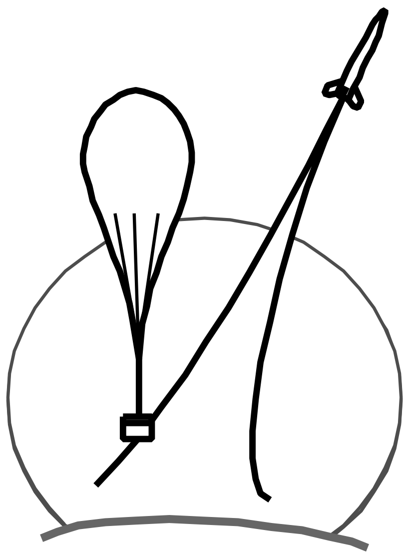
CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

Sciences Techniques Jeunesse

Département Education-Jeunesse du CNES
18, avenue Edouard Belin - 31401 TOULOUSE CEDEX 4
Tél. : ( )5 61 27 31 14 / Fax : ( )5 61 28 27 67
Site Internet : http://cnes.fr

ANSTJ - Secteur Espace
16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Tél. : ( )1 69 02 76 10 / Fax : ( )1 69 43 21 43
Site Internet : http://www.anstj.org/espace/



Les parachutes
Des fusées expérimentales

--

Edition Février 2002

Note technique ANSTJ

Remerciements

Cette note technique a été compilée par:
Patrick ROMMELUERE

Rédaction:
Arnaud COLMON
Guy PREAUX
CRM

Secteur Espace de l'anstj - 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr

CALCUL DE LA RESISTANCE DES PARACHUTES

Un parachute doit être dimensionné pour résister lors de son ouverture. Le choc lors de cette ouverture peut être évalué de la façon suivante:

La fusée, à l'instant de l'ouverture, a une vitesse $\mathbf{V_0}$. On considère l'ouverture comme étant instantanée, ce qui revient à dire qu'à cet instant, le parachute est entièrement déployé alors que la fusée a encore la vitesse $\mathbf{V_0}$. La force qui s'exerce alors sur le parachute se calcule par :

$$\boxed{\mathbf{F = \frac{R.S.C_x.V_0^2}{2}}}$$

avec : **R** : densité de l'air : (1,3 g/l)

S : surface du parachute en m²

$\mathbf{C_x}$: coefficient aérodynamique du parachute

On cherche l'ordre de grandeur d'un majorant de la force appliquée. Fixons donc $\mathbf{C_x = 1}$ (comme pour une surface plane) et **S :** la surface du parachute entièrement déployé. **R** varie un peu avec l'altitude, mais beaucoup moins que les approximations que nous sommes en train d'accepter : il sera considéré constant.

$\mathbf{V_0}$ reste le principal problème. $\mathbf{V_0}$ n'est jamais nul : on ne lance pas les fusées verticalement. $\mathbf{V_0}$ n'est pas non plus la vitesse horizontale de la fusée à culmination calculée par le programme de trajectoire. En effet les incertitudes sur ce calcul, l'inclinaison de la rampe, la poussée du propulseur, le $\mathbf{C_x}$ de la fusée, l'instant de déclenchement de l'initialisateur, la précision de la minuterie, ... font que la vitesse réelle d'ouverture est toujours beaucoup plus grande. Si on est très prudent, on peut dimensionner le parachute pour une ouverture à quelques centimètres du sol, avec une vitesse supérieure à 100 m/s. **En général, on prévoit au moins une vitesse d'ouverture de 40 à 50 m/s**.

La force calculée de cette façon s'applique au point d'attache du parachute sur la fusée, à la sangle, à l'émerillon, à l'ensemble des suspentes et au parachute lui-même. Pour les suspentes, il ne faut pas diviser la force obtenue par le nombre de suspentes, car leurs différences de longueur rendent certaines inutiles au moment de l'ouverture. Considérer par exemple que **seules 75% des suspentes participent à la résistance à l'ouverture**.

Secteur Espace de l'anstj - 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr

La première abaque donne le choc à l'ouverture en fonction de la surface du parachute pour différentes vitesses d'ouverture. Le choc est donné en Newton. Pour le comparer à la résistance des cordes qui est le plus souvent exprimée en kilo par le fabriquant, il faut diviser le résultat lu sur l'abaque par 10.

On peut se servir de la formule ci-dessus pour calculer la taille du parachute pour obtenir une certaine vitesse de descente. On obtient alors :

$$\mathbf{M.g} = \frac{\mathbf{R.S.C_x.V_d^2}}{\mathbf{2}} \qquad \text{d'où :} \quad \mathbf{S} = \frac{\mathbf{2.g.M}}{\mathbf{R.C_x.V_d^2}}$$

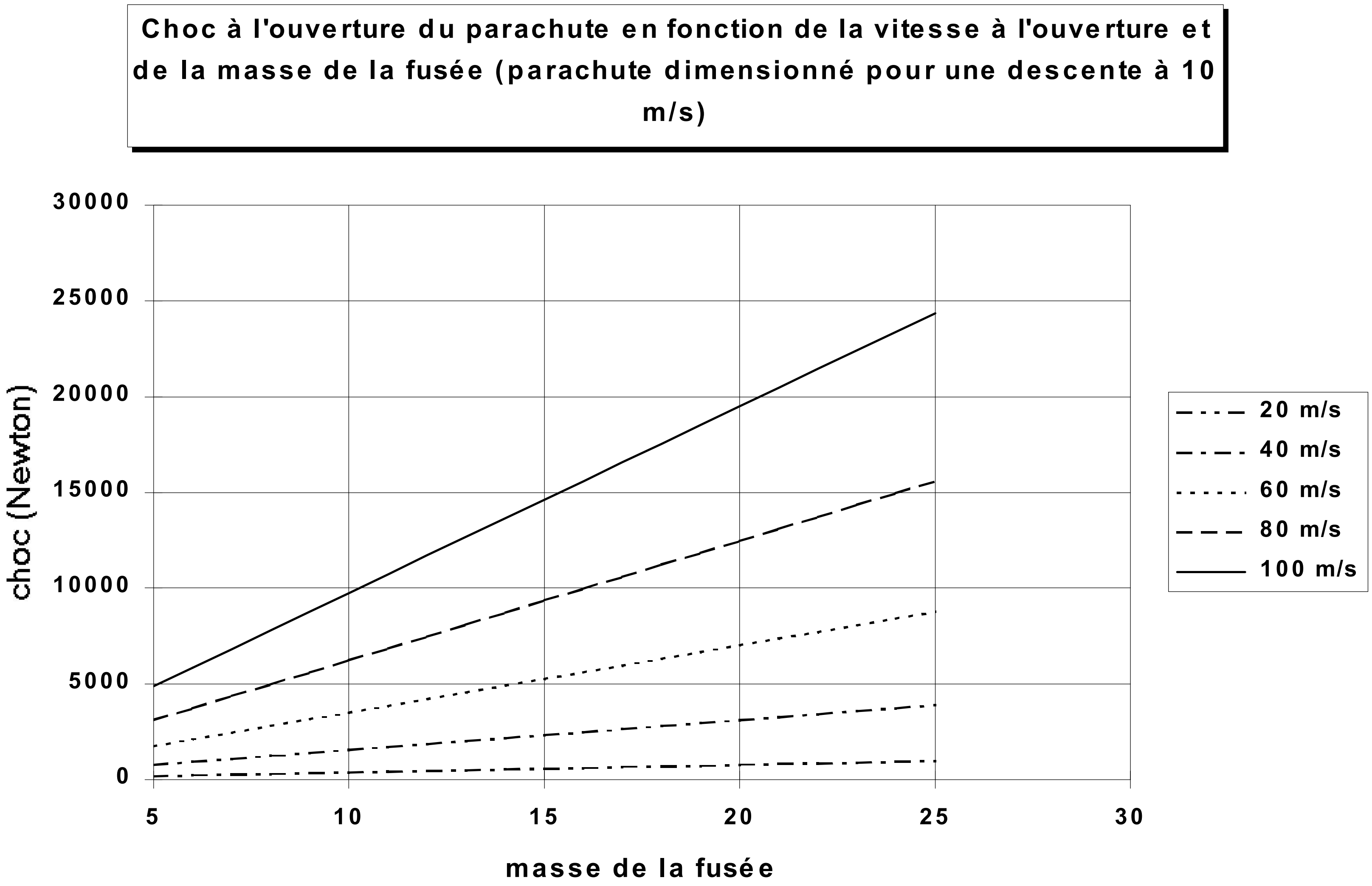
Pour une certaine vitesse de descente, on a une relation linéaire entre la masse de la fusée et la surface du parachute. Par exemple, pour $\mathbf{V_d}$ **=10 m/s, S=0,15.M** (M en kilogrammes donne S en m²). Dans cette hypothèse, la seconde abaque donne directement le choc à l'ouverture en fonction de la masse de la fusée, toujours pour différentes vitesses d'ouverture.

