



HAL
open science

Simulation du comportement de ballons stratosphériques ouverts

Frank Petitjean, Gérard Rio, Ahmad Hamdani, Xavier Soors

► **To cite this version:**

Frank Petitjean, Gérard Rio, Ahmad Hamdani, Xavier Soors. Simulation du comportement de ballons stratosphériques ouverts. CSMA 2015 - 12ème Colloque National en Calcul des Structures, May 2015, Giens, France. hal-01502302

HAL Id: hal-01502302

<https://hal.science/hal-01502302>

Submitted on 5 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation du comportement de ballons stratosphériques ouverts

F. Petitjean¹, G. Rio², A. Hamdani³, X. Soors⁴

¹ RTIME, frank.petitjean@rtime.fr

² LIMATB, Université de Bretagne Sud, gerard.rio@univ-ubs.fr

³ ENSIBS, Université de Bretagne Sud

⁴ CNES, Toulouse, xavier.soors@cnes.fr

Résumé — L'étude présente l'application d'une méthode de relaxation dynamique (RD) à la simulation de l'équilibre mécanique de ballons stratosphériques de grandes tailles (de l'ordre de 50m) en situation de mission. La méthode permet de simuler le changement de forme à partir de la forme à plat, et sous les chargements complexes imposés. Le bilan des forces globales en présence est bien respecté, mais les contraintes locales restent actuellement bruitées. Les déformées sont cohérentes avec les observations expérimentales.

Mots clés — relaxation dynamique, membrane, ballon stratosphérique.

1 Introduction

Depuis une cinquantaine d'années le CNES développe et met en œuvre des ballons stratosphériques ouverts (BSO) de très grande taille, utilisés pour des missions scientifiques. Ces aérostats gonflés à l'hélium utilisent le principe d'Archimède pour emporter jusqu'à 3t des charges à des altitudes comprises entre 17 et 40 km. Une fois la mission terminée (de quelques heures à quelques jours) l'hélium est évacué et la charge utile redescend sous parachute [?]. La forme de ces ballons a été calculée dans les années 60 de façon à limiter les contraintes longitudinales dans l'enveloppe, d'où une forme en « goutte d'eau inversée ». Les flux d'efforts sont donc essentiellement méridiens et ils sont repris par des rubans mécaniques qui encadrent les fuseaux constitutifs de l'enveloppe du ballon [2]. L'extrême élanement de la structure (le rapport entre longueur du fuseau et épaisseur du film et de plusieurs millions) ajouté aux faibles tensions dans l'enveloppe (quelques Pascals de suppression au sommet) entraînent de grandes instabilités et de fortes non-linéarités géométriques. Les premiers modèles de calcul étaient basés sur une forme simplifiée du ballon supposée connue à la plénitude, et non sur la forme réelle qui résulte de l'équilibre des forces. Plus récemment, des calculs basés sur la minimisation l'énergie élastique ont été proposés pour optimiser la forme des ballons [3]. D'autres auteurs ont proposé des modélisations basées sur la méthode des éléments finis en utilisant un solveur dynamique explicite dans l'objectif de déterminer des modes d'instabilités [5].

L'objectif de notre travail est d'une part, de calculer la forme du ballon à la plénitude, c'est à dire lorsqu'il se trouve en état d'équilibre statique au plafond, et d'autre part d'obtenir une bonne approximation de l'état de contrainte dans le ballon. C'est ce deuxième objectif qui est le plus difficile à réaliser compte tenu des nombreuses instabilités. La première originalité de ce travail est de considérer la forme réelle du ballon, c'est-à-dire la forme de découpe du fuseau à plat, et de simuler la mise en pression afin d'obtenir la forme tridimensionnelle du ballon. La deuxième originalité est d'utiliser une méthode de relaxation dynamique pour obtenir un état d'équilibre statique.

