

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique
Mémoire de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

THEME

**Simulation Numérique Du Comportement
Mécanique D'un Réservoir Composite De
Stockage D'hydrogène A Haute Pression**

Présenté par :

ATMANI Zakaria

Promoteur :

Dr. Samir BENAMMAR

PROMOTION 2019-2020

Remerciements

Je tiens à remercier respectivement tous ceux qui m'ont aidé, soutenu, et encouragé pour la réalisation de ce modeste travail :

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Dr. BENAMMAR pour sa compréhension, ses conseils, son aide, et ses orientations efficaces.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Tous mes professeurs pour leurs enseignements.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes

ATMANI Zakaria

Dédicaces.

Je dédie ce modeste travail :

Aux être qui me sont les plus chères : Mon père et ma mère pour leur Soutine et leur encouragement permanent durant toutes mes études.

A mes sœurs et frères.

A tous les membres de ma famille.

A tous mes amis ainsi qu'à tous mes collègues.

ATMANI Zakaria

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : GENERALITES SUR LA PRODUCTION, LE STOCKAGE ET L'UTILISATION DE L'HYDROGENE	
1 Introduction.....	3
2 Histoire de l'hydrogène.....	4
3 La production de l'hydrogène.....	5
3.1 Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures.....	6
3.2 Production d'hydrogène à partir d'eau.....	6
3.3 Production d'hydrogène à partir de la biomasse.....	7
3.4 Extraction d'hydrogène de gisements sous-marins.....	7
4 Transport d'hydrogène.....	7
5 Stockage d'hydrogène.....	8
5.1 Stockage sous pression.....	8
5.2 Stockage sous forme liquide.....	9
5.3 Stockage sous forme solide.....	9
6 Comparaison des différentes techniques de stockage.....	10
7 Utilisation de l'hydrogène.....	12
7.1 Applications chimiques.....	12
7.2 Transport.....	12
7.3 Stockage de l'énergie électrique.....	12
7.4 Chauffage.....	13
8 Véhicules à hydrogène.....	13
8.1 Voiture à pile à combustible.....	13
8.2 Voiture Hybride.....	13
Chapitre 2 : RESERVOIRS DE STOCKAGE DE L'HYDROGENE	
1 Introduction.....	15
2 Matériaux composites.....	16
2.1 Définition d'un matériau composite.....	16
2.2 Constituants des matériaux composites.....	17
2.2.1 Les renforts.....	17
2.2.2 La matrice.....	19
2.2.3 Les charges.....	21

2.2.4	Les additifs	21
2.2.5	L'interface	22
2.3	Architecture des matériaux composites.....	22
2.3.1	Les monocouches	22
2.3.2	Les stratifiés	23
2.3.3	Les sandwichs	23
3	Réservoirs de stockage d'hydrogène	24
3.1	Définition.....	24
3.2	Types des réservoirs de stockage d'hydrogène	25
3.2.1	Réservoirs sous pression	25
4	Conclusion	27

Chapitre 3 : Modélisation, Simulation Numérique et Analyse des Contraintes de Réservoir

1	Introduction.....	28
2	Design initial du réservoir.....	29
2.1	Caractéristiques techniques	29
3	Outils de simulation	30
4	Conception du réservoir.....	31
5	Configuration des paramètres dans ABAQUS	33
6	Création d'instance	39
7	Définition des critères de calcul utilisés	41
8	Détermination de la charge de pression appliquée à l'intérieur du réservoir	43
9	Le maillage.....	46
10	Le module « Job ».....	48
11	Visualisation des résultats.....	50
12	Modélisation et simulation du design	51
12.1	Déformation du réservoir en fonction de la contrainte appliquée	51
12.2	Influence de la pression	51
12.3	Influence des orientations des plis.....	53
12.4	L'Influence de l'épaisseur	59
	Conclusion générale et perspectives.....	62
	Références bibliographiques.....	63

Liste des tableaux

Chapitre 2 : Réservoir de stockage de l'hydrogène

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des fibres	18
Tableau II.2 : Principales propriétés des matrices thermodurcissables et thermoplastiques...	20
Tableau II.3 : Propriétés mécaniques des résines.....	20

Chapitre 3 : Modélisation, simulation numérique et analyse des contraintes de réservoir

Tableau III-1 : Caractéristiques techniques du réservoir.....	29
Tableau III-2 : différents angles d'orientation des fibres pour le premier scénario.....	52
Tableau III-3 : différents angles d'orientation des fibres pour le deuxième scénario.....	55
Tableau III-3 : différents angles d'orientation des fibres pour le troisième scénario.....	57

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralité sur la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène

Figure I-1 : Frise chronologique de l'histoire de l'hydrogène.....	5
Figure I-2 : Les modes de production de l'hydrogène.....	5
Figure I-3 : Unité de production d'hydrogène par vaporeformage à la raffinerie d'Al-Jubail, en Arabie saoudite.....	6
Figure I-4 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur.....	7
Figure I-5 : Galette de stockage de l'hydrogène solide.....	10
Figure I-6 : Capacité volumique des différentes techniques de stockage de l'hydrogène.....	11
Figure I-7 : Représentation des densités pour différentes techniques de stockage.....	11
Figure I-8 : La chaîne hydrogène simplifiée : de la production aux usages.....	13

Chapitre 2 : Réservoir de stockage de l'hydrogène

Figure II-1 : Différents types de fibres.....	17
Figure II-2 : Différents familles de renfort.....	18
Figure II-3 : Différentes familles des matrices.....	19
Figure II-4 : composite monocouche.....	22
Figure II-5 : composite stratifié.....	23
Figure II-6 : matériau composite sandwich à âmes pleines.....	24
Figure II-7 : matériau composite sandwich à âmes creuses.....	24
Figure II-8 : réservoir de type I.....	25
Figure II-9 : réservoir de type II.....	26
Figure II-10 : réservoir de type III.....	26
Figure II-11 : réservoir de type IV.....	27

Chapitre 3 : Modélisation, simulation numérique et analyse des contraintes de réservoir

Figure III-1 : Schéma du réservoir.....	29
Figure III-2 : module « part » dans ABAQUS.....	31
Figure III-3 : dessin du réservoir.....	31
Figure III-4 : Création de la forme 3D du réservoir.....	32
Figure III-5 : Forme finale du réservoir.....	32
Figure III-6 : Le module « Property ».....	33
Figure III-7 : Saisie de propriétés d'AA dans l'anglet « Edit Material ».....	34
Figure III-8 : Affectation de L'épaisseur d'AA, et de la méthode et les points d'intégration dans « Edit Section ».....	34
Figure III-9 : L'affectation de section.....	35
Figure III-10 : Le matériau AA 6061-T6 déterminé.....	35
Figure III-11 : Saisie de propriétés mécaniques de CFRP dans « Edit Material ».....	36
Figure III-12 : Saisie de la densité de CFRP.....	36
Figure III-13 : Création de stratification.....	37
Figure III-14 : Détermination des directions et des épaisseurs des couches de composite.....	37
Figure III-15 : Les couches de composite.....	38
Figure III-16 : propriétés des matériaux du réservoir sous pression déterminées.....	38
Figure III-17 : Le module « assembly ».....	39
Figure III-18 : Création de l'instance.....	39
Figure III-19 : Instance créée.....	40

Figure III-20 : Le module « Step ».....	40
Figure III-21 : Création d'une étape.....	41
Figure III-22 : Modification de l'étape créée.....	41
Figure III-23 : Etape créée.....	42
Figure III-24 : Le module « Load ».....	43
Figure III-25 : Création d'une charge de pression.....	43
Figure III-26 : Sélection de la surface sur laquelle la charge de pression sera appliquée.....	44
Figure III-27 : Affectation de la valeur de pression.....	44
Figure III-28 : Charge appliquée.....	45
Figure III-29 : Le module « mesh ».....	45
Figure III-30 : Détermination du nombre d'éléments.....	46
Figure III-31 : Visualisation du maillage.....	46
Figure III-32 : Maillage final.....	47
Figure III-33 : Le module « Job ».....	47
Figure III-34 : La création de job.....	48
Figure III-35 : Modification.....	48
Figure III-36 : Job créé.....	49
Figure III-37 : Le module « visualization ».....	49
Figure III-38 : Variation de la déformation en fonction de la contrainte.....	50
Figure III-39 : Influence de la pression sur la déformation : (a) déformation axiale, (b) déformation radial.....	51

Figure III-40 : Influence de la pression sur le déplacement radial.....	51
Figure III-41 : Les couches de composite.....	52
Figure III-42 : Contraintes de Von mises.....	53
Figure III-43 : Déplacement (mm).....	53
Figure III-44 : Déformation.....	54
Figure III-45 : Les couches de composite.....	55
Figure III-46 : Contraintes de Von mises.....	55
Figure III-47 : Déplacement (mm).....	55
Figure III-48 : Déformation.....	56
Figure III-49 : Les couches de composite.....	57
Figure III-50 : Contraintes de Von mises.....	57
Figure III-51 : Déplacement (mm).....	57
Figure III-52 : Déformation.....	58
Figure III-53 : Influence de l'épaisseur sur la contrainte : (a) contraintes axiales, (b) contraintes radiales.....	59

Résumé

Le stockage de l'hydrogène est devenu le sujet d'actualité. En fait, ce sujet intéresse à la fois les universitaires et les industriels. L'objectif de cette étude consiste à développer une simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis pour la modélisation du comportement mécanique d'un réservoir de stockage d'hydrogène de type III. Le logiciel ABAQUS est utilisé pour la simulation des résultats. La procédure et les différentes étapes de cette simulation sont présentées et expliquées. Les résultats obtenus montrent que la pression interne du gaz, les propriétés mécaniques du composite et les angles d'orientation des fibres et leurs épaisseurs affectent le comportement mécanique du réservoir. En plus, des recommandations et des perspectives sont proposées dans ce mémoire dans le but d'améliorer les résultats.

Abstract

The storage of hydrogen has become a recent topic. In fact, this topic is of interest to both academics and industry. The objective of this study is to develop a numerical simulation based on the finite element method for modeling the mechanical behavior of a type III hydrogen storage tank. ABAQUS software is used for the simulation of the results. The procedure and the different steps of this simulation are presented and explained. The obtained results show that the internal pressure of the gas, the mechanical properties of the composite and the angles of orientation of the fibers and their thicknesses affect the mechanical behavior of the tank. In addition, recommendations and perspectives are proposed in this manuscript in order to improve the results.

ملخص

أصبح تخزين الهيدروجين موضوعًا ساخنًا. في الواقع، هذا الموضوع يهم الأكاديميين والصناعة على حد سواء. الهدف من هذه الدراسة هو تطوير محاكاة عددية تعتمد على طريقة العناصر المحدودة لنمذجة السلوك الميكانيكي لخزان الهيدروجين من النوع الثالث. يتم استخدام برنامج ABAQUS لمحاكاة النتائج. يتم تقديم وشرح الإجراءات والمراحل المختلفة لهذه المحاكاة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الضغط الداخلي للغاز والخواص الميكانيكية للمركب وزوايا اتجاه الألياف وسماكتها تؤثر على السلوك الميكانيكي للخزان. بالإضافة إلى ذلك تم اقتراح توصيات ووجهات نظر في هذا الموجز بهدف تحسين النتائج.

Introduction générale

L'hydrogène de par sa combustion très énergétique, en masse plus de deux fois celle du gaz naturel, est un combustible de choix utilisable pour fournir de la chaleur et de l'énergie mécanique. Certains le considèrent comme le vecteur énergétique de future.

Le stockage est l'une des étapes clés de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur d'énergie. En effet, quelle que soit l'application visée, il est nécessaire d'avoir un système permettant de stocker l'hydrogène afin de conférer une certaine autonomie à ce système.

Les analyses de la plupart des constructeurs automobiles montrent que les solutions de stockage disponibles sur le marché ne sont pas satisfaisantes pour les applications mobiles (poids et volume trop importants, cinétiques trop faibles, coûts trop élevés...). En matière de stockage embarqué, les objectifs de développement les plus communément admis sont calculés sur la base d'un stockage d'hydrogène embarqué d'une capacité de 5 kg (quantité d'hydrogène permettant théoriquement à un véhicule particulier d'avoir une autonomie d'environ 500 km).

La limitation majeure du développement de l'utilisation de ce carburant, réside en ses modes de stockage, où il est apparu lors des opérations de transport et de stockage que l'acier des réservoirs cause un grand problème, dû à son poids et à sa corrosion rapide (réservoirs type I et II).

Les applications développées des matériaux composites touchent les domaines de l'industrie, du transport, du médical et du spatial. Pour répondre aux besoins des marchés internationaux, des études consistent à étudier, développer et fabriquer des structures cylindriques composite ultra- légères.

Une solution est envisagée dans les travaux de recherches actuelles, l'utilisation du matériau composite stratifié (réservoirs type III et IV) dans la conception des réservoirs. Ces réservoirs stockent l'hydrogène sous 700 bars. La structure du réservoir constituée d'une enveloppe métallique renforcée par une enveloppe composite qui assure la rigidité. Cette solution consiste à associer dans un même réservoir une enveloppe de cœur sous pression (liner), contenant l'hydrogène utile et une enveloppe externe (composite).

Actuellement, plusieurs travaux de recherche se sont concentrés sur la simulation et la modélisation du comportement mécanique des réservoirs composites de type III et IV [1- 6].

La majorité de ces travaux de recherche ont utilisé la méthode des éléments finis comme outil de simulation.

Le travail de ce mémoire consiste à développer un modèle numérique, basé sur la méthode des éléments finis, pour la simulation du comportement mécanique d'un réservoir de type III utilisé dans les véhicules légers. L'objectif de notre étude sert à analyser les déformations et les contraintes dues à la pression interne appliquée sur la paroi du réservoir. En effet, le but général est d'avoir une conception optimale et sûre. Pour cette raison, nous avons organisé ce mémoire en trois chapitres :

Le premier chapitre attribue des généralités sur la production, le stockage et l'utilisation de l'hydrogène.

Le deuxième chapitre contient deux parties principales. Dans la première partie, une introduction aux matériaux composites est fournie dans le but de faciliter la compréhension de la conception et de la fabrication des réservoirs composites. Dans la deuxième partie, Les types des différents réservoirs de stockage de l'hydrogène sont présentés en discutant leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre est consacré à une étude de cas d'un prototype de réservoir de type III. Les différentes étapes de l'étude sont montrées et expliquées en détail. Les résultats sont présentés avec des recommandations et des commentaires.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA PRODUCTION, LE STOCKAGE ET L'UTILISATION DE L'HYDROGENE

1. Introduction

L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'univers. On le trouve dans la composition du Soleil, des étoiles, des planètes gazeuses. Sur notre planète, on a noté quelques émanations d'hydrogène naturel, mais non exploitables en quantités significatives et à des coûts compétitifs. Pour l'utiliser, il faut donc l'isoler. Les capacités de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie sont connues depuis longtemps. La nécessité d'une transition énergétique a relancé l'intérêt des chercheurs et des industriels et les applications concrètes, comme la voiture à hydrogène, commencent à apparaître [7].

2. Histoire de l'hydrogène

L'hydrogène, élément chimique de symbole H et de numéro atomique 1, occupe la première place de la classification périodique des éléments, aussi appelée tableau de Mendeleïev. Il est le plus léger et le plus abondant de tous les atomes dans l'univers. Sur terre, dans des conditions normales de pression et de température, il est combiné avec un autre atome d'hydrogène et forme un gaz appelé « dihydrogène ». Ce gaz, Incolore, inodore et non corrosif a l'avantage d'être particulièrement énergétique : 1 kg de dihydrogène permet de produire environ 3 fois plus d'énergie (chimique thermique et électrique) que 1 kg d'essence (soit 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence). L'histoire de l'hydrogène peut être résumée en cinq dates importantes :

- En 1766, le chimiste Henry Cavendish extrait une substance gazeuse qu'il qualifie d'étrange et qui, en brûlant dans l'air, donne de l'eau. Il nomme alors ce gaz « gaz inflammable », du fait de ses propriétés explosives. [8]
- Quinze ans plus tard, en 1781, alors qu'il vient d'effectuer une synthèse de l'eau, le chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier donne à ce gaz le nom « d'hydrogène », un mot composé du préfixe grec « hydro » (eau) et du suffixe « gène » (engendrer) : « Gaz qui engendre l'eau ». [8]
- En 1804, l'Allemand Alexander Von Humboldt et le Français Louis-Joseph Gay-Lussac parviennent à démontrer ensemble que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène. [8]
- En 1839, le britannique William Robert Grove découvre le principe de la pile à combustible. Il met en avant le fait que l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour former simultanément de l'eau, de l'énergie thermique et de l'énergie électrique. [8]
- 1960 : La NASA équipe tous ces véhicules spatiaux d'un moteur fonctionnant à l'hydrogène. [8]

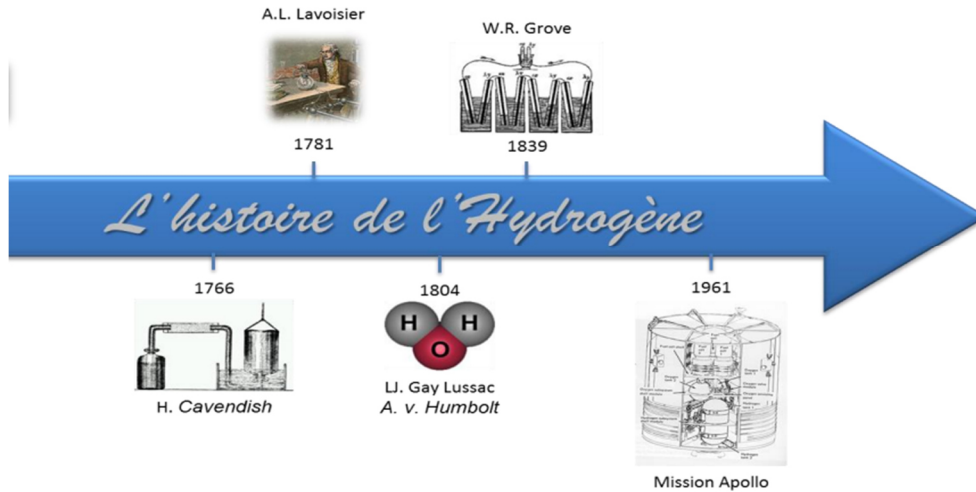


Figure I-1 : Frise chronologique de l'histoire de l'hydrogène [9].

3. La production de l'hydrogène

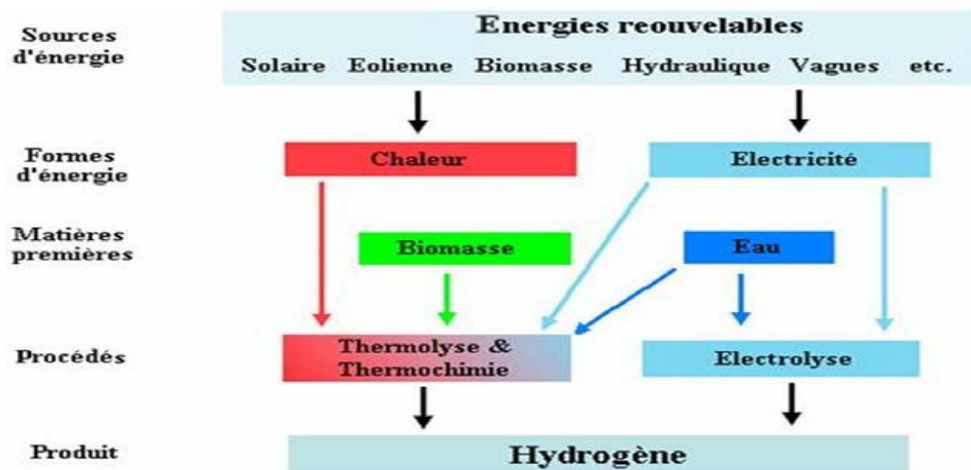


Figure I-2 : Les modes de production de l'hydrogène

Sur Terre, l'hydrogène est associé dans la nature à beaucoup d'autres éléments : surtout à du carbone pour former le méthane (CH₄) et à de l'oxygène pour constituer l'eau (H₂O).

Pour obtenir de l'hydrogène pur pour les besoins industriels, il convient donc de le séparer des éléments chimiques auxquels il est lié.

3.1 Production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures

Aujourd'hui, 95 % du dihydrogène est produit par « vaporeformage » de combustibles fossiles, cette réaction chimique casse les molécules d'hydrocarbures en présence de vapeur d'eau, de chaleur et d'un catalyseur, pour en libérer l'hydrogène. Mais cette méthode a l'inconvénient de produire du dioxyde de carbone. [10]



Figure I-3 : Unité de production d'hydrogène par vaporeformage à la raffinerie d'Al-Jubail, en Arabie saoudite [7].

3.2 Production d'hydrogène à partir d'eau

L'électrolyse permet de décomposer chimiquement l'eau en dioxygène et dihydrogène grâce à l'action d'un courant électrique. Différentes voies d'électrolyse sont étudiées, avec l'hypothèse d'une électricité d'origine nucléaire ou renouvelable. La quantité d'énergie électrique nécessaire à l'électrolyse dépend des conditions de pression et de température du procédé utilisé. De façon générale, la recherche porte sur des matériaux performants et bon marché pour réaliser des électrolyseurs. [10]

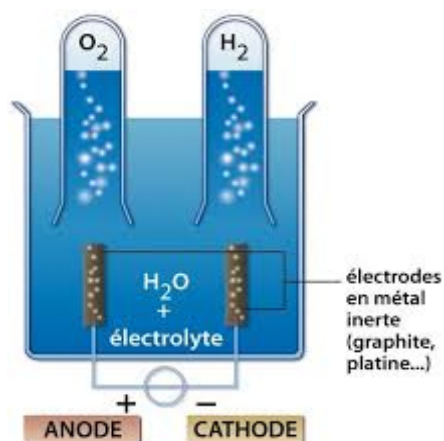


Figure I-4 : Principe de fonctionnement d'un électrolyseur

3.3 Production d'hydrogène à partir de la biomasse

La biomasse (bois, paille, etc.) pourrait constituer une source potentielle importante d'hydrogène : la gazéification à la vapeur d'eau de cette biomasse génère un mélange appelé « gaz de synthèse », constitué principalement de monoxyde de carbone et de dihydrogène, que l'on purifie ensuite pour éliminer les polluants. Cette solution permet d'obtenir un bilan effet de serre quasiment neutre car le dioxyde de carbone émis par la combustion du monoxyde de carbone est équivalent à celui qui aurait été dégagé par la dégradation de la biomasse si elle n'avait pas été gazéifiée. On cherche aussi à faire produire de l'hydrogène par des micro algues ou des bactéries qui utilisent la lumière et des enzymes spécifiques : les hydrogénasses. Une voie de recherche prometteuse consiste à mimer chimiquement ces réactions, pour développer des réacteurs bio-inspirés de production d'hydrogène. [10]

3.4 Extraction d'hydrogène de gisements sous-marins

Enfin, une autre approche vise à exploiter des sources d'hydrogène naturel. L'existence de gisements le long des chaînes volcaniques sous-marines est connue mais ceux-ci sont inatteignables. Aujourd'hui, les chercheurs s'intéressent plutôt à la géologie de certaines couches « terrestres » qui dégazeraient et accumuleraient en leur sein de l'hydrogène. [10]

4. Transport d'hydrogène

Une fois fabriqué, l'hydrogène doit être transporté jusqu'au site de stockage et/ou d'utilisation. Les modes de transport possibles dépendent de la distance, de la géographie du

trajet, de la nature du destinataire, occasionnel ou permanent, et des quantités à délivrer. Ils sont les suivants :

- Le transport maritime pour lequel on utilise la forme cryogénique, essentiellement pour des raisons d'encombrement : l'Australie, par exemple, a décidé, début 2014, d'exporter ainsi une partie de sa production.
- Le transport routier, aussi bien pour la forme cryogénique que pour la forme gaz comprimé ; ce transport, le plus utilisé, se fait actuellement en bouteilles acier sous 200 bars mais la technologie en bouteilles composites, beaucoup plus légère, est en train d'être mise en place pour un transport sous 400 bars, ce qui augmente la capacité par camion et donc diminue sensiblement le prix de ce transport.
- Le transport par gazoducs ; ce mode est ancien puisqu'il a été mis en œuvre, pour la première fois, en 1938 par les allemands dans la Ruhr pour alimenter des sites industriels. Aujourd'hui, le réseau de l'Europe de l'Ouest mesure 1 600 km ; il est exploité essentiellement par Air Liquide. D'autres réseaux du même type existent sur d'autres continents. [11]

5. Stockage d'hydrogène

L'hydrogène est le gaz le plus léger de tout l'univers : un litre de ce gaz ne pèse que 90 mg à pression atmosphérique, il est donc environ 11 fois plus léger que l'air que nous respirons.

Il faut un volume d'environ 11 m³, c'est-à-dire le volume du coffre d'un grand utilitaire, pour seulement stocker 1 kg d'hydrogène, soit la quantité nécessaire pour parcourir 100 km. Il est donc indispensable d'augmenter sa densité et plusieurs techniques existent pour cela :

- Le stockage à haute pression sous forme gazeuse.
- Le stockage à très basse température sous forme liquide.
- Le stockage à base d'hydrures sous forme solide.