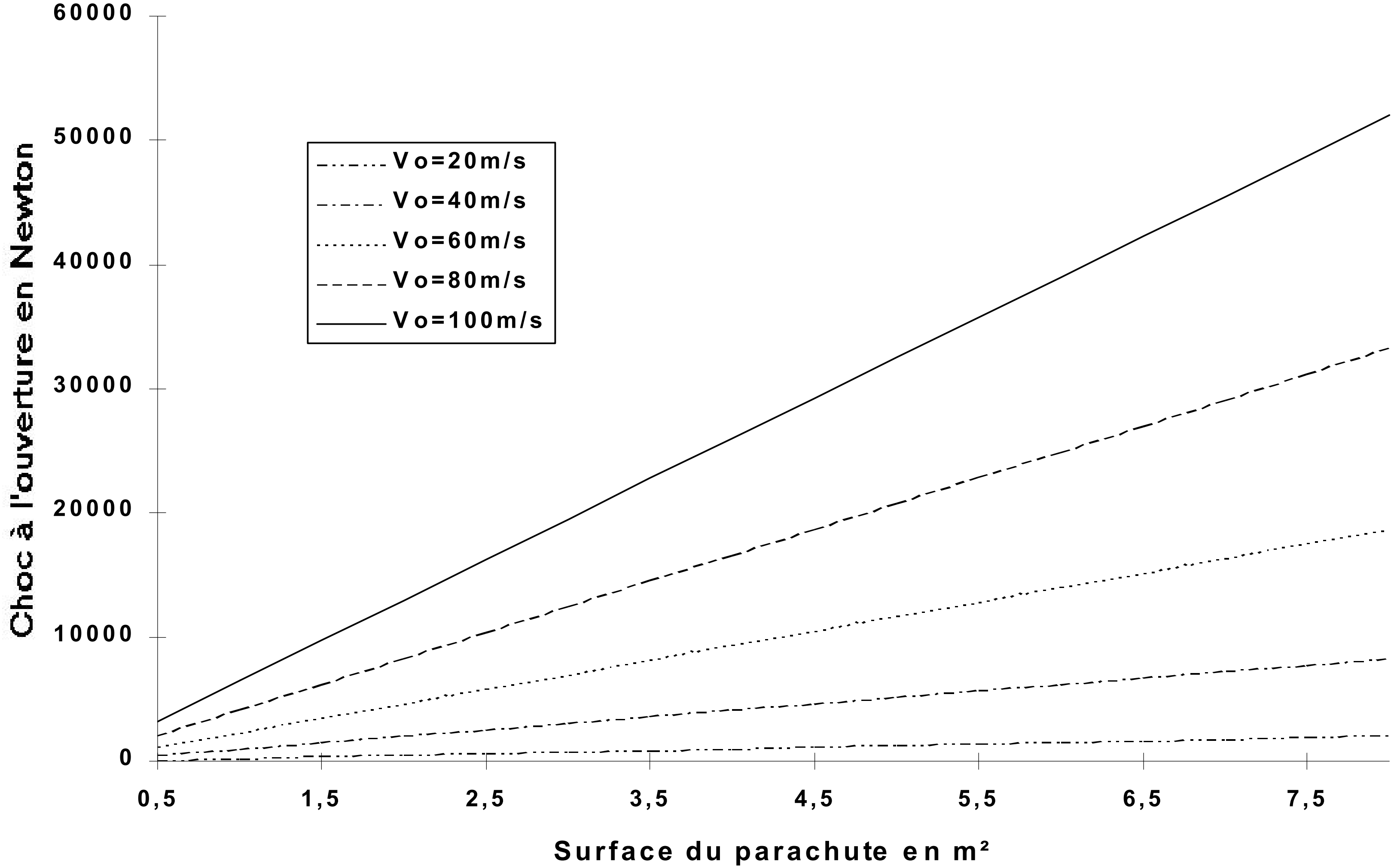
La dernière abaque enfin donne le résultat pour trois fusées typiques : **un isard de 6 kg, un chamois de 11 kg et un caribou de 21 kg**. Le choc est directement lu en fonction de la vitesse à l'ouverture.

ATTENTION

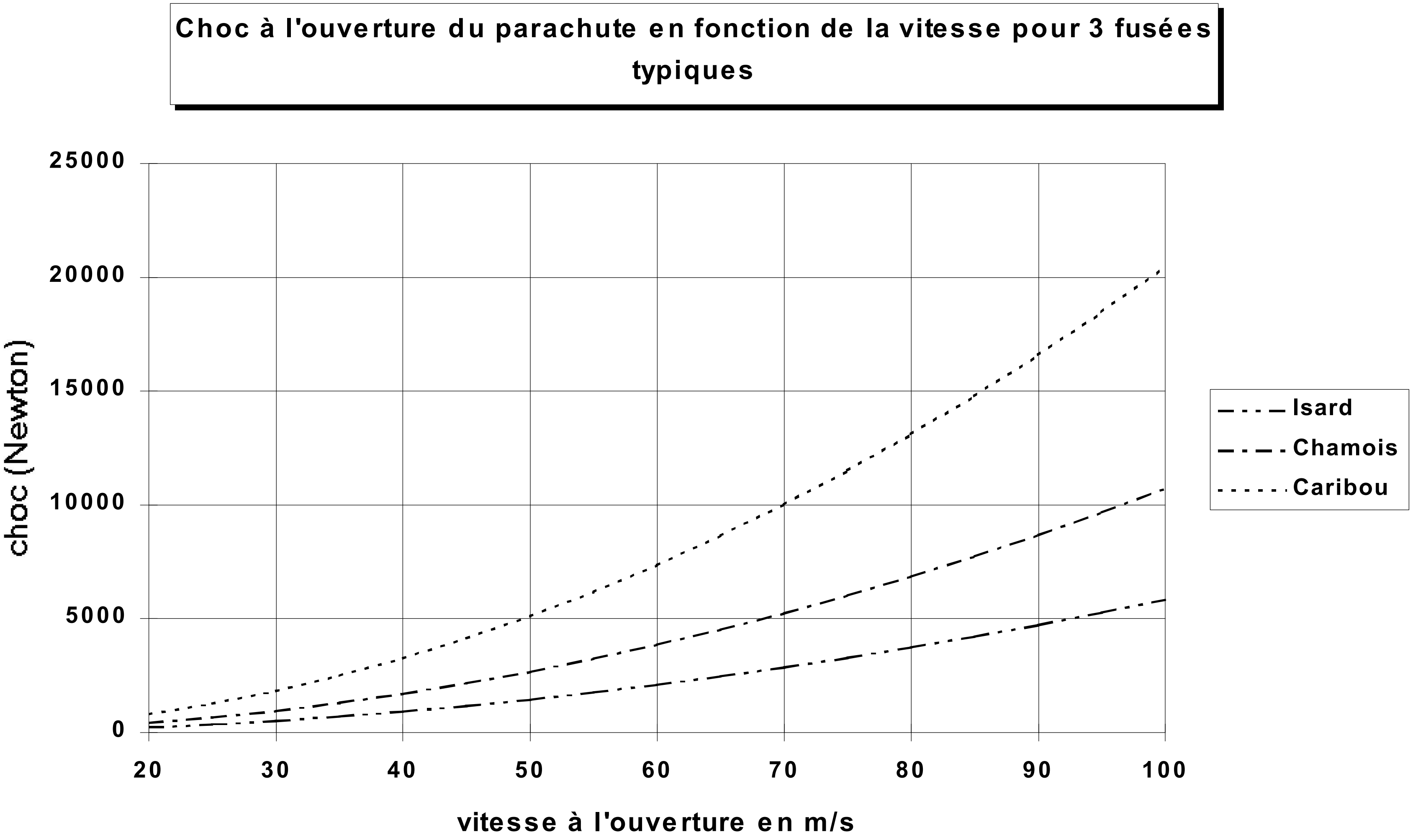
ces calculs ne donnent que des ordres de grandeur !

Secteur Espace de l'anstj - 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr


Choc à l'ouverture du parachute en fonction de la vitesse à l'ouverture et de la masse de la fusée (parachute dimensionné pour une descente à 10 m/s)
choc (Newton)
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
5
10
15
20
25
30
masse de la fusée
20 m/s
40 m/s
60 m/s
80 m/s
100 m/s



Secteur Espace de l'anstj- 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr


Choc à l'ouverture du parachute en fonction de la vitesse pour 3 fusées typiques
25000
20000
15000
10000
5000
0
choc (Newton)
20
30
40
50
60
70
80
90
100
vitesse à l'ouverture en m/s
Isard
Chamois
Caribou

LE PLIAGE DES PARACHUTES

Introduction
Parmi les systèmes de récupération, le parachute demeure le plus éprouvé. Cet article se propose d'en exposer le principe, le calcul de la vitesse de descente et la méthode de pliage

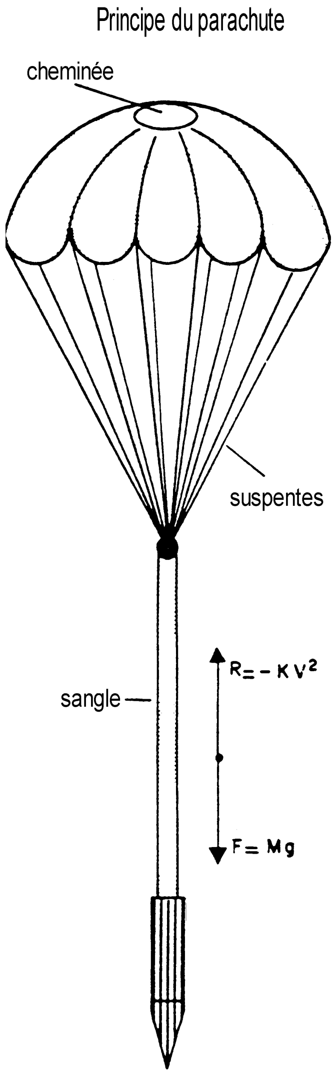


fig 1

1) Principe
L'équipage accroché au parachute est soumis à la pesanteur (Poids P) tandis que l'air exerce sur le parachute une force en sens inverse (-R). ces forces s'expriment ainsi:

Poids: $\mathbf{P = M.g}$

Résistance de l'air: $\mathbf{R = -K.V^2}$

avec

- M: Masse de l'équipage et du parachute
- g: accélération de la pesanteur
- V: vitesse de descente
- k: coefficient aérodynamique

l'accélération de la pesanteur a tendance à augmenter la vitesse de l'équipage, ce qui augmente d'autant la résistance de l'air. Cette situation conduit rapidement à un état d'équilibre ou la vitesse de descente devient pratiquement constante (**Fig**. 1) Elle est alors appelée vitesse limite de chute:

$\mathbf{P = R}$ $\mathbf{M.g = K.V^2}$ d'ou $\mathbf{V} = \sqrt{\dfrac{\mathbf{M.g}}{\mathbf{K}}}$

2) Vitesse limite de chute.
2.1. Expression de la vitesse limite de chute
Le coefficient aérodynamique K peut s'expliciter:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{R.S.C_x}}{\mathbf{2}}$$

Avec: $\mathbf{R}$ = Masse volumique de l'air, $\mathbf{C_x}$ = Coefficient aérodynamique du parachute, $\mathbf{S}$ = Maître couple du parachute

La vitesse limite de chute s'exprime donc ainsi: $\mathbf{V} = \sqrt{\dfrac{\mathbf{2.M.g}}{\mathbf{R.S.C_x}}}$

