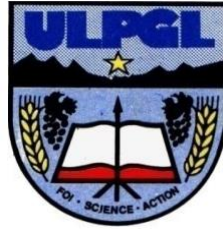


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP 368 GOMA

**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES**

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

OPTION : Structures et Ouvrages d'Arts

**CONCEPTION ET ANALYSE STRUCTURALE
D'UNE TOITURE EN VOUTE AUTOPORTANTE
EN BA : CAS D'UN BATIMENT UNIVERSITAIRE**

Mémoire Présenté et défendu par **SIFA
BISIMWA Bernadette** en vue de l'obtention du
diplôme d'ingénieur civil ;

Directeur : Professeur DIOUTA NGAMY

Encadreur : Ass. Ir. Sem BISIMWA

Année académique : 2015-2016

EPIGRAPHE

« Vous pouvez croire qu'une chose est possible ou qu'elle ne l'est pas, vous avez raison dans les deux cas parce que la façon dont vous interprétez la réalité est votre réalité. »

Carlos DEVIS

DEDICACE

A notre chère mère, Madame MASIKA Henriette.

SIFA BISIMWA Bernadette

REMERCIEMENTS

Par l'occasion qui se présente nous tenons à remercier sincèrement :

DIEU le père créateur de toute chose visible et invisible ;

Le professeur **DIOUTA NGAMY** d'avoir dirigé correctement l'élaboration de ce projet de fin de second cycle.

L'assistant, Ingénieur **Sem BISIMWA** pour l'encadrement de qualité meilleure que nous avons bénéficié auprès de lui.

Tout le corps académique de l'Université Libre des Pays de Grand-Lacs, qui ont su nous inculquer les prérequis nécessaires à la réalisation de ce projet.

Notre père, **BISIMWA Sébastien** de nous avoir donné la vie et l'opportunité de voir de près à quoi ressemble la face de la terre.

Notre mère, **MASIKA Henriette** d'avoir consacré chaque minute de sa vie à lutter pour notre cause, notre grand-mère **KAHAMBU Marie-Joséphine** de s'être très bien occupé de nous.

Toute personne, qui a apporté directement ou indirectement sa contribution à la réussite de ce travail.

Trouvez ici, Mesdames et Messieurs, l'expression de nos profondes gratitude.

SIFA BISIMWA Bernadette

AVANT-PROPOS

L'homme dans sa nature est doté d'une intelligence particulière, d'une capacité de réflexion élevée et d'un pouvoir de transformer tout ce qui est à sa disposition, c'est pourquoi du jour le jour le monde évolue et change.

Grace à son esprit ingénieux, l'ingénieur civil est de ce fait appelé à créer et à réfléchir au-delà des limites fixées par la société. Le développement de cette société est autant remarquable que le nombre des gens qui réfléchissent plus est important.

On en déduit que son rôle est de s'assurer que tout ce qu'il a créé et conçu est capable de résister aux charges et sollicitations auxquelles il est soumis. En plus de l'aspect esthétique, il effectue des calculs bien soignés pour éviter tout dégât dû à une erreur éventuelle.

L'ULPGL est parmi les institutions congolaises qui consacrent une bonne partie de leurs ressources à former des ingénieurs dont le métier est de continuer l'œuvre de la création. Elle a le souci d'offrir à ses étudiants des meilleures formations dans des conditions favorables.

De bons professeurs venant du pays ou d'ailleurs sont invités chaque année pour donner des cours dans le domaine d'ingénierie. Les six années passées dans cette université ont été très bénéfiques si bien que ce travail se présente comme un fruit de ce long et agréable parcours.

Etant limitée en espace, l'ULPGL ne pourra pas être à mesure d'accueillir tous les étudiants du Nord-Kivu désireux de suivre des formations techniques, la construction d'une université technique s'avère donc nécessaire pour satisfaire le besoin de la population.

RESUME

Ce travail de fin du second cycle est abordé sous forme d'un avant-projet susceptible d'être exécuté dans la ville de Goma.

La conception a été réalisée dans un esprit innovant, tout en se conformant aux normes relatives à l'architecture universitaire. La disponibilité, le coût et la résistance du Béton Armé sont les qualités qui ont favorisé le choix de ce matériau. Les actions appliquées à l'ensemble de l'ouvrage sont conformes aux normes de BAEL et Eurocode2. Elles sont classées en deux groupes : les charges permanentes et les charges d'exploitation, et combinées à l'ELU et l'ELS. Le dimensionnement s'est focalisé sur l'analyse statique de la coque mince en tant que toiture permettant de couvrir des bâtiments de très grande portée sans appuis intermédiaires avec économie en matériau. La MEF qui est une méthode Numérique utilisée dans le logiciel RSAP a permis de déterminer les inconnues hyperstatiques dont notamment : les efforts intérieurs, les déplacements et les contraintes.

Mots clés : Conception, dimensionnement, toiture, coque, voûte autoportante, béton armé.

ABSTRAT

This study is a draft of a project that is susceptible to be implemented in Goma. The design was achieved in an innovative context, while in agreement with design codes related to university buildings. Materials cost, availability and resistance are the factors that pushed us decide to build the structure in reinforced concrete. Loads on the structure are in conformity with the BAEL 91 and Eurocode2 design codes. These loads are divided into dead loads and live loads. They are combined at both the serviceability limit state and the ultimate limit state. The structural design focussed on the static analysis of the shell so that it achieves its intended resistance while remaining economical advantages. The numerical methods used in the RSAP softwar enabled us find statical indeterminacy for the strucure : internal forces, displacements and stress.

