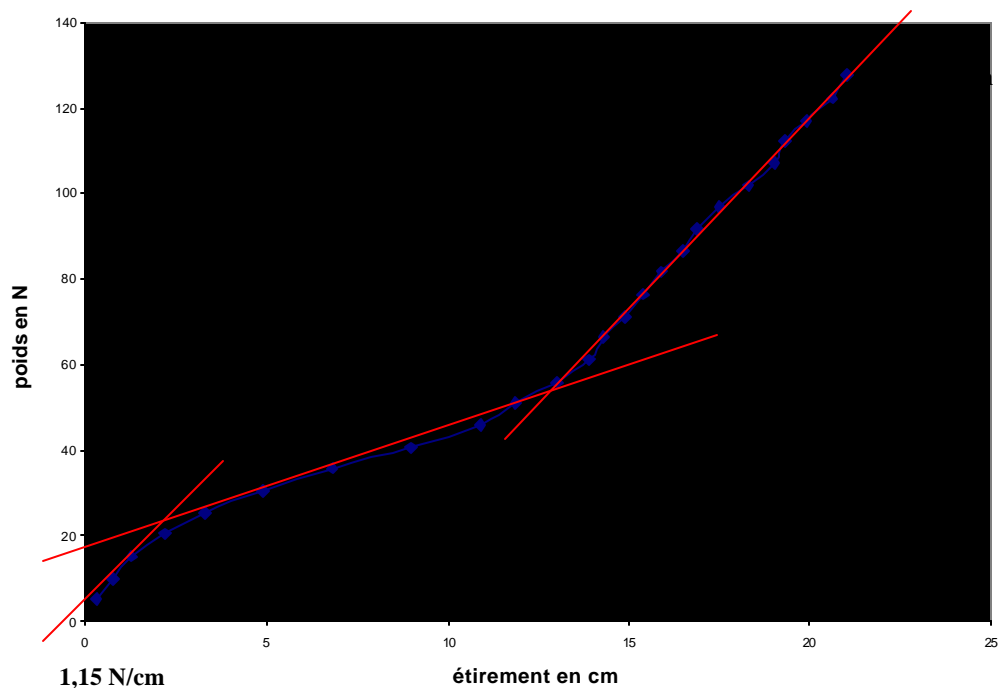


## b. Observations

Notre morceau de caoutchouc n'a pas le même comportement qu'aurait un ressort dans les mêmes conditions d'étirement. En effet nous savons qu'un ressort a un comportement du type  $F=k*x$  (où  $x$  représente l'allongement -appelé ici étirement - du ressort et  $F$  la force de rappel). Ce comportement n'est pas du tout applicable à nos données. Cependant en faisant une approximation linéaire de nos premières mesures d'étirement nous obtiendrions un ressort ayant comme constante de raideur environ  $70\text{ N.m}^{-1}$  dans les premiers temps de l'étirement.

Nous avons comme supposition que la difficulté de gonfler un ballon était liée à la résistance du matériau à l'étirement. Si l'échantillon de caoutchouc avait un comportement analogue à celui d'un ressort, la difficulté à gonfler le ballon resterait constante. Or il n'en est rien, ce que montre la courbe précédente, puisqu'on peut observer trois temps caractéristiques. Modélisés par les droites sur la courbe suivante.

**graphique du poids suspendu en fonction de l'étirement**



Nous pouvons discerner trois phases dans l'étirement ; celles-ci pourraient correspondre à des phases du gonflage. Le gonflage serait, d'après la pente des droites, plus difficile au début que par la suite et redeviendrait plus difficile dans un troisième temps.

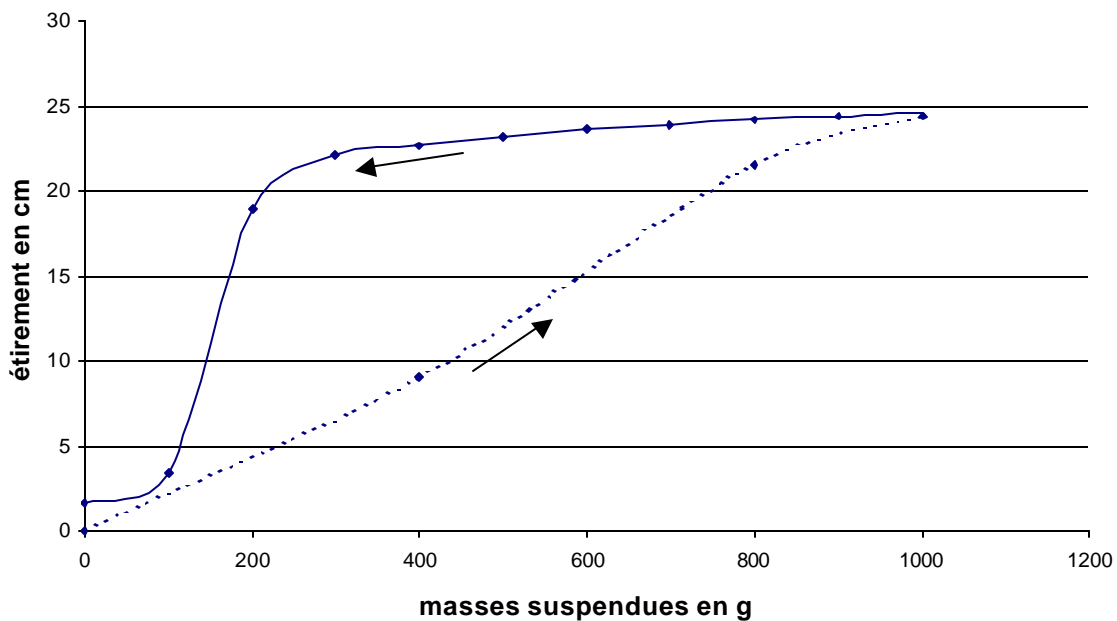
## 2. Deuxième série.