2 Méthode de résolution

Le problème de structure correspond à la recherche de l'équilibre d'une membrane soumise à son poids propre et à des efforts externes de pression. L'hypothèse de membrane est justifiée par l'épaisseur du film (quelques dizaines de microns) au regard des autres dimensions : typiquement de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. La membrane est très faiblement tendue et son équilibre fait apparaître des zones en compression générant des instabilités de forme. Le problème est donc en premier lieu une étude

de recherche de forme. Dans ce domaine, les méthodes de relaxation dynamique (RD) sont classiquement utilisées [8, 4]. Dans ce travail, nous avons utilisé une méthode de relaxation dynamique particulière, développée dans de précédents travaux [10, 9], avec la prise en compte d'amortissement cinétique et/ou visqueux. L'idée principale des méthodes (RD) est de simuler un transitoire dynamique amorti de manière optimale pour atteindre rapidement un état quasi-stable : la forme est "globalement" stable, mais localement il peut subsister des instabilités. Ainsi la méthode ne garantit pas l'unicité de la solution. Dans la pratique différentes solutions peuvent effectivement être obtenues pour un état de chargement donné. Cependant les écarts entre ces différentes solutions sont très faibles, et sont représentatifs des instabilités qui existent localement. Notons donc que seule l'étape finale est réellement représentative d'un état physique. L'implantation numérique est faite dans le logiciel académique Herezh++ ([7]).

3 Applications

Le BSO étudié est composé de 74 fuseaux identiques. Un ruban d'une section approximative de 10 mm² relie les fuseaux deux à deux, et assure le transfert des efforts de l'enveloppe à la charge verticale portée. Le fuseau est représenté par un maillage triangulaire d'éléments membranes à interpolation linéaire. Le ruban est représenté par un maillage d'éléments 1D type bielle linéaire travaillant en traction/compression. Les deux maillages sont fusionnés (cf. 1). Les 2 éléments finis permettent de modéliser les transformations finies : grands déplacements et grandes déformations. Les dimensions du BSO étu-

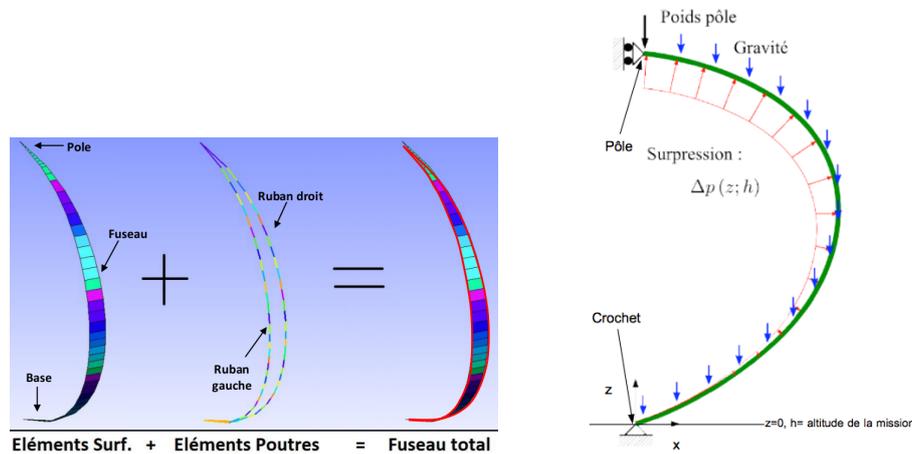


FIGURE 1 – a) Géométrie d'un fuseau + ruban, b) Chargement et conditions limites

diées sont imposantes : environ 50m de hauteur et 30m de diamètre dans le plan horizontal.

Le crochet, situé en bas du ballon, est positionné à une altitude donnée, par exemple au sol ou encore à l'altitude de la mission (dans notre cas à une altitude de 40 Km). Le crochet est donc bloqué tandis que le pôle supérieur est libre de se déplacer verticalement. À partir des données thermo-physiques de l'atmosphère et de l'hélium, on en déduit une loi d'évolution en altitude de la pression différentielle à appliquer sur la membrane (cf. 1b). Le chargement est constitué des poids propres des éléments structuraux (film et rubans), d'une force ponctuelle au sommet représentant la pièce polaire, et de la loi hydrostatique de suppression (valeur qui dépend de la position du ballon au cours de son évolution).

Il est postulé que dans le cas de membrane faiblement tendue, la loi de comportement intervient peu sur la forme finale de la structure gonflée. Dans une première approche elle est choisie isotrope linéaire.

3.1 Gonflage du ballon entier à partir d'une forme géométrique déjà courbe

Le ballon entier est modélisé par duplications circulaires du motif initial fuseau+ruban. Dans cette première application, le fuseau est initialement courbe et son profil est donné par la forme théorique en goutte d'eau inversée du ballon supposé axisymétrique. Le ballon est placé ici à une altitude arbitraire et on considère 2 niveaux de chargement intermédiaires en plus du chargement final. Aucune donnée quantitative expérimentale n'étant disponible, l'analyse pour ces cas de chargement est qualitative.

