

Interface solide-fluide de matrice Yakam : Modélisation et dimensionnement d'une structure satellitaire par la h-version de la méthode des éléments finis

Lema Nkwalu Blaise¹, Cimbela Kabongo Joseph¹, Ntampaka Biruga Benjamin¹, Makengo Lutimba Hubert², and Kabeya Mukeba Leonard³

¹Département de physique et techniques appliquées, Faculté des sciences, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD Congo

²Université Nationale de Kinshasa (UNIKIN), Kinshasa, RD Congo

³Institut Supérieur de Techniques Appliquées (ISTA) Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: DR Congo with the National Program for Space and Technological Research (PNRST), is the subject of improvement of structure of satellite own the himself.

The problem is to simulate and model the structure from the point of view viscoplasticity, vibration and cryogenic behavior at very high altitudes. Sizing will be facilitated by the following approach:

1. cracking among the modes of ruin of structures;
2. the mechanics of fracture among models dealing with the cracking of structures;
3. finite element methods among numerical methods applicable in fracture mechanics.

KEYWORDS: modeling; structural mechanics; numerical methods; finite element methods; satellite.

RÉSUMÉ: La RDC avec le programme national de recherche spatiale et technologique (PNRST), fait l'objet de l'amélioration de la structure du satellite propre à elle-même.

La problématique est de simuler et modéliser la structure du point de vue viscoplasticité, vibration et comportement cryogénique à des très hautes altitudes. Le dimensionnement sera facilité par l'approche suivante :

1. La fissuration parmi les modes de ruine des structures ;
2. La mécanique de la rupture parmi les modèles traitant de la fissuration des structures ;
3. Les méthodes des éléments finis parmi les méthodes numériques applicables en mécanique de la rupture.

MOTS-CLEFS: modélisation; mécanique de structure; méthodes numériques; méthodes des éléments finis; satellite.

1 INTRODUCTION

Dans l'introduction de cet article, nous donnons d'abord le cadre dans lequel se place ce travail.

1.1 POSITION DU PROBLÈME

La recherche du bien-être a toujours poussé l'homme à envisager les voies et moyens en vue d'améliorer ses conditions de vie du milieu dans lequel il évolue.

L'être humain s'efforce d'approcher l'omniprésence et l'omniscience par les technologies nouvelles de l'information et communication, qu'aujourd'hui les agences spatiales mondiales essaient de contrôler et de gouverner le monde comme un village dans la globalisation et mondialisation.

Parmi ces agences, la national aeronautic and space administration « NASA », l'agence spatiale européenne « ESA », l'agence spatiale fédérale russe « FKA » et l'administration spatiale de Chine « CNSA » sont celles qui émergent.

Les autres nations tentent aussi de se lancer dans cette nouvelle technologie de l'information et communication tant en Afrique qu'à travers le monde, tels que l'Afrique du sud, South african national agency (SANSa), l'Algérie, agence spatiale

algérienne (ASA), l’Egypte, autorité nationale pour la télécommunication et les sciences de l’espace (NARSS), le Maroc, centre royal de télédétection spatiale, le Nigéria, agence nationale pour le développement et les recherches spatiales du Nigeria.

Cependant, la RDC avec le programme national de recherche spatiale et technologique (PNRST) dont le prototype de satellite a été présenté devant le chef de l’état lors du défilé au Kongo central le 30 juin 2015, fait l’objet de son amélioration de la structure propre à la RDC.

La problématique est de simuler et modéliser la structure du point de vue viscoplasticité, vibration et comportement cryogénique à des très hautes altitudes. Le dimensionnement sera facilité par l’approche suivante :

1. La fissuration parmi les modes de ruine des structures ;
2. La mécanique de la rupture parmi les modèles traitant de la fissuration des structures et
3. Les méthodes des éléments finis parmi les méthodes numériques applicables en mécanique de la rupture.

Une hypothèse simple est de considérer un polygone à n facettes sur lesquelles chacune porte un ressort, un amortisseur et une masse qui évoluent dynamiquement dans l’interface dite « solide – gaz ».

Cependant, les conflits armés à l’Est de la RDC a rendu ses frontières poreuses, les braconnages, les pillages des matières premières et le déplacement massif de la population à l’intérieur et l’extérieur du pays, créant ainsi un climat d’insécurité et d’instabilité dans le pays.

En effet, cette situation nous pousse à mettre en place de recherche approfondie pour se doter des engins spatiaux (satellite et drones) pouvant contribuer tant soit peu à la croissance économique et au contrôle de son sous-sol, sa flore, sa faune et la mobilité des personnes et biens.

Sur le plan scientifique, la modélisation d’une structure satellitaire par la méthode des éléments finis d’une interface solide-gaz dans « la matrice de Yakam » est une question ouverte en problèmes couplés (mécanique, thermique, énergétique, environnemental et économique).

2 LA FISSURATION ET LES AUTRES MODES DE RUINE

Les modes de ruine en mécanique des solides sont nombreux. [1-3] Parmi les principaux, la ruine due à la fissuration est un danger essentiel à prendre en compte lors de la conception de structures à côté d’autres modes comme la ruine par déformation plastique, flambement, fluage, corrosion, etc. La fissuration prend en compte l’existence de défauts de fabrication comme des inclusions ou des vides dans le matériau ou encore de zones d’endommagement à partir desquels des fissures vont s’initier puis se propager pour parvenir à une taille où la structure atteint la ruine.

Différents types de fissuration sont à distinguer :

- La fissuration stable qui comprend
 - La fissuration quasi-statique sous une charge constante ;
 - La fissuration par fatigue sous une charge répétée et
 - La fissuration dynamique lorsqu’une charge est appliquée soudainement;
- La fissuration instable qui est instantanée et à laquelle peut conduire la fissuration stable.

2.1 RUPTURE ET ENDOMMAGEMENT

Il y a principalement deux modèles pour représenter la fissuration des structures : la mécanique de l’endommagement et la mécanique de la rupture.

Dans un modèle simple, la relation entre les contraintes σ et les déformations ε en présence d’endommagement devient $\sigma = (1 - D)E\varepsilon$, où E est le module de Young et D est la variable d’endommagement variant entre 0 et 1 pour laquelle il reste à postuler un modèle d’évolution. La mécanique de l’endommagement est appropriée pour représenter l’initiation de la fissuration à partir de micro-fissures mais aussi d’autres modes de ruine comme le fluage, par exemple.

Au contraire de cette théorie continue, la mécanique de la rupture suppose l’existence d’une ou plusieurs macro-fissures présentes dans le matériau de part et d’autre desquelles les déplacements, déformations et contraintes sont discontinus. La mécanique de la rupture peut s’appliquer soit en conception et dimensionnement après une analyse d’endommagement qui prédit une bande de fort endommagement qui devient modélisée par une fissure, soit en production si une fissure est décelée dans une structure en service pour évaluer la durée de vie résiduelle de celle-ci.