### a. Mesures

L'idée nous vient alors de faire les mesures, en sens inverse en retirant des masses, pour voir si nous retrouvons les mêmes résultats.

Les mesures prises nous ont permis de tracer la courbe suivante :

**Etirement de l'échantillon avec masses croissantes puis décroissantes**



### b Observations

Nous constatons que nous ne retrouvons pas du tout la même courbe. On observe un phénomène appelé hystérésis c'est-à-dire que l'état de l'échantillon dépend, des contraintes à l'instant  $t$ , mais aussi des précédentes, donc de son histoire.

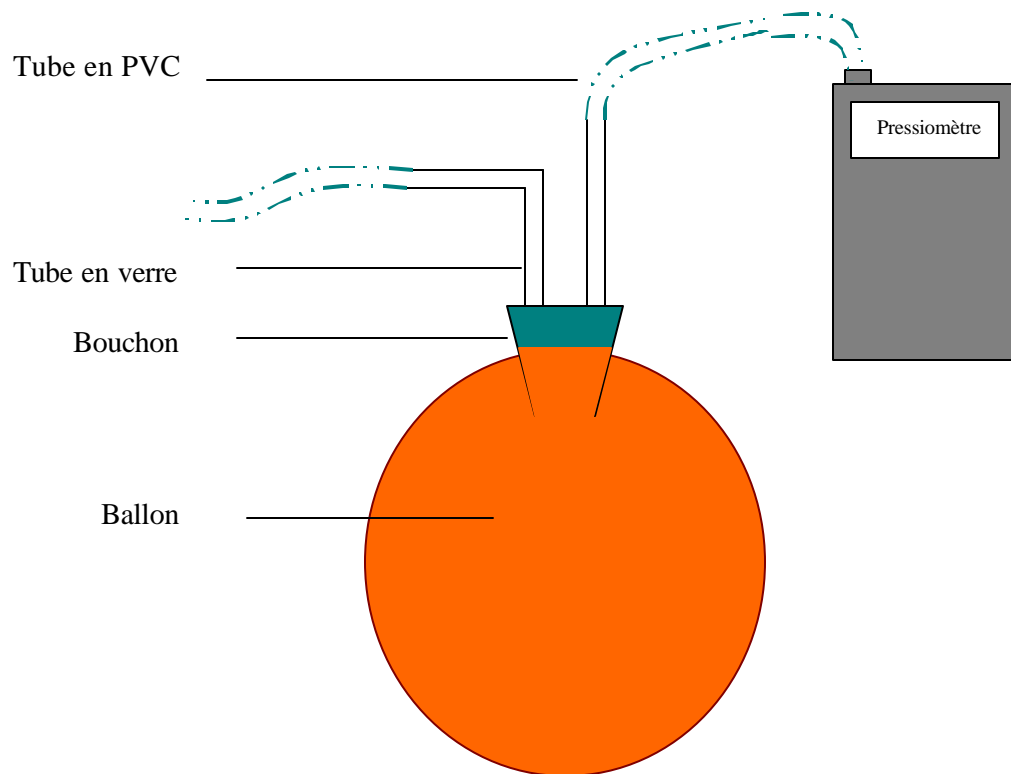
Intéressons-nous désormais au gonflage proprement dit des ballons.

### III. Expérimentation du gonflage de ballons.

#### A. Première approche

##### 1. Mesure au pressiomètre

###### a. Schéma du dispositif



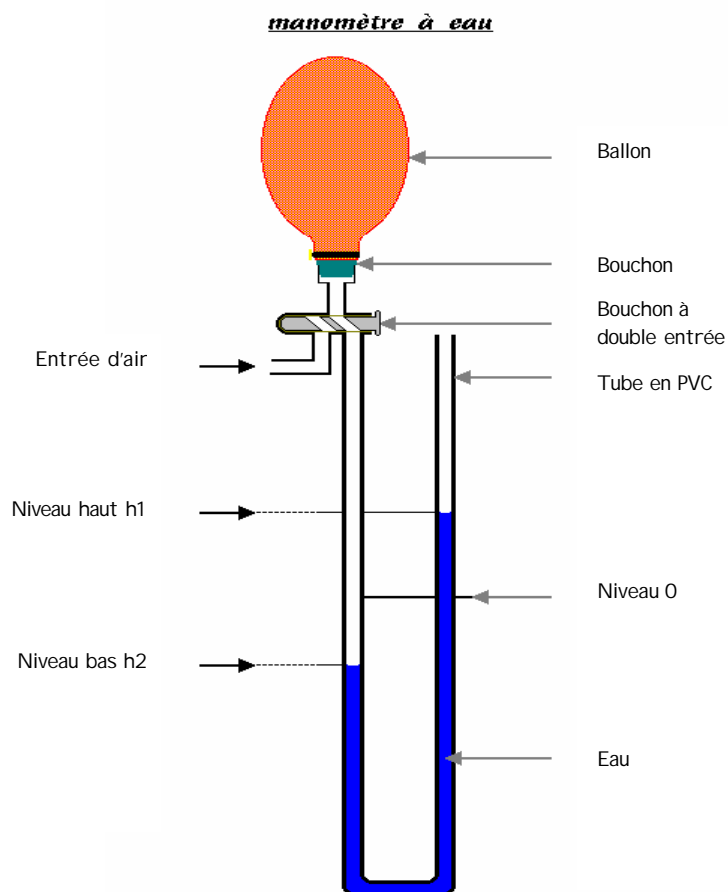
###### b. Description du dispositif.