5.1 Stockage sous pression

La méthode la plus simple permettant de diminuer le volume d'un gaz, à température constante, est d'augmenter sa pression.

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 contre 0.090 kg/m^3 à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

Aujourd'hui la majeure partie des constructeurs automobiles a retenu la solution du stockage sous forme gazeuse à haute pression. Cette technologie permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire à une voiture alimentée par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein. [12]

5.2 Stockage sous forme liquide

Une technique de pointe pour stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer de l'hydrogène gazeux en hydrogène liquide en le refroidissant à très basse température. L'hydrogène se liquéfie lorsqu'on le refroidit à une température inférieure de $-252,87 \text{ }^\circ\text{C}$. Ainsi, à $-252.87 \text{ }^\circ\text{C}$ et à 1,013 bar, l'hydrogène liquide possède une masse volumique de près de 71 kg/m^3 . À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 75 litres. Afin de pouvoir conserver l'hydrogène liquide à cette température, les réservoirs doivent être parfaitement isolés.

Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide est pour l'instant réservé à certaines applications particulières de très hautes technologies comme la propulsion spatiale. Par exemple, les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide, contiennent les 28 tonnes d'hydrogène liquide qui vont alimenter son moteur central. Ces réservoirs sont une véritable prouesse technologique : ils ne pèsent que 5,5 tonnes à vide et leur paroi ne dépasse pas 1,3 mm d'épaisseur. [12]

5.3 Stockage sous forme solide

Le stockage de l'hydrogène sous une forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique

réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanates.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux. [12]



Figure I-5 : Galette de stockage de l'hydrogène solide

6. Comparaison des différentes techniques de stockage.

L'hydrogène est un gaz extrêmement léger et inflammable. Les consignes de sécurité mises en place par les différents pays sont très strictes. Les infrastructures de stockage d'hydrogène sous forme comprimé et liquéfié sont de moins en moins acceptées dans les environnements urbains.

D'autre part, comme le montrent les graphiques en Figure 6 et Figure 7, le stockage solide sous forme d'hydrures métalliques offre une capacité volumique beaucoup plus élevée que le gaz comprimé ou liquide permettant de stocker plus d'hydrogène pour un volume équivalent.

Cependant le coût d'un réservoir utilisant les hydrures métalliques reste très élevé dû au prix de vente des matériaux mis en œuvre. Un compromis entre performances et coût est alors à trouver. [13]

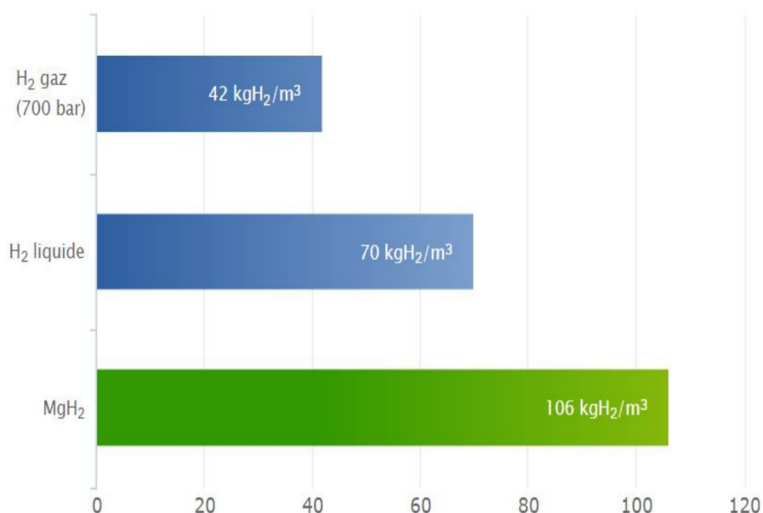


Figure I-6 : Capacité volumique des différentes techniques de stockage de l'hydrogène [14]

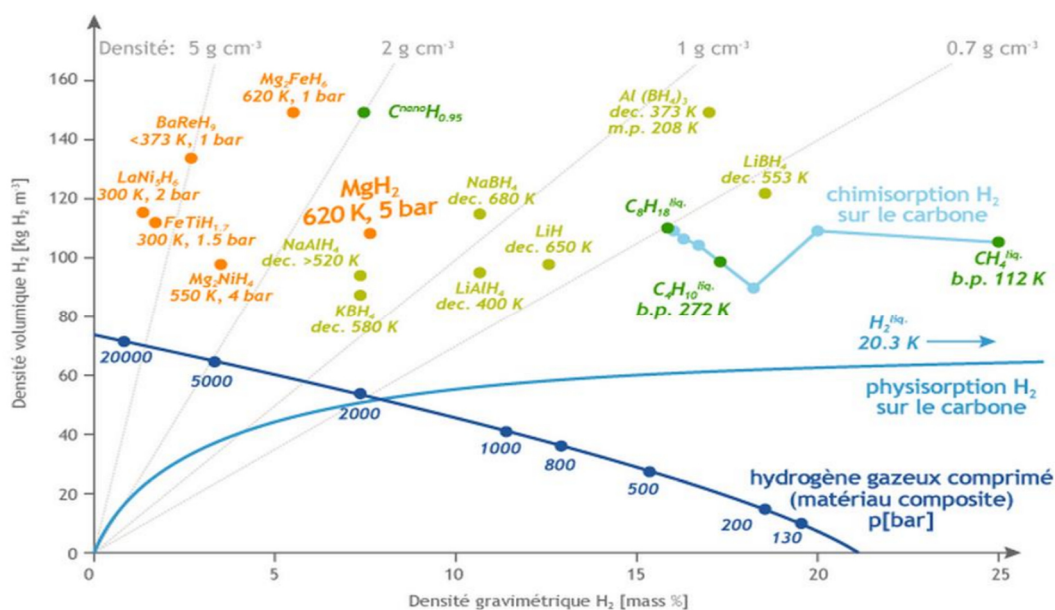


Figure I-7 : Représentation des densités pour différentes techniques de stockage

7. Utilisation de l'hydrogène

Les applications pour l'H₂ sont multiples. En plus du stockage d'énergie, il peut être utilisé dans les piles à H₂ qui alimentent les voitures, cars, bus, avions, vélos, bateaux. Peut être utilisé également en gaz pour alimenter les chaudières à H₂, dans l'alimentation et par d'autres industries telles que l'aérospatial (carburant de fusée), dépollution de sables bitumineux, le traitement de combustibles fossiles (hydrocracking) et la production d'ammoniaque (surtout pour le marché de fertilisants). [15]

7.1 Applications chimiques

Engrais chimiques, métallurgie, électronique, chimie, verrerie, alimentation, etc. Chaque année, plus de 60 millions de tonnes d'hydrogène sont consommés dans le monde, ce qui équivaut à ¼ du méthane produit. 95% sont utilisés par le producteur et 5% commercialisés. La production augmente de l'ordre de 10% par an. [15]

7.2 Transport

Les voitures à H₂ sont des voitures électriques munies de pile à combustible qui produit l'électricité au sein de la voiture grâce à une réaction entre l'hydrogène injecté dans la pile à combustible (FCH) et l'oxygène aspiré de l'air. Le plein d'hydrogène est fait en 3 min. Véhicules, bateaux, charriots remonte-charge, bus, trains, etc. [15]

7.3 Stockage de l'énergie électrique

Les énergies renouvelables sont appelées à prendre une très grande part dans le mix énergétique (fossile, renouvelable, nucléaire). Cependant, le vent et le soleil ne travaillent pas à la demande, un décalage entre l'offre et la demande apparaît, sans compter la saturation du réseau en période de pic de production. Comme l'électricité ne peut pas être stockée, cette énergie est gaspillée. [15]

Pour éviter ce gaspi, l'excédent d'électricité produit par les éoliennes ou les panneaux solaires peut être utilisé pour produire de l'hydrogène qui est stockable. Cet hydrogène peut servir de carburant pour les voitures électriques à piles à combustible (FCEV) ou pour chauffer des bâtiments. A terme, quand la technologie sera moins coûteuse, l'hydrogène stocké pourra être reconverti en électricité à l'aide de piles à combustible et réinjecté dans le réseau électrique lors de pics de demande créant ainsi un « tampon énergétique ». [15]

7.4 Chauffage

Il existe dans le marché, des chaudières à l'hydrogène qui ne produisent pas de pollution secondaire. En termes de matières polluantes, les 2 l de gasoil consommés par heure pour une chaudière thermique conventionnelle produisent plus de 5 kg de CO₂ + des NOx + des benzopyrènes et des particules fines... [15].

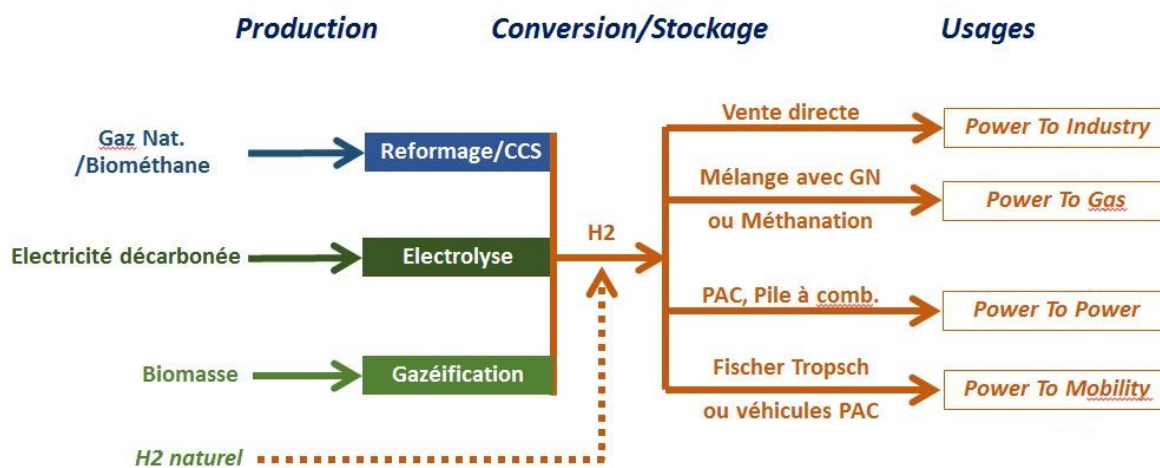


Figure I-8 : La chaîne hydrogène simplifiée : de la production aux usages [16]

8. Véhicules à hydrogène

8.1 Voiture à pile à combustible

Une voiture à pile à combustible (PAC) est d'abord une voiture électrique, mais qui reçoit principalement son énergie d'une pile à combustible. Une batterie est cependant bien présente sur la chaîne de traction, mais de moindre importance. Cette architecture technologique s'active selon 4 scénarios, dont le principal est d'utiliser l'hydrogène des réservoirs pour faire avancer le véhicule, via la pile à combustible et ses dispositifs associés. Si la batterie n'est pas à sa pleine capacité, et que l'utilisation de l'engin le permet, la PAC va permettre de la recharger en même temps. Lors d'un fort appel de puissance, à l'accélération, la pile à combustible et la batterie vont alimenter de concert la motorisation électrique. Enfin, comme dans la très grande majorité des véhicules électriques, l'énergie cinétique des phases de décélération et de freinage va être transformée en électricité pour régénérer le pack lithium. [17]

8.2 Voiture Hybride

Le fonctionnement d'une voiture hybride est finalement très proche d'une motorisation hybride de type TOYOTA Prius. Sauf qu'il n'y a qu'une seule énergie finale qui active un ou

plusieurs moteurs électriques. L'architecture de la chaîne de traction est composée de 5 éléments principaux : le(s) réservoir(s) pour stocker l'hydrogène comprimé à très haute pression, la pile à combustible, une batterie tampon à haute tension, un inverseur, le moteur électrique et le réducteur associé. [17]

CHAPITRE II

RESERVOIRS DE STOCKAGE DE L'HYDROGENE

1. Introduction

Historiquement, plusieurs technologies de réservoirs pour le stockage de gaz sous pression ont été développées. Les réservoirs de stockage gazeux hyperbare peuvent être classés en quatre catégories selon leurs matériaux constitutifs ; « type I » « type II » « type III » et « type IV » [18].

Pour le stockage comprimé d'hydrogène, le gaz est généralement comprimé à des pressions entre 200 et 350 bar mais, plus récemment, des pressions de stockage de 700 bar encore plus élevé ont fait l'objet d'un procès. Ces énormes pressions doivent être prises en considération des questions concernant le choix des matériaux, le dimensionnement des composants et la sécurité. L'hydrogène a tendance à s'adsorber et à se dissocier à la surface des matériaux, l'atome d'hydrogène se diffuse alors dans le matériau et provoque la fragilisation et la diffusion. Les matériaux adaptés aux applications hydrogène sont principalement l'acier inoxydable austénitique et alliages d'aluminium [19].

Pour réduire le poids, les conteneurs en acier ont été remplacés par des conteneurs composites. Une fine doublure intérieure en métal (acier ou aluminium) assure l'étanchéité aux gaz. La stabilité est donné par un maillage partiellement (type II) ou complètement (type III) fourni par des fibres de carbone. Avec les conteneurs de type IV, les doublures sont également en matière synthétique [19].

2. Matériaux composites

2.1 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : [20]

- ✓ Légèreté
- ✓ Grande résistance à la fatigue
- ✓ Liberté de formes
- ✓ Maintenance réduite
- ✓ Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
- ✓ Insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- ✓ Une bonne isolation électrique.

Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût [9]. On distingue deux types de composites : les composites grandes diffusions et les composites hautes performances.

➤ Grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : l'optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux [19].

➤ Hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

2.2 Constituants des matériaux composites

2.2.1 Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présente sous forme filamentaire (des fibres organiques et non organiques).

➤ Différents types de renfort

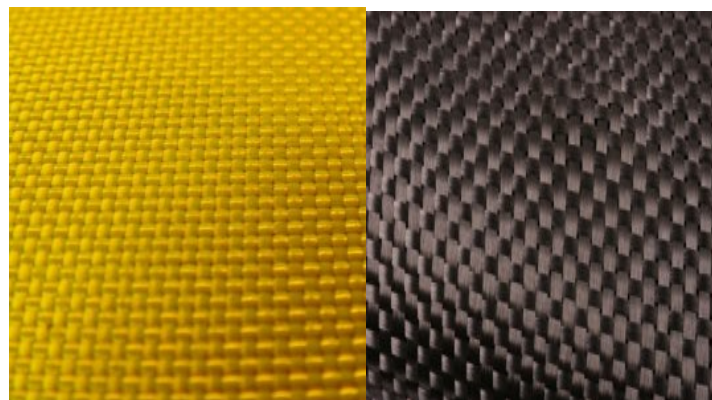
Les renforts les plus utilisées se présentent sous forme de fibres ou forme dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7. Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.



Fibre de verre

Tissu de verre

Mat de verre



Aramide

Carbone

Figure II-1 : Différents types de fibres

➤ Différents natures de renforts

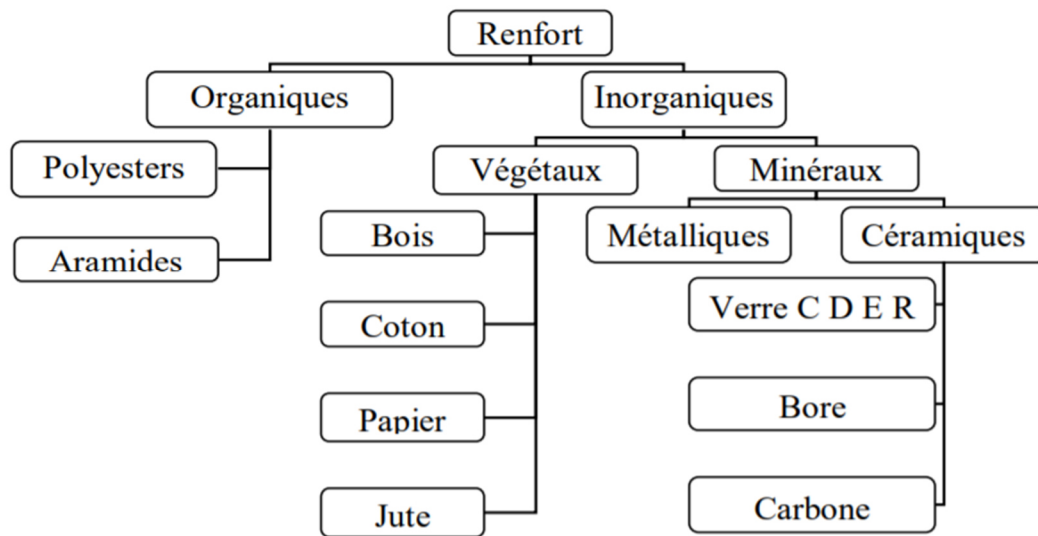


Figure II-2 : Différents familles de renfort

➤ Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des fibres

Fibre	Densité (kg/m ³)	Résistance en traction : σ_r (MPa)	Allongement à la rupture en %	Module Longitudinale : E_L (MPa)	Diamètre du filament élémentaire (μm)
Verre E	2540	3400	4.8	73000	3-30
Verre R	2480	4400	5.4	86000	3-30
Aramide BM	1450	3100	2	70000	12
Aramide HM	1450	3100	1	130000	12
Kevlar	-	2900	2.3	130000	1.45
Aluminium	-	1380	0.7	380000	3.9
Carbone HT	1780	2800	0.5	200000	8
Carbone HM	1800	2200	-	400000	8
Bore	2630	3500	0.8	400000	100-200

2.2.2 La matrice

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

➤ **Différentes natures de la matrice**

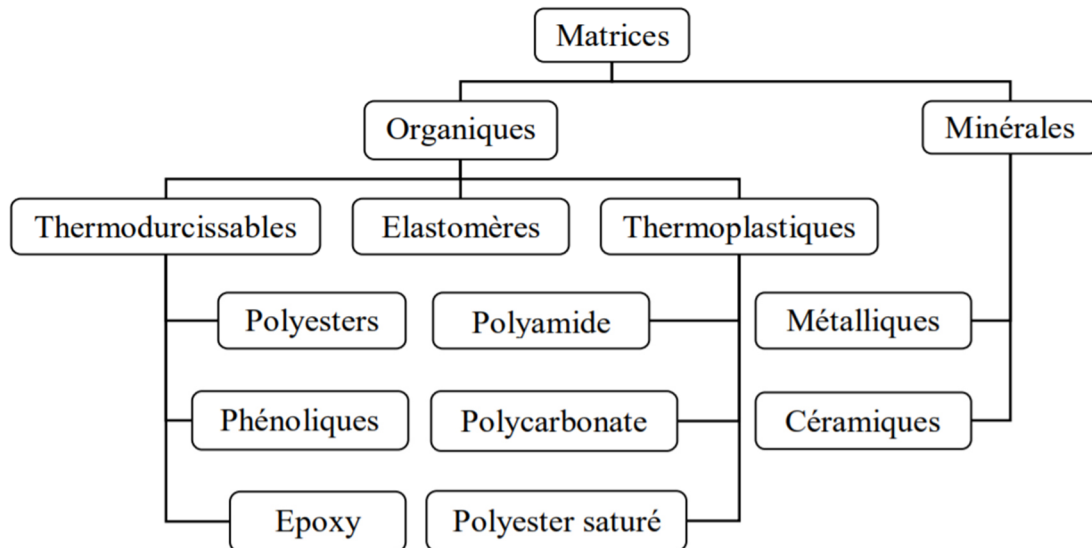


Figure II-3 : Différentes familles des matrices

- ❖ Résine thermodurcissable : sont mis en forme et se polymérisent selon la forme souhaitée. La transformation irréversible.
 - les résines phénoliques (PF) : utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes imposées par les normes dans les transports civils.
 - les résines époxyde (EP) : qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure performantes (véhicules et voiliers de compétition, aéronautique).
 - les résines polyesters insaturés (UP) : peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante.
- ❖ Résine thermoplastique : mis en forme par chauffage, durcissent au cours du refroidissement. La transformation est réversible.

- Un polyamide : est un polymère contenant des fonctions amide pouvant résulter de la polycondensation entre les fonctions acides carboxyliques et amine.
- Le polycarbonate : est une matière plastique disposant d'excellentes propriétés mécaniques et d'une résistance thermique permettant une utilisation entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ❖ Elastomère : Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. Le terme de caoutchouc est un synonyme usuel d'élastomère.

Tableau II.2 : Principales propriétés des matrices thermodurcissables et thermoplastiques

Matrices	Thermodurcissables	Thermoplastiques
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + Refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Cours
Tenue au choc	Limité	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Condition de travail	Emanations de solvants	Propreté

➤ **Principales caractéristiques mécaniques des résines**

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques des résines

	Polyester	Epoxyde	Phénolique	Polyamide	Aluminium
Allongement à la rupture (%)	2 – 5	2 – 5	2 – 5	-	-
Densité ρ (Kg/m ³)	1200	1100 - 1500	1200	1130	2630
Résistance en traction σ_r (MPa)	50 – 80	60 – 80	40	70	358
Module de Young E (GPa)	2.8 – 3.5	3 – 5	-	3	69

2.2.3 Les charges

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre).

Les principales charges utilisées sont :

- Microbille en verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...
- Des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- Des particules de carbone (noir de carbone)

2.2.4 Les additifs

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés [20].

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retraits.
- Agents anti-ultraviolets.
- Accélérateur.
- Catalyseur.

2.2.5 L'interface

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine.

Des produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, l'interphase etc. ... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite [20].

2.3 Architecture des matériaux composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches.
- Les stratifiées.
- Les sandwichs.

2.3.1 Les monocouches

La composite monocouche (couche élémentaire ou strate) correspond à l'unité élémentaire de l'épaisseur, elle est constituée d'un ou plusieurs plis identiques assemblés sans aucune orientation. Un pli et un semi produit de composite (Fibre + Matrice) présenté sous forme quasi-bidimensionnelle, feuille d'épaisseur faible. On distingue le pli UD (le renfort est à structure UD), le pli tissé (le renfort est à structure orientée) et le pli mat (le renfort est à structure aléatoire) [21].

La structure de la monocouche dans l'ordre de plan de drapage va constituer le stratifié.



Figure II-4 : composite monocouche.

2.3.2 Les stratifiés

Le composite stratifié ou multicouche est un ensemble de couches empilées et orientées suivant un ordre de drapage définis et rendus solidaires par l'opération de polymérisation. Le drapage est l'orientation des plis par rapport à un référentiel donné. Il définit les propriétés mécaniques, électromagnétiques et thermiques globale de matériau composite.

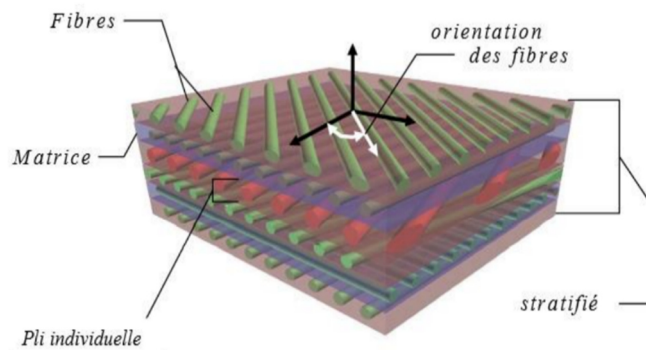


Figure II-5 : composite stratifié.

2.3.3 Les sandwichs

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer sur une âme constituée d'un matériau ou une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression deux feuilles, appelées peaux, possédant de bonnes caractéristiques traction. L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier la légèreté et la rigidité.

Généralement, le choix des matériaux est fait pour un objectif initial d'avoir une masse minimale en tenant en compte ensuite des conditions d'utilisation (condition thermique, corrosion, prix,...).

Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- Pour les âmes pleines :
 - ✓ Le balsa ou bois cellulaire.
 - ✓ Diverses mousses cellulaires.
 - ✓ Des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées syntactiques.

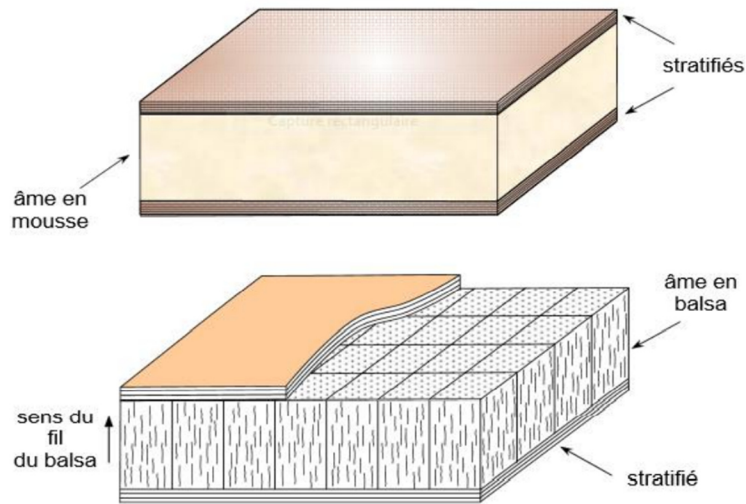


Figure II-6 : matériau composite sandwich à âmes pleines

➤ Pour les âmes creuses :

- ✓ Des alliages métalliques légers.
- ✓ Du papier kraft (enduit ou non de résine).
- ✓ papier polyamide, type papier Nomex.