Les équations à résoudre pour obtenir les déplacements, déformations et contraintes en tout point du solide fissuré sont les mêmes que celles pour le solide non-fissuré mais, une condition aux limites supplémentaire sur les nouvelles frontières internes est imposée : les tractions sont connues sur les deux lèvres de la fissure, généralement nulles dans le cas habituel où aucune force n'est exercée sur les bords.

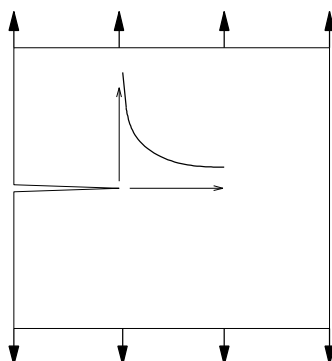


Fig. 2.1. Singularité des contraintes

Il est nécessaire de formuler une loi de comportement pour le matériau étudié. Si le matériau est fragile, un comportement élastique est admis. Il résulte de cette loi que les contraintes deviennent infinies au front de fissure. Cette singularité des contraintes, illustrée sur (la figure 2.1), est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la distance au front. De manière simplifiée et sur une ligne dans le prolongement de la fissure, la tension est exprimée sous la forme

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \tag{2.1}$$

où r est la distance au front et K est appelé facteur d'intensité de contrainte. Il dépend de la longueur de la fissure, de la géométrie et des forces appliquées. Cette équation montre que, quel que soit le matériau, il y a une zone de déformation plastique. L'hypothèse de matériau fragile, qui revient à négliger la plasticité dans cette zone, est justifiée et satisfaisante pour décrire le comportement d'un matériau si cette zone est suffisamment petite. Dans le cas contraire, le matériau est dit ductile et une loi de comportement élasto-plastique est adoptée.

2.2 MÉTHODES NUMÉRIQUES EN MÉCANIQUE DE LA RUPTURE

La méthode des éléments finis classique a montré son efficacité et sa puissance pour résoudre de nombreux problèmes en mécanique des solides [4]. En effet, pour appliquer cette méthode, une division (appelée maillage) du domaine en sous-domaines dont les frontières doivent correspondre aux frontières du domaine est nécessaire. Comme les frontières internes changent d'une analyse à l'autre, cette opération de maillage doit être recommencée à chaque étape, au moins dans une zone entourant la formation des nouvelles frontières. On distingue trois familles principales de méthodes numériques plus appropriées que la méthode classique des éléments finis pour la propagation de fissures. Nous les schématisons sur la (figure 2.2) et les décrivons ci-dessous dans l'ordre chronologique de leur apparition.

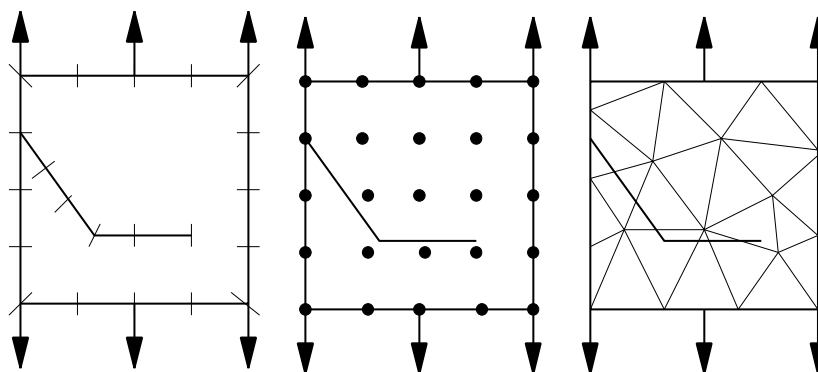


Fig. 2.2. Trois méthodes numériques pour l'analyse des corps fissurés

2.2.1 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS DE FRONTIÈRE

Elle est appliquée aux problèmes de mécanique de la rupture depuis une vingtaine d'années, elle présente pour principale caractéristique de ne demander qu'une discrétisation de la frontière du domaine et non de l'intérieur. Le travail de remaillage entre chaque étape est donc minime puisqu'il suffit d'ajouter un ou quelques éléments sur les incréments de fissure. Pour ces problèmes, un maillage de la zone plastifiée est nécessaire, ce qui fait perdre une grande partie des avantages de la méthode. Les articles sur ce sujet sont nombreux, comme par exemples Portela et al. [5] et Yan et al. [6] pour la fissuration à deux dimensions et Mi et al. [7] à trois dimensions.

2.2.2 MÉTHODE SANS MAILLAGE

Elle est appliquée aux problèmes de mécanique de la rupture depuis 1994, cette méthode est plus proche de la méthode des éléments finis que la méthode précédente. Elle se base sur la résolution de la forme faible des équations aux dérivées partielles par une méthode de Galerkin comme en éléments finis, mais par contre l'approximation du champ de déplacement qui est construite pour être introduite dans la forme faible ne nécessite pas de maillage. Seul un ensemble de nœuds est réparti dans le domaine et l'approximation du champ de déplacement en un point ne dépend que de la distance de ce point par rapport aux nœuds qui l'entourent et non de l'appartenance à un certain élément fini.

2.2.3 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ÉTENDUE

Elle est la plus connue sous le sigle XFEM (pour eXtended Finite Element Method) et parfois appelée méthode des éléments finis généralisée, elle est appliquée aux problèmes de mécanique de la rupture depuis 1999. Elle se base sur la méthode des éléments finis avec un maillage normal en remplaçant les éléments qui sont coupés par une fissure par des éléments spéciaux possédant quelques degrés de liberté supplémentaires qui permettent de représenter un champ de déplacement discontinu de part et d'autre de celle-ci. La propagation est simulée en remplaçant les éléments nouvellement traversés par une fissure par un élément spécial. Moës et al. [8] présentent la méthode à deux dimensions et Moës et al. [9] et Gravouil et al. [10] présentent la méthode à trois dimensions.

3 STRUCTURES ET SA RÉSISTANCE

3.1 DÉFINITION DES STRUCTURES

La mécanique des structures se définit comme la mécanique des solides de dimensions finies où une des dimensions au moins est faible devant les autres Laroze S. et al. [11], [12-13], la mécanique des structures couvre donc un grand nombre de géométries dont les plus courantes sont les poutres (1D), les plaques et coques (2D), et les solides axisymétriques (2D) (figure 2.1). En observant la géométrie des structures étudiées, des hypothèses peuvent être faites quant à la cinématique qui prévaut dans ces solides. Toute la difficulté de ce type d'approche réside dans le choix judicieux de cette cinématique qui doit être suffisamment riche pour observer tous les phénomènes rencontrés durant l'utilisation des structures considérées, mais assez simple pour permettre des résolutions analytiques. Parmi les quatre types nous nous concentrons sur la plaque et la poutre.