Cette vitesse n'est pas constante puisque $\mathbf{R}$ et $\mathbf{g}$ varient avec l'altitude Pour un calcul approché $\mathbf{R}$ peut être pris contant et égal à: $\mathbf{R} = \dfrac{\mathbf{R_s + R_h}}{\mathbf{2}}$

Avec:

$\mathbf{R}_s$ = masse volumique de l'air au sol

$\mathbf{R}_h$ = masse volumique de l'air à l'altitude de culmination

avec un contener, méthode CEV

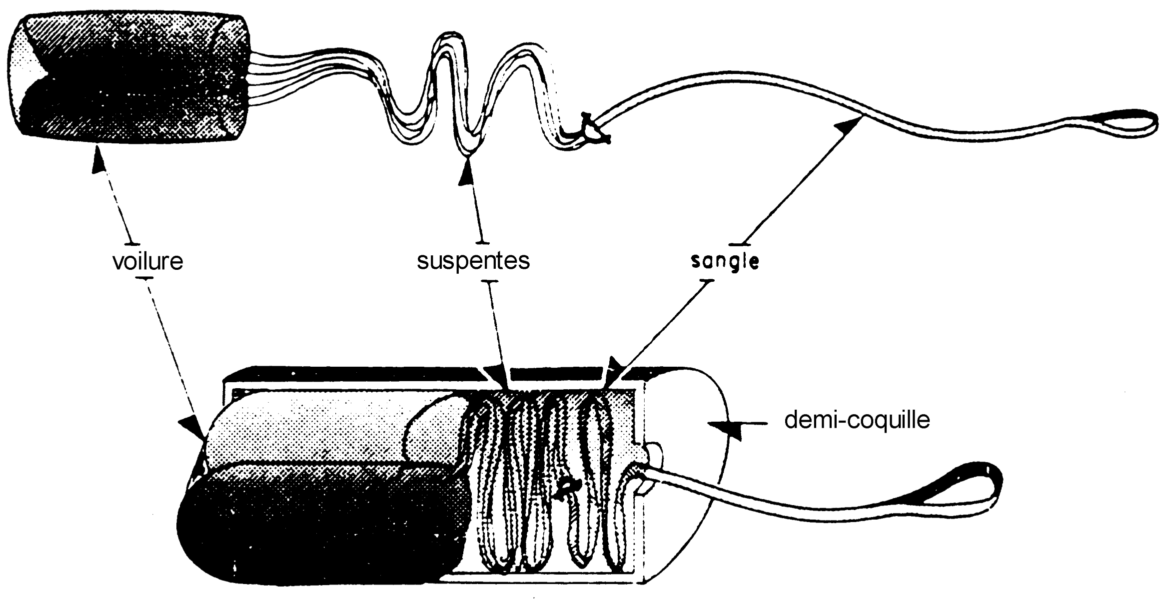


Fig 2

Notons que $\mathbf{R}$ est souvent différent de $\mathbf{R}_0$ (Masse volumique au niveau de la mer). Quant à **g**, sa valeur peut être prise contante $\mathbf{g = 9.80 m.s}^{-2}$

Pour la détermination de $\mathbf{R}$ et **g**, le lecteur se référera à une table d'atmosphère moyenne (3.2.1 Espace n°5)

2.2. Applications

En considérant que cette vitesse de chute est atteinte dès l'ouverture du parachute à culmination, il est possible:

- De déterminer, avant le lancement, le point de chute prévisionnel en fonction des conditions aérologiques et de l'altitude atteinte.
- De connaître après le lancement l'altitude de culmination (**H**) et fonction du temps de descente (**t**): **H=V.t**

Secteur Espace de l'anstj- 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr

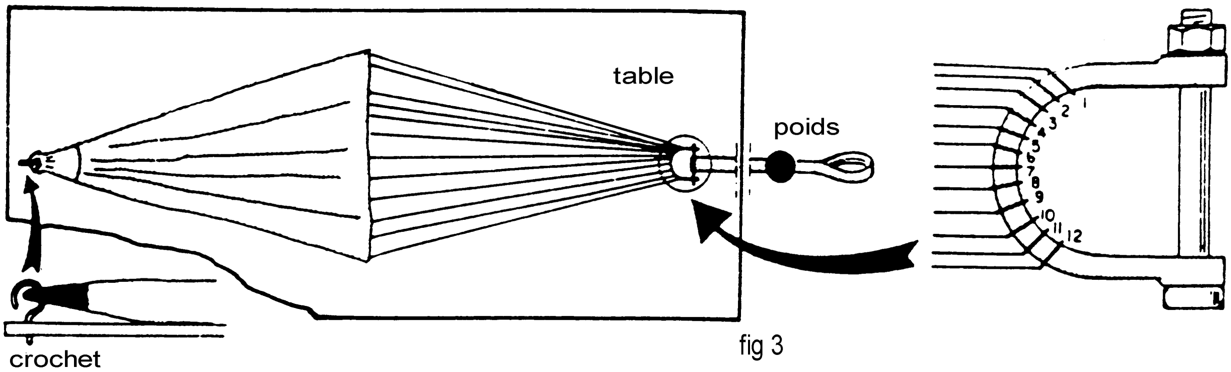


fig 3

3) Protection du parachute

Le parachute est enfermé dans deux demi-coquilles éjectées avec lui et ne s'ouvrant qu'à l'air libre. La case de la pointe doit être suffisamment vaste et dépourvue d'arêtes vives susceptibles d'accrocher la toile ou de scier la sangle au moment de l'éjection du parachute. Lors du déploiement du parachute, des forces très importantes sont appliquées sur l'ensemble des liaisons pointe-parachute; la sangle et les crochets doivent donc être de grande résistance. Pour éviter que la sangle ne soit sectionnée ou la voilure déchirée ou brûlée, des précautions doivent être prises:

- Régler l'ouverture du parachute avant la culmination prévue.
- La sangle doit avoir au moins 1.5 fois la longueur de la pointe complète
- Dans la case parachute, séparer la toile du parachute et les supports avec du papier de soie

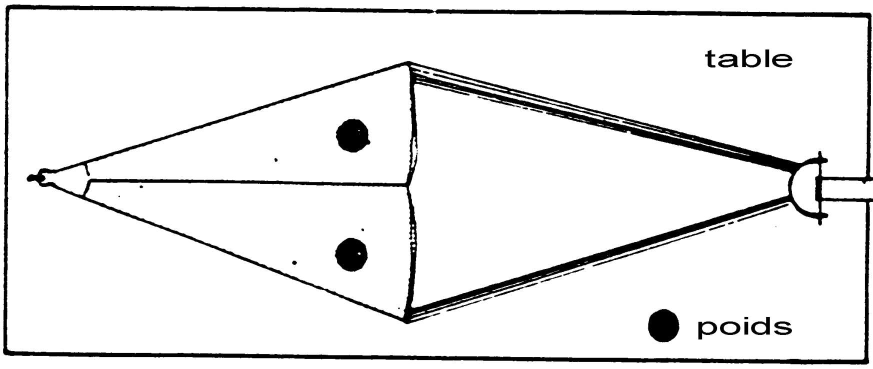


Fig 6

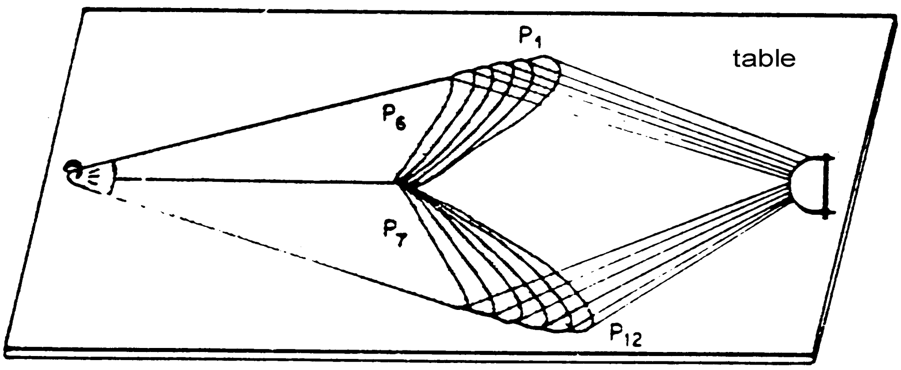


Fig 5

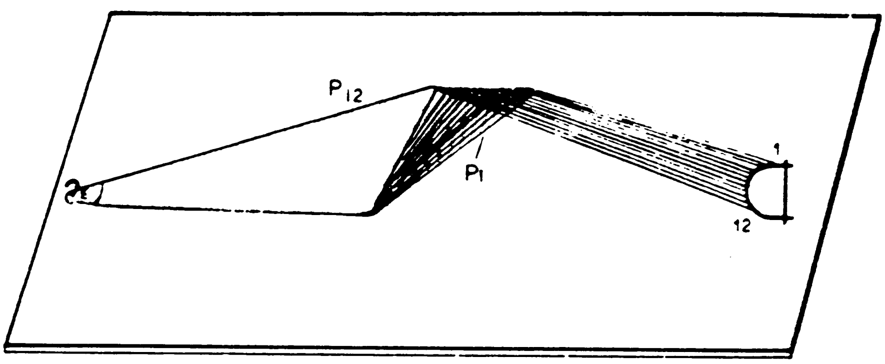


Fig 4

Secteur Espace de l'anstj- 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr

- Les suspentes ne doivent pas être attachées avec des caoutchoucs

L'utilisation d'un fourreau et d'un parachute extracteur sont conseillés mais nécessitent de nombreux essais

4) Le pliage

Le pliage en container peut s'effectuer suivant la méthode du centre d'essais en vol de bretigny sur Orge (C.E.V) (**fig**. 2) ou celle utilisée par la plupart des clubs aérospatiaux (**fig**. 3 à 10). le pliage du parachute cruciforme s'effectue de la même manière.