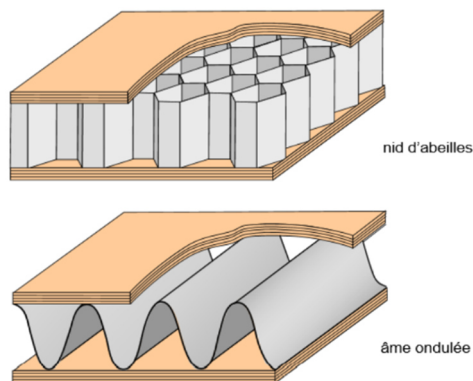


Figure II-7 : matériau composite sandwich à âmes creuses.

3. Réservoirs de stockage d'hydrogène

3.1 Définition

Un réservoir de stockage est un récipient, généralement pour contenir des liquides, des gaz comprimés et parfois pour les solides.

3.2 Types des réservoirs de stockage d'hydrogène

3.2.1 Réservoirs sous pression

L'hydrogène a été stocké et distribuer sous pression il y a plusieurs années, avec des bouteilles ou assemblage des bouteilles cylindriques en acier gonflées avec 20 ou 25 MPa (type I et II). L'inconvénient est le poids qui résulte de l'utilisation d'aciers à bas niveau de contraintes pour éviter les problèmes de fragilisation par l'hydrogène. La situation a radicalement changée avec l'apparition de la technologie des réservoirs composites dits de type III et IV. Leur principe de base est de séparer les deux fonctions essentielles qui sont l'étanchéité et la tenue mécanique pour les gérer l'une indépendamment à l'autre. Dans ce type de réservoir on associe une vessie en résine (thermodurcissable ou thermoplastique) à une structure de renforcement constitué de fibre (verre, aramide, carbone) permette à travailler à des pressions beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse et en évitant les risque de rupture explosive en cas d'agressions externes sévères. C'est ainsi que 70 MPa est pratiquement devenu actuel. De fait de lois de compressibilité, cette valeur semble être une limite, même si des réservoirs de pression nominal égale ou supérieur à 100 MPa ont été réalisés à titre expérimental [22].

Les réservoirs de stockage gazeux hyperbare peuvent être classés en quatre catégories selon leurs matériaux constitutifs.

➤ Réservoirs de type I

Sont entièrement métalliques. Ces réservoirs présentent l'inconvénient d'avoir une masse importante et ainsi des densités de stockage faibles (de l'ordre de 12%). Par ailleurs les pressions maximales de stockage sont limitées à 300 bars [18].

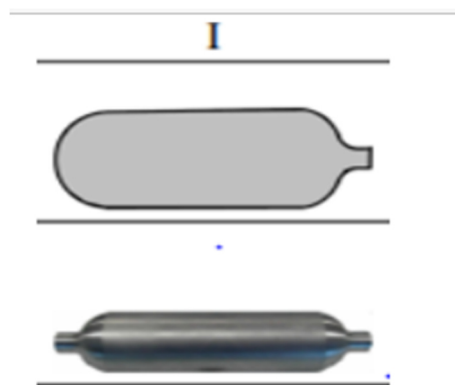


Figure II-8 : réservoir de type I.

➤ **Réservoirs type II**

Sont métalliques avec un frettage en partie cylindrique. Ces réservoirs présentent néanmoins les mêmes inconvénients que ceux de type I. L'augmentation de pression de stockage reste mineure [18].

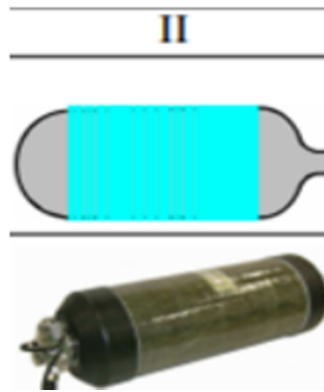


Figure II-9 : réservoir de type II.

➤ **Réservoirs type III**

Sont en matériaux composites avec un liner (revêtement interne) métallique. Cette combinaison permet d'atteindre des pressions plus élevées (jusqu'à 700 bar). Les principaux inconvénients se situent au niveau de la résistance à la fatigue qui reste encore faible tandis que la masse de l'ensemble demeure encore élevée [18].

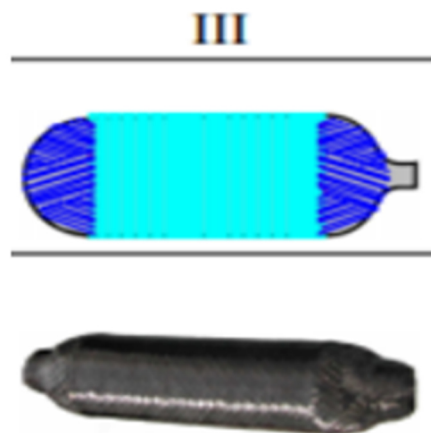


Figure II-10 : réservoir de type III.

➤ Réservoirs types IV

Sont des réservoirs en composites (principalement en fibres de carbone) avec un liner en polymère (thermoplastique ou thermodurcissable). Dans ce cas, le liner ne supporte pas la charge, il assure seulement l'étanchéité à l'hydrogène. Les propriétés particulières des polymères permettent d'allonger considérablement la durée de vie en fatigue du réservoir et leur faible densité permet de diminuer la masse totale de l'ensemble. Cette combinaison permet d'atteindre des niveaux de pression élevés comparables à ceux des réservoirs de type III (700 bar). Le stockage de l'hydrogène de type IV est à l'heure actuelle la technologie la plus avancée [18].



Figure II-11 : réservoir de type IV

4. Conclusion

Parmi tous les réservoirs précédents, les réservoirs de type III et IV sont ceux qui présentent le meilleur ratio performance-masse et la meilleure durée de vie car moins sujet à la fatigue du fait de l'absence d'une contribution métallique dans la partie structurante de réservoir.

Les réservoirs de type III et IV sont les plus performants, donc ils sont capables de répondre aux besoins en terme de stockage à la très haute pression nécessaire pour conserver les autonomies actuelles dans les domaines de l'automobile.

CHAPITRE III

MODELISATION, SIMULATION NUMERIQUE ET ANALYSE DES CONTRAINTES DE RESERVOIR

1. Introduction

Les matériaux composites de polymère renforcé de fibre de carbone (CFRP) ont été de plus en plus utilisés pour développer les réservoirs légers de stockage d'hydrogène à haute pression pour les véhicules à pile à combustible. Dans ce chapitre, un modèle d'éléments finis paramétriques 3D est proposé pour prédire l'évolution de la résistance à la rupture des réservoirs de stockage d'hydrogène de type III. Pour cette raison, un design initial de réservoir d'hydrogène de haute pression de type III est proposé. Le réservoir est de forme cylindrique avec deux demi-sphères dans les deux côtés. Il est formé de deux couches de différents matériaux ; la première (liner) est une couche d'alliage d'aluminium (AA) et la deuxième (composite) est une couche de polymère renforcé de fibre de carbone (CFRP). Le modèle initial proposé est modélisé et simulé en utilisant le logiciel ABAQUS. Le premier design est simulé pour des différentes pressions internes pour analyser son comportement mécanique. Des modifications, concernant les épaisseurs de la paroi et les orientations des angles de CFRP, ont été faites sur le design initial dans le but d'analyser la variation des contraintes, des déplacements et des déformations. Les résultats obtenus sont expliqués, commentés et validés avec d'autres réservoirs similaires.

2. Design initial du réservoir

Le design initial est pris à partir du réservoir validé expérimentalement [23] ; c.à.d. ce réservoir peut résister à une pression interne de 70 MP mais il n'est pas optimal. Le réservoir est un cylindre avec deux demi-sphères dans les deux côtés. Il est formé de deux couches de différents matériaux ; la première (liner) est une couche d'alliage d'aluminium et la deuxième (composite) est une couche de polymère renforcé de fibre de carbone. La **figure III-1** représente un schéma explicatif de la forme du réservoir.

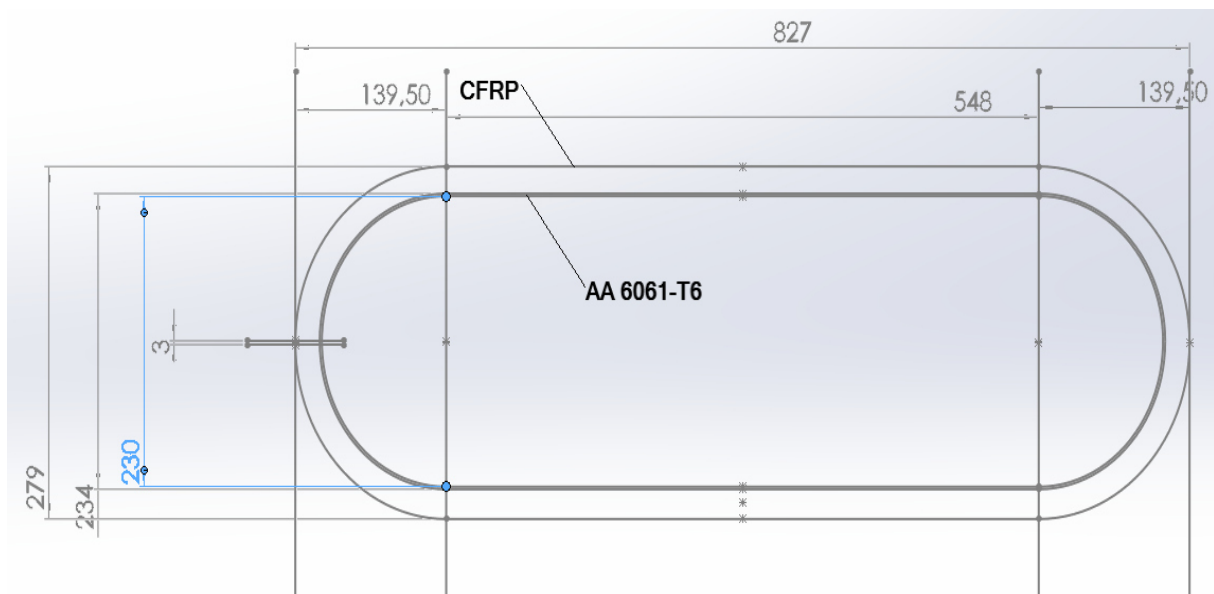


Figure III-1 : Schéma du réservoir

2.1 Caractéristiques techniques

Le **tableau III-1** représente les différentes caractéristiques techniques du réservoir d'hydrogène.

Tableau III-1 : Caractéristiques techniques du réservoir

Caractéristiques	Valeur	Unité	Reference
Volume	29	Litre	[23]
Pression de service	70	MP	[23]
Longueur externe	827	mm	[23]
Diamètre externe	279	mm	[23]
Diamètre interne	230	mm	[23]
Diamètre d'injecteur	3	mm	[23]
Epaisseur d'AA	2	mm	[23]
Epaisseur de CFRP	22.5	mm	[23]
Module de Young (E) AA 6061-T6	68.9	Gpa	[24]
Coefficients de Poisson (ν) AA 6061-T6	0.33	/	[24]
Résistance à la traction AA 6061-T6	310	Mpa	[24]
Résistance à la fatigue AA 6061-T6	96.5	Mpa	[24]
Densité (AA 6061-T6)	0.27	Kg/m ³	[24]
Modules de Young (CFRP) E₁, E₂, E₃	135 ; 9.66 ; 9.66	Gpa	[25]
Modules de cisaillement (CFRP) G₁₂, G₁₃, G₂₃	5.86 ; 5.86 ; 3.46	Gpa	[25]
Coefficients de Poisson (CFRP) ν_{12}, ν_{13}, ν_{23}	0.25 ; 0.25 ; 0.41	/	[25]
Densité (CFRP)	0.99	Kg/m ³	[25]

3. Outils de simulation

On a utilisé le logiciel **ABAQUS 6.14.1** pour la conception et la simulation du réservoir. ABAQUS est un logiciel de calcul par éléments finis. Il permet de réaliser des simulations du comportement de pièces ou de structures impliquant des éléments en polymères ou en élastomères : prise en compte des non linéarités, des grandes déformations, couplage avec les effets de température. Il est ainsi possible de réaliser des analyses en statique, ou en dynamique, par exemple pour des problématiques d'étanchéité, des analyses vibratoires... [23]. La machine de calcul est un PC portable i7 de 8 Go de RAM.

4. Conception du réservoir

La conception de la forme du réservoir, décrite précédemment, dans l'ABAQUS se fait dans le module « part ». Dans ce dernier on dessine une vue de face en 2D (shell) du réservoir. Après avoir cliqué avec le bouton gauche de la souris sur le dessin, on fait un autre clic avec le bouton droit, cela fait apparaître une nouvelle fenêtre (Edit Revolution). Sur l'icône « Angle » on introduit le chiffre 360 puis on clique sur « OK », on obtient la forme finale du réservoir en 3D.

Les figures III-2, III-3, III-4, III-5 expliquent les étapes de conception du réservoir d'hydrogène.

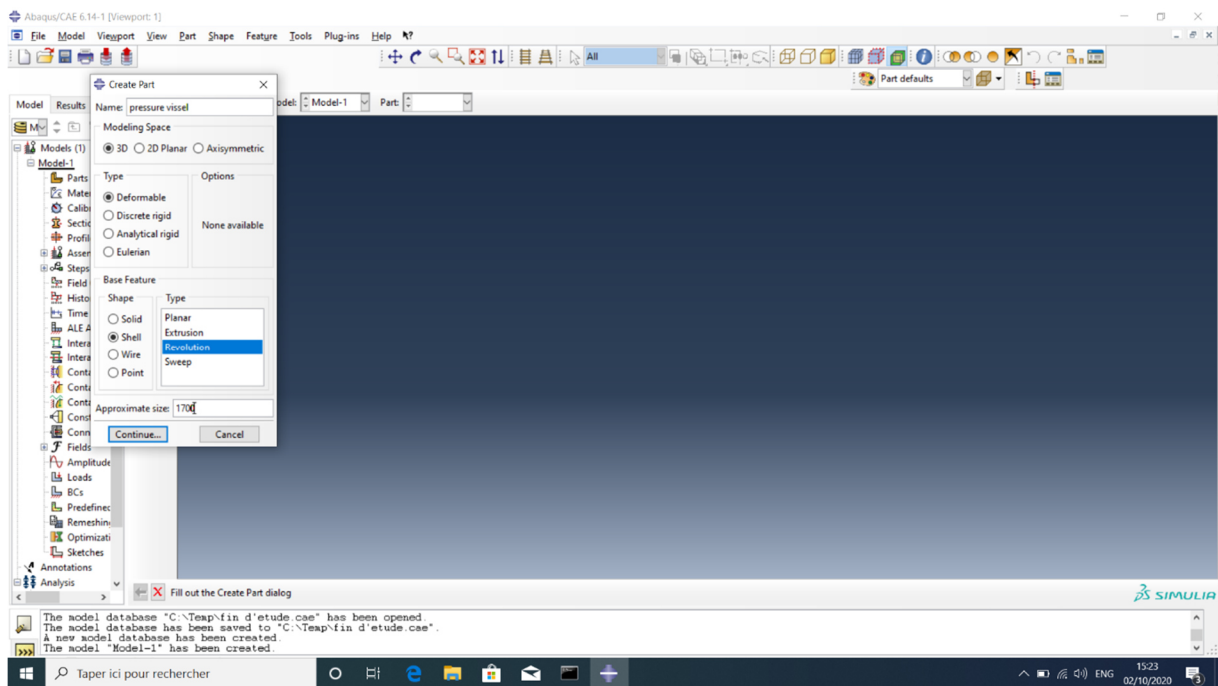


Figure III-2 : module « part » dans ABAQUS

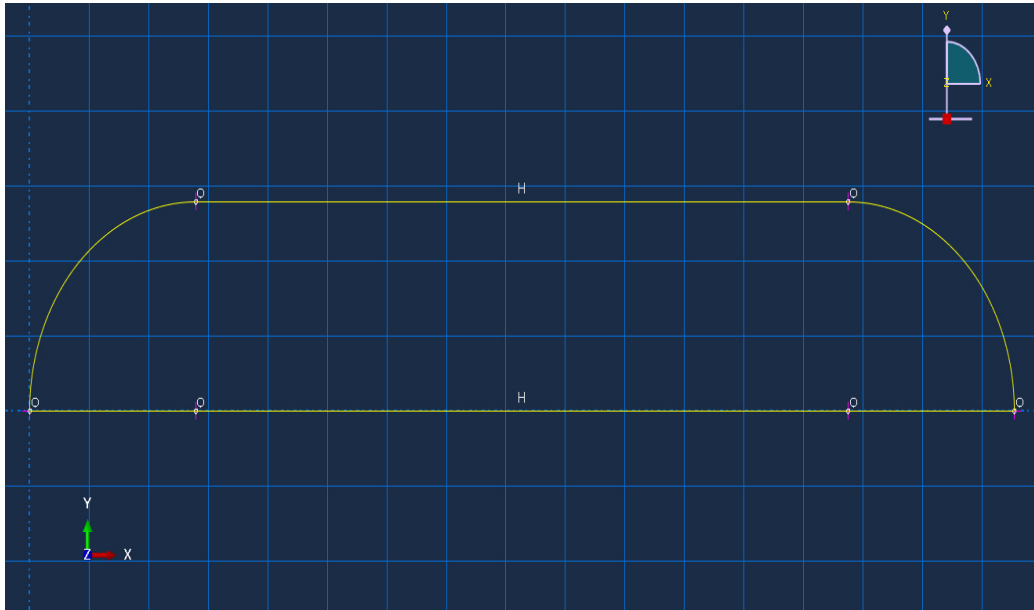


Figure III-3 : dessin du réservoir

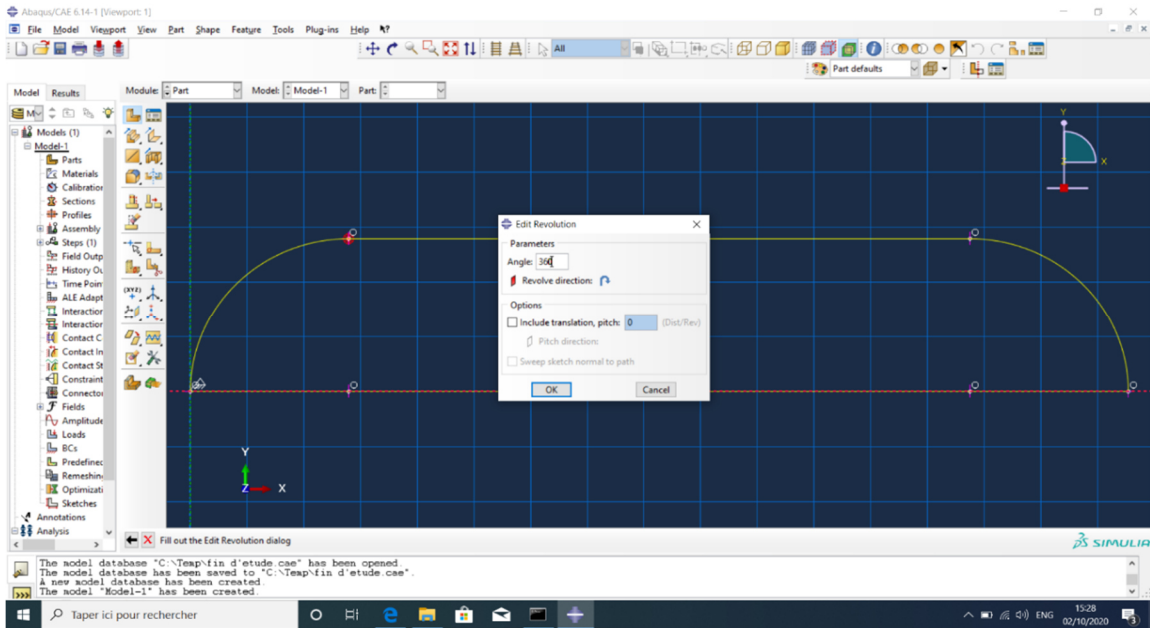


Figure III-4 : Création de la forme 3D du réservoir

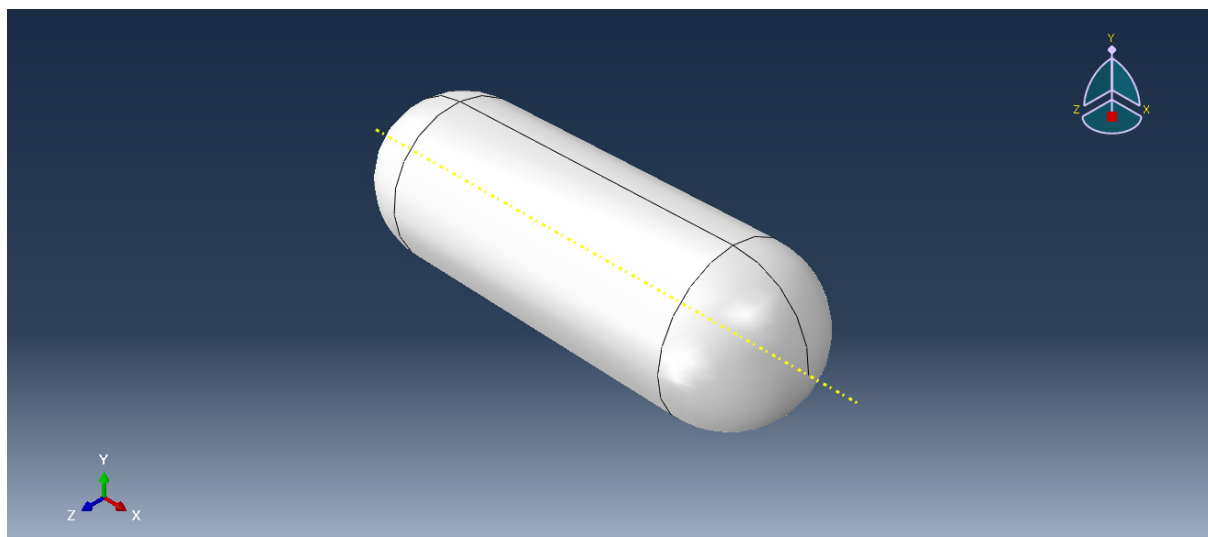


Figure III-5 : Forme finale du réservoir

5. Configuration des paramètres dans ABAQUS

Dans le module « Property » sur le logiciel ABAQUS, on introduit toutes les valeurs caractéristiques de CFRP et de AA. Ces différentes valeurs caractéristiques sont montrées dans le **tableau III-1**. La **figure III-6** représente le module « Property » dans ABAQUS. Les **figures III-7, III-8 et III-9** montrent l'affectation des paramètres (module de Young, coefficient de poisson, épaisseur,...) d'AA. Sur l'anglet « Edit Material », on détermine le nom (AA), le type et le comportement du matériau. Puis, en bas de cet anglet, on introduit le module de Young et le coefficient de poisson (**voir figure III-7**). Dans l'anglet « Edit Section », on affecte la valeur de l'épaisseur et on choisit la méthode et les points d'intégration ; pour la méthode d'intégration nous avons choisi la méthode de Simpson (**voir figure III-8**). La couleur verte dans la **figure III-10** signifie que le premier matériau AA est configurée dans ABAQUS. Toujours dans l'icône « Edit Material » on introduit les caractéristiques du CFRP (**voir figures III-11 et III-12**). Pour le CFRP il est très important de déclarer le nombre, les orientations et les épaisseurs des couches de composite (ply). La **figure III-13 et III-14** représentent clairement ces étapes. La **figure III-15** montre le positionnement et l'orientation des différentes couches de composite. La couleur dorée dans **figure III-16** interprète la configuration globale du réservoir.