Nous avons gonflé un ballon par l'intermédiaire d'un bouchon à double sortie ce qui nous permet d'insuffler l'air dans le ballon tout en mesurant la pression y régnant. Nous gonflons le ballon grâce à un dispositif à air comprimé. La pression est mesurée à l'aide d'un pressiomètre disponible au lycée de marque Jeulin. Cependant ce capteur se révéla inadapté c'est pour cela que nous avons cherché à créer un nouveau dispositif.

## 2. Nouveau capteur, le manomètre à eau

### a. Description du montage

Le montage est constitué d'un long tube en PVC de 3 mètres environ et de diamètre constant que nous avons mis en U. Les deux parties de ce tube sont parallèles et fixées grâce à des clous sur un support vertical muni d'une règle pour faciliter nos mesures. Pour les effectuer, nous faisons la différence des deux niveaux d'eau, nous obtenons ainsi la hauteur  $h$  de la colonne d'eau déplacée par la surpression à l'intérieur du ballon.



Nous relevons à chaque ajout d'air la circonférence du ballon et calculons son rapport avec la circonférence initiale (ballon à peine gonflé).



## b. Comparaison des capteurs

Comparons la sensibilité et la précision des mesures de pression entre notre capteur à eau et le capteur électronique vendu dans le commerce à 100 euros:

Pour le manomètre à eau, l'incertitude de mesure sur la lecture de la dénivellation est de un millimètre par côté, ce qui entraîne une erreur de plus ou moins 10Pa.

Le pressiomètre électronique quant à lui, indique une pression à 2% près à laquelle il faut ajouter une incertitude de  $\pm 4\text{hPa}$  à l'affichage. L'indication sur le cadran se fait avec 4 chiffres en hPa. La pression atmosphérique étant de l'ordre de 1000hPa, la mesure affichée par le pressiomètre présente une erreur de l'ordre de 24hPa donc 2400 Pa, soit une précision 120 fois moindre que notre capteur ! De ce fait, les mesures de petites variations de pression sont peu précises avec le pressiomètre, que nous avons donc vite renoncé à utiliser.

En plus de sa précision et sa résolution bien supérieures au pressiomètre, le manomètre à eau présente l'avantage d'indiquer directement la surpression à l'intérieur du ballon et non la somme de cette dernière avec la pression atmosphérique au moment de l'expérience. Il est donc plus facile de comparer différentes mesures de gonflage car celles-ci ont le même « zéro », ce qui n'est pas le cas pour le pressiomètre électronique.

## 3. Principe de la mesure des pressions.

Nous pouvons calculer la surpression dans le ballon grâce à la formule :

$$P = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot h$$

P étant la surpression en Pascal,  $\rho_{\text{eau}}$  étant la masse volumique de l'eau en  $\text{kg.m}^{-3}$  fixée à  $1000\text{kg.m}^{-3}$ , h la hauteur de la colonne d'eau déplacée exprimée en mètre et g l'intensité de la pesanteur de valeur  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

Ainsi pour  $h = 1\text{m}$  la surpression vaudrait  $P = 9,81.10^3 \text{ Pa}$ , soit environ un dixième de la pression atmosphérique.

## B. Mesures au manomètre à eau.

### 1. Phase de gonflage

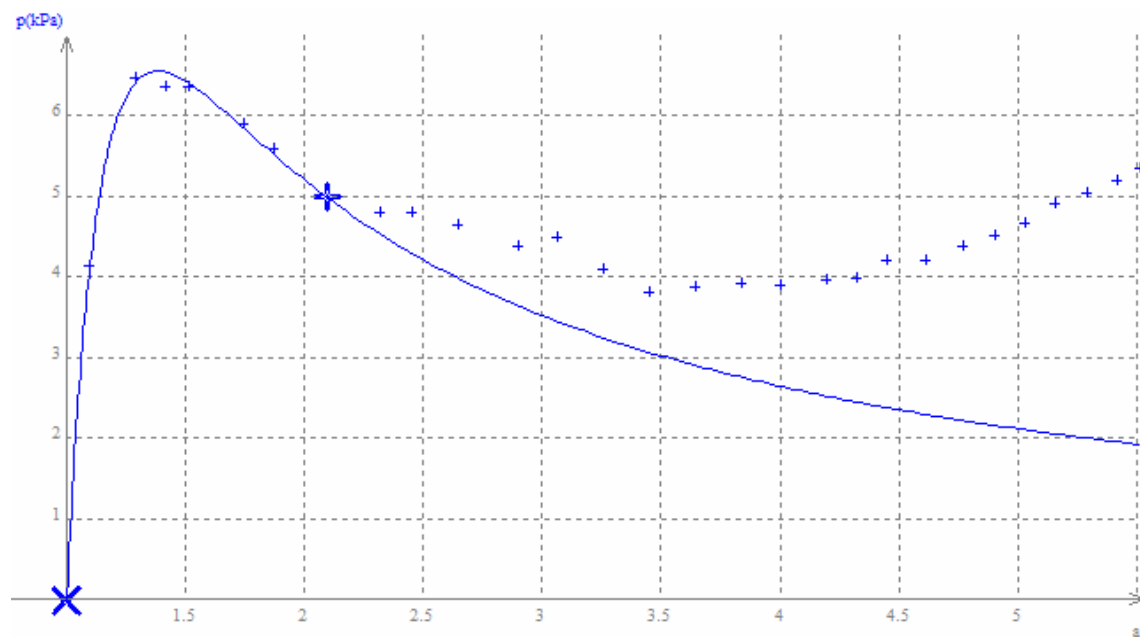
Nous réalisons à nouveau plusieurs séries de mesures et nous traitons la plus représentative grâce au logiciel REGRESSI .