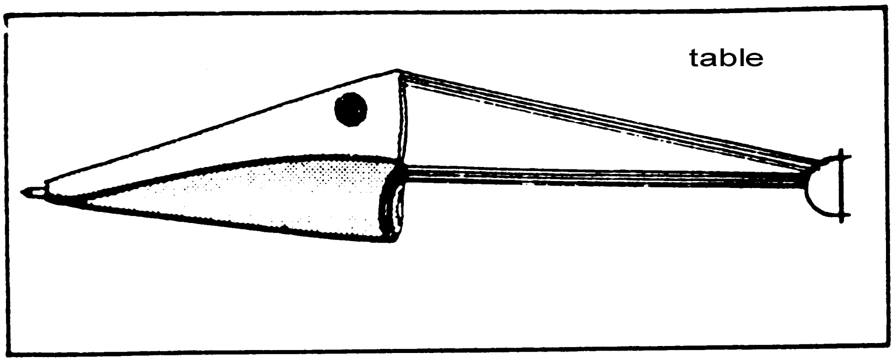


Fig 7

Il est conseillé d'effectuer le pliage du parachute un ou deux jours avant le lancement et de laisser le conteneur bien serré. cela permet au parachute de prendre sa place dans le conteneur qui n'aura pas tendance à s'ouvrir sous la pression de la toile. il convient toutefois de ne pas oublier de supprimer ce serrage avant le lancement.

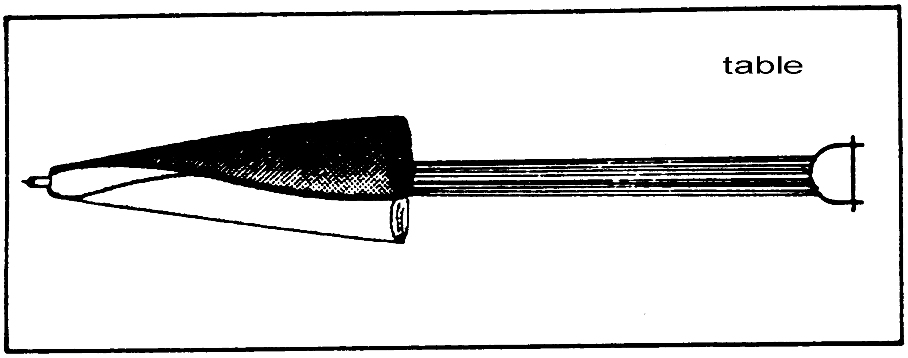


Fig 8

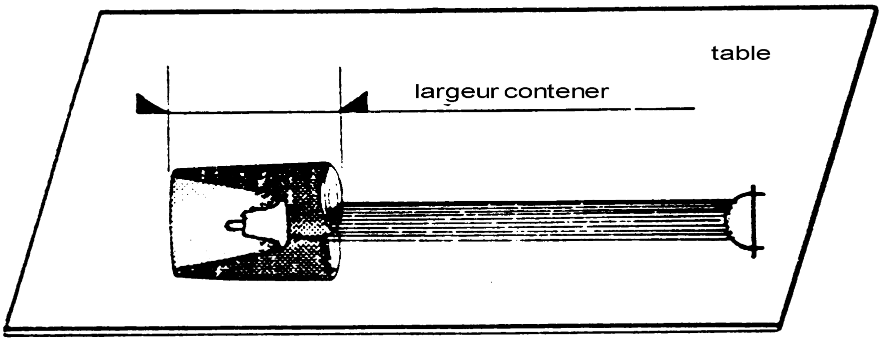


Fig 9

A noter que seule la toile du parachute est compressible, pas les suspentes ni la sangle.

Dans le cas d'utilisation d'un extracteur, le placer en dehors du container, coté éjection.

Secteur Espace de l'anstj- 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr

Lorsque le parachute n’est pas utilisé, le laisser pendu le long d’un mur pour éviter les faux plis ou bien le laisser parfaitement plié dans son fourreau.

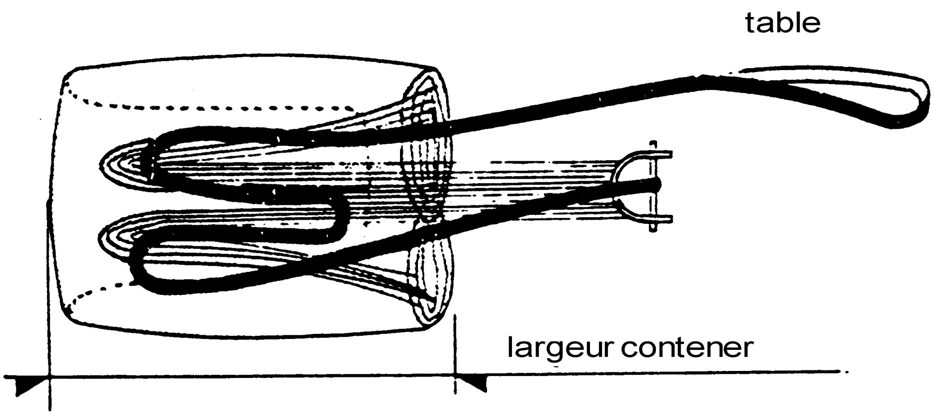


Fig 10

5) Méthode de pliage

- Allonger le parachute sur une table. Accrocher la cheminée, tendre le parachute en tirant sur la sangle et maintenir en cette position

- Démêler les suspentes, mettre les panneaux (P) et les suspentes (S) en ordre (P1,P2,...,P12)

- Prendre une suspente extérieure (P1 ou P12) et placer les panneaux les uns sur les autres (P1/P2, P3/P4, .., P11/P12) Descendre le long des suspentes (De la toile vers l’anneau) et vérifier que les suspentes sont bien alignées.
- Diviser le paquet de 12 anneaux en deux. Reprendre le dernier panneau en contact avec la table (P12) et passer la main entre P12 et P11 puis entre P11 et P10 ,.. pour effacer les faux plis entre chaque panneau (surtout lorsque le parachute comporte des panneaux radarisables)

- Mettre des poids sur chaque tas de panneaux et bien superposer ceux ci en tenant les suspentes. Les bords d’attaques doivent être bien superposés.

- Mettre le parachute en « sapin » en fonction de la grosseur désirée. Replier une partie des panneaux. Replier la deuxième partie
- Pliage en « S » Décrocher la cheminée et plier selon la longueur du container

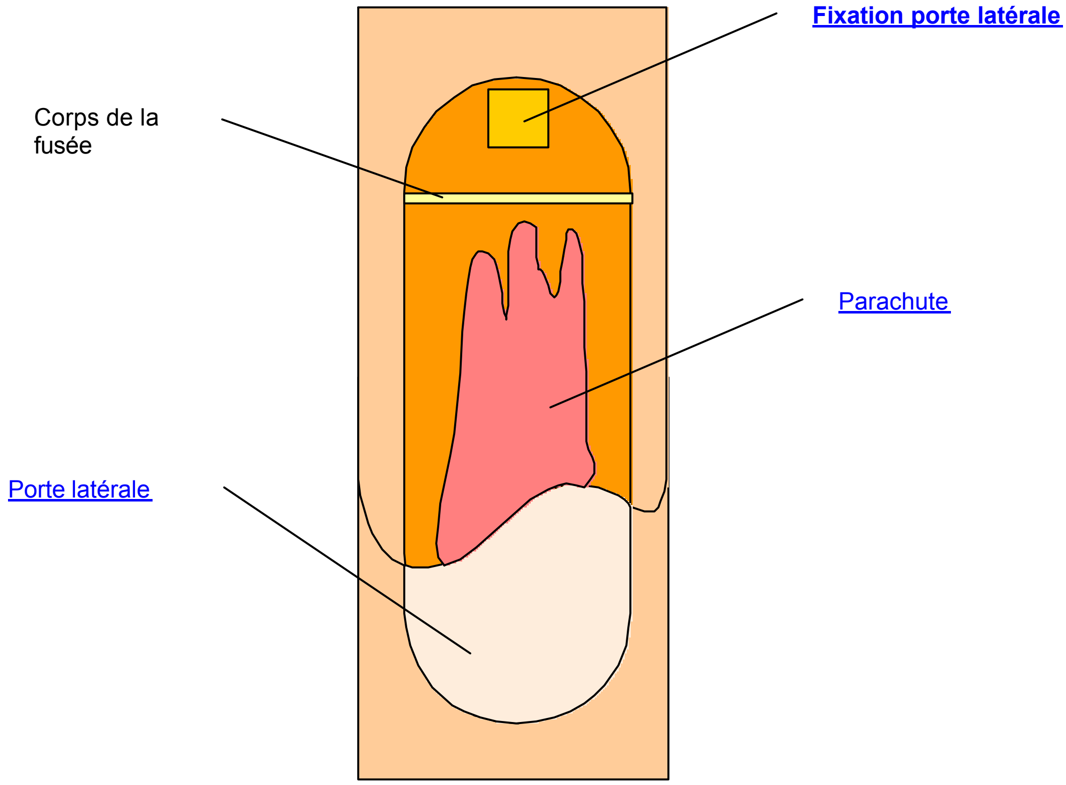
- Ramener les suspentes sans oublier les feuilles de protection en papier de soie. Disposer les suspentes en « S » ainsi que la sangle

- Replier le tout en rond, suspentes à l’intérieur. Mettre le boudin dans une demi coquille et recouvrir le tout avec l’autre demi-coquille.

- Serrer les deux demis coquilles avec une ficelle (noeud auto serrant) en prenant garde que la toile et les suspentes ne sont pas coincées entre les bords des coquilles.