Figure III-6 : Le module « Property »

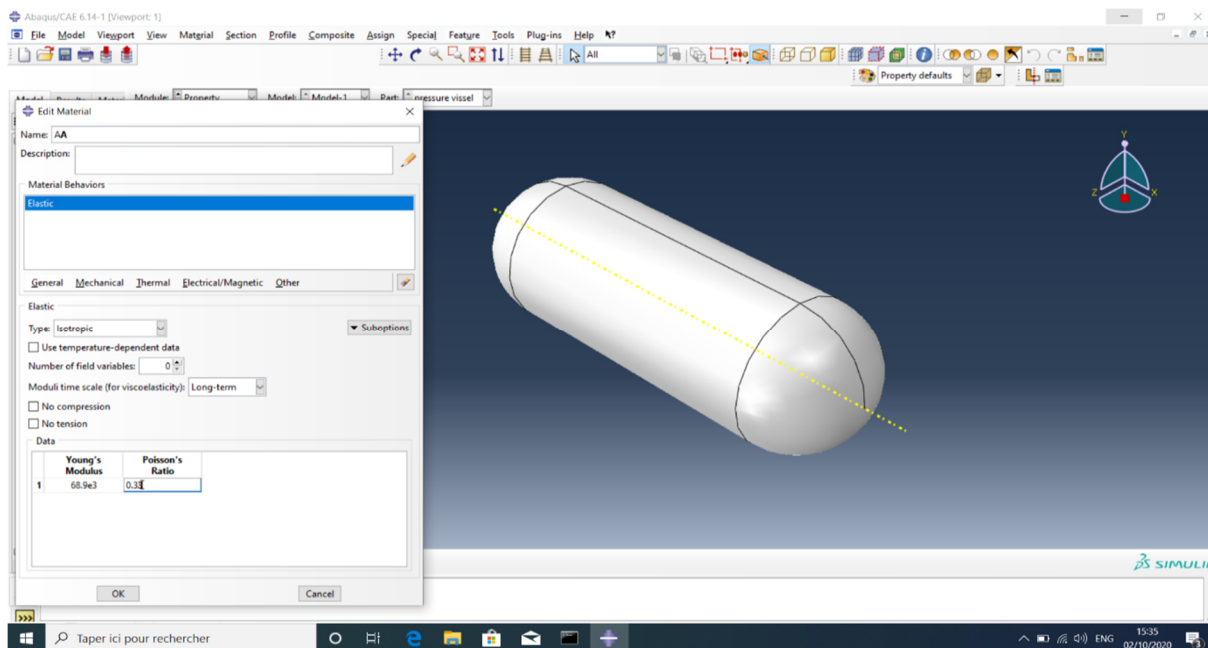


Figure III-7 : Saisie de propriétés d'AA dans l'angle « Edit Material »

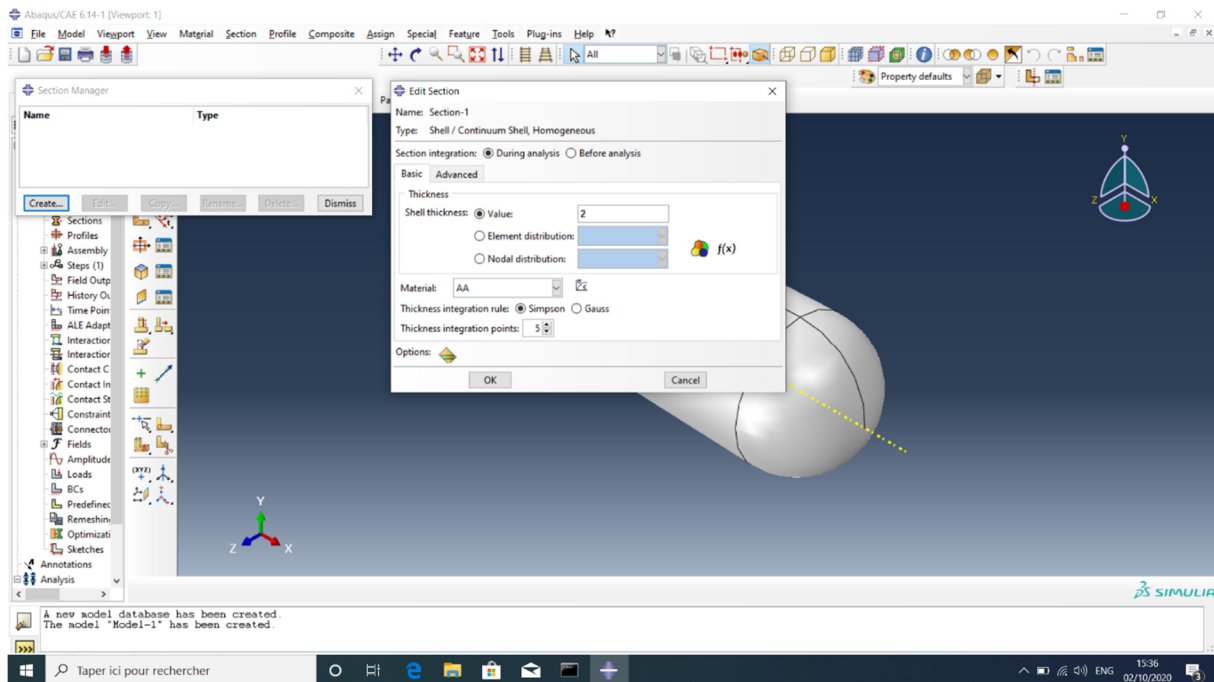


Figure III-8 : Affectation de L'épaisseur d'AA, et de la méthode et les points d'intégration dans « Edit Section »

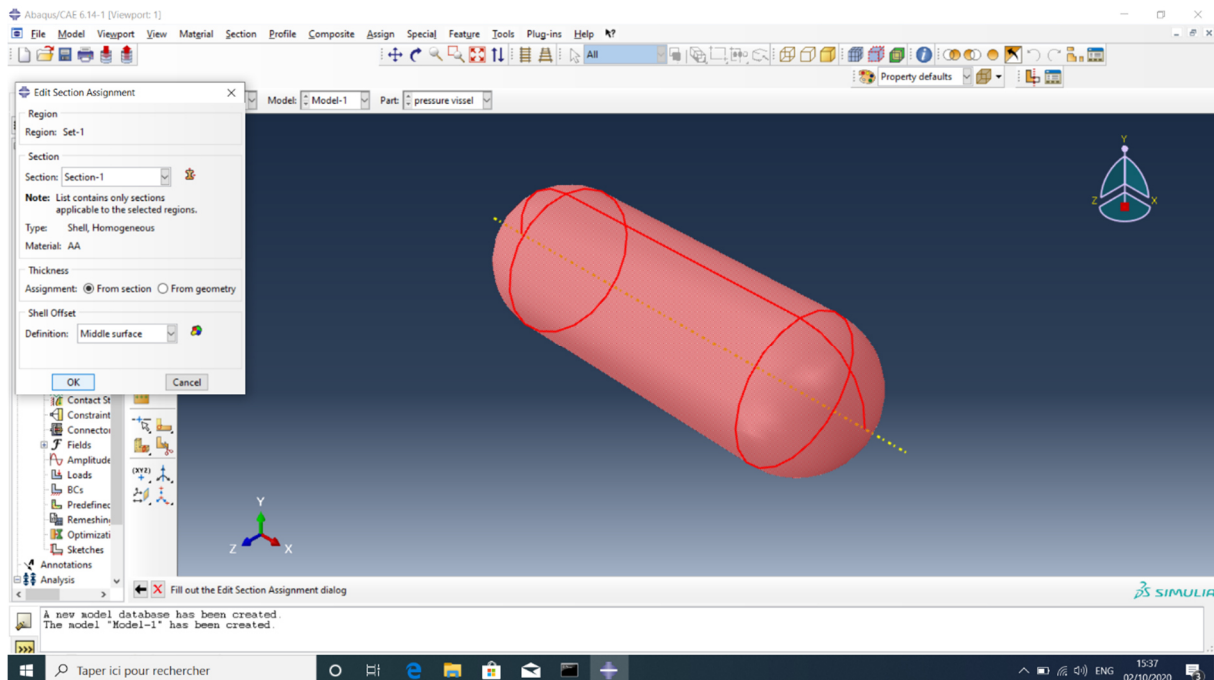


Figure III-9 : L'affectation de section

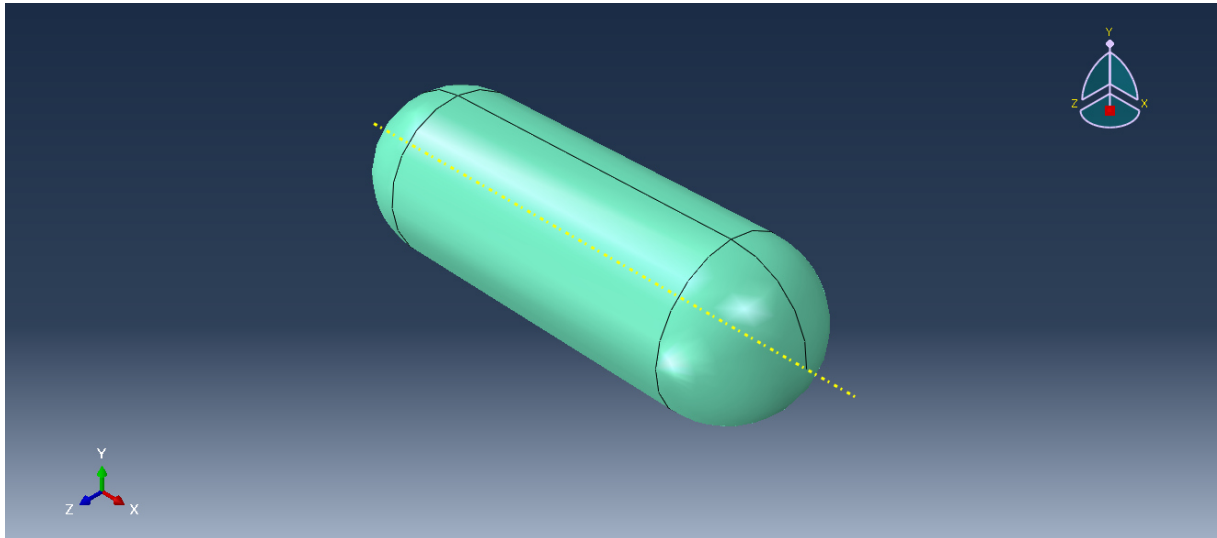


Figure III-10 : Le matériau AA 6061-T6 déterminé

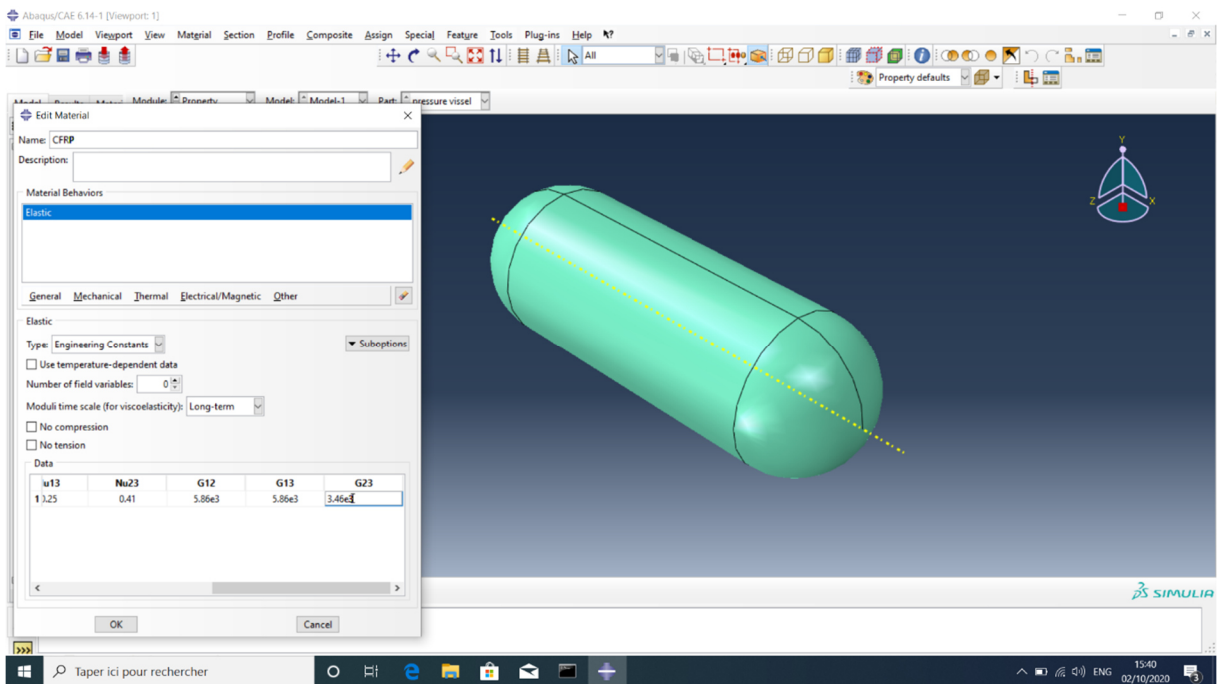


Figure III-11 : Saisie de propriétés mécaniques de CFRP dans « Edit Material »

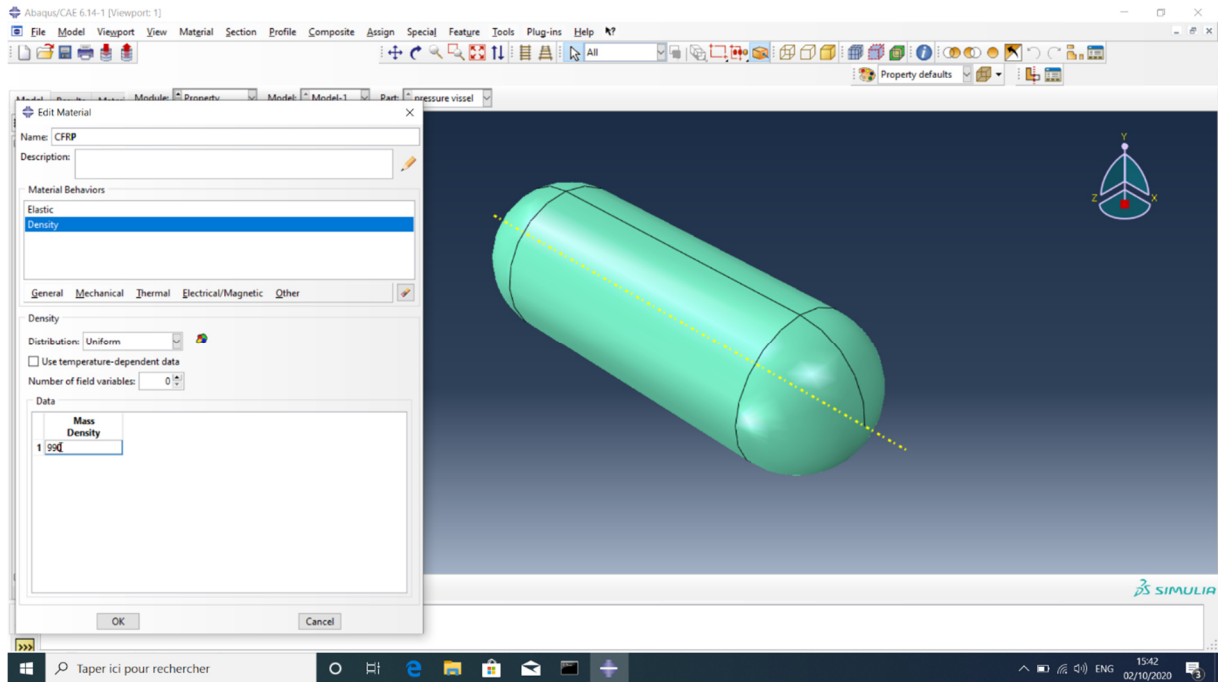


Figure III-12 : Saisie de la densité de CFRP

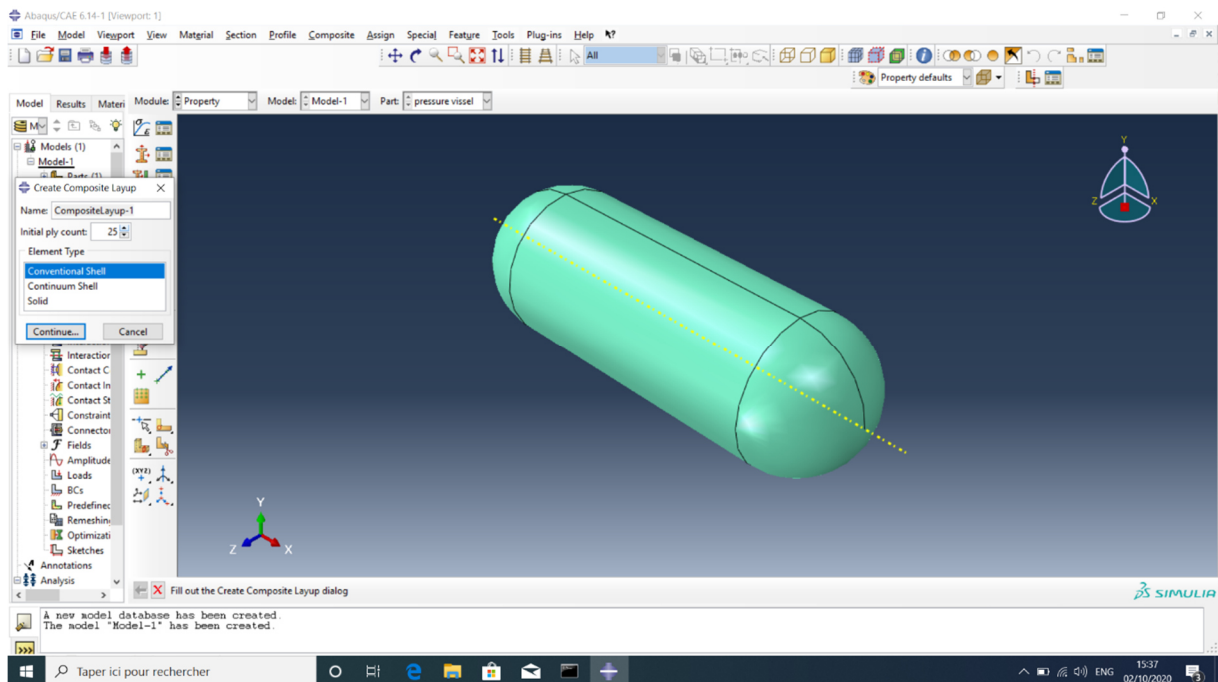


Figure III-13 : Création de stratification

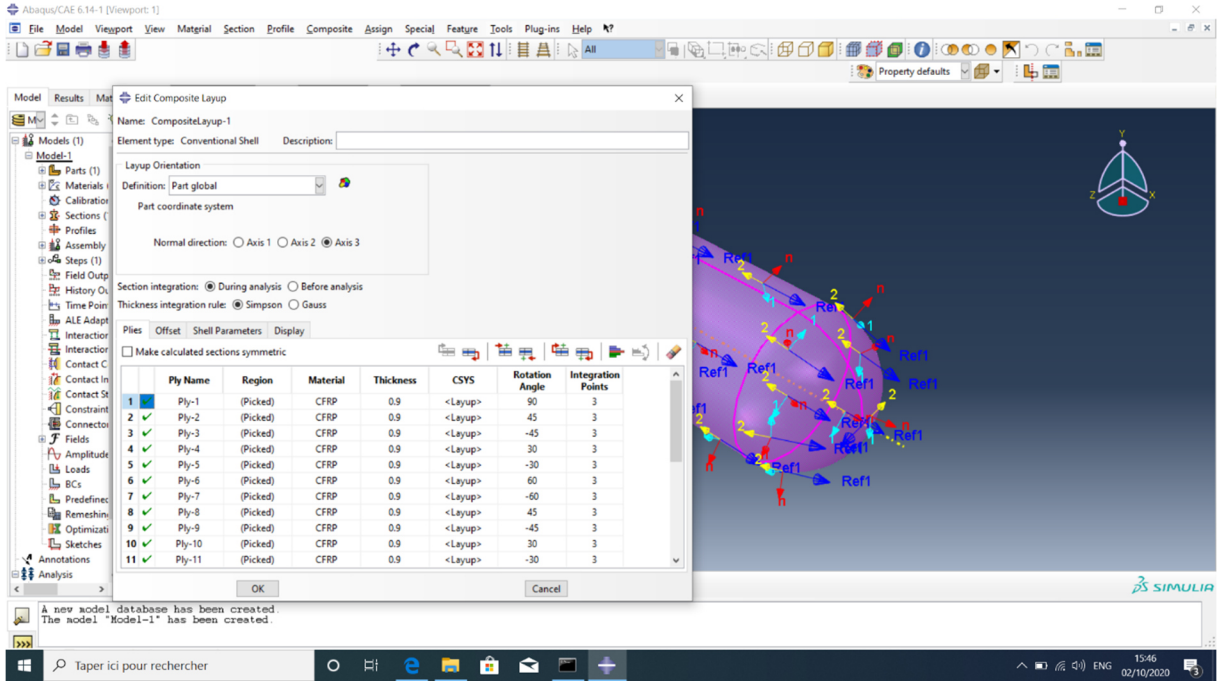


Figure III-14 : Détermination des directions et des épaisseurs des couches de composite

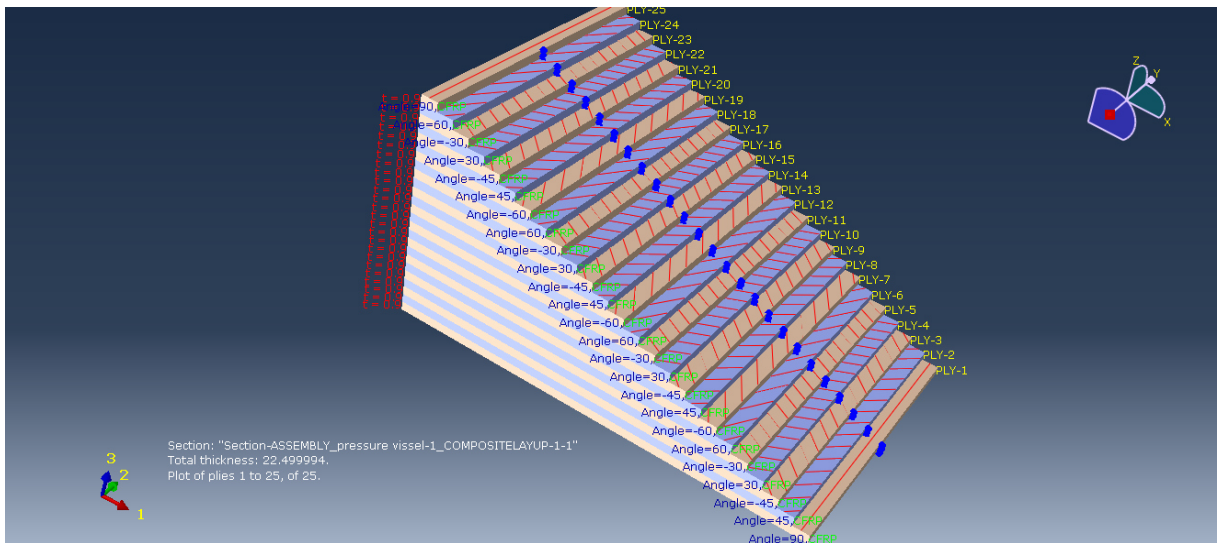


Figure III-15 : Les couches de composite

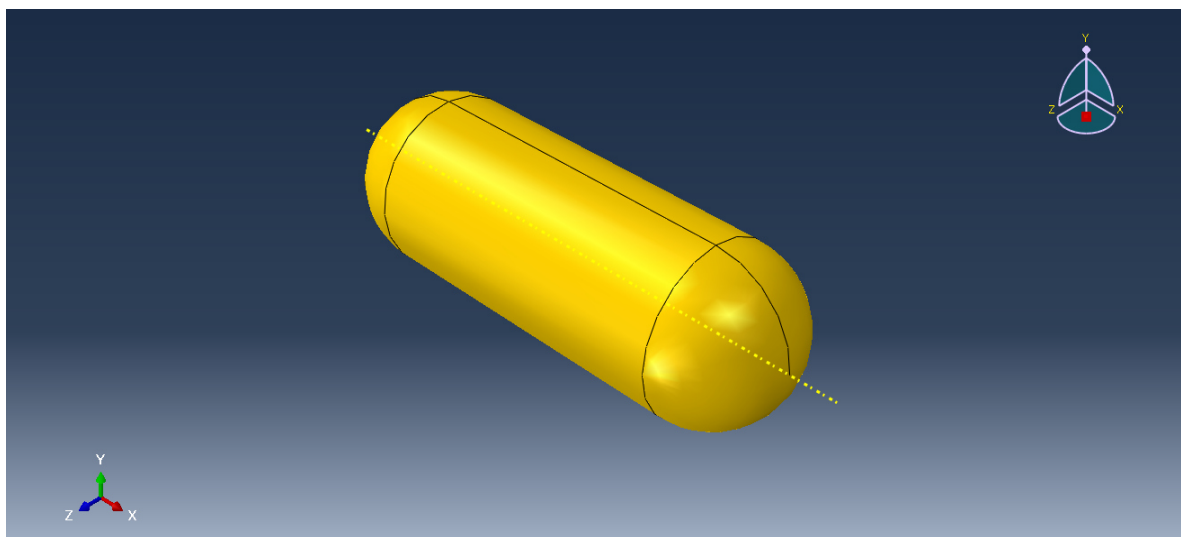


Figure III-16 : propriétés des matériaux du réservoir sous pression déterminées

6. Création d'instance

Cette opération est faite dans l'ABAQUS sur le module « Assembly » utilisé pour créer une instance de la pièce, ce qui signifie que si on a plusieurs pièces, on peut les placer dans le même assemblage, mais si on a une, elle doit toujours être dans un assemblage. On peut ensuite mailler sur la pièce ou sur l'assemblage. Les figures **III-17**, **III-18** et **III-19** expliquent les étapes suivies dans « Assembly ».