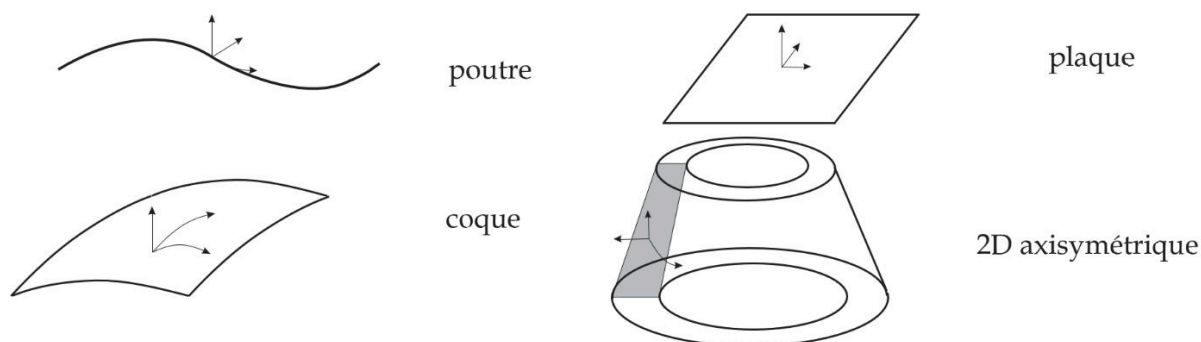


Fig. 2.1. Type de structures

3.2 RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

La résistance des matériaux est un cadre restreint, mais utilisable pour la plupart des applications courantes, pour traiter des problèmes de mécanique des structures. Principalement, les hypothèses simplificatrices de la RdM portent sur des conditions de réversibilité et de linéarité. Les études en RdM sont conduites sous les hypothèses suivantes :

- Cadre de l'hpp : petites déformations, petits déplacements (pas de flambage ou de striction par exemple) ;
- Les matériaux constitutifs sont élastiques linéaires isotropes ;
- Les problèmes appartiennent au domaine de la statique, ou sont supposés quasi statiques ;
- Principe de Saint-Venant : loin de son point d'application, une sollicitation extérieure peut être remplacée par son torseur équivalent ;
- Principe de superposition : quel que soit l'ordre d'application des efforts extérieurs sur un solide, l'état final est invariant.

Sous ces hypothèses, la RdM permet de traiter des problèmes de poutres, plaques, coques, ... Il faut maintenant se faire une idée de la notion de modélisation géométrique des solides. Ceci fait l'objet particulièrement des poutres et plaques qui nous serviront sur la structure satellitaire.

Considérons une poutre avec les hypothèses sur sa géométrie qui permettent de représenter un solide 3D élancé par sa ligne moyenne. Ceci s'applique également aux plaques et coques où cette fois-ci l'épaisseur étant faible devant les autres dimensions le solide est remplacé par le feuillet moyen correspondant. C'est pourquoi nous définissons une poutre comme un solide engendré par une aire plane S qui est immobile ou déplacée dans l'espace, de sorte que durant son mouvement le centre de gravité G de la section S parcourt une ligne donnée L , et que l'aire se maintienne constamment normale à cette surface (figure 2.2). De plus, la section peut varier au cours de ce parcours, mais de façon continue, i.e. le profil ne doit pas présenter de discontinuités. La ligne L est appelée fibre moyenne de la poutre. Une poutre est dite :

- Gauche si la ligne L suit une courbe gauche ;
- Plane si la ligne L suit une courbe plane ;
- Droite si la ligne L suit une droite.

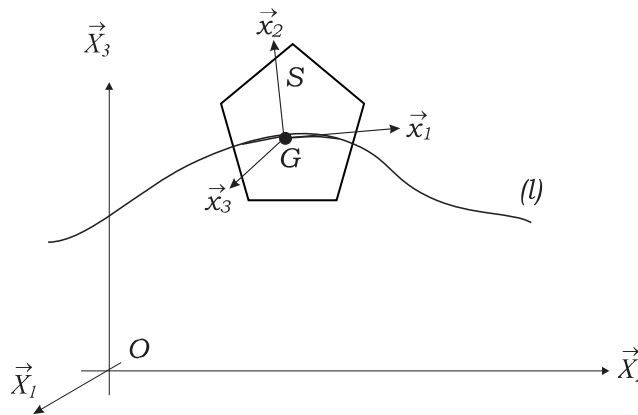


Fig. 2.2. Définition géométrique d'une poutre

4 ETAT DE L'ART DU SATELLITE

4.1 DÉFINITION

Le satellite est une planète qui tourne autour d'une autre planète plus grande. Ainsi, l'homme en copiant la nature a mis au point le satellite artificiel qui n'est qu'un engin placé en orbite autour de la terre ou d'une autre planète [14]. Dans la suite de notre travail nous appellerons le satellite artificiel par satellite tout court. Pour notre part le modèle simple d'une masse attachée à une corde en mouvement curviligne définit le satellite.

4.2 TYPES DE SATELLITE

Il existe plusieurs types de satellite dans le monde. Tous les satellites tournent autour de la terre sur des orbites très différents. Certains suivent le plan de l'équateur d'autres passent par les pôles et d'autres encore circulent entre les deux. Les principaux sont entre autres :

Les satellites de télécommunications, les satellites météorologiques, les satellites d'alerte avancée, les satellites d'aide à la navigation, les satellites espions, les satellites astronomiques...

4.3 POSITIONNEMENT DES SATELLITES

La (figure 4.1) illustre les différents positionnements des satellites, il s'agit des satellites à orbite terrestre basse, des satellites à orbite moyenne, des satellites à orbite géostationnaire, des satellites à orbite haute.