Nous pouvons tout de suite observer que la pression augmente très vite, ce qui confirme l'impression ressentie lors du gonflage à la bouche. Par la suite, celle-ci diminue, signe qu'il est plus facile alors de gonfler le ballon. Toute la difficulté réside dans le "col" à franchir, comme on le ferait dans une ascension d'une montagne...

Un article reproduit en annexe nous a permis de proposer un modèle dans la première phase de gonflage :

$$P = k [1/a - 1/a^7]$$

P étant la surpression en kilo pascal, k une constante définie en fonction des dimensions du ballon étudié et de sa température, et a le rapport circonférence sur circonférence initiale (ballon à peine gonflé).



Nous obtenons une courbe conforme à la théorie dans un intervalle [1 ; 2] la théorie actuelle ne permettant pas de la modéliser sur un plus grand intervalle (nous n'avons pas trouvé d'autres travaux à ce sujet).

Nous avons dérivé la fonction donnée par l'article de 1958 (annexe) pour trouver l'augmentation du diamètre correspondant au maximum de pression :

$$F(a) = 1/a - 1/a^7$$

$$F'(a) = -1/a^2 - (-7/a^8)$$

Pour trouver l'abscisse du maximum de la fonction  $F(a)$ , nous posons  $F'(a) = 0$

$$\begin{aligned} & -1/a^2 + 7/a^8 = 0 \\ \Leftrightarrow & (-a^6 + 7)/a^8 = 0 \\ \Leftrightarrow & -a^6 + 7 = 0 \\ \Leftrightarrow & a^6 = 7 \\ \Leftrightarrow & a = \sqrt[6]{7} \\ \Leftrightarrow & a = 7^{1/6} \\ & (a = 1,38) \end{aligned}$$

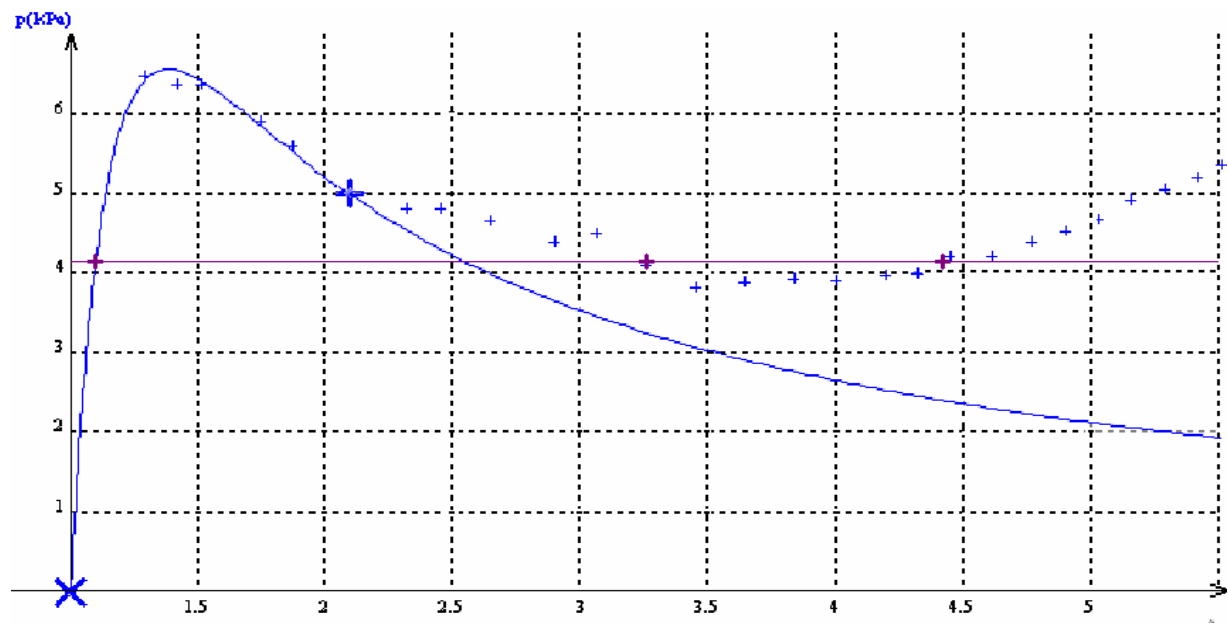
Le maximum de pression est atteint pour un rapport  $a = 1,38$ . Donc, le maximum de pression se produit lorsque le diamètre du ballon a augmenté de 38%.

Il est surprenant toutefois de constater que la surpression n'est alors que de 6400 Pa, soit environ 6 à 7 % de la pression atmosphérique (nos a priori en ont pris un bon coup)

Tout comme lors de l'étirement, nous avons constaté qu'il est possible de diviser en trois phases le comportement du ballon. La première étant celle de forte augmentation de la pression, la seconde une phase où la pression diminue pour finalement ré-augmenter dans la troisième phase.