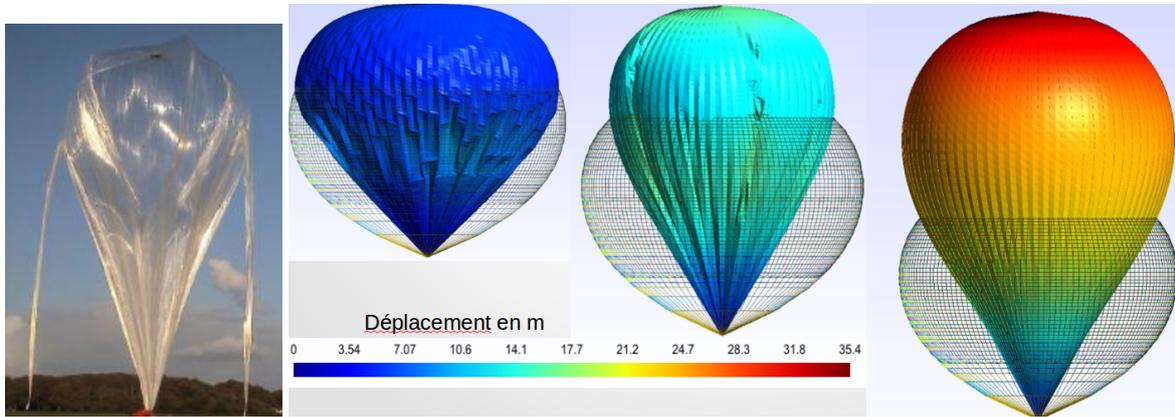


FIGURE 2 – a)BSO avant lâcher, b)Trois équilibres du ballon

Analyse : Les niveaux de chargement intermédiaires font apparaitre de nombreux plis, néanmoins pour chaque niveau, une solution quasi-stable est obtenue. La finesse de la description des plis dépend de celle du maillage. Cependant, pour le deuxième niveau de pression intermédiaire, on observe en plus des plis locaux, la présence de grands lobes plissés. Cette situation intermédiaire est qualitativement proche des formes observées expérimentalement pour de faibles altitudes (cf. 2a).

3.2 Gonflage d'un fuseau+ruban à partir d'une forme géométrique plane

Il s'agit ici d'étudier la possibilité de partir de la forme à plat réelle d'un fuseau, telle qu'elle est obtenue après découpe. De manière à garantir une symétrie cyclique des fuseaux, les bords du fuseau, au niveau des rubans, sont contraints, via des conditions cinématiques linéaires, à se déplacer dans un plan passant par l'axe de symétrie cyclique. La figure (3) montre que cette contrainte introduit des efforts orthoradiaux compressifs conduisant à l'apparition de plis au niveau des pôles. La méthode RD permet effectivement de modéliser le gonflage à partir de la structure à plat.

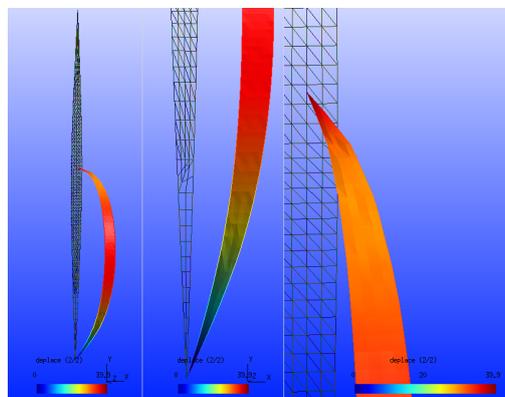


FIGURE 3 – Déplacement alt. 40 km. De gauche à droite : fuseau entier ; zoom au crochet ; au pôle sup.

TABLE 1 – Bilan d'archimède

Précision de convergence	Volume du ballon (m ³)	Masse du ballon (Kg)	Masse au crochet (Kg)	Masse de l'hélium (Kg)	Pourcentage d'erreur
10 ⁻³	99861.53	315.584	227.53	77.14	11.28
10 ⁻⁴	100670.43	315.584	178.35	77.76	1.75
10 ⁻⁵	100715.44	315.584	174.30	77.80	0.99

Il est possible de valider le calcul d'équilibre via un bilan global des efforts : forces de gravité, forces d'Archimède. Le tableau 1 montre que ce bilan est bien respecté à condition que la précision à convergence soit suffisamment forte : ici typiquement de l'ordre de 10⁻⁴. La précision est calculée via une norme relative sur le résidu statique d'équilibre et l'énergie cinétique.