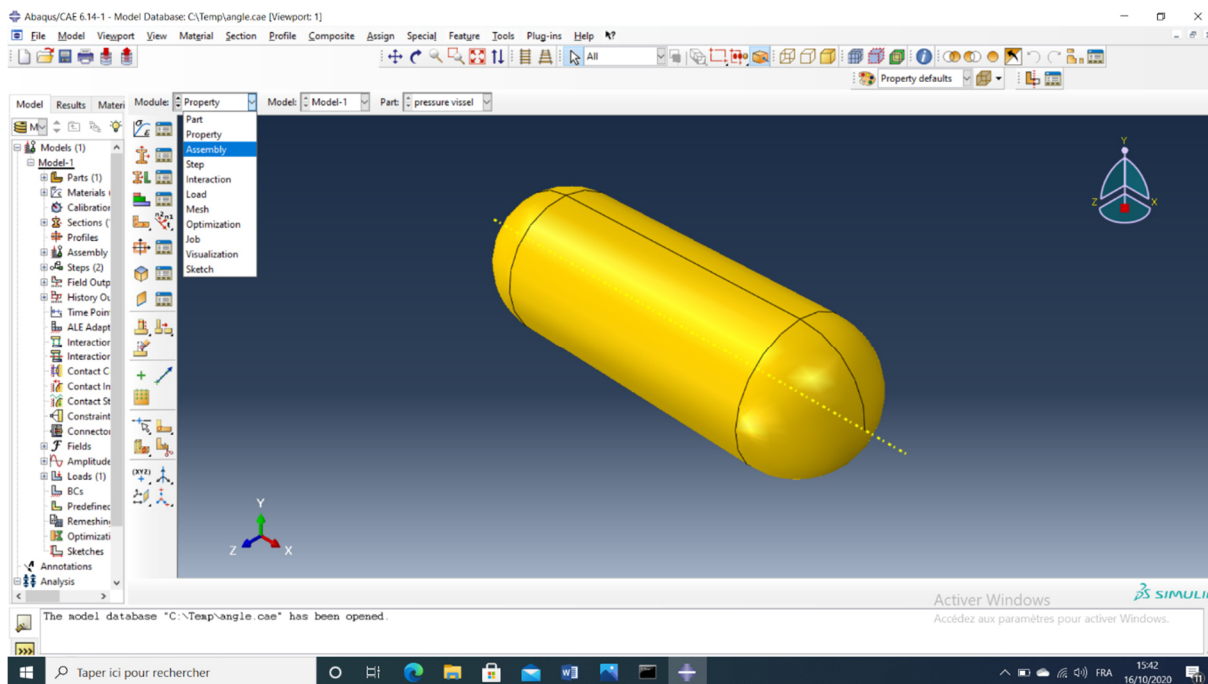


Figure III-17 : Le module « assembly »

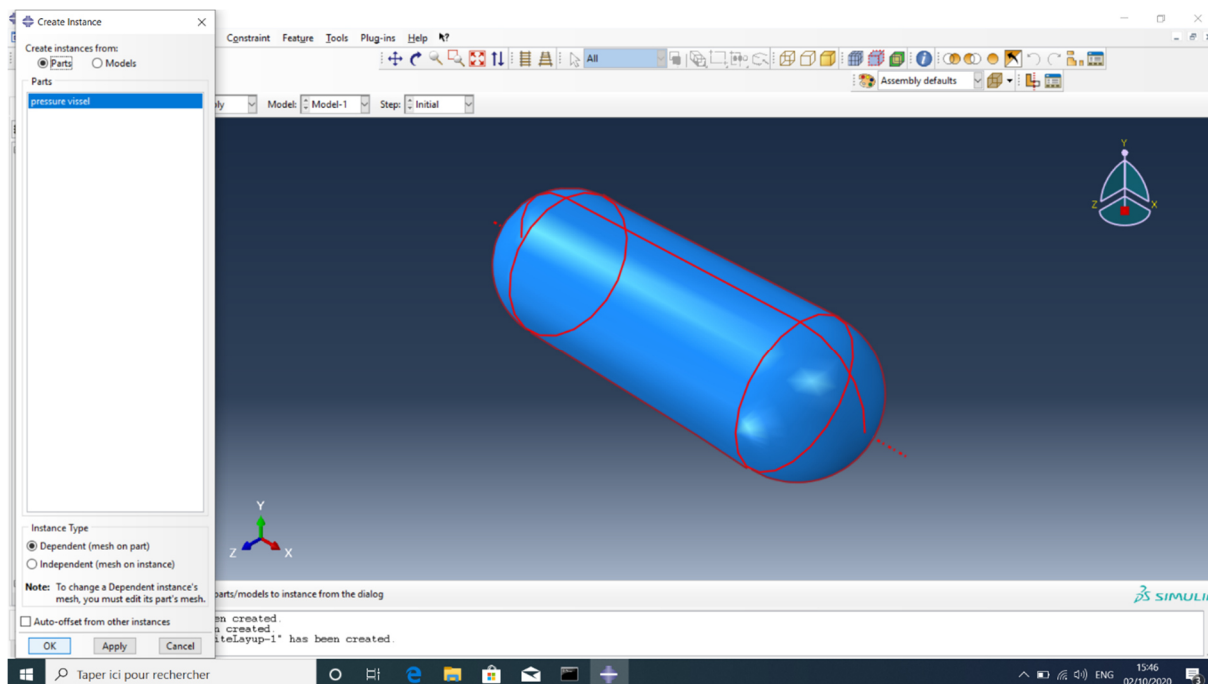


Figure III-18 : Création de l'instance

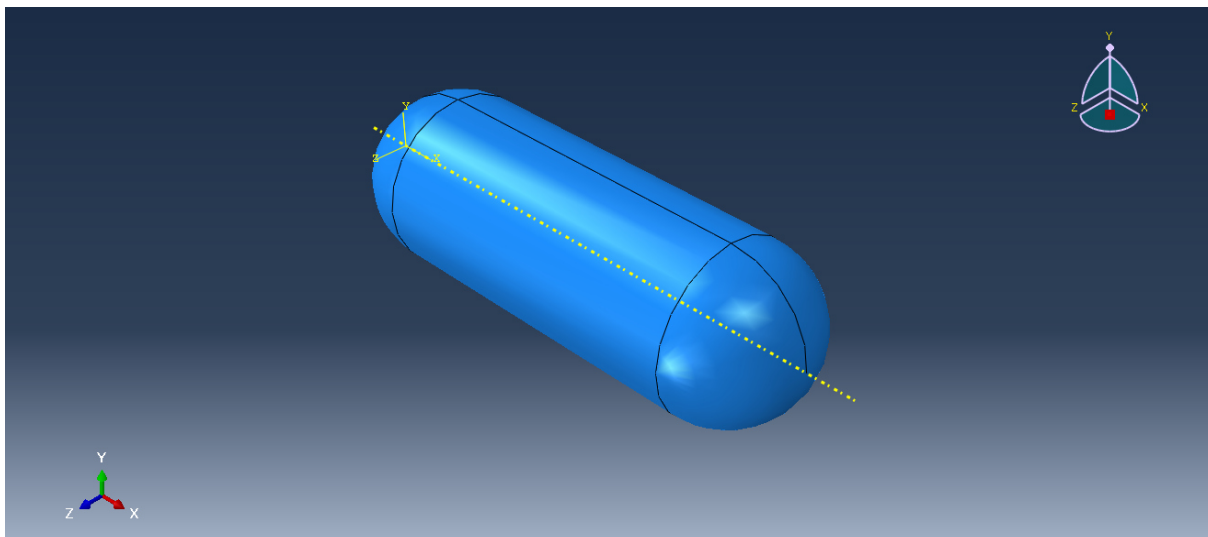


Figure III-19 : Instance créée

7. Définition des critères de calcul utilisés

Dans cette partie on va déterminer l'incrémentation, valeur du pas de temps, et la valeur du temps final. Le temps que nous sommes en train de parler ici est un temps sans unité, ou bien c'est un temps virtuel.

Les figures III-20, III-21, III-22, III-23 expliquent les étapes à suivre dans le module « Step ».

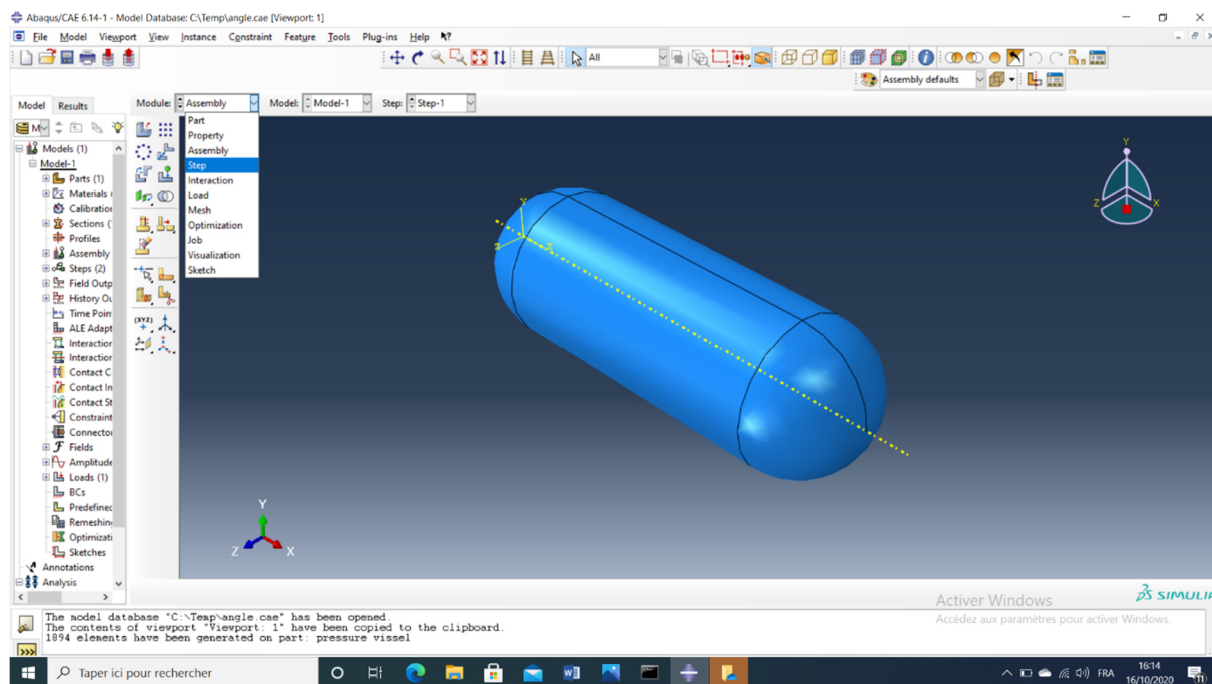


Figure III-20 : Le module « Step »

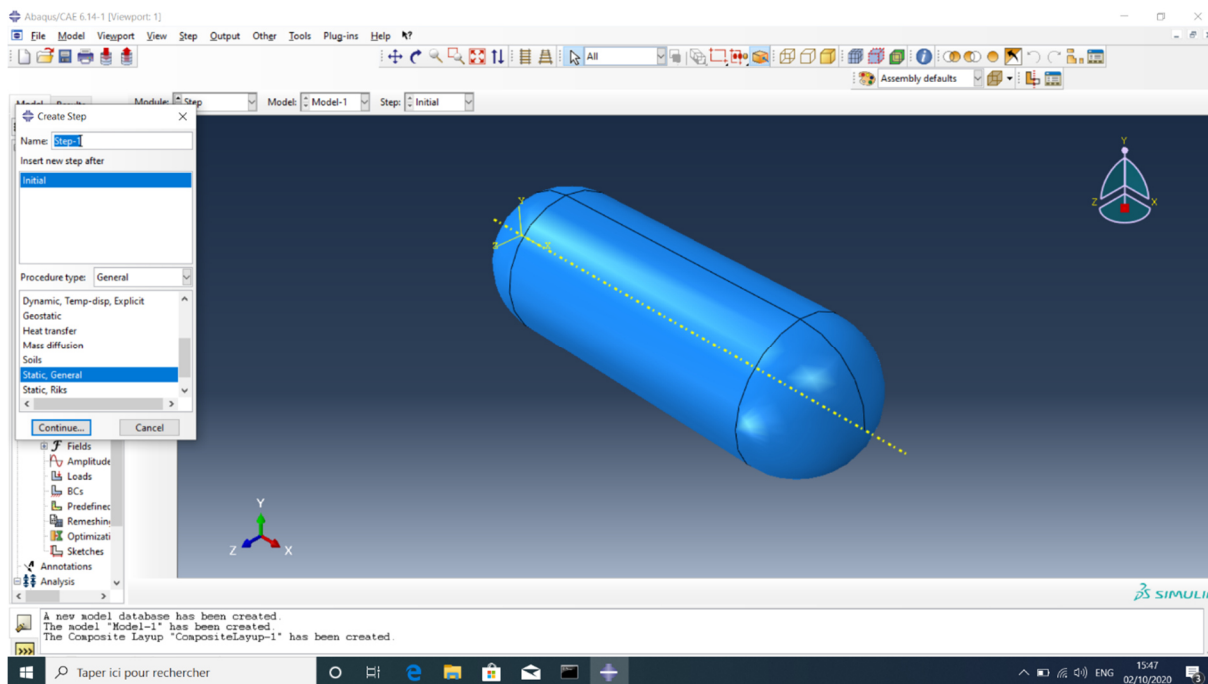


Figure III-21 : Création d'une étape

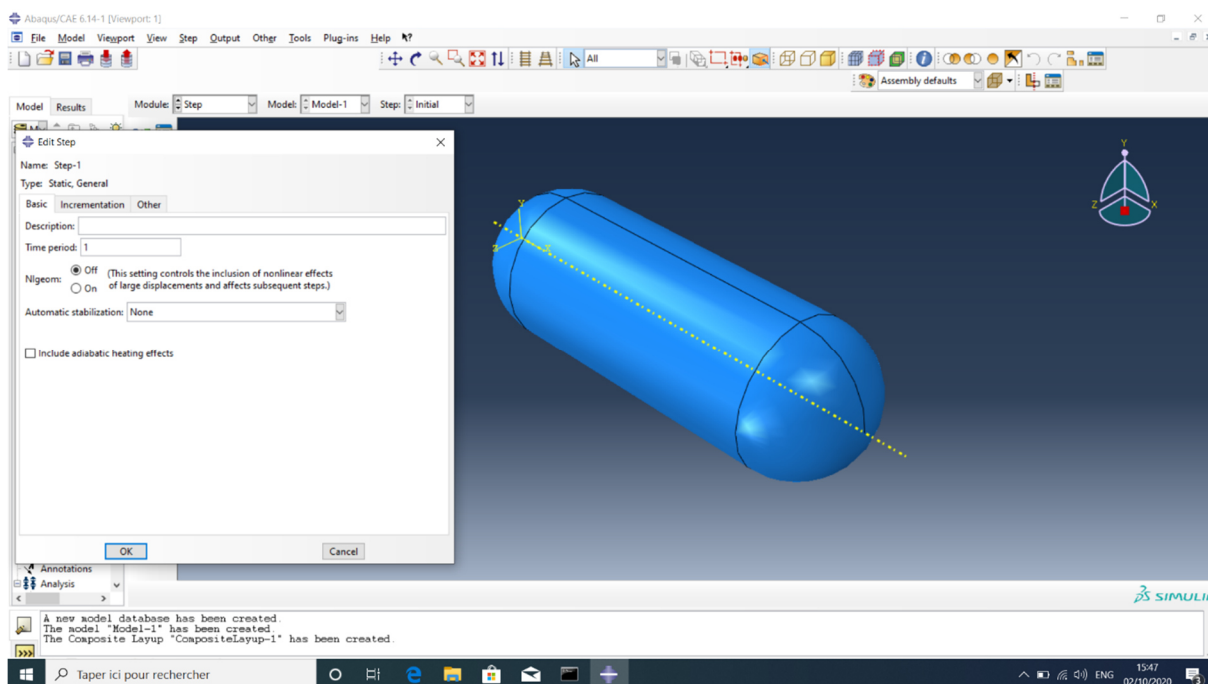


Figure III-22 : Modification de l'étape créée

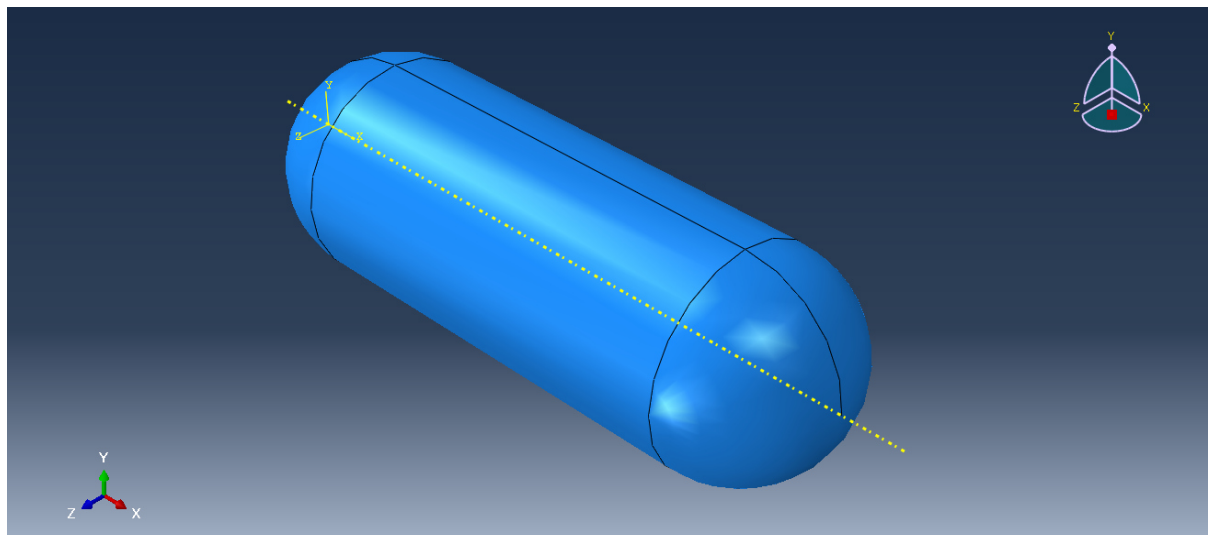


Figure III-23 : Etape créée

8. Détermination de la charge de pression appliquée à l'intérieur du réservoir

La détermination de la charge de pression du gaz d'hydrogène, appliquée à l'intérieur du réservoir, est effectuée dans le module « Load » dans ABAQUS. La réglementation et les normes exigent que la pression de service nominale (PSN), pour les réservoirs de stockage d'hydrogène dans les véhicules légers, est de 70 MPa [26]. Pour l'affectation de cette valeur de pression, on doit tout d'abord ouvrir le module « Load » tel qu'il est représenté dans la figure III-24. Dans la liste représentant les différents types de charges sur l'icône « Create Load », on selecte « Pressure » (voir figure III-25). À l'intérieur du demi-réservoir obtenu, on sélectionne la surface violette sur laquelle la charge de pression sera appliquée (voir figure III-26). La figure III-27 montre la saisie de la valeur de pression sur l'anglet « Edit Load ». La figure III-28 représente la vue finale de la Charge appliquée dans le réservoir.

Les figures III-24, III-25, III-26, III-27 et III-28 expliquent les étapes suivies pour cette opération.

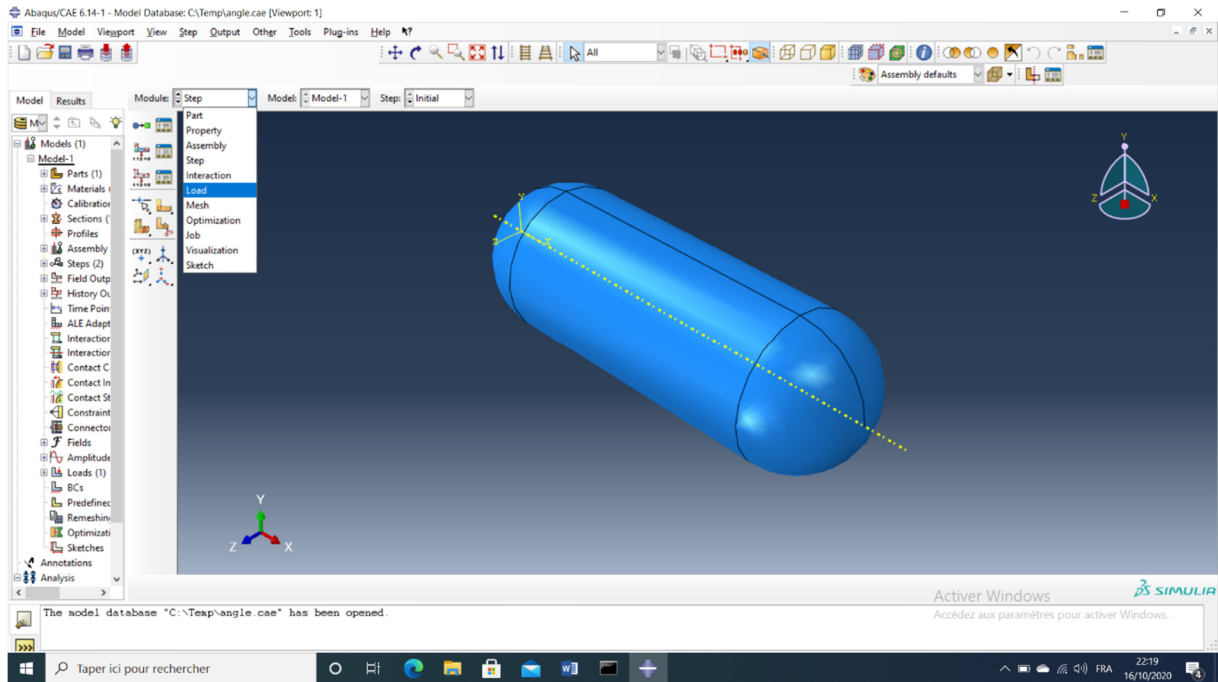


Figure III-24 : Le module « Load »

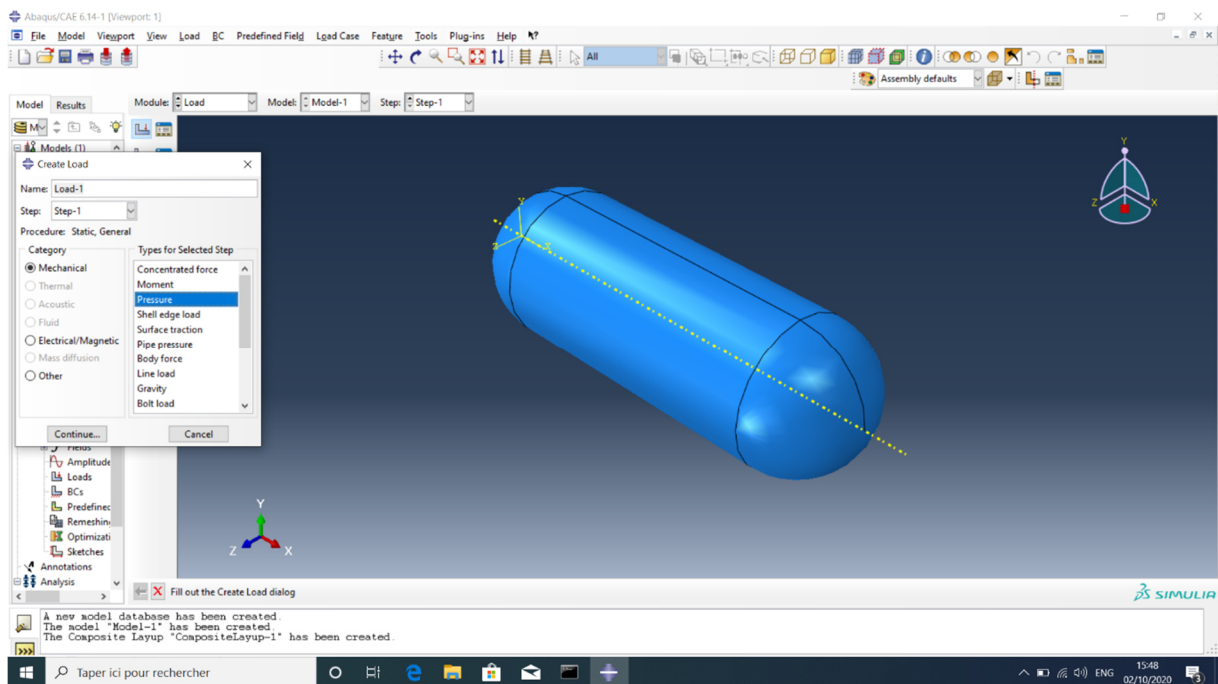


Figure III-25 : Création d'une charge de pression

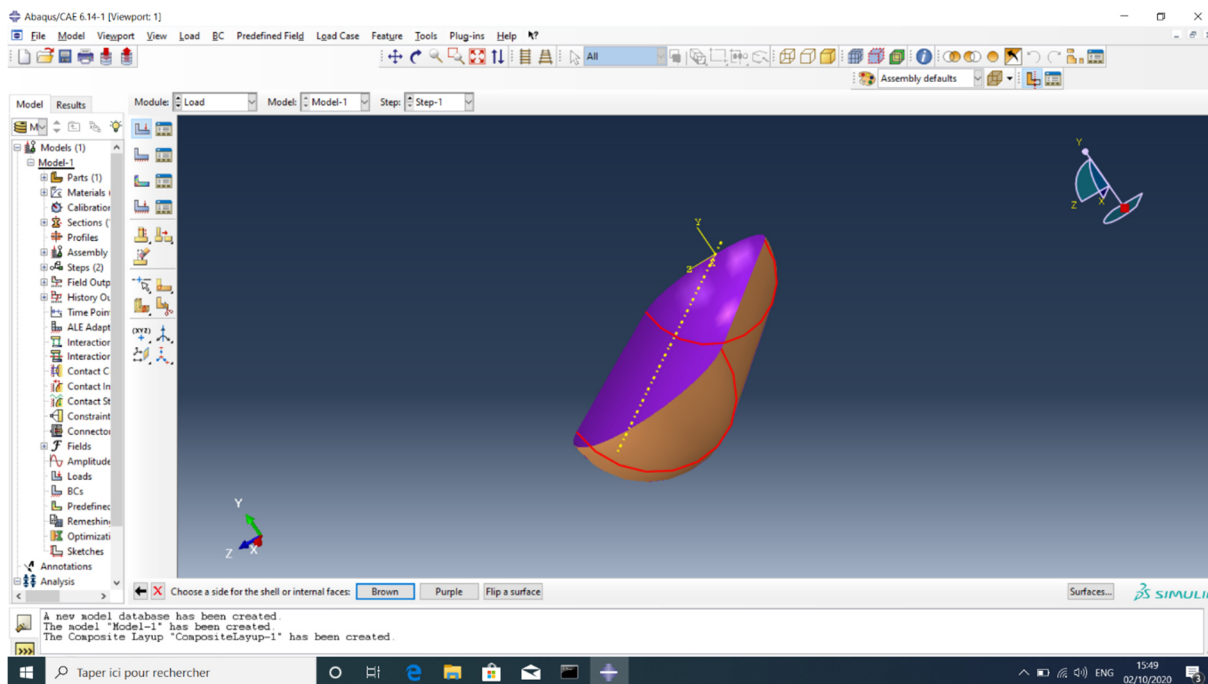


Figure III-26 : Sélection de la surface sur laquelle la charge de pression sera appliquée