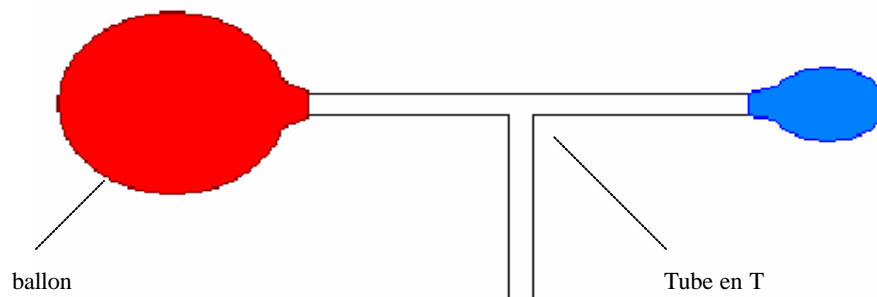
## 2. Points d'équilibres

Ces observations ont pour conséquence qu'il peut exister trois points d'équilibre, représentés sur la courbe suivante :



Les points d'équilibre sont matérialisés ici par de petites croix violettes. Ces « points d'équilibre » indiquent la possibilité d'avoir plusieurs ballons aux diamètres différents mais présentant la même surpression.

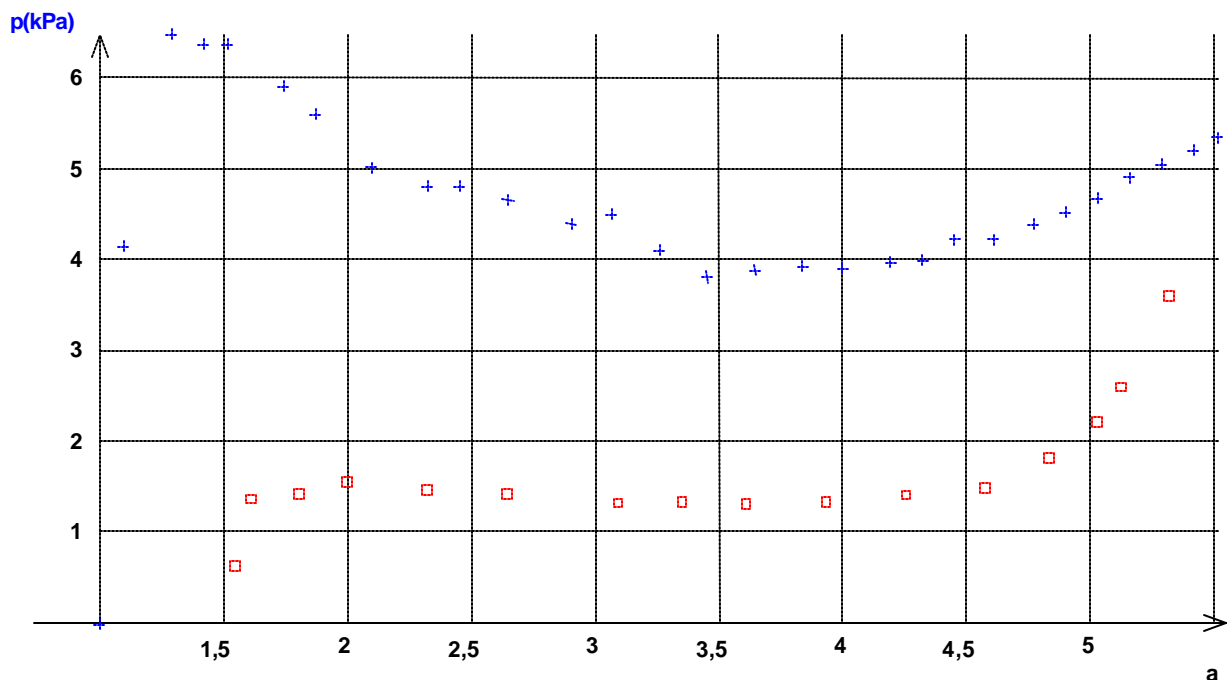
Expérimentalement, il est donc possible de relier deux ballons à l'aide d'un tube en T tel que les deux ballons présentent des diamètres différents pour une même surpression comme le montre le schéma ci-dessous :



Chacun des deux ballons est ici à un point d'équilibre différent.

### 3. Phase de dégonflage.

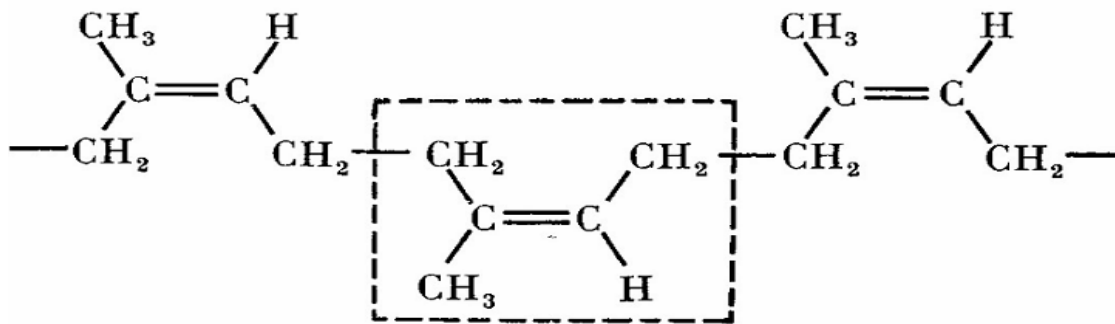
Comme cela avait été réalisé avec l'échantillon de caoutchouc, nous avons aussi voulu observer le comportement du ballon lors du dégonflage. Les résultats sont indiqués ci-dessous ; la courbe du bas correspond à la phase de dégonflage (carrés).