Key words : design, structural analysis, roof, shell structure, autostable vault, reinforced concrete.

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 Élément structural mince	4
Figure I. 2 Courbe v , de courbure normale $1/rn$ au point A, section normale de la surface Σ par le plan P.....	5
Figure I. 3 Ossature en treillis 3-D du prototype du planétarium, 1922	6
Figure I. 4 Voûte cylindrique en berceau	7
Figure I. 5 Hangar pour dirigeable, Voûte en arc.....	7
Figure I. 6 Parois, exemple type.....	8
Figure I. 7 Toitures en structure plissée	8
Figure I. 8 Polyvoûte $K=0$	9
Figure I. 9 hyperboloïde à une nappe	9
Figure I. 10 Réservoir sphérique, $K > 0$	9
Figure I. 11 Station-service de Deitingen.....	10
Figure I. 12 Instabilité d'une coque cylindrique comprimée : géométrie, charge et modes d'instabilité (en soufflet à gauche, en damier à droite)	11
Figure I. 13 directrices de voûtes autoportantes où L est la portée longitudinale et b la portée transversale.....	12
Figure I. 14 Shed autoportant à deux travées.	13
Figure I. 15 Voile mince autoportant en béton armé.....	14
Figure I. 16 Coque cylindrique en shed	14
Figure I. 17 Pente donnée à la toiture en shed pour permettre l'écoulement des eaux pluviales	15
Figure II. 1 Université de Turin, Italie	17
Figure II. 2 Flagler College – St. Augustine, Floride, États-Unis.....	18
Figure II. 3 Berry College – Mount Berry, Géorgie, États-Unis.....	19
Figure II. 4 Espace vert de l'Université de la Colombie-Britannique – Vancouver, Colombie-Britannique, Canada	19
Figure II. 5 UBO (l'Université de Bretagne Occidentale), France	20
Figure III. 1 Schéma d'installation pour enseignements supérieur et universitaire	29
Figure III. 2 Plan annoté 1 ; Echelle 1/500.....	30
Figure III. 3 Plan annoté 2 ; Echelle 1/500.....	31
Figure III. 5 Façade principale, Echelle 1/500	31
Figure III. 6 Façade latérale gauche, Echelle 1/500	32
Figure III. 7 Façade postérieure, Echelle 1/500	32
Figure III. 8 Façade Latérale droite, Echelle 1/500.....	32
Figure III. 9 Perspective	33
Figure III. 10 Coupe longitudinale, Echelle 1/500.....	33
Figure III. 11 Coupe transversale, Echelle 1/500.....	34
Figure III. 12 Vue de dessus.....	34

VIII

Figure IV. 1 Déplacement	36
Figure IV. 2 Efforts intérieurs : (a) membranaires, (b) Flexionnels	37
Figure IV. 3 Etape de l'analyse d'un problème aux limites	39
Figure IV. 4 Maillage du domaine en triangles à trois nœuds	39
Figure IV. 5 le mode opératoire standard dans le logiciel.....	40
Figure IV. 6 Modélisation	42
Figure IV. 7 Modélisation de la toiture	46
Figure IV. 8 Maillage de la coque	46
Figure IV. 9 Moment suivant la direction x	47
Figure IV. 10 Moment suivant la direction y	48
Figure IV. 11 Moment de torsion.....	49
Figure IV. 12 Effort membranaire suivant x	50
Figure IV. 13 Effort membranaire suivant y	50
Figure IV. 14 Effort membranaire résultant	51
Figure IV. 15 Efforts tranchants suivant l'axe x.	52
Figure IV. 16 Efforts tranchants suivant l'axe y	52
Figure IV. 17 Déplacement suivant l'axe x.....	53
Figure IV. 18 Déplacement suivant l'axe y.....	53
Figure IV. 19 Déplacement suivant l'axe Z	54
Figure IV. 20 Contraintes suivant la directrice	55
Figure IV. 21 Contraintes suivant la génératrice.....	55
Figure IV. 22 Contraintes tangentielles.....	56
Figure IV. 23 Modèle de ferrailage de la coque.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV. 1 Matériaux utilisés	41
Tableau IV. 2 Tableau récapitulatif des charges appliquées à la structure	44
Tableau IV. 3 Combinaison d'actions	45
Tableau IV. 4 Description de la structure.....	45
Tableau IV. 5 Moment maximal suivant x, c'est le moment fléchissant	47
Tableau IV. 6 Moment maximal suivant y : c'est le moment fléchissant	48
Tableau IV. 7 Moment de torsion	49
Tableau IV. 8 valeurs maximales des efforts membranaires.....	51
Tableau IV. 9 valeurs max des déplacements	54
Tableau IV. 10 Valeurs max des contraintes.....	56
Tableau IV. 11 Paramètres des coques BA - ferrailage théorique	57
Tableau IV. 12 Section théorique des armatures.....	57
Tableau IV. 13 Coût de la toiture en coque.....	58

SIGLES ET ABREVIATIONS

BA	: Béton Armé ;
BAEL	: Béton Armé aux Etats Limites ;
DTU	: Document Technique Unifié ;
ELS	: Etat Limite de Service ;
ELU	: Etat Limite Ultime ;
M	: Moment fléchissant ;
MEF	: Méthode des Eléments Finis ;
N	: Effort normal ;
Q	: Effort tranchant ;
RDC	: République Démocratique du Congo ;
RSPA	: Robot Structural Analysis Professional ;
S	: Contrainte ;
U	: Déplacement ;
ULPGL	: Université Libre des Pays des Grands Lacs ;
W	: Flèche ;