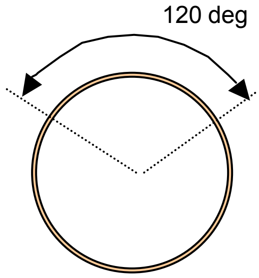
Secteur Espace de l'anstj- 16, place Jacques Brel - 91130 RIS-ORANGIS
Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43
http://anstj.mime.univ-paris8.fr

CASE PARACHUTE



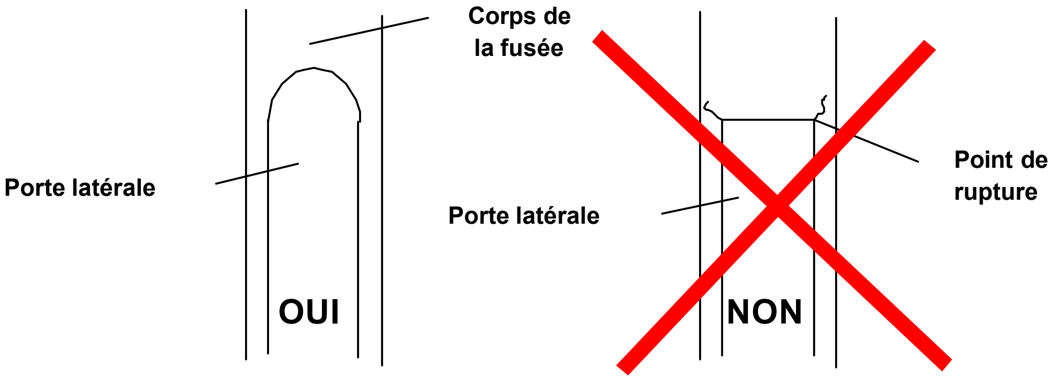
CASE PARACHUTE
Porte latérale

La case parachute est ouverte sur un tiers de la section du corps de la fusée. Elle est fermée par la porte latérale qui doit s'ouvrir à culmination et permettre au parachute de s'ouvrir.



La longueur de la porte latérale est comprise entre 20 et 30 cm, cela dépend de la taille du parachute.

Les bords de la porte latérale doivent être impérativement arrondis afin d'éviter les points de rupture sur le corps de la fusée.



Pour le traçage de la porte sur le corps de la fusée, il convient de réaliser un gabarit en papier ou bristol. Attention à bien calculer la largeur du gabarit !

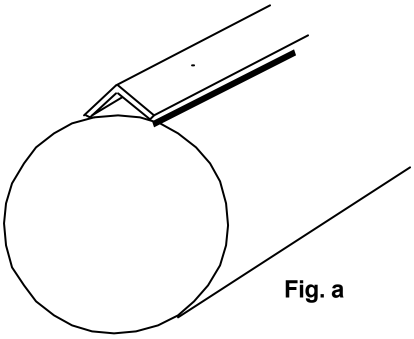


Fig. a

Tracer un axe le long de la fusée avec une cornière (Fig. a). Cet axe devra se trouver au milieu de deux ailerons (Fig. b)

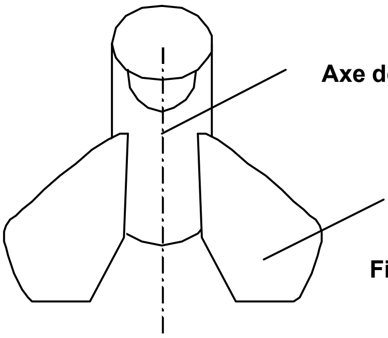
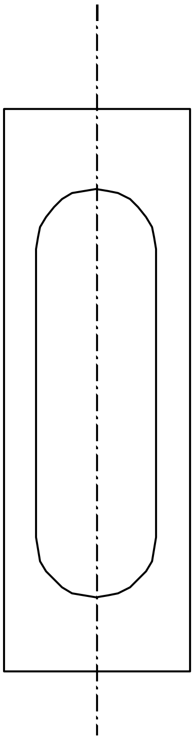
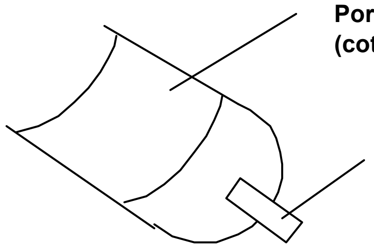


Fig. b

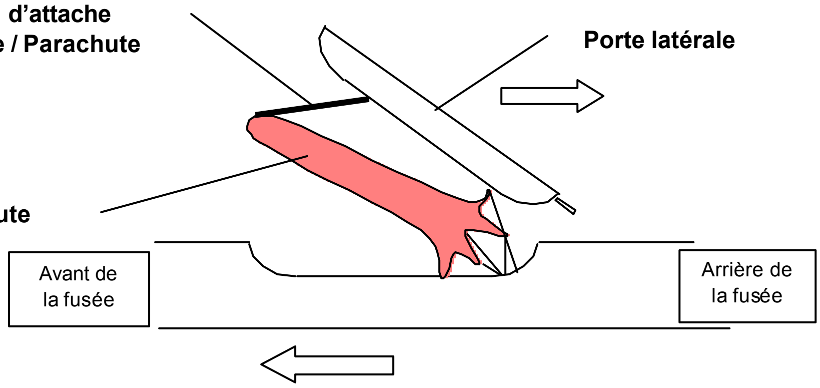


La découpe de la porte se fait au cutter, soit en utilisant un gabarit découpé dans une tôle d'aluminium très fin ou en suivant les traits droits avec la cornière et en négiciant les arrondis en suivant simplement le trait.

Pour la maintenir bien fermée, il faut fixer une languette rigide en bas de la porte latérale. Elle doit être collée à la colle [Epoxy].



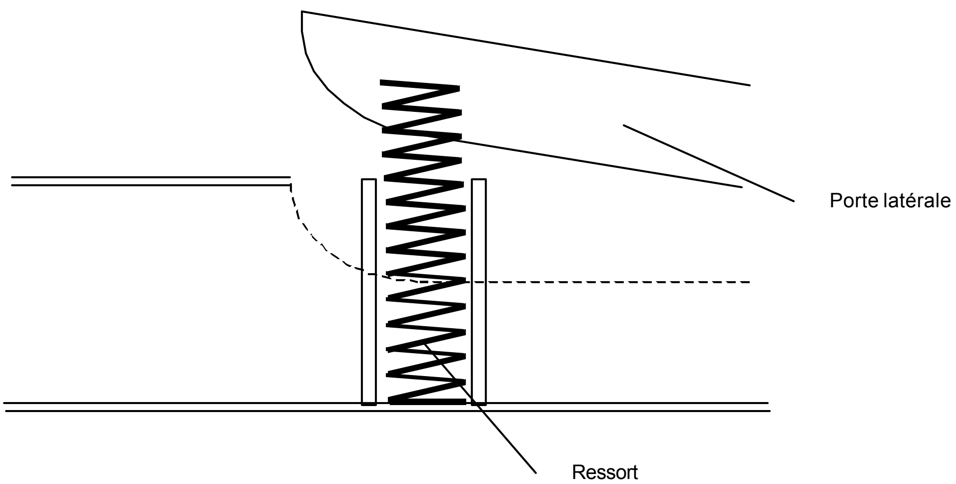
Pensez à attacher la porte au parachute. En s'ouvrant, emportée par le vent, elle contribuera à l'extraction du parachute.



Ejection de la porte latérale

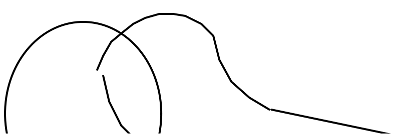
Afin de garantir une ouverture franche du parachute, nous vous conseillons d'installer un moyen d'éjecter la porte latérale et le parachute hors de la fusée. Voici deux exemples :

Le ressort



Les élastiques

Ils permettent de "pousser" le parachute en dehors de la fusée.



CASE PARACHUTE
Parachute

Le parachute est l'élément essentiel pour la récupération de la fusée. Sa taille va dépendre de la masse de l'ensemble de la fusée. La vitesse de descente sous parachute doit être comprise entre 5 m/s et 15 m/s.

Calcul de la surface du parachute $S_p = 2 M g / (r_0.C_x.V^2)$ en m^2.

M : masse de l'ensemble de la fusée (en kg)

g : accélération de la pesanteur ($g = 9{,}81\ m/s^2$)

r_0 : Masse volumique de l'air ($r_0 = 1{,}3\ kg/m^3$)

C_x : Coéfficient de pénétration dans l'air ($C_x = 1$)

V : Vitesse de descente (en m/s)

On vise en général, une vitesse de descente de 10 m/s

Voir courbe d'étude

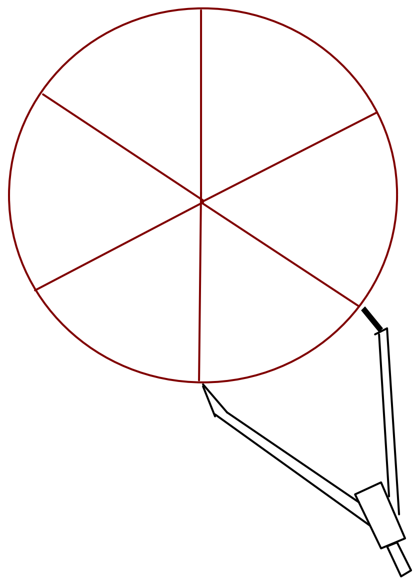
Il est réalisé en toile de Spi ou toile de cerf-volant. Il peut être hémisphérique ou cruciforme.

Le parachute hémisphérique

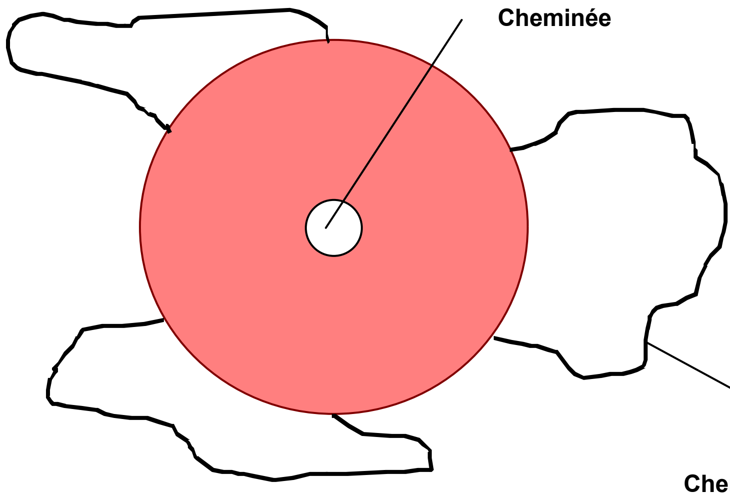
Masse (kg)	Diamètre (cm)
1	43,8
1,1	46,0
1,2	48,0
1,3	50,0
1,4	51,9
1,5	53,7
1,6	55,4
1,7	57,2
1,8	58,8
1,9	60,4
2	62,0

Le tableau ci-dessus montre le diamètre du parachute en fonction de la masse de la fusée à la vitesse de descente de 10 m/s (36 km/h).