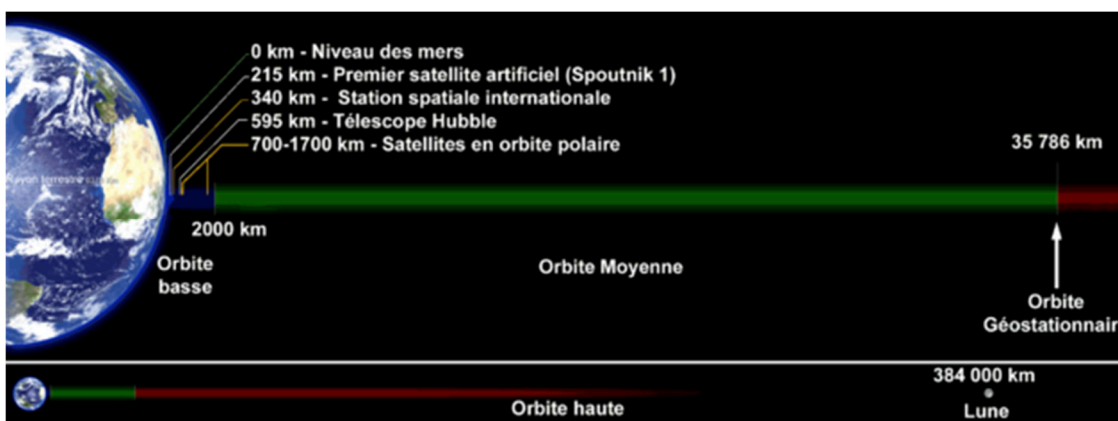


Fig. 4.1. Positionnement des satellites [15]

L'interprétation du vol ariane 5 est donné par les digrammes de la (figures 1.8a) et la (figure 1.8b) ci-dessous.

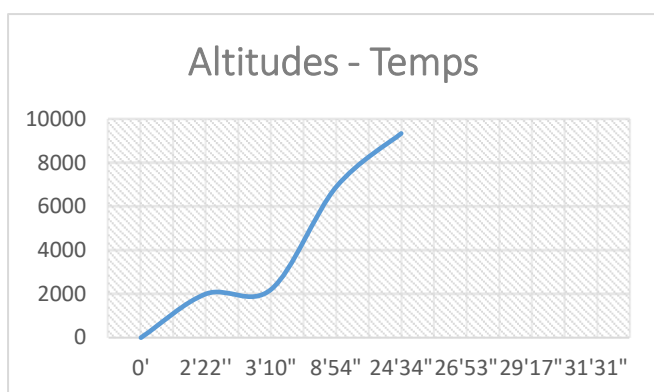


Fig. 4.2a : diagramme altitudes-temps

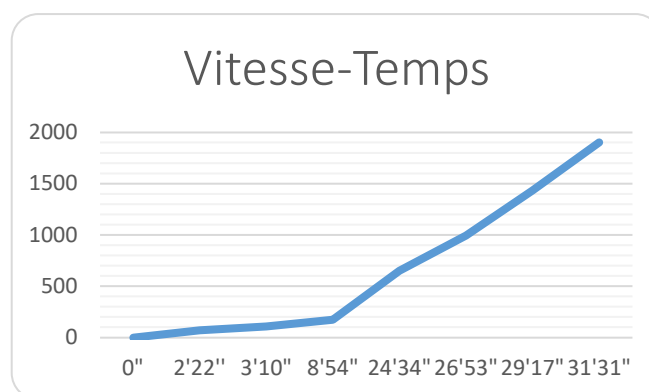


Fig. 4.2b. diagramme vitesse-temps. [14]

Tableau 4.1 : chronologie des satellites [14]

| Date | Observation |
|-----------|---|
| 1932 | Invention du Tube à ondes progressives composant central des futurs satellites de télécommunications |
| 1945 | Arthur C. Clarke publie un article sur le rôle que pourrait jouer des satellites de télécommunications placés en orbite géostationnaire |
| 1955 | John R. Pierce publie un article détaillant les caractéristiques, les avantages et les coûts d'un satellite de télécommunications |
| 1956 | Inauguration du premier câble transatlantique (TAT-1) permettant d'assurer des télécommunications longue distance à travers les océans |
| 1957 | Début de l'ère spatiale : premier satellite artificiel placé en orbite (Spoutnik 1) |
| 1958 | SCORE premier satellite de télécommunications expérimental (satellite passif) |
| 1961 | Développement des satellites de télécommunications expérimentaux Telstar 1, RELAY et Syncom |
| 1961 | Lancement de Telstar et Relay |
| 1962 | L'administration américaine Kennedy fournit un cadre réglementaire pour les télécommunications spatiales : le Communications Satellite Act de 1962 |
| 1963 | Lancement de Syncom, premier satellite géostationnaire |
| 1964 | Création de l'organisation internationale Intelsat chargée de gérer le système de télécommunications spatiales des pays membres |
| 1965 | Lancement de Intelsat I premier satellite de télécommunications opérationnel |
| 1969 | Lancement de la série Intelsat III fournissant une couverture complète de la planète |
| 1972 | Lancement du satellite canadien Anik A1 premier satellite de télécommunications domestique |
| 1975 | Intelsat IVA : premier satellite à utiliser la double polarisation |
| 1974 | Symphonie ; satellite de télécommunications franco-allemand |
| 1975 | Satcom-1 (en) premier satellite commercial stabilisé 3 axes et de diffusion de programmes de télévision |
| 1976 | Marisat F1 : premier satellite de télécommunications reliant des mobiles (navires) |
| 1977 | Création de l'organisation internationale Eutelsat exploiter la première génération de satellites de communication commandés par l'Agence spatiale européenne (ESA) |
| 1979 | Création de l'organisation internationale Inmarsat pour gérer les systèmes de télécommunications spatiales maritimes et les systèmes de prévention des risques et de secours via le segment spatial |
| 1988 | Inauguration de TAT-8 (en) premier câble transatlantique utilisant la fibre optique annonce le glas du marché des communications téléphoniques longue distance par satellite |
| 1993 | Création de la norme de codage du signal pour la diffusion par satellite de programmes de télévision DVB-S |
| 1995-2001 | La bulle internet suscite de nombreux projets de constellations de satellites en orbite basse |
| 1998 | Mise en service du premier réseau de téléphonie par satellite : Iridium. Première constellation de satellites en orbite basse. |
| 2001 | Privatisation des organisations internationales Intelsat et Inmarsat |
| 2010 | Ka-Sat, satellite d'Eutelsat pour le haut-débit en orbite GEO : 11 kW, 5800 kg au lancement 80 faisceaux, 70 Gbit/s soit 1 million de connexions de type ADSL |
| 2015 | 1ers satellites géostationnaires tout électriques (Eutelsat 115 West B & ABS-3A) fabriqués par Boeing. Mise à poste : 8 mois. |
| 2017 | 1er satellite géostationnaire tout électrique Airbus DS: 3500 kg, 12 kW Eutelsat 172 B. Mise à poste : 4 mois. |

5 MODÉLISATION DE LA STRUCTURE

5.1 PROBLÈMES DE LA MODÉLISATION « RÉELLE »

Partant de l'hypothèse simple, considérant un ressort, un amortisseur et une masse dynamiquement alignés sur un feuillet (figure 5.1) en interface de "Yakam Matrix" nous avons modélisé un satellite à 5 facettes (figure 5.2).