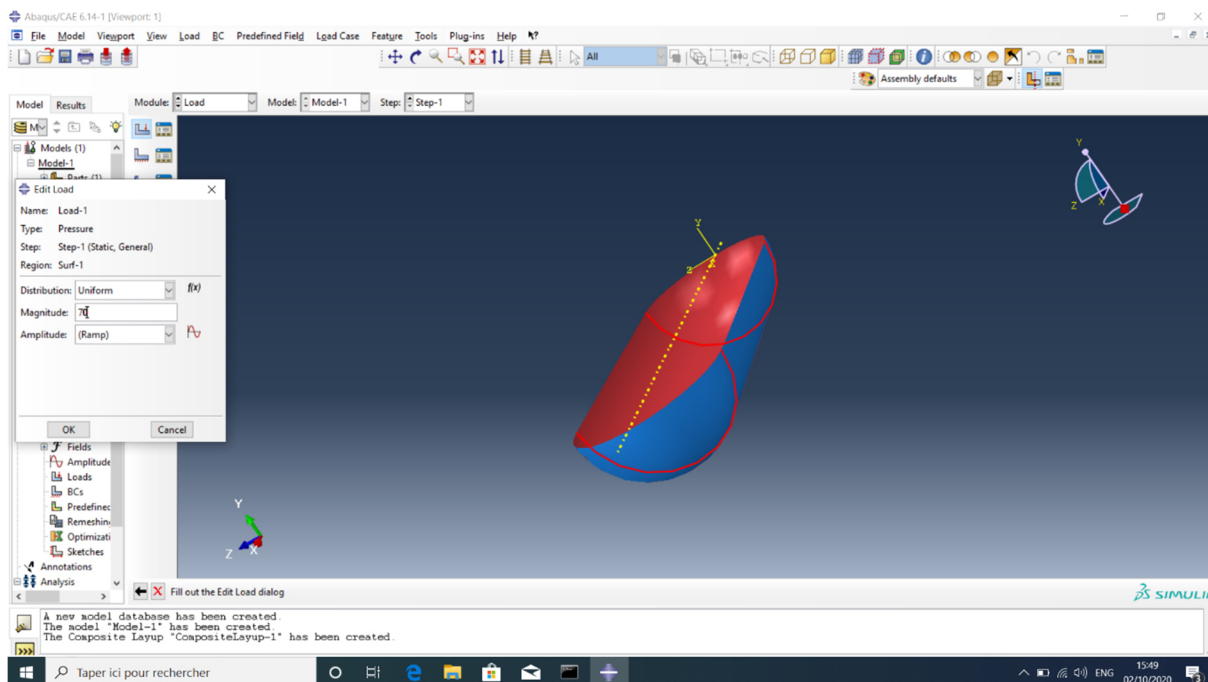


Figure III-27 : Affectation de la valeur de pression

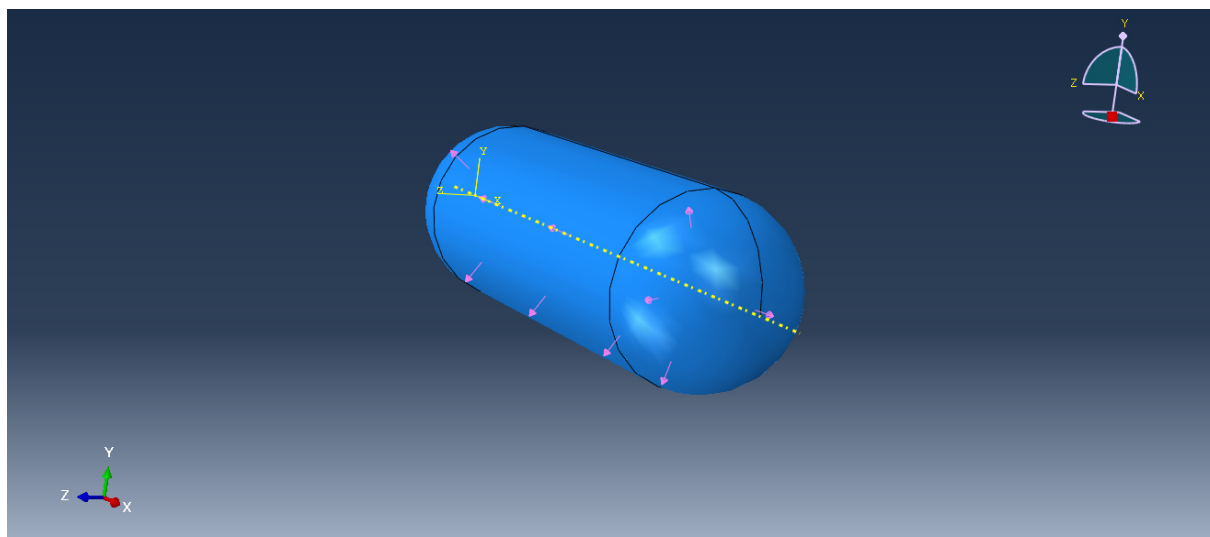


Figure III-28 : Charge appliquée

9. Le maillage

Cette opération sera faite sur le module «mesh » dans logiciel ABAQUS. Les figures III-29 et III-30 expliquent les étapes suivies pour le maillage du réservoir. Pour la visualisation du maillage, on clique sur « mesh part » puis sur « yes » tel qu’il est montré par la figure III-31.

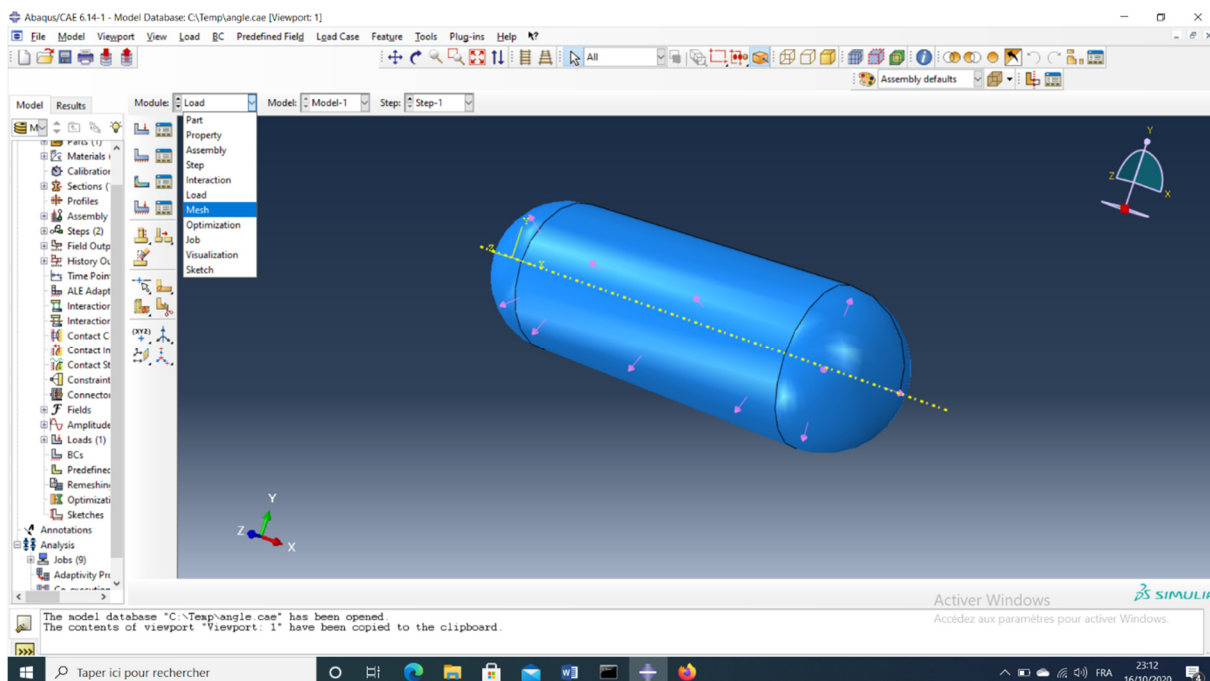


Figure III-29 : Le module « mesh »

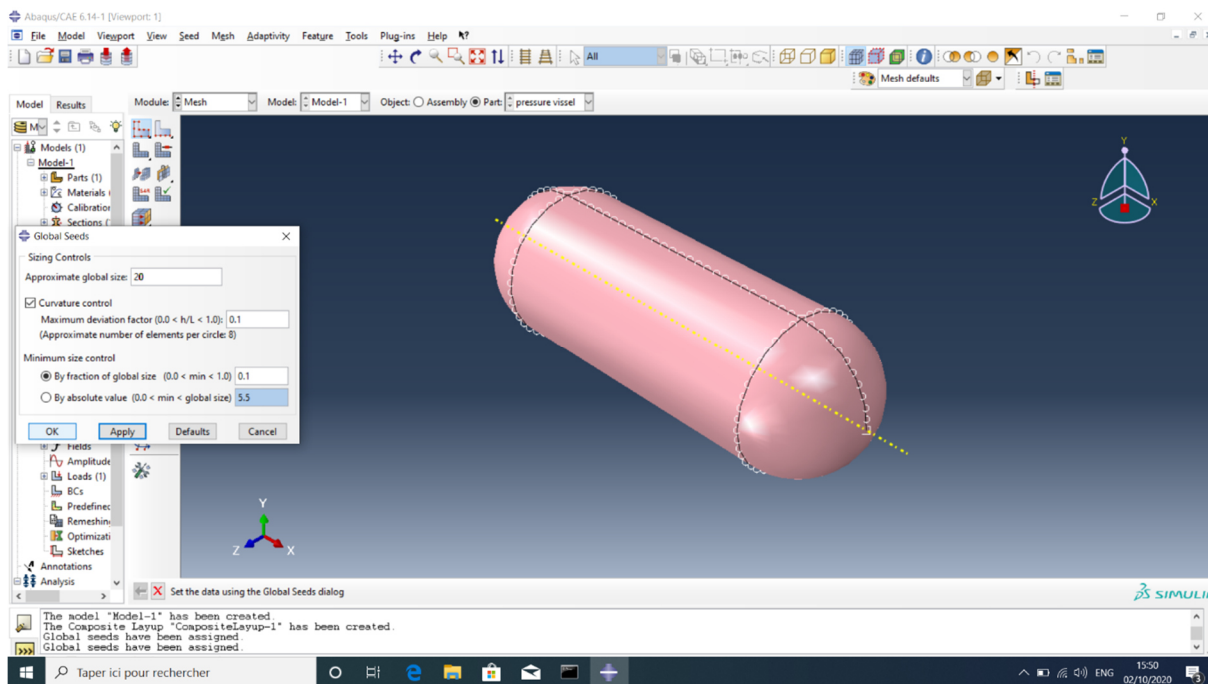


Figure III-30 : Détermination du nombre d'éléments

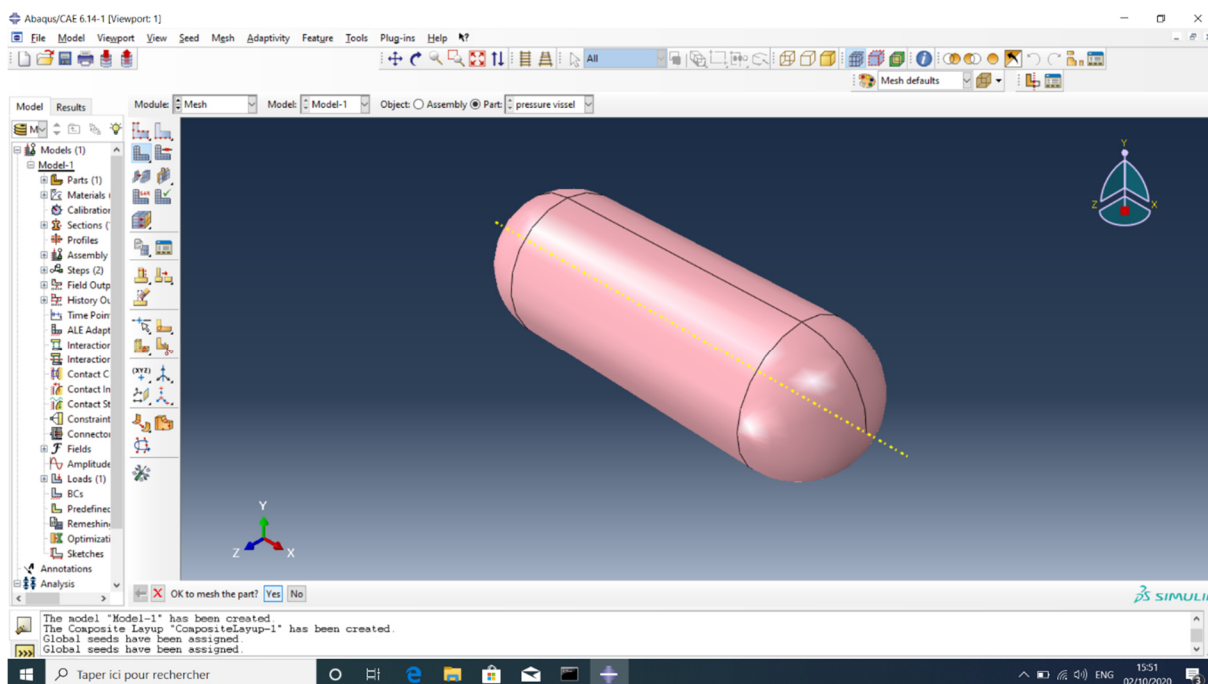


Figure III-31 : Visualisation du maillage

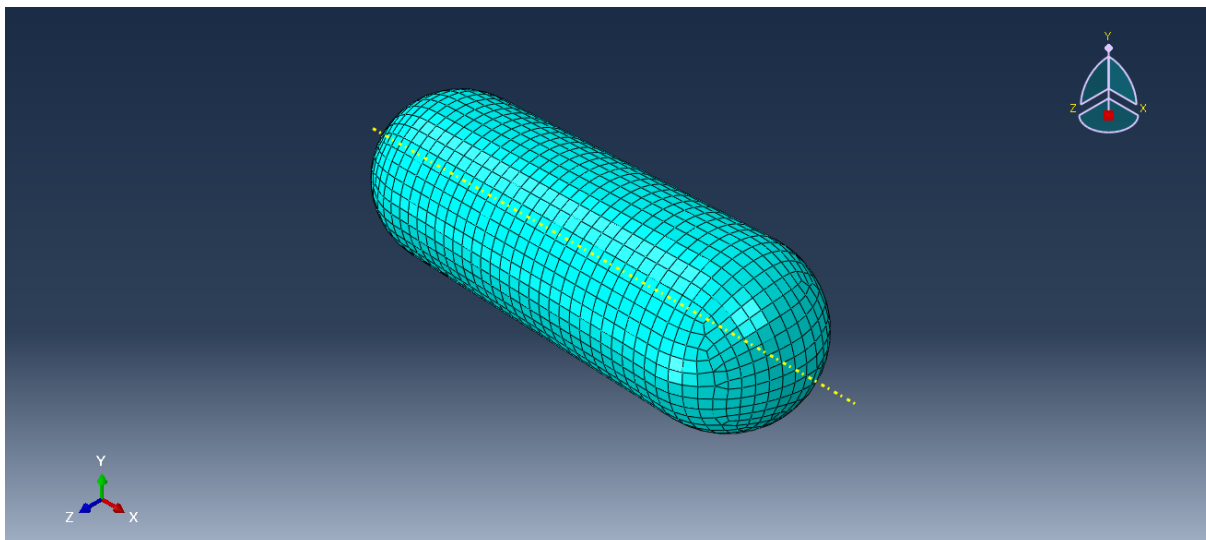


Figure III-32 : Maillage final

10. Le module « Job »

Le module Job vous permet de créer un job, de le soumettre pour analyse et de suivre sa progression. Si vous le souhaitez, vous pouvez créer plusieurs modèles et travaux et exécuter et surveiller les travaux simultanément.

Les figures III-33, III-34, III-35 et III-36 expliquent les étapes suivies dans le module « Job ».

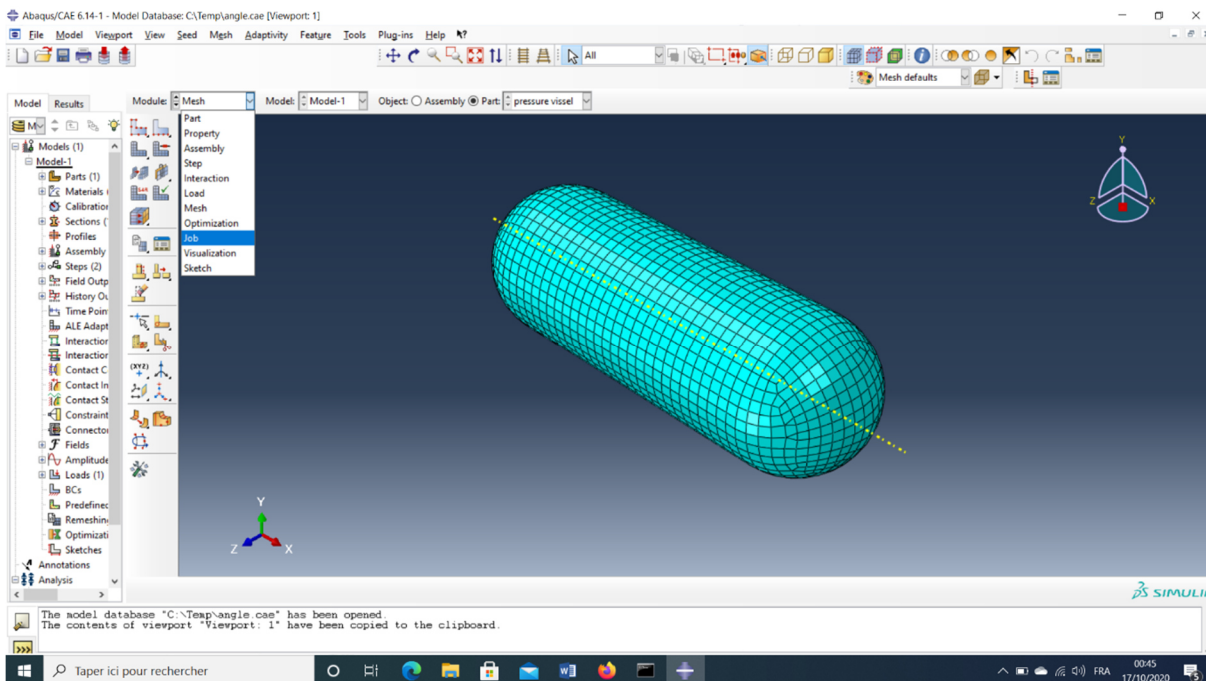


Figure III-33 : Le module « Job »