TABLE DES MATIERES

EPIGRAPHE	I
DEDICACE.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
AVANT-PROPOS	IV
RESUME.....	V
ABSTRAT	VI
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
SIGLES ET ABREVIATIONS	X
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : NOTIONS GENERALES.....	4
CHAPITRE I. LES VOILES MINCES.....	4
I.1. DEFINITION ET ORIGINE.....	4
I.1.1. Définition	4
I.1.2. Origine	6
I.2. CLASSIFICATION	7
I.2.1. D’après la forme de la surface moyenne.....	7
I.2.2. D’après la courbure de gauss	8
I.3. VOILES MINCES ELEMENTS DE CONSTRUCTION	10
I.3.1. Avantages et inconvénients des voiles minces	10
I.3.2. Voûtes autoportantes.....	12
I.3.3. Exigences des coques.....	13
I.3.4. Dispositions pratiques de construction des toitures	13
CHAPITRE II. THEORIES SUR LES UNIVERSITES.....	16
II.1. CAMPUS EDUCATIF	16
II.1.1. Utopie et planification intégrée	16
II.1.2. Communauté d’apprentissage.....	17
II.1.3. Harmonie spatiale	18
II.1.4. Harmonie émotionnelle et intellectuelle	18
II.1.5. La nature et l’art	18
II.1.6. Image et accessibilité.....	19
II.1.7. Durabilité et adaptation à l’environnement	19
II.1.8. Mémoire et avant-gardisme	20
II.1.9. La relation université/ville.....	21
II.1.10. Des modalités d’enseignement et d’apprentissage innovantes	21

II.2. CLASSEMENT DES UNIVERSITES.....	22
II.2.1. Au niveau mondial.....	22
II.2.2. En Afrique	24
II.2.3. Au niveau national	24
II.3. CARACTERISTIQUE DES UNIVERSITES MODERNES	25
II.3.1. Structure.....	25
II.3.3. L'enseignement: un rôle central dans l'évolution de la société.....	26
DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT	28
CHAPITRE III. CONCEPTION	28
III.1. AMENAGEMENTS CENTRAUX.....	28
III.2. AMENAGEMENTS DE BASE	28
III.3. BESOIN EN ESPACE SPECIFIQUE POUR CHAQUE DISCIPLINE	29
III.4. LES VUES EN PLAN.....	30
III.5. LES FAÇADES ET PERSPECTIVE.....	31
III.6. LES COUPES	33
CHAPITRE IV. DIMENSIONNEMENT	35
IV.1. METHODES D'ANALYSE STRUCTURALE DES COQUES MINCES.....	35
IV.1.1. Méthodes théoriques	35
IV.1.2. Méthodes numériques	38
IV.2. PREDIMENSIONNEMENT	41
IV.2.1. Choix de matériau	41
IV.2.2. Choix de section.....	41
IV.3. CHARGEMENT DE LA STRUCTURE	42
IV.3.1. Base de calcul.....	42
IV.3.2. Evaluation des charges.....	42
IV.3.3. Combinaison des charges	45
IV.3.4. Caractéristiques de l'analyse.....	45
IV.4. PRESENTATION DES REULTATS DE L'ANALYSE STATIQUE DE LA TOITURE EN COQUE.....	46
IV.4.1. Sollicitations dans la coque	47
IV.4.2. Calcul des armatures dans la coque	57
IV.5. INTERPRETATION DES RESULTATS	58
IV.6. COUT ESTIMATIF	58
CONCLUSION.....	59
BIBLIOGRAPHIE	60

INTRODUCTION GENERALE

L'époque actuelle est caractérisée par le goût et la recherche des œuvres modernes selon les techniques contemporaines. Cependant, en RDC, cette disposition ne se fait vraiment pas sentir du point de vue architectural.

L'esprit innovant ne se fait pas remarquer ; Aucune diversité, aucune variété, tout est presque pareil en ce qui concerne la construction des toitures : La plupart des ouvrages construits dans cette contrée sont couverts de la même manière.

C'est la manière classique qui utilise une couverture plane constituée de deux éléments nettement différents. Il s'agit des éléments couvrants et des éléments porteurs ; ils rendent la structure encombrante pour les constructeurs.

Pour essayer d'éviter cet encombrement on utilise actuellement les voiles minces comme couverture autoportante. Elles sont conçues de telle sorte qu'elles suppriment les éléments porteurs en conférant à la structure son caractère léger d'où l'adjectif « autoportante ».

Toutefois, elles ne sont pas d'usage courant. L'analyse et le dimensionnement de ces structures font recourt à des méthodes complexes et difficiles à simuler ; cette situation constitue un obstacle pour beaucoup d'ingénieurs civils à s'engager dans cette voie.

D'une autre part, il s'avère important de rappeler que l'avenir d'un pays dépend de l'éducation de sa population, laquelle éducation doit être sauvegardée. La présence des universités ne possédant pas de bâtiments appropriés pour ces fins est un défi à relever.

L'effectif étudiant augmente de manière considérable au fil des ans. Les universités sont alors occupées par un nombre d'étudiants dépassant le seuil. En outre, la qualité de formation technique n'est pas bonne en raison de l'insuffisance en équipements d'ateliers et laboratoires.

Par ailleurs, les universités congolaises ne trouvent aucune place dans le palmarès africain. Eu égard à cela, l'image du défi à relever dans ce pays est grand. C'est donc raisonnable d'étudier ce phénomène et en dégager les différentes possibilités d'y remédier.

Parmi ces possibilités figure celle qui fait l'objet de ce présent travail. Conception et dimensionnement d'une toiture en voûte autoportante appliquée à un bâtiment universitaire à Goma.