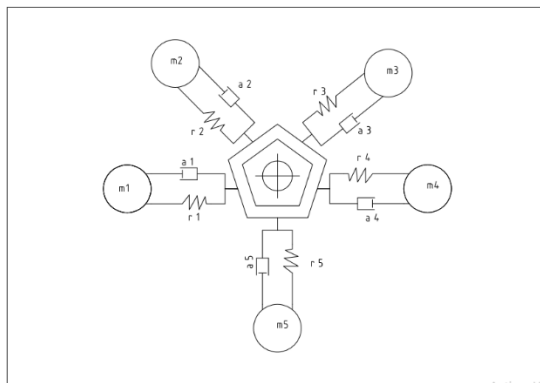
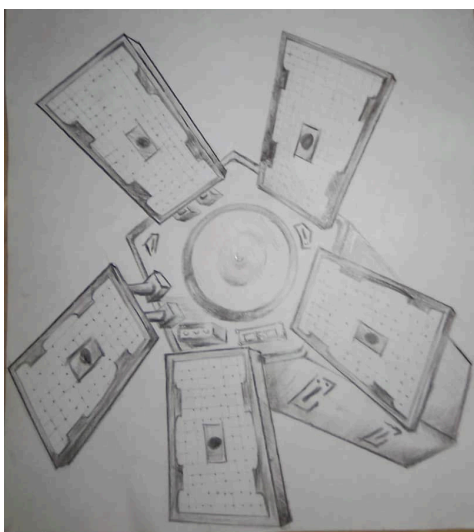
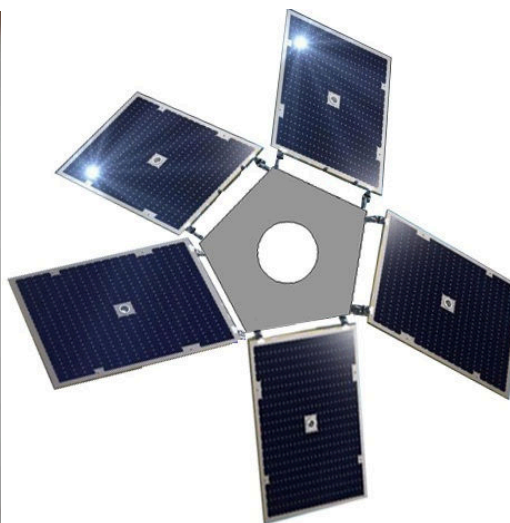


Figure 5.1 : schéma du satellite LKT



(a)



(b)

Figure 5.2: satellite LKT à 5 panneaux solaires

Les calculs des supports des panneaux solaires du satellite nous conduits à l'application poutres en flexion. On peut souhaiter avoir des poutres dites d'égal résistance, c'est-à-dire que l'état de contrainte soit le même partout dans la poutre. Ceci assure une homogénéité dans toute la poutre, et donne l'assurance qu'en tout point de la poutre la résistance du matériau constitutif ne sera pas dépassée si le dimensionnement est effectué correctement.

Nous allons appliquer ce principe à la structure du satellite avec un effort réparti vertical d'intensité p_y constante représentant la charges des panneaux (figure 5.3). La section de cette poutre est rond creux : $D = 60.0$ $t = 20.0$ (mm)

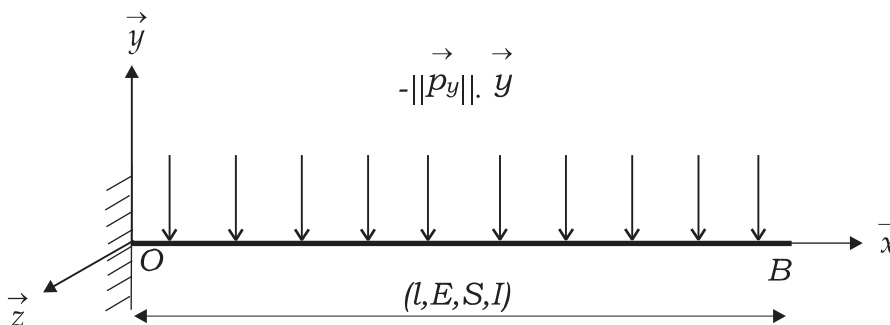


Figure 5.3 : poutre console soumise à une charge répartie p_y constante

RÉSOLUTION DU PROBLÈME POSÉ SUR LA FIGURE 5.1

Nous allons :

- Poser le problème à résoudre pour déterminer complètement les quantités cinématiques et statiques (équations d'équilibre + conditions aux limites) ;
- Exprimer les déplacements en tout point x ;
- Tracer le diagramme des efforts tranchants et des moments fléchissant.

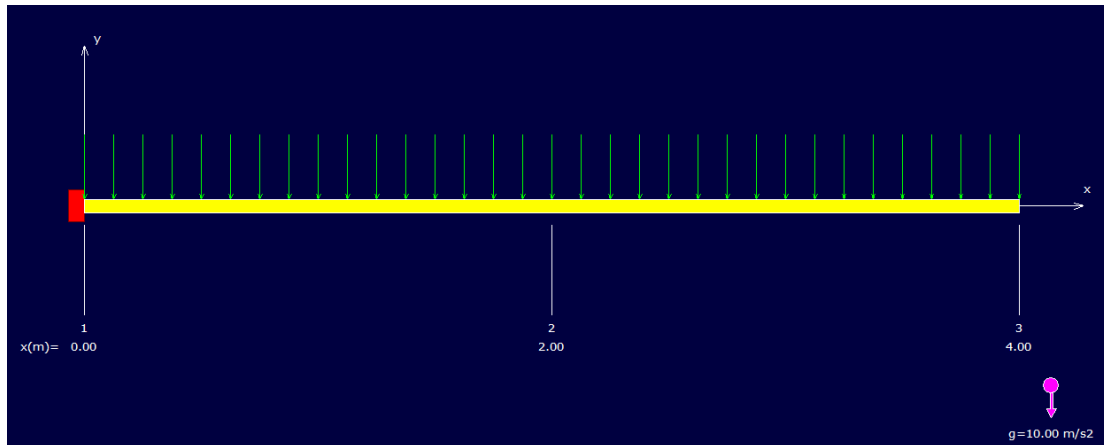


Figure 5.4 : poutre chargée

Données du problème

Matériau

Nom du matériau = Acier 45 SCD 6

Module de Young = 220000 MPa

Masse volumique = 7850 kg/m³

Limite élastique = 1450 MPa

Noeuds [m]

Noeud 1 : x = 0.000

Noeud 2 : x = 2.000

Noeud 3 : x = 4.000

Section(s) droite(s)

Noeuds 1 --> 3

Rond creux : D = 60.0 t = 20.0 (mm)