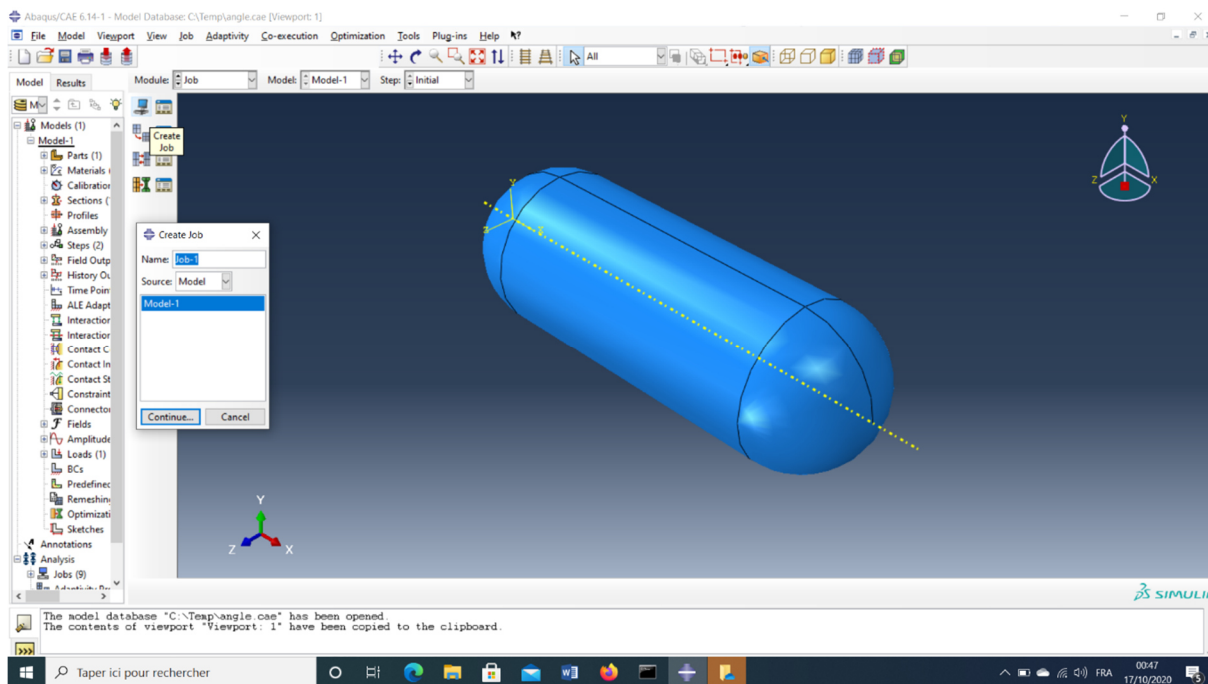


Figure III-34 : La création de job

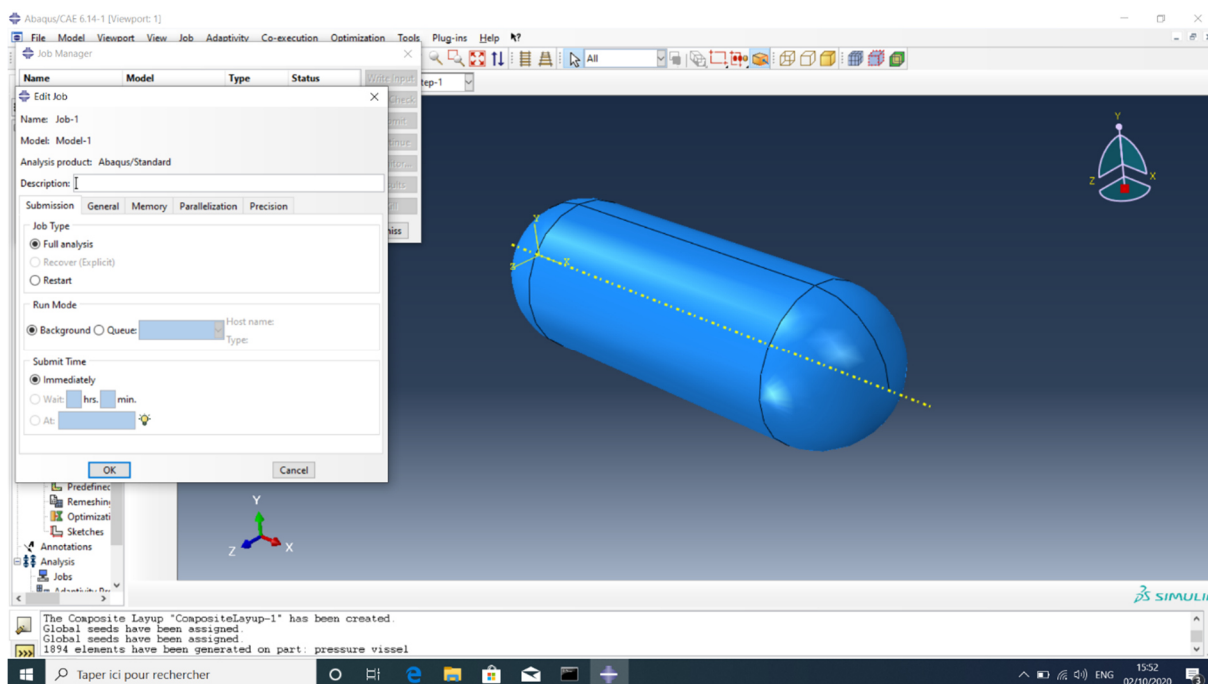


Figure III-35 : Modification

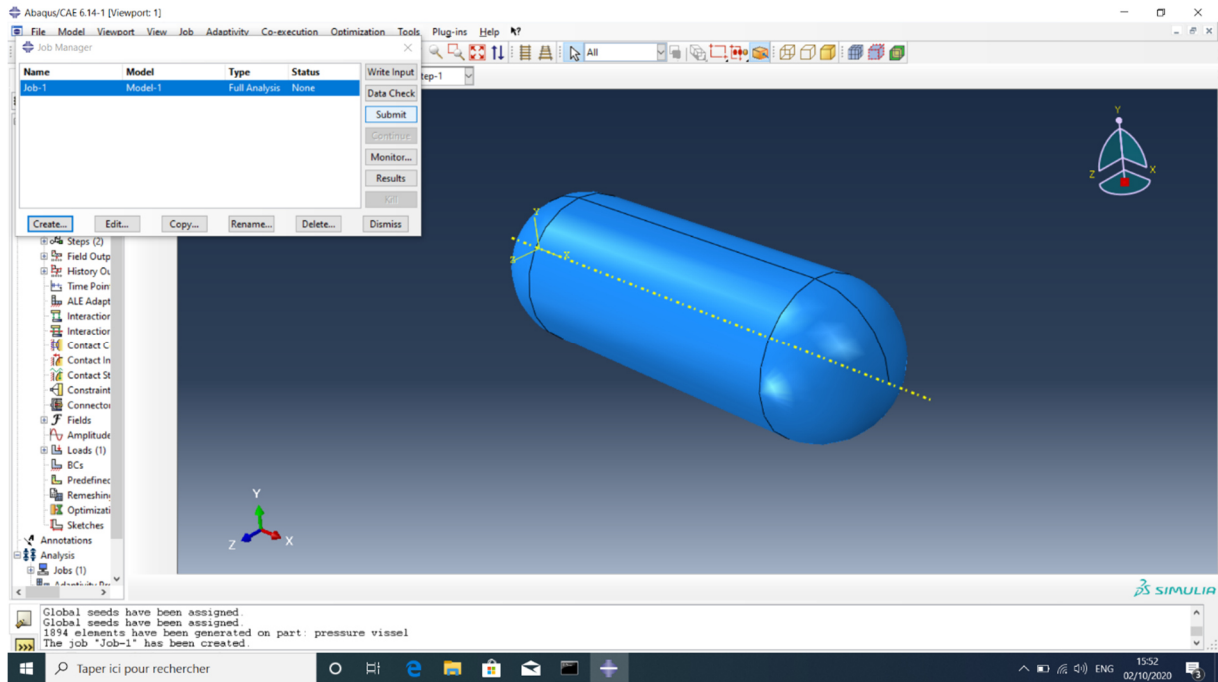


Figure III-36 : Job créé

11. Visualisation des résultats

Après avoir complété l'analyse sur le module « Job », on clique sur « Result » pour pouvoir consulter les résultats de calcul. Le module « visualization » montre l'affichage des résultats.

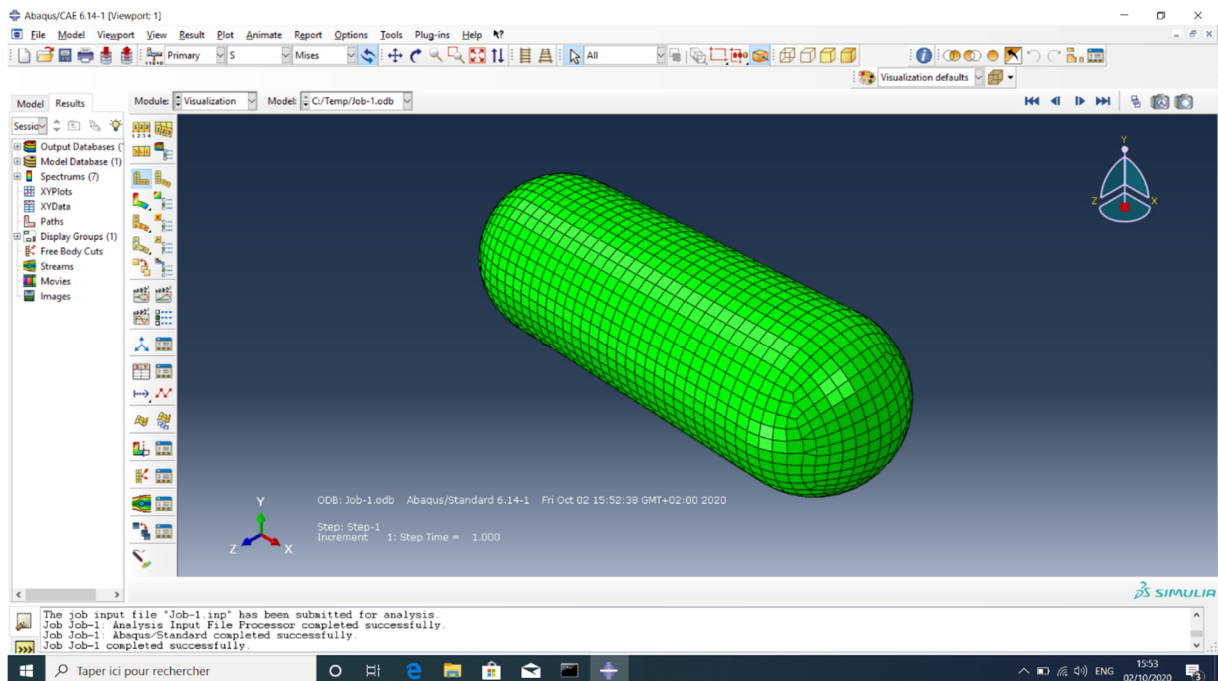


Figure III-37 : Le module « visualization »

12. Modélisation et simulation du design

12.1 Déformation du réservoir en fonction de la contrainte appliquée

La **figure III-38** représente la variation de la déformation au niveau du réservoir en fonction de la contrainte appliquée. En effet, la déformation augmente avec l'augmentation de la contrainte. Par conséquent, la déformation maximale est de 0.016 à une contrainte de 2200 MP.

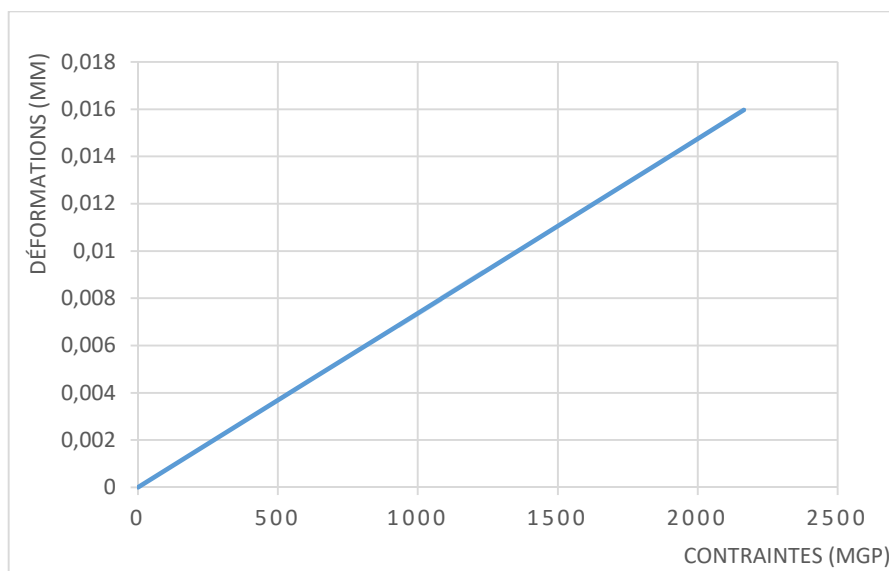


Figure III-38 : Variation de la déformation en fonction de la contrainte

12.2 Influence de la pression

En variant la pression de 40 MP à 140 MP, on obtient les graphes des **figures III-39** et **III-40** qui montrent l'influence de la pression interne sur la déformation et le déplacement radial du réservoir, respectivement. Selon la **figure III-39**, L'effet de la pression du gaz dans le réservoir sur la déformation de ce dernier se fait d'une façon linéaire ; c.à.d. la déformation est proportionnelle à la pression. Cependant, on constate une légère non-linéarité concernant l'effet de cette pression sur le déplacement radial (voir **figure III-40**).

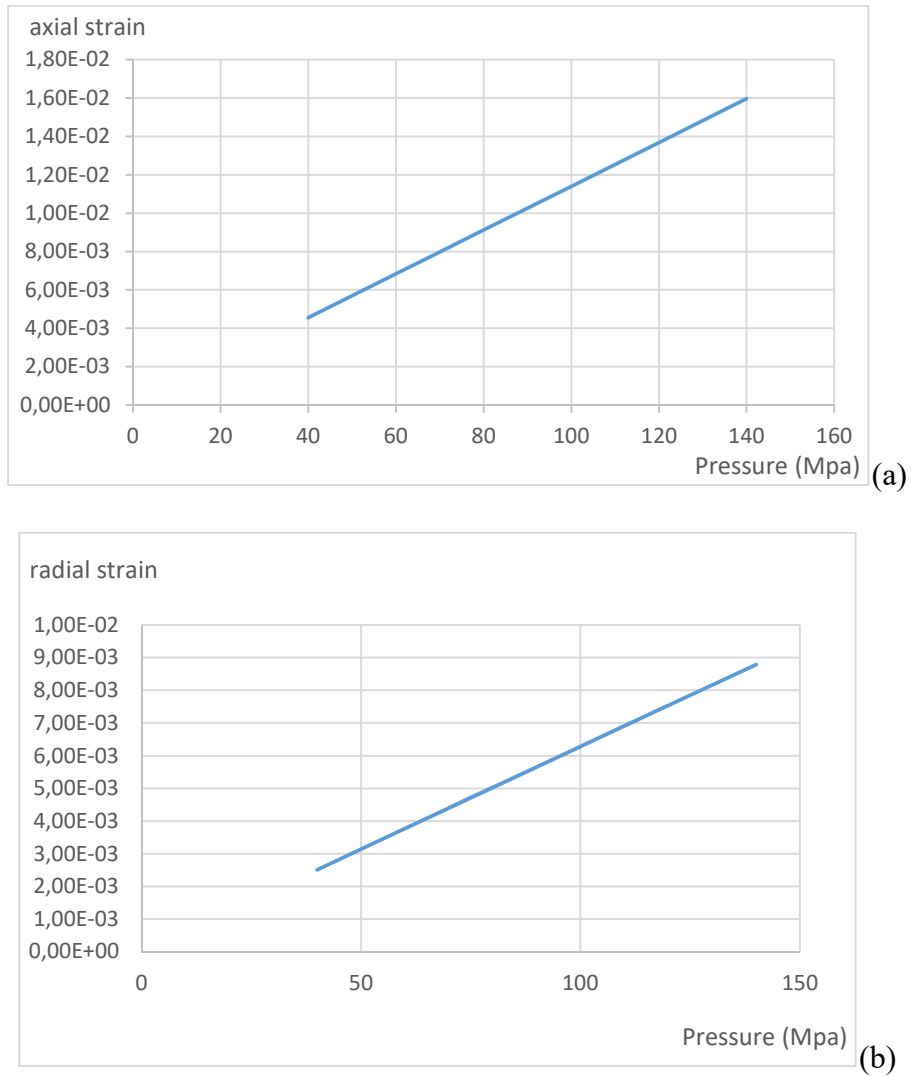


Figure III-39 : Influence de la pression sur la déformation :(a) déformation axiale
(b) déformation radiale

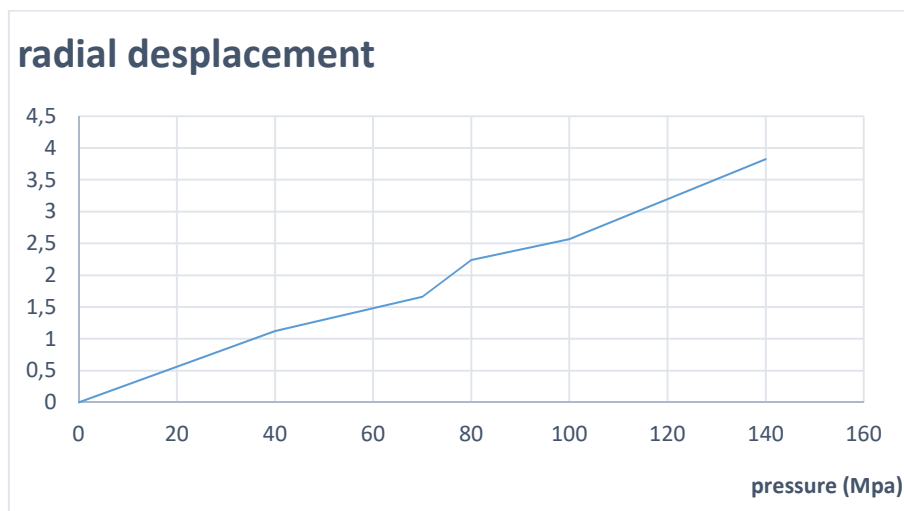


Figure III-40 : Influence de la pression sur le déplacement radial

12.3 Influence des orientations des plis

- Scénario N° 01

Les angles d'orientation des fibres et leurs épaisseurs, pour le premier scénario, sont représentés dans le tableau III-2.

Tableau III-2 : différents angles d'orientation des fibres pour le premier scénario

N° de la couche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Epaisseur (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Angle	90	45	-45	30	-30	60	-60	45	-45	30	-30	60	-60
N° de la couche	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Epaisseur (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
Angle	45	-45	30	-30	60	-60	45	-45	30	-30	60	90	

La figure III-41 représente les angles d'orientation des fibres dans les couches de stratifié.

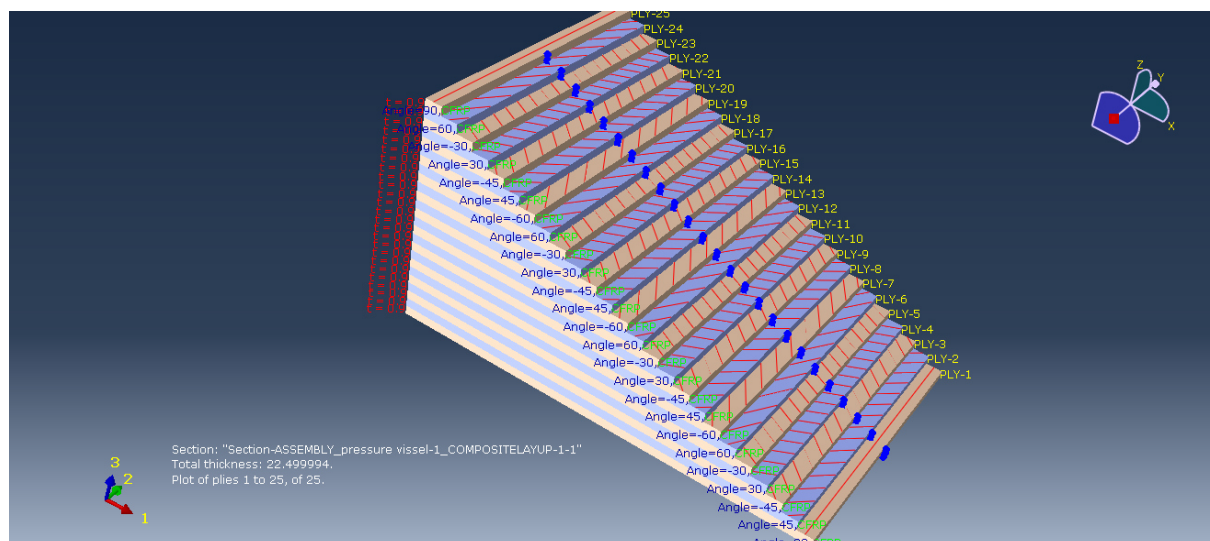


Figure III-41 : Les couches de composite

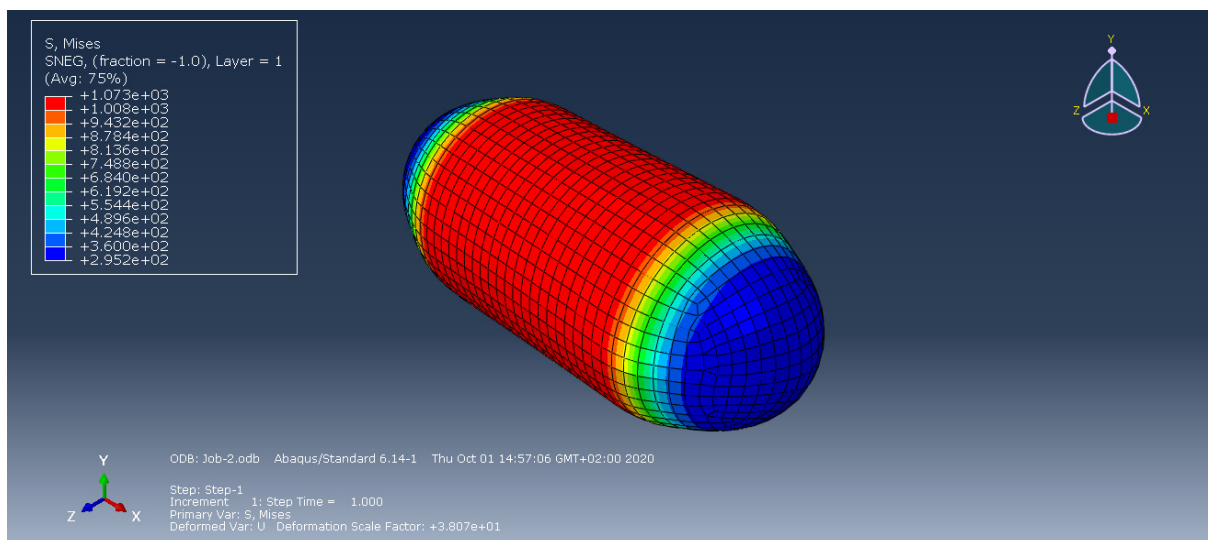


Figure III-42 : Contraintes de Von mises

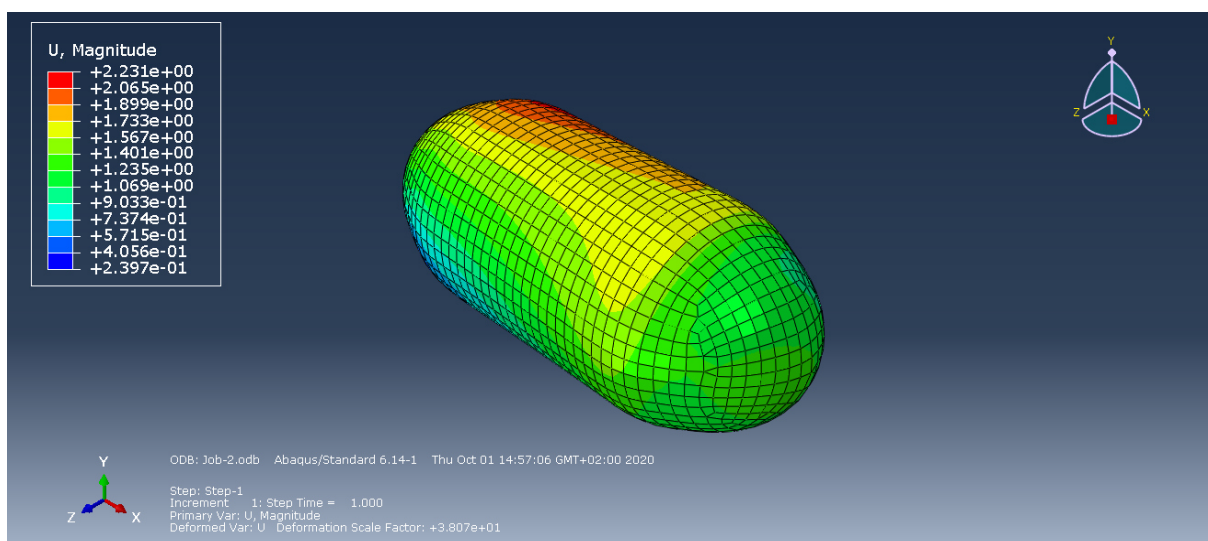


Figure III-43 : Déplacement (mm)

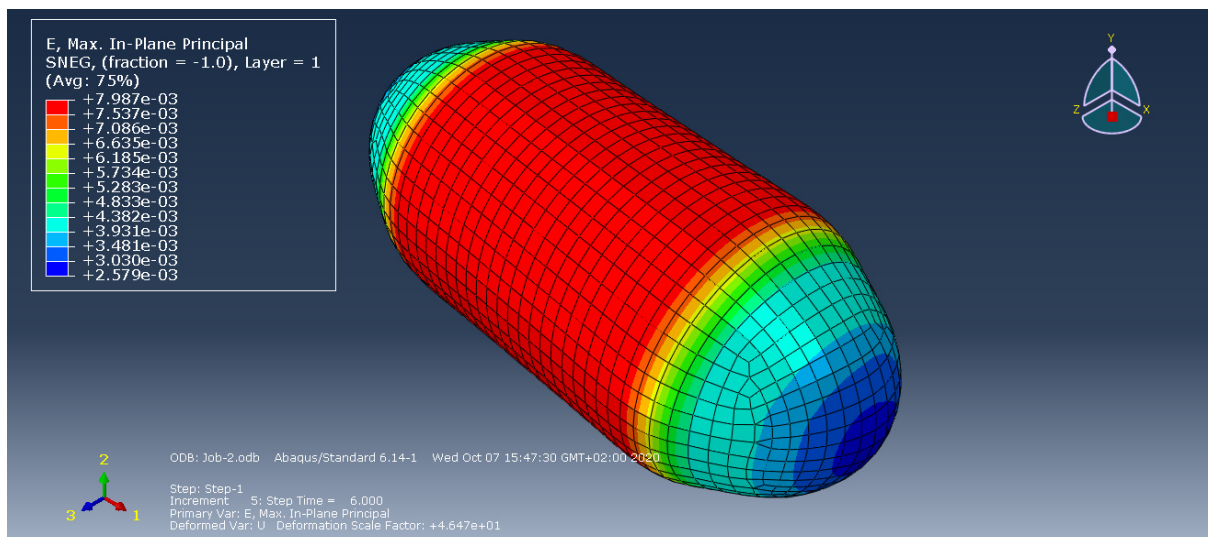


Figure III-44 : Déformation

- **Scénario N° 02**

Les angles d’orientation des fibres et leurs épaisseurs, pour le premier scénario, sont représentés dans le tableau III-3.

Tableau III-3 : différents angles d’orientation des fibres pour le deuxième scénario

N° de la couche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Epaisseur (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Angle	90	30	-30	30	-30	30	-30	30	-30	30	-30	30	-30
N° de la couche	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Epaisseur (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
Angle	30	-30	30	-30	30	-30	30	-30	30	-30	30	90	

La figure III-45 représente les angles d’orientation des fibres dans les couches de stratifié.