Au début du dégonflage, nous observons que pour une faible diminution du diamètre du ballon, il s'opère une forte diminution de la pression. Il s'agit du même comportement que celui observé lors de l'étirement lorsque nous retirions des masses. En effet, l'étirement diminuait peu pour une forte diminution de la force appliquée. La pression pouvant être assimilée à une force, dans les deux cas, une forte diminution de la force entraîne une faible diminution de la déformation, tout du moins dans un premier temps.

#### IV. Interprétation microscopique des phénomènes se produisant lors du gonflage d'un ballon

Durant nos expériences de gonflage nous n'utilisons que des ballons en latex naturel dont la composition chimique des chaînes est de formule semi développée :



Il s'agit d'une chaîne polymérique de 2 méthyl but-2-ène.

Dans la première phase, nous avons observé une faible croissance du ballon par contre, la courbe est très croissante sur l'intervalle [1 ; 1,38]. Cette pression peut être due à la force qu'exerce la paroi du ballon sur l'air. Les chaînes polymériques constituant la paroi sont à ce moment là entremêlées de façon aléatoire (voir schéma) d'où la forte résistance de celle-ci.



Dans la seconde phase, s'étendant sur l'intervalle [1,38 ; 4] nous constatons une croissance importante de la taille du ballon accompagnée d'une baisse de la pression. Cette baisse de pression peut être due à l'étirement des chaînes constituant la paroi ce qui fait diminuer la résistance de cette dernière. Le schéma suivant donne une idée de la nouvelle répartition des chaînes durant la phase d'étirement. Ces dernières, se rangent de manière de plus en plus ordonnées ce qui facilite le gonflage.



Dans la troisième phase, on observe une nouvelle hausse progressive de la pression ; la croissance du ballon se ralentit. A ce moment là, certaines chaînes commencent à être complètement étirées d'où une augmentation de la résistance de la paroi entraînant la hausse de pression. Les chaînes sont alors beaucoup plus ordonnées comme le montre le schéma ci-dessous.



Si le gonflage se poursuit, le ballon finira par éclater. Ce phénomène est probablement dû à la rupture de liaisons entre les chaînes voir au sein même des chaînes.

## V. Etude de la perméabilité de la membrane d'un ballon en fonction de différents gaz

Chaque expérience est réalisée sur plusieurs jours en laissant un ballon gonflé avec différents gaz sur un manomètre.

On mesure plusieurs fois par jour la circonférence du ballon pour estimer son volume en utilisant la formule  $\frac{4}{3}\pi r^3$  où  $r$  est le rayon de la sphère considérée. Grâce à ce volume, nous pouvons calculer une estimation de la quantité de gaz présent dans le ballon en utilisant la formule,

$$n = V/V_m$$

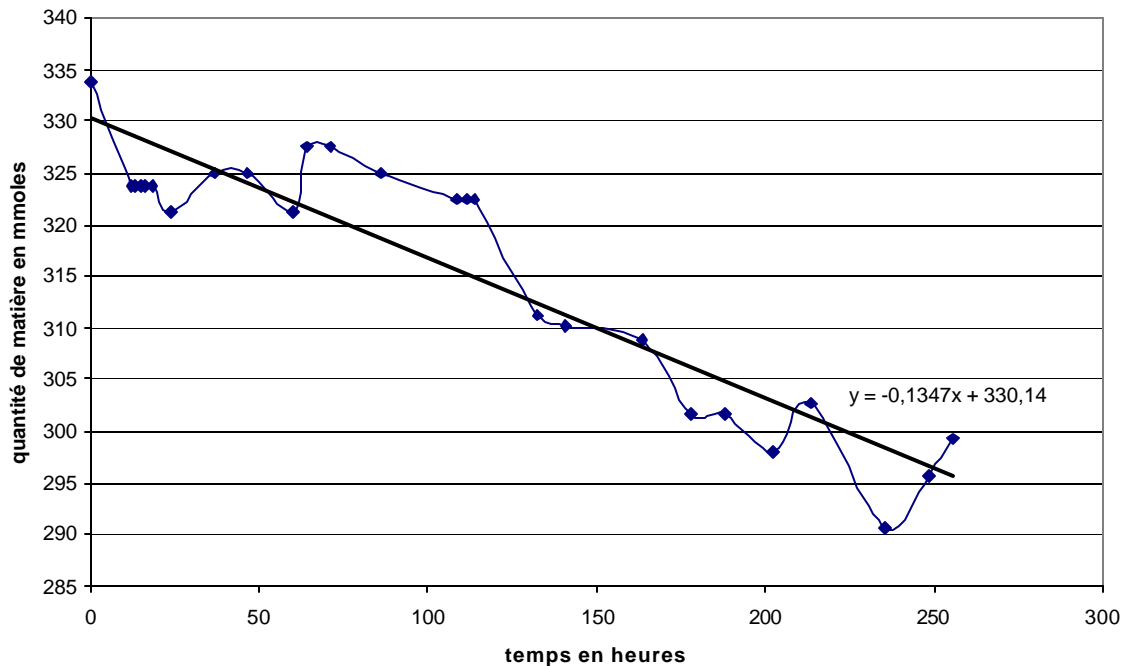
Nous prenons  $V_m = 24 \text{ L/mol}$ . Nous ne tenons pas compte de la surpression dans le ballon car elle est quasiment négligeable par rapport à la pression atmosphérique. La température quant à elle est considérée constante à  $20^\circ\text{C}$ . En estimant la quantité de matière avec la formule précédente ou avec la relation des gaz parfaits :  $PV = nRT$ , nous obtenons des quantités de matière quasi identiques.