Aire = 25.13 cm²

Moment quadratique : I_z = 62.83 cm⁴

Fibre supérieure : v_y = 30.00 mm Wel.z = 20.94 cm³

Fibre inférieure : v_y = 30.00 mm Wel.z = 20.94 cm³

Poids de la structure = 789.17 N (g = 10.00 m/s²)

Liaison(s) nodale(s)

Noeud 1 : Encastrement

Cas de charge(s)

Charge linéairement répartie : Noeuds = 1 -> 2 pyo = -60.00 pye = -60.00 N/m

Charge linéairement répartie : Noeuds = 2 -> 3 pyo = -60.00 pye = -60.00 N/m

Le poids propre est pris en compte ($g = 10.00 \text{ m/s}^2$)

Résultats

Déplacements nodaux [m , °]

Noeud Flèche Pente

1 0.000E+000 0.000E+000

2 -2.110E-002 -9.954E-001

3 -5.956E-002 -1.138E+000

Dy maximal = 0.00000E+000 m , x = 0.000 m

Dy minimal = -5.95626E-002 m , x = 4.000 m

Efforts intérieurs [N N.m MPa]

Ty = Effort tranchant Mfz = Moment fléchissant Sxx = Contrainte normale

Noeud Ty Mfz Sxx

1 -1029.17 -2058.34 -98.28

2 -514.58 -514.58 -24.57

2 -514.58 -514.58 -24.57

3 0.00 0.00 0.00

Moment fléchissant maximal = 0.00 N.m à 4.000 m

Moment fléchissant minimal = -2058.34 N.m à 0.000 m

Contrainte normale maximale = 98.28 MPa à 0.000 m

Contrainte normale minimale = -98.28 MPa à 0.000 m

Action(s) de liaison [N N.m]