Parlant de matériaux, des affirmations stipulent que le béton armé est disponible dans cette région. C'est le principal matériau qui compose l'ouvrage en étude. Bien confectionné, le béton est l'un des matériaux les mieux adaptés.

Pour créer un complexe universitaire, il ne suffit pas de donner forme à une technique architecturale. Il faut fournir un cadre à une architecture dont l'objectif est de stimuler l'activité humaine.

Un campus universitaire devrait refléter la qualité de l'enseignement dispensé. Il œuvre pour le développement intellectuel, psychologique et social de ses étudiants. Le « Campus éducatif » est un concept innovant qui vise à encourager la modernisation des universités.

La RDC se trouve dans une situation telle qu'elle a plus besoin des praticiens que des théoriciens. La construction de ce pays, nécessite la participation de tous. L'apport de l'ingénieur s'avère très nécessaire pour sortir ce pays de son handicap.

L'ingénieur est appelé à créer et à résoudre des problèmes impossibles aux yeux de tous. Sa formation doit être donnée dans un cadre qui lui permettra de stimuler son ingéniosité ; de pousser son raisonnement, sa réflexion et son imagination aussi loin que possible.

Ce travail pourra aider les étudiants et Ingénieurs qui seraient intéressés par ce domaine à faire de calculs ou analyses similaires. La réalisation de celui-ci contribuerait à l'éducation du peuple congolais, richesse du pays.

Les coques présentent un aspect très élégant éveillant la curiosité contemplative chez les observateurs. L'implantation de ce genre d'ouvrages, ne fait que renforcer les fonctions touristiques de la ville de Goma,

Certes, il est possible de rendre la ville de Goma plus élégante qu'elle ne l'est, seulement en adoptant les conceptions aux techniques modernes et en essayant de réfléchir au-delà de ce qu'on a l'habitude de voir.

Les voiles minces présentent non seulement des avantages mais également des inconvénients. Après mûre réflexion, portant sur une étude comparative, les avantages l'emportent sur les inconvénients.

Voilà les raisons qui poussent à affirmer que ça vaut la peine de poursuivre ce travail.

En abordant le sujet, en premier lieu seront décrites brièvement les notions générales sur différents mots clés. En second lieu seront présentés plus en détail la conception et le dimensionnement accompagnés du coût estimatif.

Outre l'introduction et la conclusion, ce travail est subdivisé en quatre chapitres suivants :

Le chapitre I : parle des voiles minces ;

Le chapitre II : présente une théorie sur les universités ;

Le chapitre III : montre un aperçu général de la conception ;

Le chapitre IV : traite du dimensionnement.

PREMIERE PARTIE : NOTIONS GENERALES

CHAPITRE I. LES VOILES MINCES

Il est important de présenter une brève théorie sur les structures qui composent l'ouvrage en étude. Ce n'est pas du tout très aisé d'aborder tous les thèmes relatifs à ce sujet. L'essentiel, dans le cas de ce projet, est dit dans la suite.

I.1. DEFINITION ET ORIGINE

I.1.1. Définition

Une coque est définie par la géométrie courbe de sa surface moyenne et par son épaisseur en tout point de cette surface¹.

On entend par voile (coque) mince, des structures spatiales dont l'épaisseur est très faible par rapport aux deux autres dimensions (le rapport épaisseur/portée est typiquement moins, voire beaucoup moins, que 1/100).

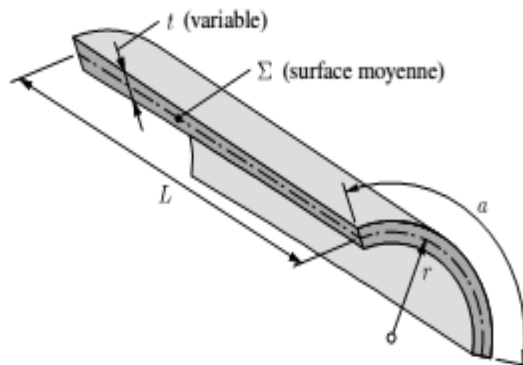


Figure I. 1 *Élément structural mince*

Où t est l'épaisseur, a est la courbure, r est le rayon de courbure et Σ la surface moyenne.

¹ François Frey, Traité de génie-civil Volume 5, *Analyse des structures en milieux continus*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2013, page 1

Soit n la normale élevée au point A d'une surface Σ (fig. I.2). On dit qu'un plan P contenant n réalise une section normale de la surface ; cette section se traduit par une courbe plane v tracée sur Σ .

Lorsque le plan P tourne autour de n , r_n et $1/r_n$ varient entre deux valeurs extrêmes appelées **rayons de courbure principaux** $r_{\max}$ et $r_{\min}$ et **courbures principales** $1/r_{\min}$ et $1/r_{\max}$; les plans P correspondants sont perpendiculaires.

Au point A de cette courbe, on désigne par r_n **le rayon de courbure** ; son inverse $1/r_n$ est la **courbure normale**.

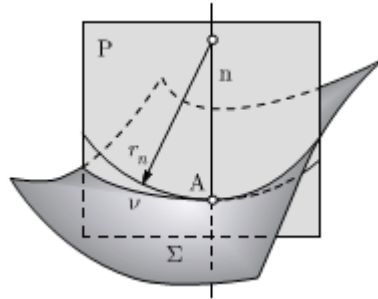


Figure I. 2 Courbe v , de courbure normale $1/r_n$ au point A , section normale de la surface Σ par le plan P

La trace de ces deux plans dessine, au voisinage immédiat du point A , une petite croix sur la surface Σ .