La toile est découpée autour d'un gabarit de carton avec un fer à souder dont la panne est aplatie.



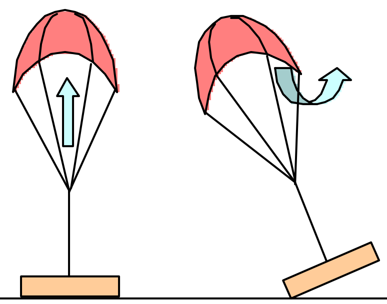
Les repères de fixation sont tracés sur le gabarit en utilisant un compas dont l'écartement correspond au rayon du parachute.



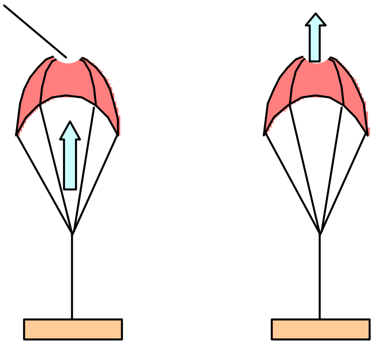
On attache 6 suspentes au parachute. Une cheminée de 3 ou 4 cm de diamètre est découpée au centre. Elle permet à la fusée de ne pas se balancer sous son parachute.

Suspente (double)

Cheminée



Sans cheminée, l'air s'engouffre dans le parachute et a tendance à vouloir s'échapper (surpression). Il le fait par les cotés du parachute et fait basculer l'ensemble.

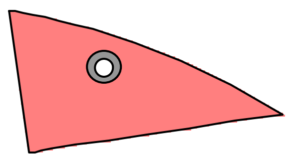


Avec une cheminée, l'air peut s'écouler par le dessus du parachute, mais pas trop sinon le parachute ne servirait à rien ! L'ensemble reste vertical.

Pour fixer les suspentes sur le parachute, vous pouvez utiliser deux solutions :

<u>Les œillets</u>

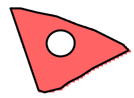
Ils sont placés à 1 cm du bord du parachute.



Attention, nous vous conseillons de réaliser des tests sur des chutes de toile.

Les renforts

Collez des deux cotés de la toile, des petits renforts en toile. Percez à l'aide d'un fer à soudé chaud (Nettoyez le bien après !)

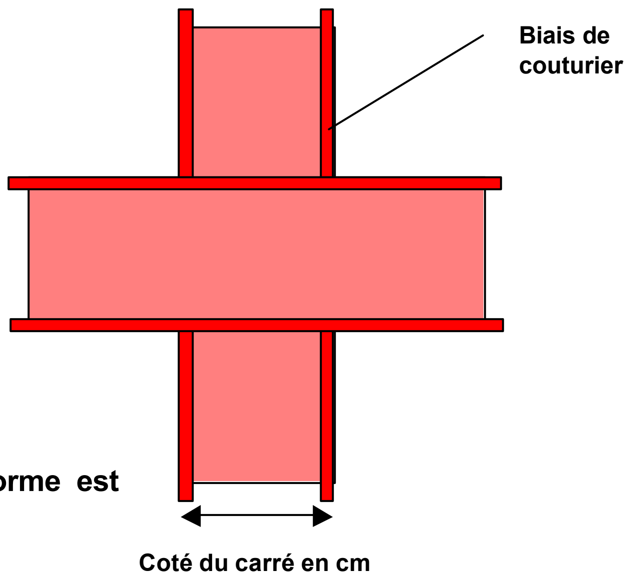


Le parachute cruciforme

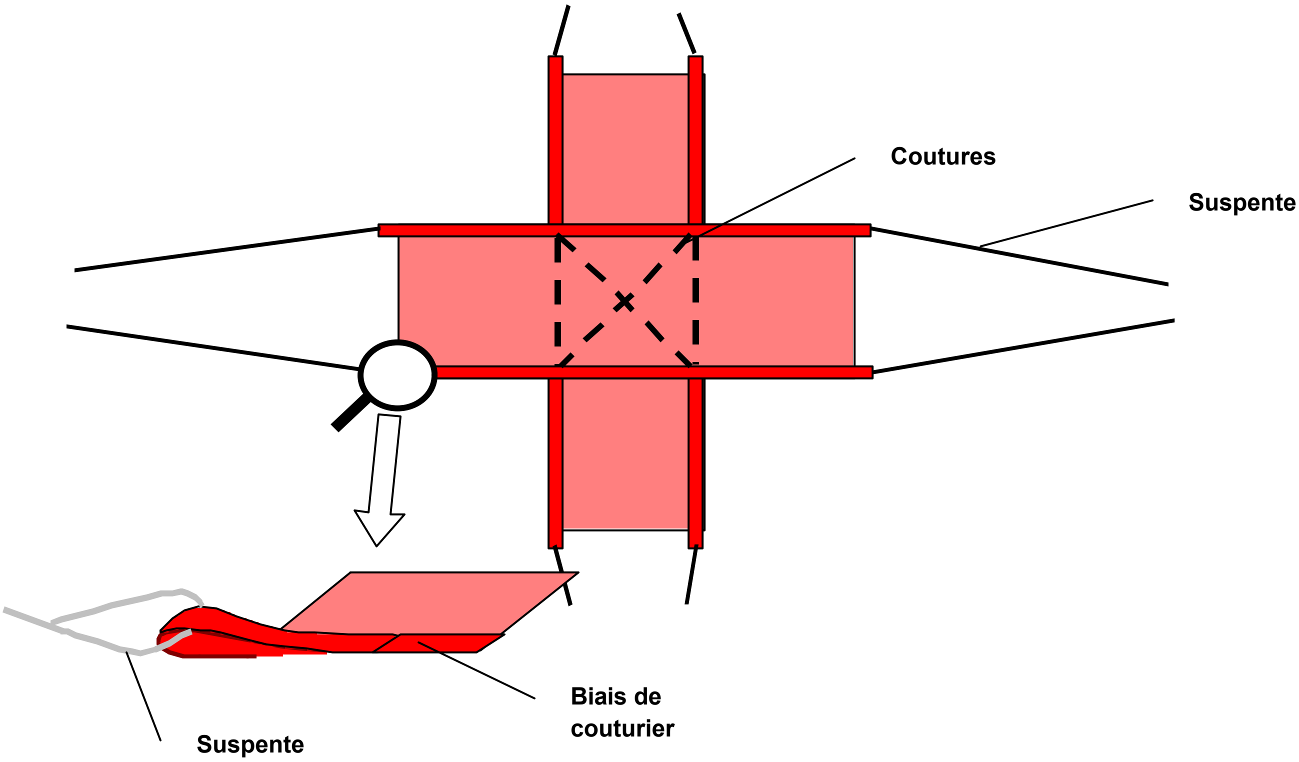
Le parachute cruciforme est utilisé pour des ouvertures à grande vitesse. Il est constitué de deux bandes de toile de Spi renforcées par des biais de couturier.

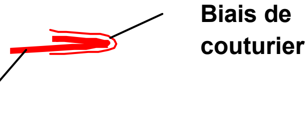
Voici le tableau de correspondance entre la masse de la fusée et les dimensions du parachute cruciforme pour une descente à 10 m/s.

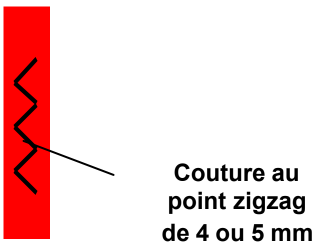
Masse (Kg)	Coté du carré (cm)
1	17,4
1,1	18,2
1,2	19,0
1,3	19,8
1,4	20,6
1,5	21,3
1,6	22,0
1,7	22,7
1,8	23,3
1,9	23,9
2	24,6



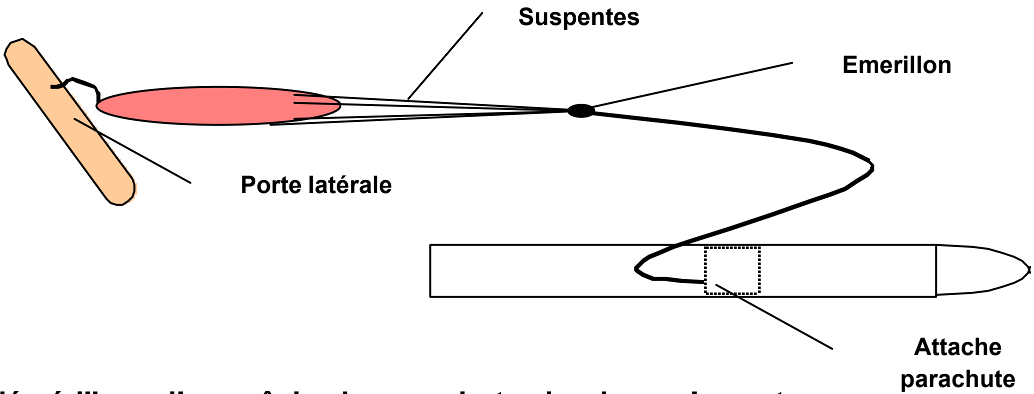
La surface du parachute cruciforme est composée de cinq carrés.


Coutures
Suspente
Biais de couturier
Suspente


Biais de couturier
Toile de Spi


Couture au point zigzag de 4 ou 5 mm

L’ensemble du parachute devrait avoir la forme suivante :



<u>L’émérillon</u> : il empêche le parachute de s’enrouler autour des suspentes et de se refermer. Attention il doit résister aux efforts dûs à l’ouverture à grande vitesse (malgré tout) du parachute. Un émérillon qui résiste à 10kg que l’on trouve dans le rayon des articles de pêche fera l’affaire.
Il ne faut pas négliger cet élément : voir la porte latérale s’ouvrir et le parachute se détacher de la fusée n’est pas une bonne chose…

<u>L’attache parachute</u> : elle doit se faire le plus près possible du centre de gravité de la fusée. La corde qui relie le parachute à la fusée doit être très solide et résister au moins à 50 kg !