Noeud 1 Fy = 1029.17 Mz = 2058.34

Informations sur le calcul

Pivot minimal = 2.59181393921175E+0004

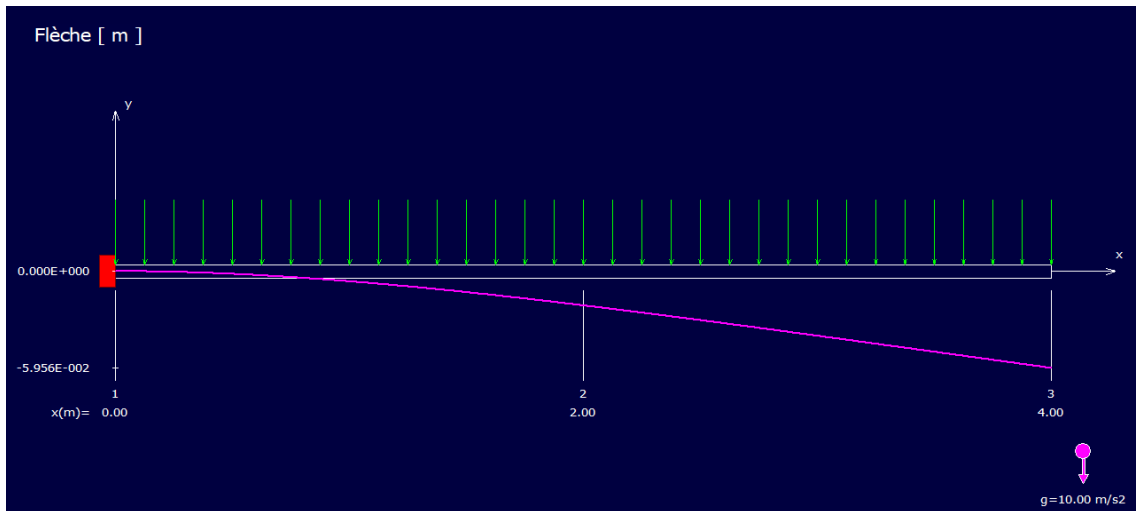


Figure 5.5 : diagramme de la flèche

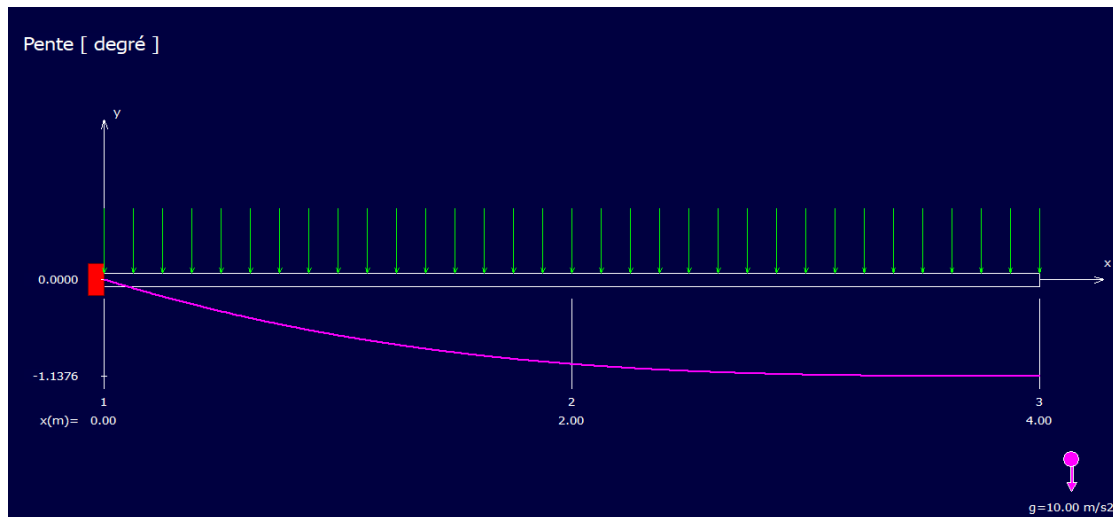


Figure 5.6 : diagramme de la pente

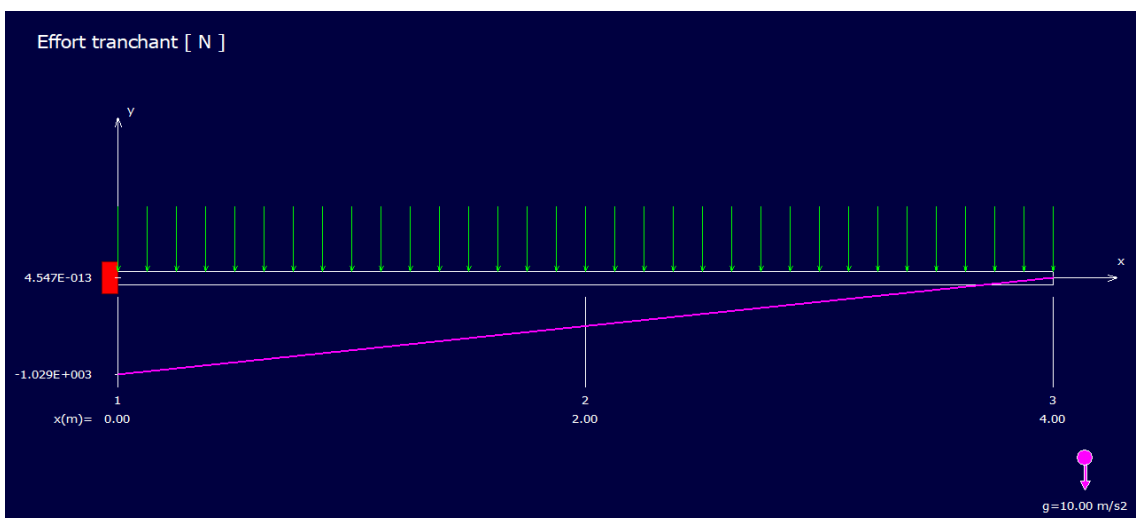


Figure 5.7 : diagramme de l'effort tranchant

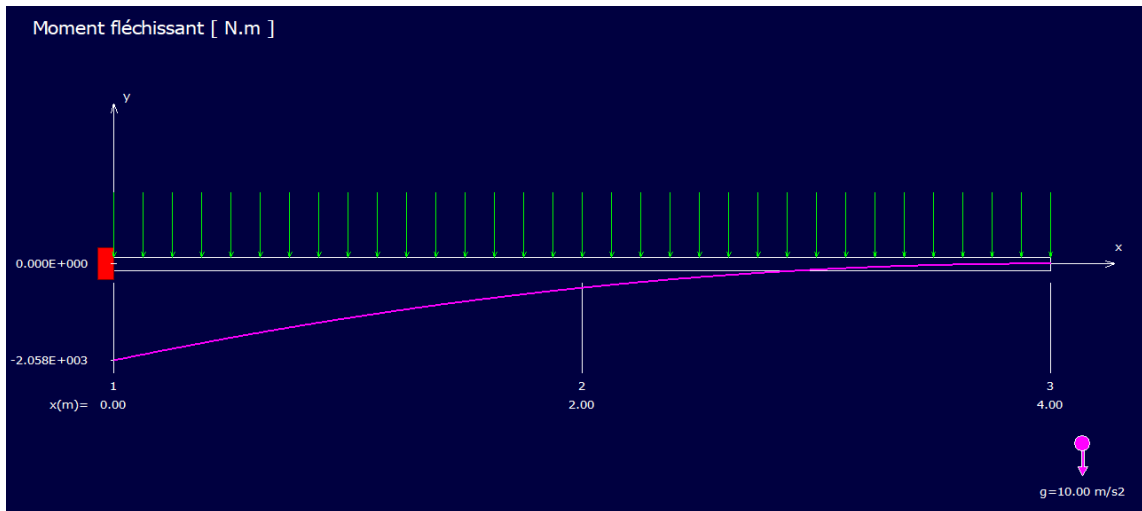


Figure 5.8 : diagramme de moment fléchissant

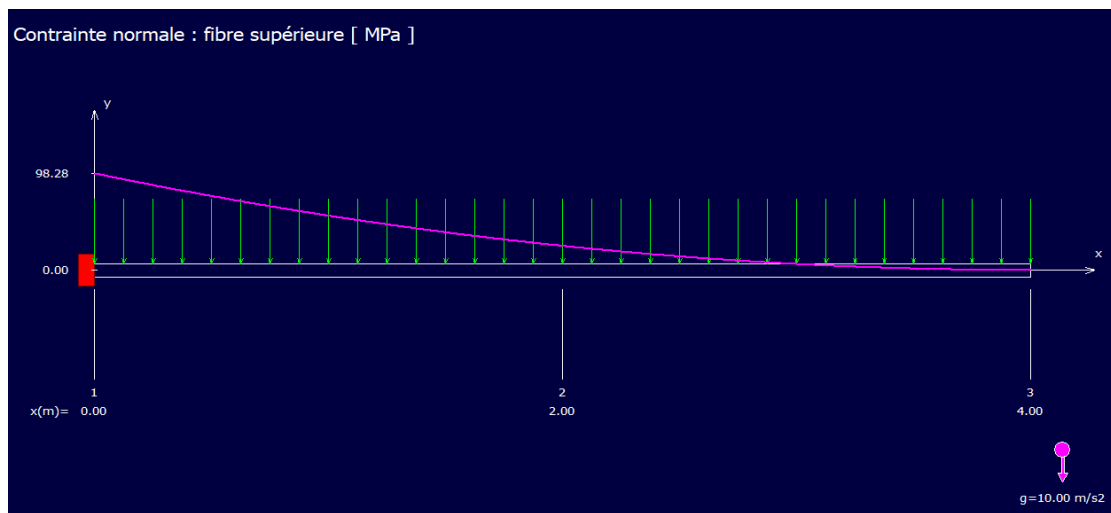


Figure 5.9 : diagramme de la contrainte normale : fibre supérieure

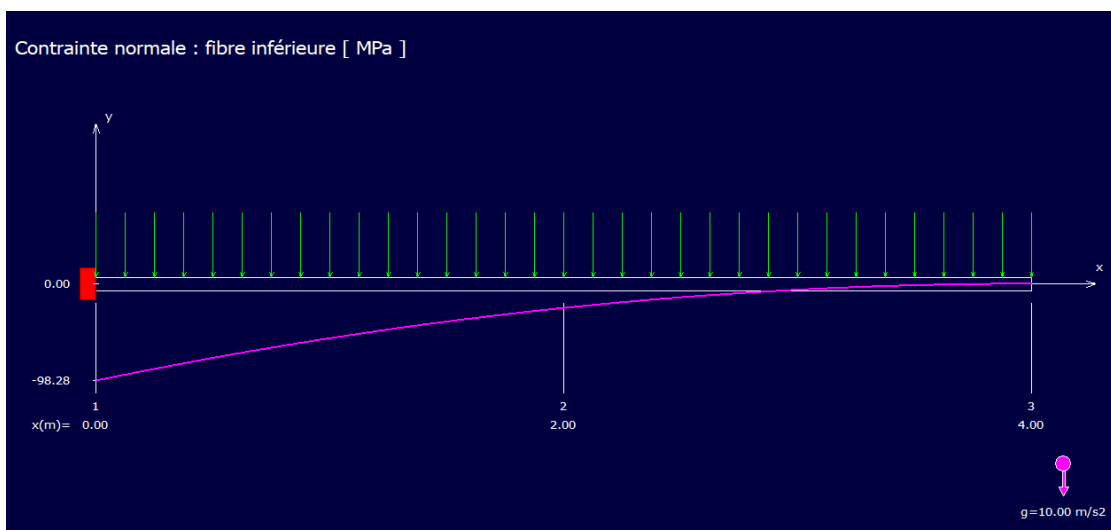


Figure 5.10 : diagramme de la contrainte normale : fibre inférieure

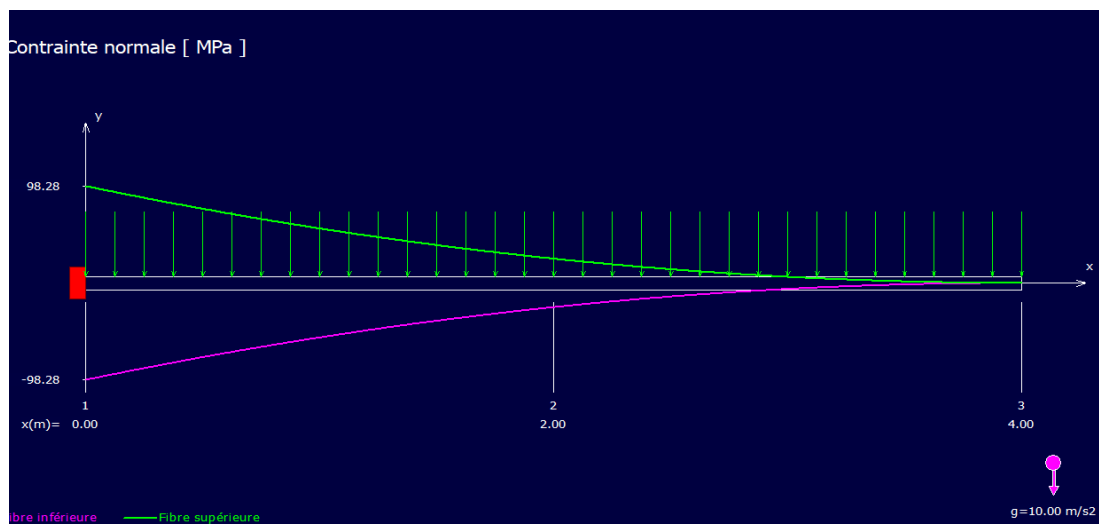


Figure 5.11 : diagramme de la contrainte normale

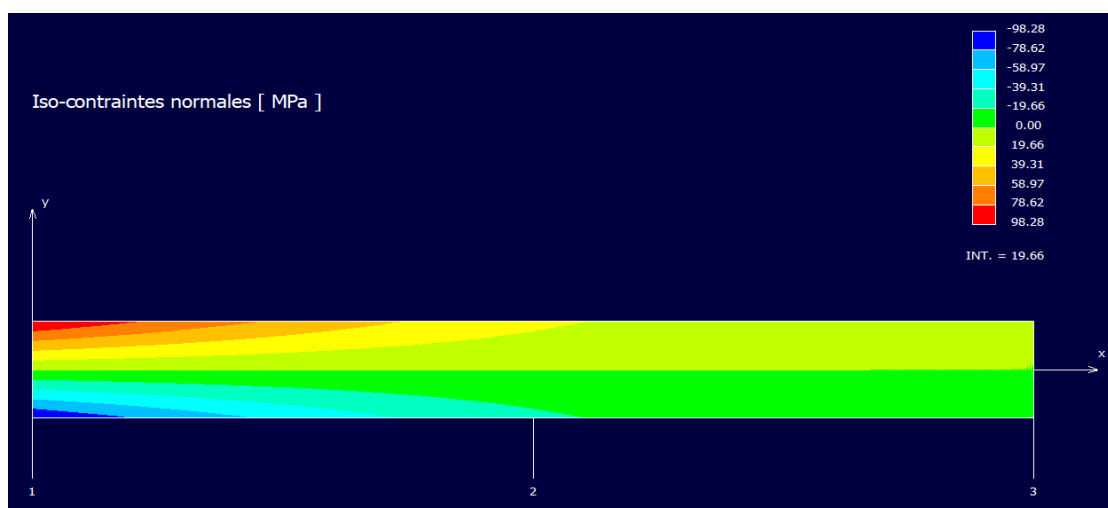


Figure 5.12 : diagramme des iso-contraintes normales

6 CONCLUSION

Les sollicitations squelettiques moyennes développées dans cet article, nous a permis de mettre en lumière les différentes sollicitations que subit la plateforme de notre satellite, plus précisément le support des panneaux solaires. La complexité de la structure exige des études approfondies pour éviter en gestion de pôle de risque toute défaillance, car une fois à l'espace, la maintenance est inexistante. Raison pour laquelle, notre étude limitée sur la structure supportant les panneaux solaires montre que les conditions de résistance et bien d'autres ont été respectées ; son ossature évoluera dans une zone élastique sans atteindre la rupture.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué à la rédaction de cet article, en particulier, le professeur Kabeya Mukeba Leonard, le professeur Makengo Lutimba Hubert et le professeur Cimbela Kabongo Joseph, car leurs disponibilités et conseils ont été une aide précieuse.

REFERENCES

- [1] Griffith, A. A. (1920). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of Londres*.