Les bras de cette croix sont les directions principales ; les courbes enveloppes de ces directions, en tous les points de Σ , constituent un réseau orthogonal de deux familles de lignes, les lignes de courbure principale ou, simplement, les lignes de courbure.

En un point d'une surface, **la courbure de Gauss** K , ou courbure totale, est le produit des courbures principales $K = \frac{1}{r_{\max} r_{\min}}$ et la courbure moyenne $H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_{\max}} + \frac{1}{r_{\min}} \right)$.

I.1.2. Origine

On peut trouver quelques constructions d'avant les années 1920 qui entrent dans cette définition. Il est néanmoins, admis que l'aventure constructive des voiles minces en béton armé commence au début des années 1920.



Figure I. 3 Ossature en treillis 3-D du prototype du planétarium, 1922

Pour permettre un dimensionnement rationnel, cette construction s'accompagnait de développements de modèles mathématiques spécifiques.

Auparavant, les seuls modèles dont disposent les ingénieurs pour dimensionner les constructions en béton armé sont le fonctionnement unidimensionnel en poutre droite et en arc. Ce qui induit la typologie structurale depuis les origines du béton armé.

Le fonctionnement de surfaces minces est bi-dimensionnel. C'est ce comportement qui va permettre d'atteindre de grandes portées de couverture avec une économie de matière et de poids considérable par rapport aux solutions constructives antérieures.

C'est ainsi qu'ont été conçus les voutes. La première application importante, et largement diffusée dans la littérature technique est la couverture (en 1927) du marché de Francfort.

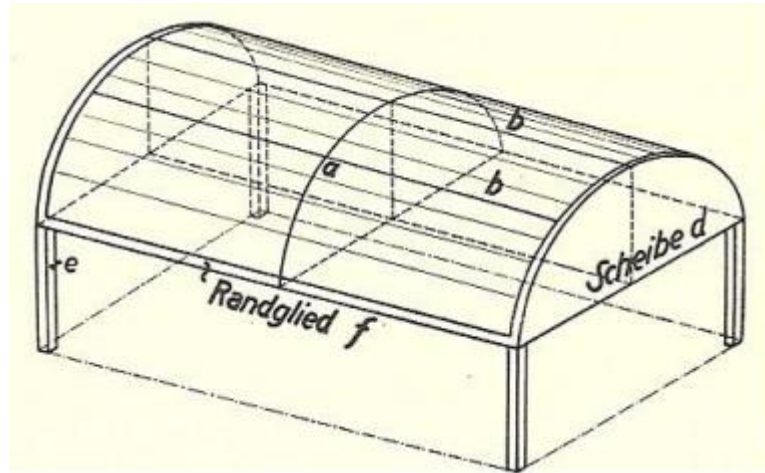


Figure I. 4 Voûte cylindrique en berceau

15 voûtes accolées de 37m de portée et de 7cm d'épaisseur, permettant une surface couverte de 220m par 50m sans appuis intermédiaires.

I.2. CLASSIFICATION

I.2.1. D'après la forme de la surface moyenne

On distingue,

- **les coques ou voiles**, à surface moyenne courbe,



Figure I. 5 Hangar pour dirigeable, Voûte en arc

- **les parois et plaques**, à surface moyenne plane

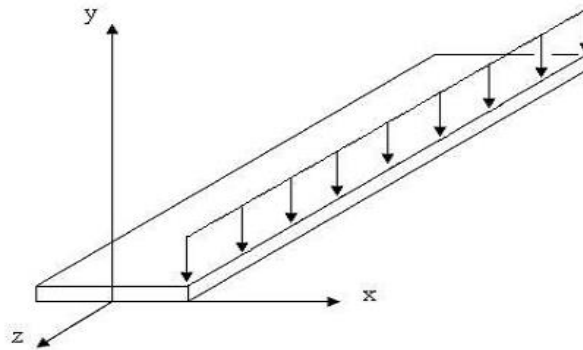


Figure I. 6 Parois, exemple type

- **les structures plissées**, à surface moyenne polyédrique.

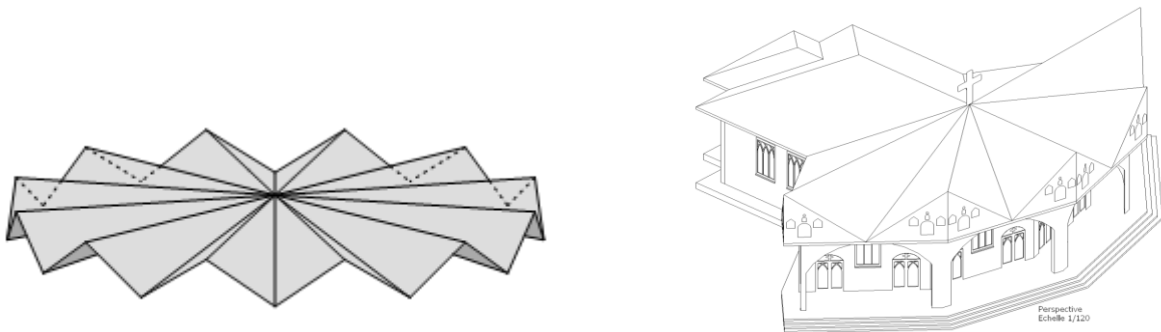


Figure I. 7 Toitures en structure plissée

I.2.2. D'après la courbure de gauss

On distingue :

- **Surface à simple courbure**

En tout point de la coque, $K=0$, l'une des courbures principales est nulle (exemple : cône, cylindre, conoïde...) Ces coques présentent une facilité de coffrage et se prêtent à la préfabrication.