N°

ETUDE SUR LA TENSION DES CORDES DANS LES SYSTEMES DE RECUPERATION

D'après le CRM (Italie)

Le rôle d'un système ralentisseur est de permettre une récupération en bon état des éléments constituant la pointe d'une fusée.

Les caractéristiques aérodynamiques d'un parachute étant déterminées, il est essentiel que le système "suspentes + sangle" résiste aux tensions très importantes qu'il aura à subir lors de l'extraction et de l'ouverture du parachute.

Cette étude permet la simulation théorique des mécanismes d'ouverture, cette dernière pouvant être instantanée ou retardée, et d'en déduire les valeurs maximales des tensions agissant sur les liaisons entre pointe et parachute.

1) CAS MECANIQUE GENERAL :

1) Tension maximum d'une corde reliant 2 corps dotés initialement par une force instantanée d'une vitesse relative :

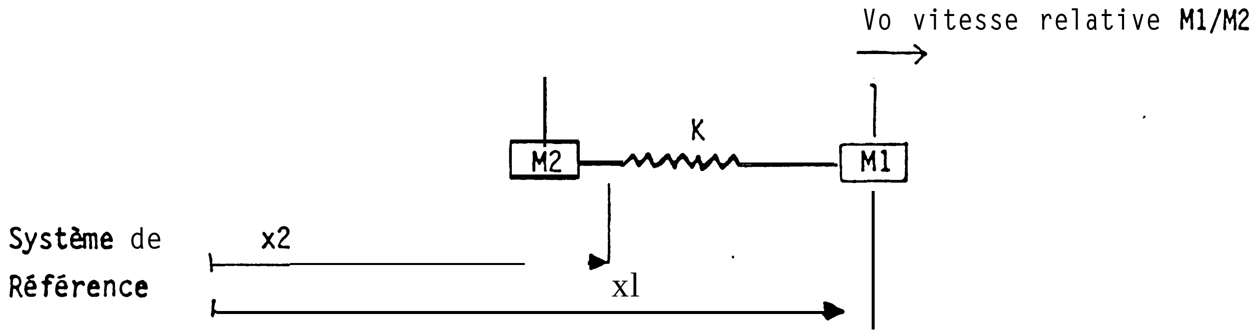
Soient 2 corps M1 (le parachute) et M2 (la cellule), initialement unis puis séparés par une force instantanée (système pyrotechnique, ressort . ..) à une vitesse relative Vo.

Les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie donnent :

$$\underbrace{M1\ Vo}_{\text{Repère de M1}} = \underbrace{M2\ \dot{x}2 + M1\ (\dot{x}1 + \dot{x}2)}_{\text{Système de Référence}}$$

$$\overbrace{\frac{1}{2}\ M1\ Vo^2} = \overbrace{\frac{1}{2}\ M2\ \dot{x}2^2 + \frac{1}{2}\ M1\ (\dot{x}1 + \dot{x}2)^2 + \frac{1}{2}\ \frac{T^2}{K}}$$

avec $\begin{cases} T \text{ tension de la corde} \\ K \text{ constante élastique} \end{cases}$



La tension maximale de la corde est obtenue lorsque la vitesse $\dot{x}1$ de M1 s'annule :

$$M1\ Vo = \dot{x}2\ (M1 + M2)$$

$$M1\ Vo^2 = M2\ \dot{x}_2^2 + M1\ \dot{x}_2^2 + \frac{T^2\ max}{K}$$

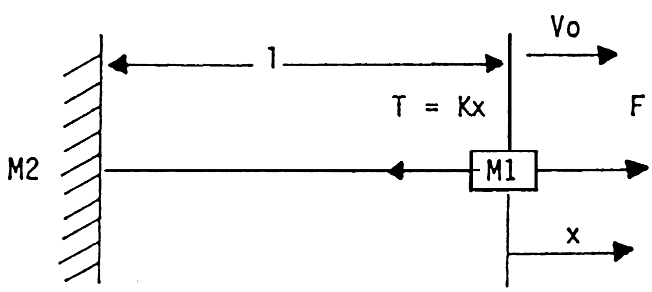
$$\text{D'où} \quad T\ max = \pm\ vo\ \underbrace{\sqrt{K\ \frac{M1\ M2}{M1 + M2}}}_{\text{Facteur de choc}}$$

2) Tension maximum d'une corde reliant deux corps dotés d'une vitesse **relative** sous l'effet d'une force constante.

Soit deux corps de masses M1 (le parachute) et **M2** (la cellule) initialement unis et **séparés** sous l'effet d'une force constante (résistance de l'air sur le parachute) **à** une vitesse Vo.

Pour simplifier le problème, l'un **des** deux corps (M2) possédera une masse supposée infinie.

Dans cette hypothèse, à partir de t = o, la corde se tend et Ml, sur lequel s'applique une force constante F, est doté d'une vitesse relative Vo.



Les conditions initiales sont :

$$x\ (o) = 0$$
$$\dot{x}\ (o) = Vo$$

La solution de l'équation est de la forme :

$$x = \frac{Vo}{W}\ \sin\ wt - \frac{F}{K} \cdot \cos\ wt + \frac{F}{K} \qquad \text{avec} \quad : w^2 = \frac{K}{M}$$

La tension maximum est:

$T\ max = K.x\ max$

et x max est obtenu pour $\dot{x} = \emptyset$,

ce qui donne $tg\ wt = \dfrac{-V_o K}{F W}$

En développant :

$$T\ max = \sqrt{V_o^2 K M1 + F^2} + F$$

Notons que T max a une solution formée de :

- 1 terme (F) correspondant avec la tension d'équilibre (F = T) si F était appliqué lentement.
- 1 terme (V_o^2 K M1) introduisant la vitesse relative.
- 1 terme (F^2) exprimant l'application instantanée de la force F.

Transposons ce résultat au problème précédent, dans le cas ou M2 est doté d'une masse finie. Par analogie, on peut attendre :

$$T\ max = \sqrt{V_o^2\ K \frac{M1\ M2}{M1 + M2} + F^2 \frac{M2^2}{(M1 + M2)^2}} + F \frac{M2}{M1 + M2}$$

3) Tensions statiques et dynamique

La formule définie précédemment:

$$F = \sqrt{V_o^2\ K \frac{M1\ M2}{M1 + M2} + F^2 \frac{M2^2}{(M1 + M2)^2}} + F \frac{M2}{M1 + M2}$$

est la composition des tensions dues à la sortie du parachute et à son ouverture.

+ La tension due à la sortie du parachute est la tension dynamique qui correspond au fait que la force F est nulle. Nous retrouvons alors le résultat du paragraphe 1.

$$T\ (dyn)\ max = Vo \sqrt{K \frac{M1\ M2}{M1 + M2}}$$

Elle dépend de la vitesse appliquée initialement Vo, des masses cellules et parachute et du coefficient d'étasticité K.

+ La tension due à l'ouverture du parachute est la tension statique qui correspond au fait que la vitesse initiale Vo est nulle :

$$T\ (stat)\ max = 2\ F \frac{M2}{M1 + M2}$$

Elle ne dépend que de la force F de type aérodynamique, le terme $\dfrac{M2}{M1 + M2}$ ne jouqnt qu'un rôle de coefficient.

II) APPLICATION A LOUVERTURE D'UN PARACHUTE.

1) Elasticité d'une corde. Détermination de K.

Par de simples expériences de traction, il est possible de **définir:**

- le graphique allongement (Al)-charge (P)
- la charge de rupture Pr

A la limite de rupture, les suspentes se comporteront d'une façon parfaitement élastique, avec le module **d'élasticité** E donne par :

$$E = \frac{l_0}{\Delta l} \cdot \frac{P}{A}$$

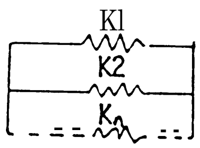
avec $\begin{cases} l_0 \text{ longueur initiale de la corde} \\ A \text{ section de la corde} \end{cases}$

La constante élastique K sera :

$$K = \frac{EA}{l_0}$$

Donc, pour une corde donnée, K est proportionnel à sa section et inversement proportionnel à sa longueur.

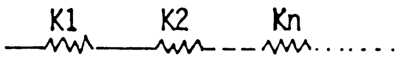
Si nous prenons plusieurs cordes en **parallèles** : $K = \Sigma K i$



avec, pour n cordes de même constante **élastique** $\bar{K}$: $K = n \bar{K}$

Inversement, si les cordes élastiques sont mises en série :

$$\frac{1}{K} = \Sigma \frac{1}{KY}$$



2) Détermination de la vitesse relative Vo

La vitesse relative est due d'une part à 1 'action de separation entre la pointe et le parachute, d'autre part à celle de la **résistance,** d'autre part à celle de la **résistance** de l'air sur le parachute.

Nous allons tout d'abord **déterminer** séparément les vitesses dues aux diverses causes :

+ Vitesse relative provoquée par la séparation :

Soient Ml, le parachute, et M2**,** la pointe, deux corps in .**itialement** unis et Q l'énergie cinétique créée par le **système** de **séparation** (charge pyrotechnique, piston, ressort ...), ceci dans la direction horizontale.

Les lois de conservations donnent :

$$Q = \frac{1}{2} M1\ V1^2 + \frac{1}{2} M2\ V2^2$$

$$0 = M1\ V1 + M2\ v2$$

Où V1 et V2 sont les vitesses absolues **après** l'explosion dans un **système** de référence en translation à la vitesse V rel.

$$V1 = - \sqrt{\frac{2Q\ M2}{M1\ (M1 + M2)}}$$

$$V2 = \sqrt{\frac{2Q\ M1}{M2\ (M1 + M2)}}$$

$$Vo = V2 - V1 = \sqrt{\frac{2Q}{M1 + M2}} \cdot \left[\sqrt{\frac{M2}{M1}} + \sqrt{\frac{M1}{M2}}\right]$$

Il est possible de démontrer que le résultat ne change pas pour une direction verticale.

Par exemple, dans le cas d'une'extraction par une charge pyrotechnique:

Théoriquement, 1 Kg de poudre développe une énergie de 270 000 à 290 000 Kgm et environ 30% de cette énergie est **transformée** en énergie cinétique (expérience de Cherpy).