Ici, la valeur de la quantité de matière, ne nous intéresse pas directement puisque nous voulons étudier sa variation.

Pour tous les gaz que nous avons étudié la perte de matière s'effectue de façon linéaire, dans un premier temps tout du moins. Nous calculons pour les différents gaz les pentes des droites obtenues. Plus la pente est forte plus la perte de matière est rapide.

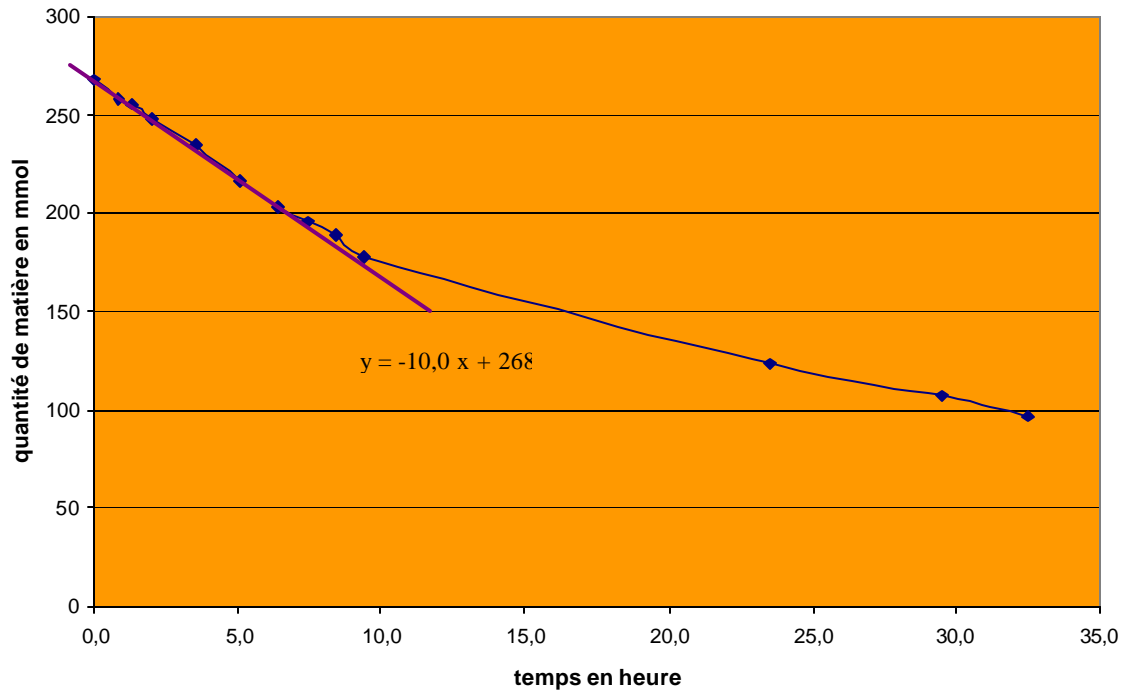
## 1. Expérience avec l'air :

**graphique de la variation de matière dans un ballon gonflé avec de l'air**



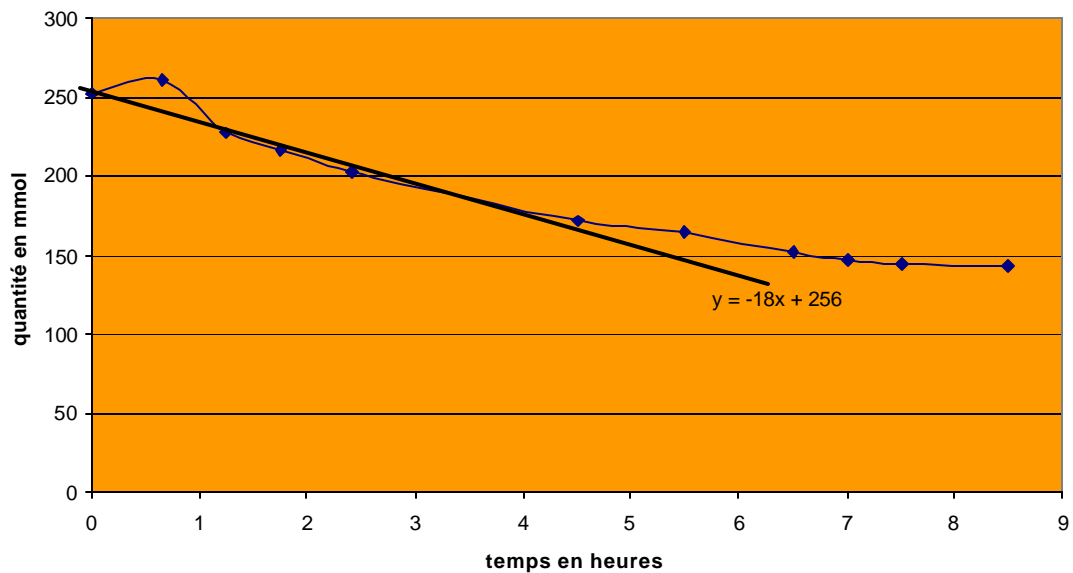
## 2. Expérience avec l'hélium :