Figure I. 8 Polyvoûte $K=0$

- **Surface à double courbure** dite **surface à courbure de Gauss négative**,

En tout point de la coque $K < 0$, les courbures principales sont non nulles et de signes opposés (exemple : Paraboloïde hyperbolique, hyperboloïde à une nappe...).



Figure I. 9 hyperboloïde à une nappe

- **Surface à double courbure** dite **surface à courbure de Gauss positive**,

En tout point de la coque, $K > 0$, les courbures principales sont non nulles et de même signe (exemple : sphère, paraboloïde de révolution...).

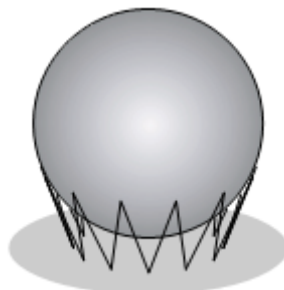


Figure I. 10 Réservoir sphérique, $K > 0$

N.B : Certaines surfaces ont des zones à courbure totale positive, nulle ou négative (Exemple : tore, ...).

I.3. VOILES MINCES ELEMENTS DE CONSTRUCTION

Les voiles minces sont des surfaces portantes qui ont des caractéristiques statiques remarquables. Ce n'est pas par hasard qu'on les rencontre dans la nature sous les formes les plus variées. Ils permettent de réaliser des couvertures avec le minimum de matériaux.

I.3.1. Avantages et inconvénients des voiles minces²

La structure qui sera analysée dans le cadre de ce projet de fin d'étude est une coque cylindrique ouverte appelée voûte autoportante qui est une variété des voiles minces ; ces structures à surface moyenne courbe présentent des avantages qu'il faut savoir en premier lieu :



Figure I. 11 Station-service de Deitingen

1. Le principal avantage de ces structures réside dans leur légèreté. En effet, les éléments porteurs sont éliminés avec la forme particulière qui est donnée aux éléments couvrants, ce qui entraîne automatiquement une économie.
2. Ces modèles de structures représentent souvent une solution idéale pour la couverture de grandes salles car permettent de créer des espaces de très grandes dimensions sans appuis intermédiaires.

² ABDELKADER NDIAYE, *conception d'une toiture autoportante en béton armé destinée à la couverture d'un hall omnisport*, université CHEIKH ANTA DIOP, Thiès, 1986.

3. Leur aspect élégant, constitue un moyen d'expression architecturale bien adapté à cette époque de grande production industrielle où le style, le mode, et la recherche plastique sont utilisés comme moyen de vente.

Cependant, malgré tous ces avantages, il convient de souligner un certain nombre d'inconvénients qui peuvent parfois faire hésiter les constructeurs pour le choix de ces types de structures.

1. L 'handicap des voiles minces en béton armé se situe surtout dans la réalisation des coffrages. Elles nécessitent un soin particulier pour les surfaces courbes, ceci implique une main d'œuvre spécialisée, et conduit souvent à un coût élevé.
2. La difficulté des calculs de résistance de ce genre des structures peut parfois faire hésiter les constructeurs, ou même les conduire à avoir recours aux solutions classiques.

Une simple imperfection géométrique (Géométrie d'ensemble, courbure, épaisseur, position des charges, conditions d'appui) ou matérielle entraîne l'instabilité de la coque.

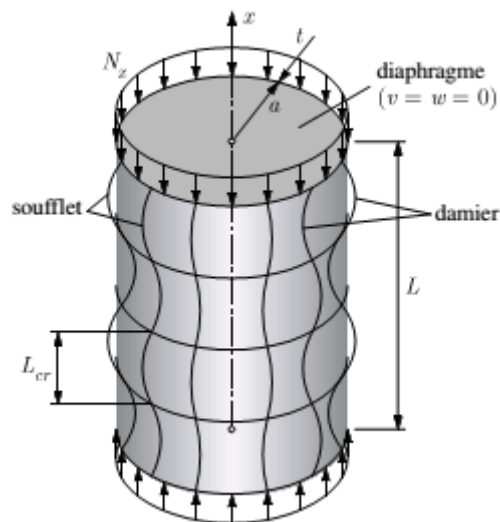


Figure I. 12 Instabilité d'une coque cylindrique comprimée : géométrie, charge et modes d'instabilité (en soufflet à gauche, en damier à droite)

I.3.2. Voûtes autoportantes

La voûte autoportante (ou coque cylindrique ouverte) est d'usage courant comme couverture.

En coupe (plan de la directrice), la forme de la directrice est a priori quelconque (arc de cercle, ellipse, forme en shed, etc.).

Les naissances (*endroit où commence la directrice*) peuvent être renforcées, par exemple épaissies ou, éventuellement, munies de raidisseurs. Enfin, la voûte peut être *simple* ou *multiple* (Figure I.13).