- [2] Hegen, D. (1996). Element-free Galerkin methods in combination with finite element approaches. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*.
- [3] Dhatt G., and Touzot G. (1984), The finite element method displayed, J. Ziley & Sons, New York.
- [4] Réthoré J. (2005), Méthode éléments finis étendus en espace et en temps : application à la propagation dynamique des fissures. Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- [5] Portela A., Aliabadi M. et Rooke D. (1991). The dual boundary element method : Effective implementation for crack problem. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
- [6] Yan A. M. et Nguyen-Dang, H. (1995). Multiple-cracked fatigue crack growth by BEM. *Computational Mechanics*.
- [7] Mi Y. et Aliabadi M. H. (1993). Three-dimensional crack growth simulation using BEM. *Computers and Structures*.
- [8] Moës N., Dolbow J. et Belytschko T., (1999). A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
- [9] Moës N., Gravouil A. et Belytschko T., (2002). Non-planar 3d crack growth by the extended finite element and level sets—part I : Mechanical model. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
- [10] Gravouil A., Moës N. et Belytschko, T., (2002). Non-planar 3d crack growth by the extended finite element and level sets—part II : Level set update. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*.
- [11] (Laroze S. et Barrau J.J., 1991), Mécanique des structures, tome 2 poutres, Éd. Masson
- [12] Chaussement S. : Mécanique des milieux continus. NUME Phy, Univ. du Maine, Le mans.
- [13] Lema N. B., (2013), DEA, contribution au dimensionnement d'une structure hydroglisseuse en prototype modèle conceptuel d'un aéroboat local.
- [14] Wikipédia.
- [15] France Télécom, (2001), Commission Supérieure Technique de l'Image et du Son, Communiqué de presse, Paris.