Graphique de l'évolution de la quantité d'hélium présent dans un ballon au cours du temps



## 3. Expérience avec le dihydrogène :

Graphique de l'évolution de la quantité de dihydrogène dans un ballon au cours du temps



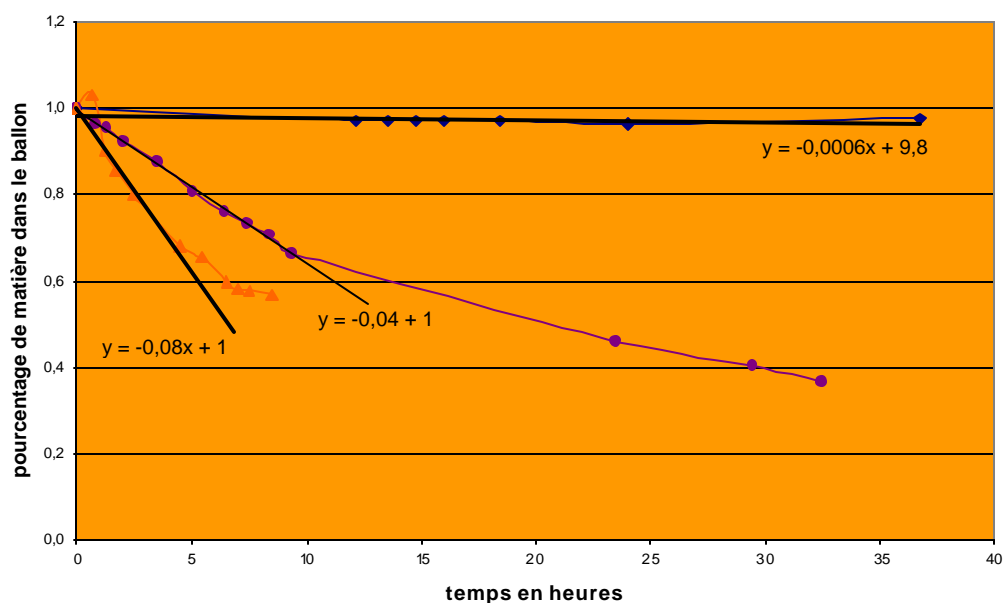


#### 4. Constatations :

Nous constatons que la porosité d'une même membrane à différents gaz varie. En effet, la quantité de matière dans un ballon gonflé avec de l'air diminue environ 75 fois moins vite que s'il avait été gonflé avec de l'hélium et 135 fois moins vite que s'il avait été gonflé avec du dihydrogène. La porosité n'est donc pas la même pour tous les gaz, celle-ci varie probablement avec la taille des molécules.

La courbe suivante compare les pertes de matière pour les trois gaz.

**Comparaison de la variation de matière dans un ballon gonflé avec différents gaz**



La courbe orange représente l'expérience avec le dihydrogène, la violette, celle avec l'hélium et en bleu celle avec l'air. L'ordonnée de cette courbe a été calculée pour faciliter la comparaison entre les gaz, il s'agit du pourcentage de matière présent dans le ballon par rapport à la valeur initiale. Les coefficients directeurs sont donnés avec un chiffre significatif.

#### VI. Conclusion

D'après ces expériences, nous pouvons dire que la croissance d'un ballon s'effectue plus difficilement au début du gonflage que par la suite car :

- Le caoutchouc constituant la paroi oppose une plus grande résistance à ce moment là, probablement due au fait que les chaînes polymériques sont très entremêlées. Il est donc nécessaire d'appliquer une force plus importante pour les démêler.

- Le caoutchouc ne se comporte pas comme un ressort, sa constante de raideur varie selon la contrainte exercée. De plus, à cause du phénomène d'hystérésis, le retour en arrière est impossible (dans tous les cas, tant gonflage qu'étirement).

- A cause de la nécessité de souffler très fort pour passer le pic de pression ; les petits enfants n'ayant pas une grande capacité pulmonaire, s'y heurtent. Toutefois on peut constater que cette surpression ne représente que 6% de la pression atmosphérique.

- Nous avons aussi constaté qu'il existe une porosité aux gaz et que celle-ci variait selon la nature de ces derniers.

Durant toutes nos expériences, nous avons considéré la température constante, cependant celle-ci à une influence sur les propriétés du caoutchouc.

Qu'obtiendrions-nous si nous recommencions ces mêmes expériences à -5°C ou +50°C ?

Finalement gonfler un ballon n'est pas un jeu d'enfant ! Heureusement qu'il n'est pas nécessaire d'en connaître le fonctionnement avant de pouvoir l'utiliser !

---

#### Bibliographie :

- p8 et 9 du magazine PROFIL du 04/2000 sur l'histoire du caoutchouc (magazine allemand)
- magazine EUREKA n°30 d'Avril 1998 titrant « Le caoutchouc, un secret bien gardé »
- extrait du « journal of chemical education » Volume 35 n°4 avril 1958 p203-204. Titre de l'article « On the inflating of balloons » (traduit en annexe)
- document de chez Bayer à la Wantzenau

sites Internet :

[www.Lecaoutchouc.com](http://www.Lecaoutchouc.com)

[www.lrcpp.fr](http://www.lrcpp.fr)

[Retour en haut de page](#)