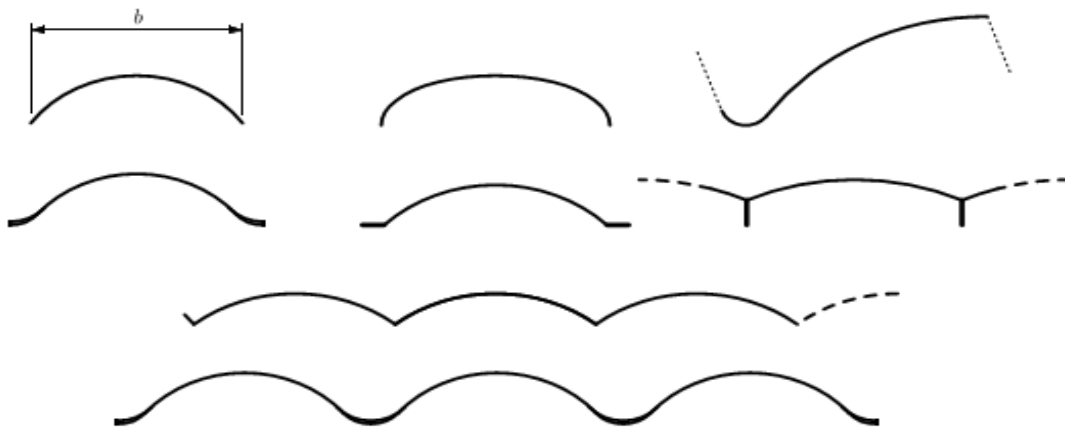


Figure I. 13 directrices de voûtes autoportantes où L est la portée longitudinale et b la portée transversale

En long, la voûte est à *simple portée* et limitée par deux diaphragmes (*Organes d'entretoisement qui épousent la forme de la directrice, Pratiquement, le diaphragme est une paroi (pleine ou évidée), une poutre courbe ou un treillis*),

ou *continue* et supportée par une succession de diaphragmes. La voûte s'appuie sur ses diaphragmes qui, à leur tour, prennent appui sur les murs et colonnes de la construction.

Les coques cylindriques autoportantes ont, dans le plan (X, Z), l'aspect général de poutres.

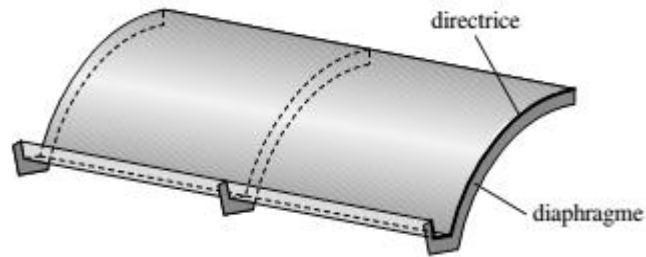


Figure I. 14 Shed autoportant à deux travées.

I.3.3. Exigences des coques

L'ingénieur reste confronté aux deux impératifs usuels suivants : *savoir analyser la structure pour la dimensionner avec précision et sécurité*, et *savoir concevoir, planifier et construire la structure de manière rationnelle et économique*.

Mais, pour l'ingénieur civil, dans le domaine des coques, survient fréquemment une troisième exigence essentielle : savoir choisir des formes esthétiques pour donner à la construction un aspect attrayant.

I.3.4. Dispositions pratiques de construction des toitures

Les dispositions pratiques de construction sont conditionnées par plusieurs facteurs dont notamment les besoins des usagers, Les impositions d'ordre architectural et l'économie³.

- Forme de la surface à couvrir

Le type de voile à utiliser dépend de la forme de la surface à couvrir et de l'emplacement des points d'appuis que l'on peut prévoir.

Pour une solution plus économique, et pour éviter l'encombrement de la surface occupée par les usagers, le meilleur choix de toiture est celle qui permet de minimiser le nombre d'appuis.

³ Martial MISSIHOUN, *Calcul et Technologie des voiles minces*, Université CHEIKH ANTA DIOP, Thiès, 1992.

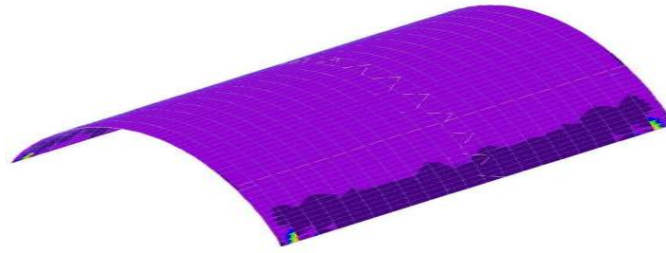


Figure I. 15 Voile mince autoportant en béton armé

D'une épaisseur de 15 centimètres destiné à couvrir une surface de 54m de large et 73m de long sans appuis intermédiaires: cas de la porte de Vanves sur le boulevard périphérique parisien.

- Eclairage

Toute pièce destinée à un séjour prolongé doit être éclairée par une quantité suffisante de lumière du jour. Grâce à leur intrados⁴ galbé et lisse, la plupart des voiles minces offre un effet favorable sur l'éclairage car la lumière est facilement réfléchie.

Il est possible de prévoir un éclairage zénithal⁵ soit en ménageant dans celles-ci des ouvertures, soit en adoptant une toiture en shed.



Figure I. 16 Coque cylindrique en shed

⁴ Face inférieure (intérieure) d'une voûte (par opposition avec extrados)

⁵ Eclairage naturel venant du haut par des verrières, des lanterneaux, etc.

- *Écoulement des eaux pluviales*

L'eau est le principal agent d'altération d'ouvrages en béton armé, dans une zone à climat tropical où les pluies sont abondantes (cas de notre zone cible), il s'avère très nécessaire de prendre en compte ses actions pour éviter les dégâts correspondants.

Ainsi le choix du type de voile doit faciliter l'évacuation des eaux et être tel que l'on soit certain qu'il ne puisse jamais se produire une stagnation d'eau accidentelle qui créerait une sollicitation tout à fait anormale et dangereuse pour la structure.

Les surfaces cylindriques ouvertes à courbure gaussienne nulle sont positionnées de telle sorte que la pente soit suffisante pour permettre l'écoulement radical des eaux.