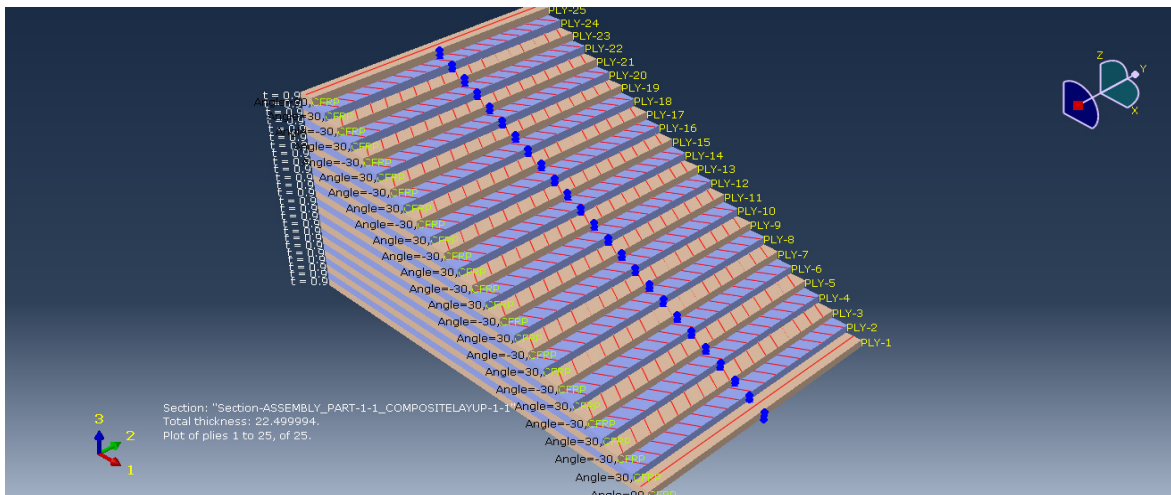


Figure III-45 : Les couches de composite

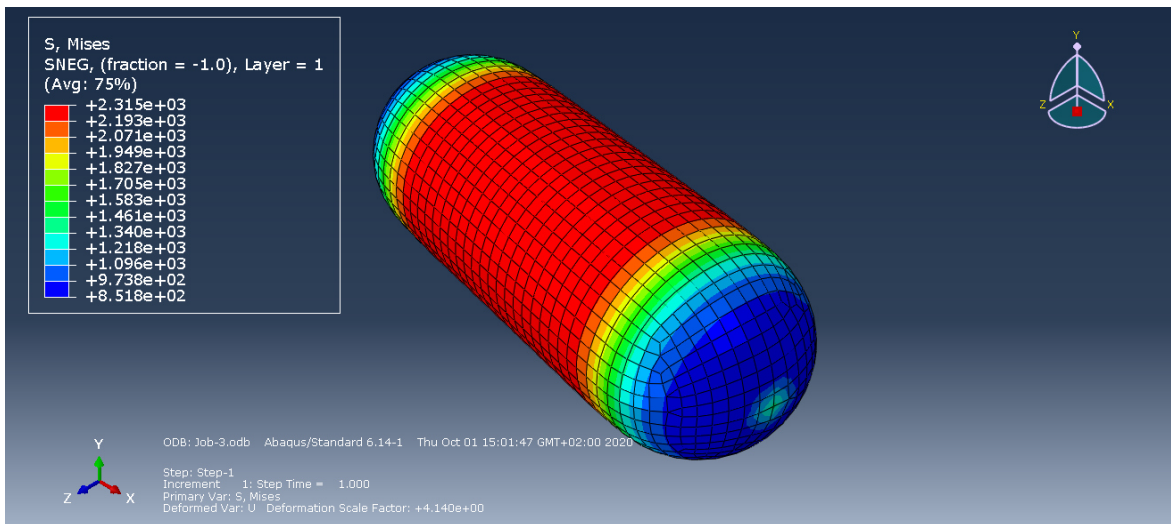


Figure III-46 : Contraintes de Von mises

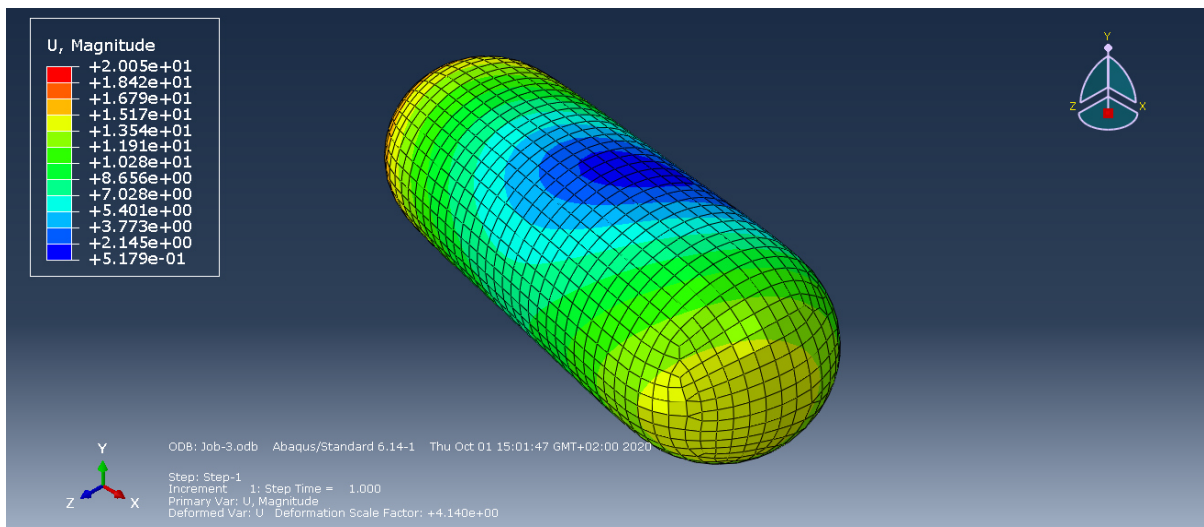


Figure III-47 : Déplacement (mm)

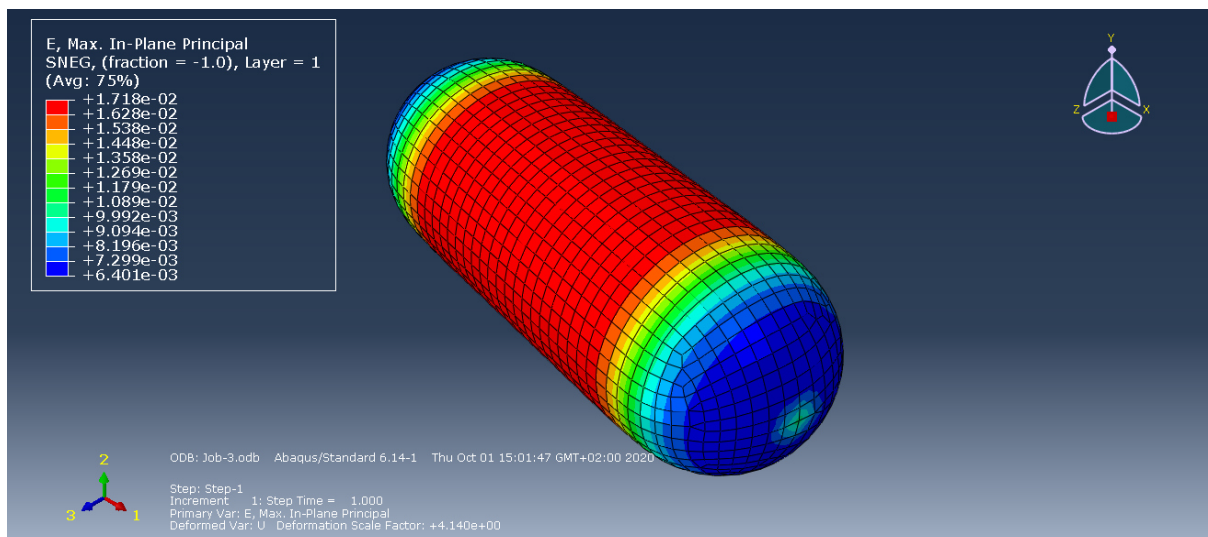


Figure III-48 : Déformation

- **Scénario N° 03**

Les angles d’orientation des fibres et leurs épaisseurs, pour le premier scénario, sont représentés dans le tableau III-4.

Tableau III-3 : différents angles d’orientation des fibres pour le troisième scénario

N° de la couche	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Epaisseur (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Angle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N° de la couche	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Epaisseur (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
Angle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

La figure III-49 représente les angles d’orientation des fibres dans les couches de stratifié.

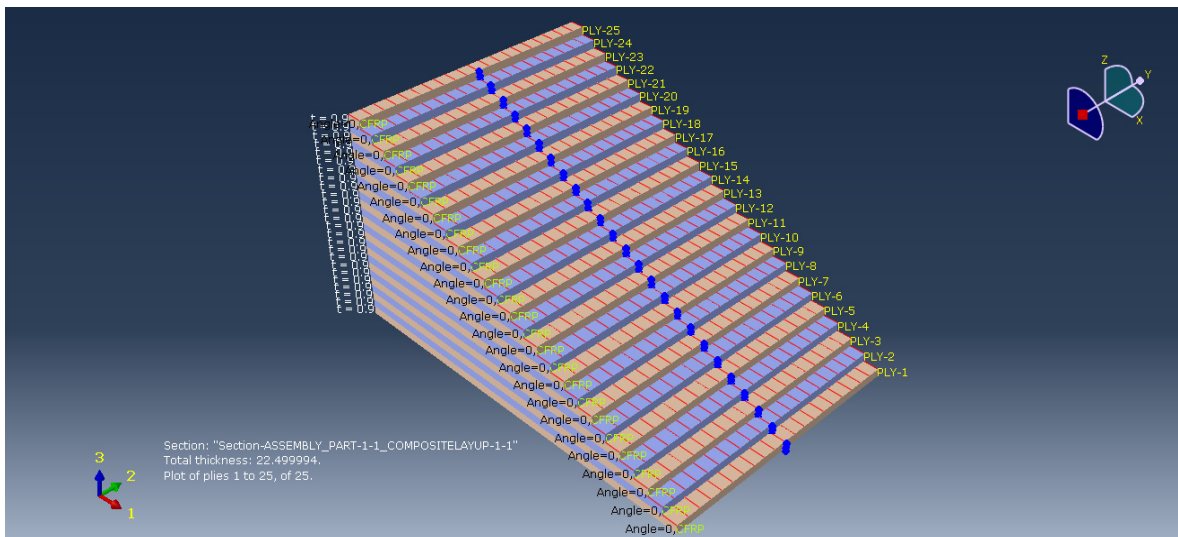


Figure III-49 : Les couches de composite

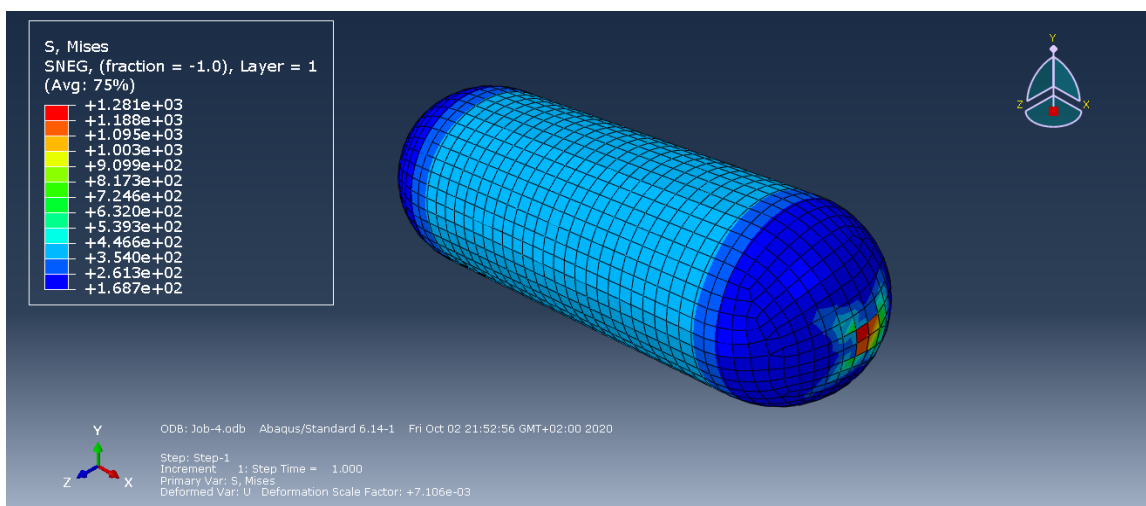


Figure III-50 : Contraintes de Von mises

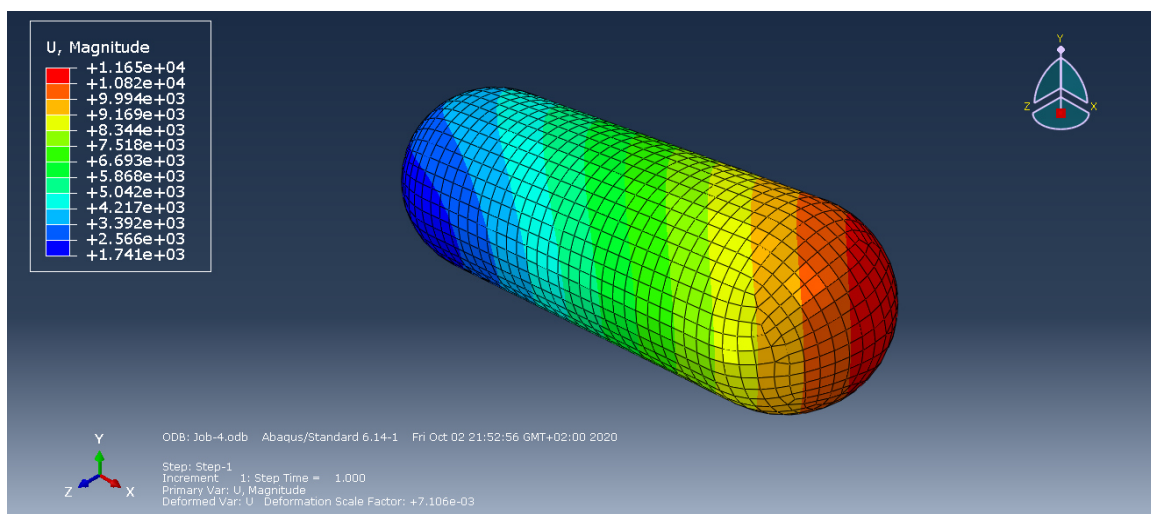


Figure III-51 : Déplacement (mm)

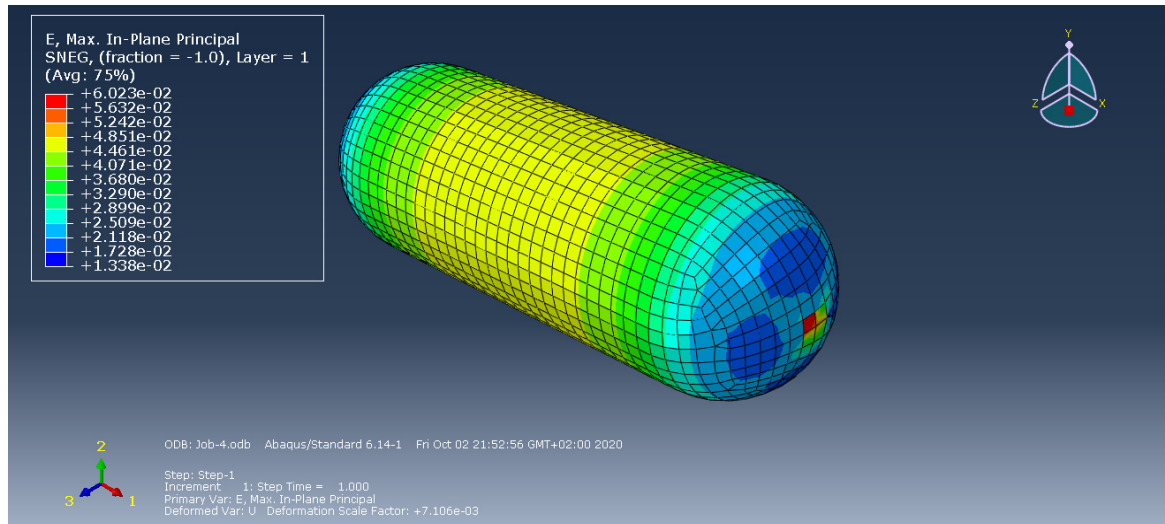


Figure III-52 : Déformation

- **Conclusion**

Les résultats de ces simulations sont différents, donc dans ce cas-là, le changement de l'orientation des fibres a influencé sur les résultats.

Il faut choisir la meilleure séquence d'empilement par rapport à la contrainte maximale.

12.4 L'Influence de l'épaisseur

Dans cette opération on va choisir l'orientation des plis N°1 et on va varier l'épaisseur des couches de composite.

Le graph de la figure **III-53** représente l'influence de l'épaisseur de la paroi du réservoir sur les contraintes axiales et radiales appliquées sur ce dernier. L'épaisseur est variée de 19.5 mm à 29.5 mm. Les valeurs maximales des contraintes axiales et radiales sont respectivement 1393 MP et 49.88 MP. On constate que la contrainte diminue avec l'augmentation de l'épaisseur. Evidemment, quand on augmente l'épaisseur de la paroi, sa résistance à la déformation augmente ; par conséquent, la contrainte appliquée diminue.

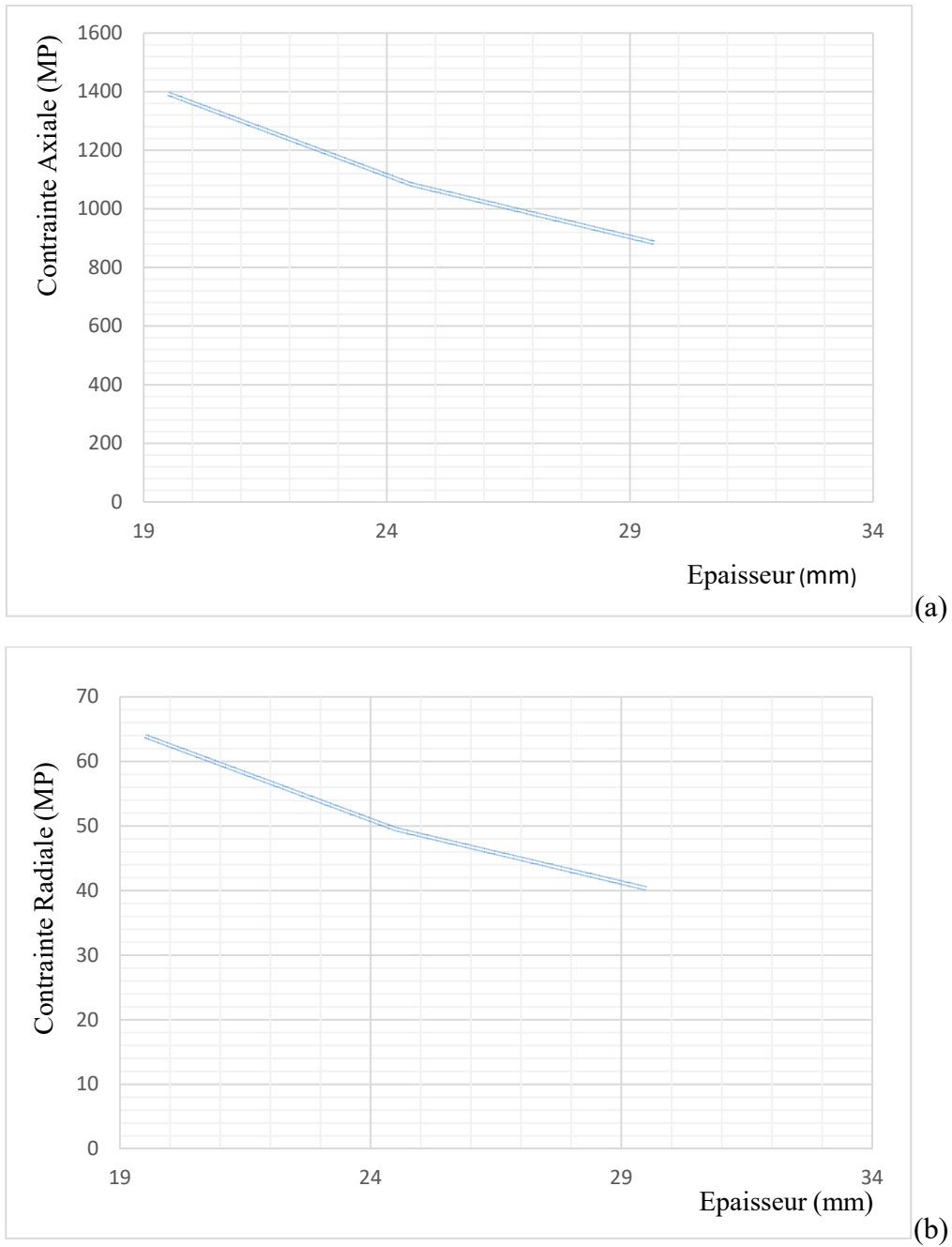


Figure III-53 : Influence de l'épaisseur sur la contrainte : (a) contraintes axiales
(b) contraintes radiales

- **Conclusion**

A partir des changements des graphes précédents on déduit que le changement d'épaisseur a aussi une influence sur les résultats de la simulation de réservoir, De sorte que plus l'épaisseur est grande, les contraintes diminuent.

Conclusion générale et Perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire a permis d'étudier le comportement mécanique d'un réservoir cylindrique de stockage d'hydrogène de type III en se basant sur la méthode des éléments finis. Le réservoir est constitué d'une enveloppe métallique (liner) renforcée par un enroulement composite.

L'objet de cette étude était de simuler la réponse mécanique de la structure de stockage à un chargement quasi statique. Le logiciel ABAQUS est utilisé pour simuler ces résultats de la réponse mécanique. Les effets des séquences d'empilements, des évolutions des angles et des épaisseurs d'enroulements ont été étudiés.

- L'angle d'enroulement influe directement sur le comportement mécanique du réservoir.
- Les propriétés mécaniques du matériau composite jouent un rôle très important sur l'endommagement de l'enveloppe composite du réservoir.
- Les angles d'orientation des fibres et leurs épaisseurs influent directement sur le comportement mécanique du réservoir.

Le sujet de ce travail est un domaine très large et reste ouvert à d'autres contributions et perspectives à partir desquelles nous proposons :

- Une étude analytique permis de développer un modèle mathématique pour la modélisation du réservoir sous pression.
- Optimisation du design de réservoir en fonction du coût et de la sollicitation.
- Refaire la même étude de ce mémoire pour un réservoir de type IV.

Références bibliographiques

- [1] M. Z. Kabir. Finite element analysis of composite pressure vessels with a load sharing metallic liner. *Composite Structures* 49 (2000) 247-255.
- [2] P. Xu, J.Y. Zheng, P.F. Liu. Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels. *Materials and Design* 30 (2009) 2295–2301.
- [3] J. Marzbanrad, A. Paykani, A. Afkar, M. Ghajar. Finite element analysis of composite high-pressure hydrogen storage vessels. *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (1) (2013) 63-74
- [4] H.S. Roh, T.Q. Hua, R.K. Ahluwalia. Optimization of carbon fiber usage in Type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles. *International journal of hydrogen energy* 38 (2013) 12795-12802.
- [5] T. S Atul, S. S Bhat, S. S Chavan, S. B Kamble, A. P Kulkarni, S. B Sangale. Finite Element Analysis of Composite Overwrapped Pressure Vessel for Hydrogen Storage. *Int. Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, Sept. 21-24, 2016, Jaipur, India.
- [6] M. Bouvier, V. Guiheneuf, A. Jean-marie. Modeling and simulation of a composite high-pressure vessel made of sustainable and renewable alternative fibers. *International journal of hydrogen energy* 44 (2019) 11970-11978.
- [7] Planète énergies : L'hydrogène un vecteur d'énergie, 2 Octobre 2014.
- [8] E-monsite : l'hydrogène en quelques dates.
- [9] JEAN-BENOIT DENIS. Étude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène dans le système Ti-V-Fe. Le 22 septembre 2016.
- [10] CEA, l'énergie renouvelable. L'essentiel sur l'hydrogène. 10Janvier 2019.
- [11] L'hydrogène. Encyclopédie de l'énergie.
- [12] Air liquide énergies médiathèque, planète hydrogène. Comment stocker l'hydrogene ?
- [13] Schulz, UND, Wachtendorf, V., Klimmasch, TAlers, P., *Prog. Org. Coatings* 2001, 42, 38–48.
- [14] McPhy Energy, Stockage D'hydrogène Solide, 2010.

- [15] Applications de l'H₂ – H₂life.
- [16] Tout savoir sur l'hydrogène. IFPEN - IFP Energies nouvelles.
- [17] Le fonctionnement d'une voiture à hydrogène.H₂ mobile.
- [18] Baramée Patamaprohm. Conception et durabilité de réservoirs en composites destinés au stockage l'hydrogène. L'École nationale supérieure des mines de Paris, le 21 février 2014.
- [19] Michael Hirscher. Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage. WILEY-VCH, Germany, 2010.
- [20] Généralité sur les matériaux composites, UNIV Biskra, DJEBLOUN Youcef.
- [21] F. Baala, N. Ouhnane. Matériaux composites ; université d'Oran Mouhamed Boudiaf 2016/2017.
- [22] D.HALM, B. Magneville, J. Renard. Optimisation de réservoirs en composite de stockage hyperbare de l'hydrogène. Bilan de projet Osirhys.
- [23] De Miguel N, Acosta B, Baraldi D, Melido R, Ortiz Cebolla R, Moretto P. The role of initial tank temperature on refuelling of on-board hydrogen tanks. *Int J Hydrogen Energy* 2016; 41: 8606e15.
- [24] Aluminum 6061-T6 –ASM Material Data Sheet-MatWeb.
- [25] Peter Beaumont C. Soutis Alma Hodzic Structural Integrity and Durability of Advanced Composites 1st Edition Innovative Modelling Methods and Intelligent Design. 20 Mai 2015.
- [26] Vladimir Molkov, Mohammad Dadashzadeh, Dmitriy Makarov. Physical model of onboard hydrogen storage tank thermal behaviour during fueling. *International journal of hydrogen energy* 44 (2019).