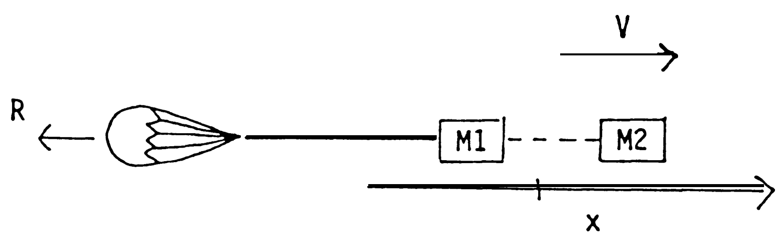
Ou bien, lors de l'utilisation d'un ressort extracteur

$$Q = -\frac{K}{2} (\Delta x)^2$$

avec K coefficient d'élasticité du ressort
Δx allongement du ressort

+ Vitesse relative provoquée par l'ouverture du parachute

En supposant **instantanée** cette ouverture :



Tant que la corde qui relie MI et **M2** n est pas tendue, la masse **M2** maintient sa propre vitesse et son équation est :

$$x2 = VT$$

Pour la masse M1 :

$$R = + M1\ \ddot{X}1$$

$$\ddot{X}1 = - \frac{H}{M1} \dot{x}_1^2 \qquad \text{avec } H = \frac{1}{2} \rho\ s\ c_A$$

En posant $\dot{x}1 = y$

$$\dot{y} = -\frac{H}{M1}y^2 \qquad dt = -\frac{M1}{Hy^2}\,d\,y \qquad t - to = \left[\frac{M1}{Hy^2}\right]_{y°}^{y}$$

$to = 0 \qquad yo = V$

$$t = \frac{M1}{Hy} - \frac{M1}{HV}$$

Soit également :

$$y = \frac{V\ M1}{HVt + M1} \qquad \text{avec} \quad y = \dot{x}1$$

D'où $\quad x1 - x1\ (o) = \dfrac{M1}{H} \quad Log \left[(M1 + HVt)\right]_{to}^{t}$

Or $\quad to = 0 \qquad x1\ (o) = 0$

$$x1 = \frac{M1}{H} \quad Log \quad \left(1 + \frac{HVt}{M1}\right)$$

La distance relative q entre M1 et M2 est $q = x2 - x1$

$$q = Vt - \frac{M1}{H}\left[Log \quad \left(1 + \frac{HVt}{M1}\right)\right]$$

Cette équation ne peut être résolue arithmétiquement mais il est possible d'obtenir une solution approximative par un développement en série :

$$q = q\ (o) + q'\ (o) + \frac{1}{2}q''\ (o)\ t^2 + \ldots$$

Comme $to = 0 \qquad q\ (o) = 0 \qquad$ et $\qquad q'\ (o) = 0$

$$q \simeq \frac{1}{2}\ \frac{HV^2}{M1}\ t^2$$

Au temps $t = \bar{t}$ où la corde est tendue $(q = lo)$

$$lo \simeq \frac{1}{2}\frac{HV^2}{M1}\ \bar{t}^2$$

D'où $\quad \bar{t} \simeq \dfrac{1}{V}\sqrt{\dfrac{2\ M1\ lo}{H}}$

La vitesse relative Vo est alors :

$V\ rel = \dot{x}2\ (\bar{t}) - \dot{x}1\ (\bar{t})$

$V\ rel = V - y\ (\bar{t})$

$$Vo \simeq V\ \frac{\sqrt{\beta}}{1 + \sqrt{\beta}} \qquad \text{avec} \quad \beta = \frac{2\ H\ lo}{M1}$$

t Résistance de l'air . Détermination de F

En fait, la force F, qui est la résistance de l'air à l'avancement due à l'ouverture du parachute, n'est pas constante puisque la vitesse évolue constamment, mais il est possible de considérer une fourchette de variation de F telle que :

$H (V - Vo)^2 \leqslant F \leqslant H V^2$.

avec $H = \frac{1}{2} \rho s c_A$

V = Vitesse de la pointe à l'ouverture d'un parachute

d'où F max = $H V^2$

Les divers paramètres étant explicités, il reste à les utiliser à bon escient dans les phases de vol choisies préalablement par l'expérimentateur.

3) Séparation avec ouverture instantanée du parachute

Dans ce cas, il faut utiliser la formule générale :

$$T\ max = \sqrt{Vo^2\ K \frac{M1\ M2}{M1 + M2} + F^2 \frac{M2^2}{M1 + M2}} + F \frac{M2}{M1 + M2}$$

Vo est alors composition de la vitesse de séparation et de la vitesse de ralentissement du parachute avec S et c_A, caractéristiques du parachute ouvert.

4) Séparation avec ouverture retardée du parachute

Si l'ouverture est suffisamment retardée pour que la première tension des cordes ne soit causée que par la séparation, il n'apparaitra dans un premier temps que la tension dynamique :

$$T\ max = Vo \sqrt{K \frac{M1\ M2}{M1 + M2}}$$

La vitesse relative Vo sera la composition de la vitesse relative de séparation et d'une vitesse relative aérodynamique assez faible puisque S et c_A seront ceux d'un parachute plié.

Dans un deuxième temps, le parachute s'ouvrira et les cordes n'auront qu'à supporter la tension statique :

$$T\ max = 2\ F \frac{M2}{M1 + M2}$$

Il est d'ailleurs possible, en considérant le mouvement visqueux dû à l'imparfaite élasticité des cordes, de prendre :

$$T\ max \simeq 1{,}7\ F \frac{M2}{M1 + M2}$$

La tension de rupture devra donc être supérieure à chacune des tensions maximales, contrairement à l'ouverture instantanée où elle doit être supérieure à leur somme.

III) DISPOSITIFS RALENTISSEURS

Mis en service préalablement à la sortie du parachute, ils permettent de réduire la vitesse initiale V donc la tension statique d'ouverture.

Deux systèmes principaux existent : la banderolle et les aérofreins.

1) Banderolle

Elle consiste en une bande de toile, dont les deux faces comportent des poches. Cette bande est initialement enroulée et reliée à la cellule par une courte sangle, cependant suffisante pour permettre une sortie complète de la bande enroulée hors de la cellule.

La banderolle se déroule alors, chaque poche se gonflant successivement et permet un freinage progressif.

La banderolle étant en tension permanente, il n'y a pas de réelle composition entre tensions statiques et dynamiques. Seule. existe la tension statique augmentée d'une tension dynamique réduite due au déroulement de la banderolle. En pratique, sur ce type de banderolle, nous pouvons prendre :

$$T\ max = 1{,}5\ F\ \frac{M2}{M1 + M2}$$

2) Les aérofreins

Ce sont des surfaces intégrées au corps qui sont sorties au moment opportun pour augmenter le maître couple et le coefficient de trainée de l engin.

Avec sf Maitre couple des aérofreins
sc Maitre couple de la cellule
Cac Coefficient de trainée de la cellule
Caf Coefficient de trainée des aérofreins.

Avant l'ouverture des aérofreins, la trainée est :

$$F = \frac{1}{2} \rho \ sc\ V^2 C_{ac}$$

Après l'ouverture :

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 (sc\ Cac + sf\ Crf)$$

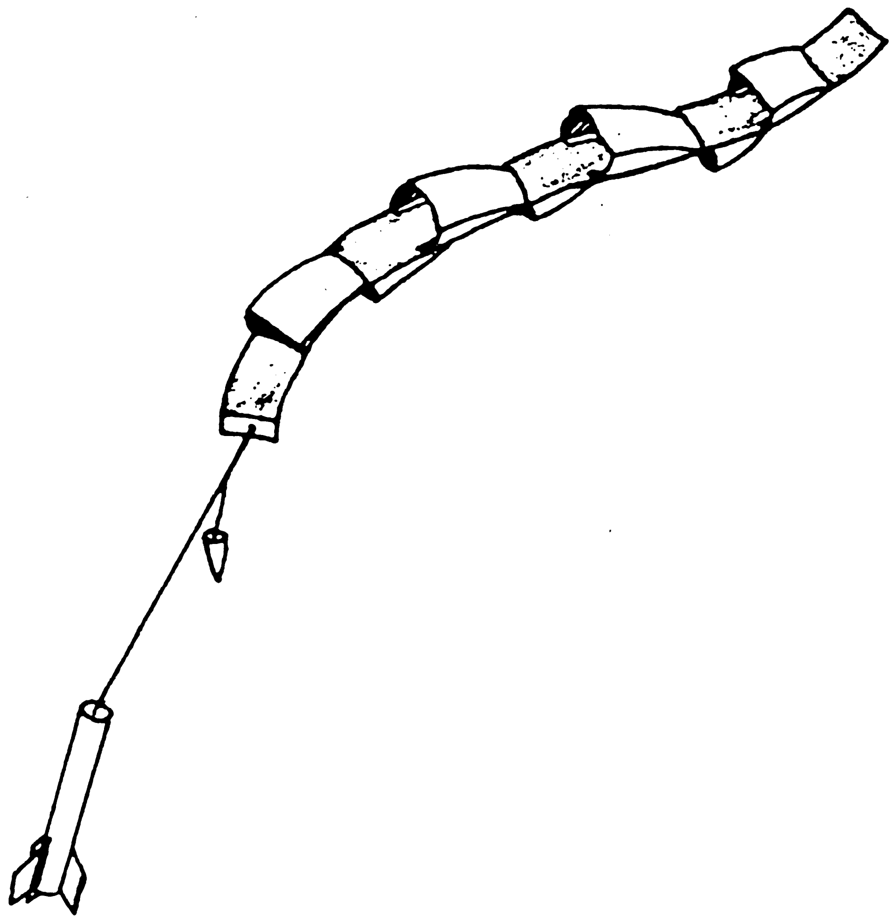
$$F = \frac{1}{2} \rho V^2\ Sc\ (Cac + Caf\ \frac{sf}{sc})$$

En posant $Cat = Cac + Caf\ \frac{sf}{sc}$

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2\ sc\ C\,a\,t$$

La résistance de trainée est donc identique dans sa forme avant et après l'ouverture des aérofreins, au passage instantané prêt du coefficient Cac au coefficient Cat.

RÉCUPÉRATION PAR BANDEROLLE :



T : tension des cordes

F : traînée