3.3 États de contrainte

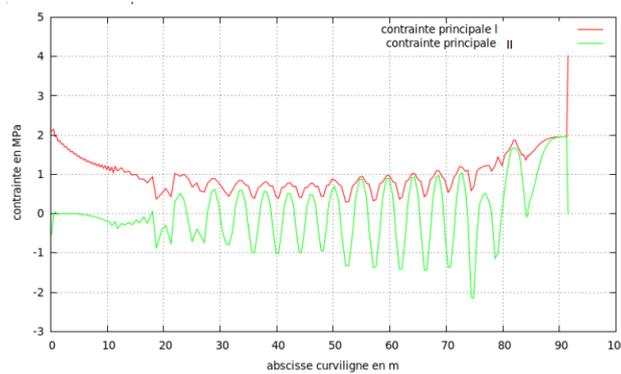


FIGURE 4 – Contraintes principales : 1 méridienne, 2 orthoradiale

La figure (4) présente la répartition des contraintes principales sur un quart du ballon le long d'un méridien et le long d'un parallèle. Même si on obtient des niveaux moyens de contrainte cohérents avec des estimations analytiques obtenues sur des modèles simplifiés, les oscillations ne représentent pas correctement la réalité. En particulier on observe des contraintes alternativement positives et négatives le long d'un parallèle. Or la membrane ne permet pas d'absorber ces efforts de compression. Deux solutions sont envisageables pour résoudre le problème : soit utiliser une finesse de maillage largement plus élevée, soit introduire une loi de comportement particulière qui s'annule dans les directions de compression. La première solution entrainera des temps de calcul élevés, la seconde solution est donc la solution retenue dans les travaux qui se poursuivent actuellement. Ce choix est cohérent avec des travaux analogues réalisés sur des ballons pressurisés (cf. par ex[6]).

4 Conclusion

L'étude montre que la méthode de relaxation dynamique est capable de modéliser le gonflement de très grandes structures membranaires instables sous des chargements complexes, ceci à partir d'une forme à plat. Les formes obtenues sont cohérentes avec les formes observées expérimentalement et le bilan global des forces est respecté. La précision des contraintes locales n'est pas satisfaisante. Le travail se poursuit par l'introduction d'une loi de comportement adaptée à la prise en compte de plis.

Références

- [1] <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/8508-les-aerostats-du-cnes.php>
- [2] T. Abe, T. Imamura, N. Izutsu, N. Yajima. *Scientific Ballooning*, Springer, 2009.
- [3] F. Baginski, M. Barg, W. Collier. *Existence theorems for tendon-reinforced thin wrinkled membranes subjected to a hydrostatic pressure load*, Mathematics and Mechanics of Solids, 13 (2008) 532-570.
- [4] M.R. Barnes. *Form-finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation*, Int. J. Space Struct., Multi Science Publishing, (14) 89-104, 1999.
- [5] X. Deng, S. Pellegrino. *Computation of partially inflated shapes of stratospheric balloon structures*, In 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf. (Schaumburg, IL).
- [6] T. Gerngross and S. Pellegrino. *Anisotropic viscoelasticity and wrinkling of superpressure balloons : simulation and experimental verification*. In 20th AIAA , ISBN : 9781615671397, pages 1277–1313, 2009.
- [7] G. Rio. *Herezh++ : dépôt APP - Certification IDDN.FR.010.0106078.000.R.P.2006.035.20600*, 2014.
- [8] W.J. Lewis. *Tension Structures, Form and Behaviour*, T. Telford , 2003.
- [9] J. Rodriguez, G. Rio, J.M. Cadou, J. Troufflard. *Numerical study of dynamic relaxation with kinetic damping applied to inflatable fabric structures with extensions for 3d solid element and non-linear behavior*, Thin-Walled Structures, Elsevier, 49(11) :1468-1474, 2011.
- [10] J. Troufflard, J.-M. Cadou, and G. Rio. *Recherche de forme des gilets de sauvetage gonflables*, Mécanique et Industrie, AFM EDP Sciences, (11) 117-122, 2010.