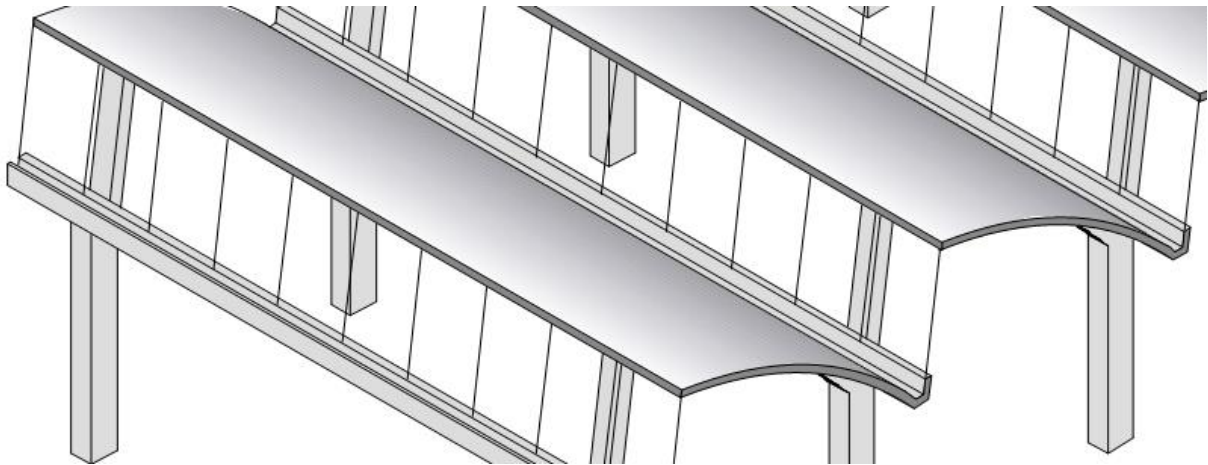


Figure I. 17 *Pente donnée à la toiture en shed pour permettre l'écoulement des eaux pluviales*

CHAPITRE II. THEORIES SUR LES UNIVERSITES

Les universités actuelles doivent faire face à l'évolution des exigences en matière de qualité des espaces (architecture et urbanisme). C'est pour répondre à ce défi que le concept innovant du « Campus éducatif » sera décrit dans La suite.

II.1. CAMPUS EDUCATIF

Ce travail vise à encourager la transformation de simples espaces physiques en espaces éducatifs de qualité, et ainsi contribuer au développement intellectuel, affectif et social de l'étudiant universitaire au sein du contexte urbain et social.

L'enseignement est conditionné par son contexte spatial dans la mesure où l'interaction qui facilite l'échange de savoirs se déroule dans un environnement physique particulier.

L'objectif de cette partie du travail est de fournir un éventail de réflexions théoriques et pratiques qui pourraient être utiles aux concepteurs des bâtiments universitaires et aux universités qui projettent de réaménager leur environnement.

Un campus peut être considéré comme « éducatif », lorsqu'il incarne les valeurs identifiées dans les dix⁶ principes suivants :

II.1.1. *Utopie et planification intégrée*

Dans l'esprit de la vision utopique de créer des espaces parfaits, élaborer des stratégies de planification intégrée pour les universités. L'essence d'idéaux utopiques est transformée en objectifs tangibles.

⁶ Pablo Campos Calvo-Sotelo, *le concept du campus éducatif et son application dans les universités espagnoles*, Université CEU-San Pablo, Espagne, CELE Échanges 2010/8 – ISSN 2072-7933 – © OCDE 2010

Ces stratégies devraient donner forme à des modèles caractérisés par une très grande liberté et flexibilité en termes d'espace et de temps. Il faut également fournir un cadre à une architecture dont l'objectif est de stimuler l'activité humaine.



Figure II. 1 Université de Turin, Italie⁷

Ce campus est si impressionnant qu'on a l'impression d'évoluer dans le futur.

II.1.2. Communauté d'apprentissage

Un établissement d'enseignement supérieur devrait encourager les contacts personnels et remplir diverses fonctions, et donc favoriser le développement d'une communauté d'apprentissage à part entière.

Une conception soigneusement étudiée devrait permettre aux utilisateurs de ces espaces de créer des liens avec leur environnement physique.

⁷ <https://www.erasmusworld.org/>

II.1.3. Harmonie spatiale

La configuration d'une université en termes d'architecture et d'urbanisme doit être foncièrement esthétique, dans la mesure où elle restera dans la mémoire collective des utilisateurs.

Les éléments physiques d'un lieu d'apprentissage ne doivent pas uniquement se réduire à une simple surface bâtie et équipée. Il est nécessaire de créer un ensemble spatial cohérent dans lequel les espaces ouverts sont aussi importants que les volumes construits.



Figure II. 2 Flagler College – St. Augustine, Floride, États-Unis⁸

II.1.4. Harmonie émotionnelle et intellectuelle

L'agencement et les matériaux utilisés dans la construction des diverses composantes architecturales d'un site d'enseignement ou de recherche doivent favoriser le bien-être psychologique de ses utilisateurs.

II.1.5. La nature et l'art

La nature a une valeur éducative au sein du campus. Des espaces supplémentaires à l'intérieur ou à l'extérieur peuvent être ajoutés aux bâtiments principaux pour exposer les œuvres d'art et encourager d'autres expériences éducatives.

⁸ <https://www.buzzfeed.com/.../les-25-plus-beaux-campus-universitaires-du-monde>



Figure II. 3 Berry College – Mount Berry, Géorgie, États-Unis

II.1.6. Image et accessibilité

L'université devrait présenter une image forte conformément à ses missions essentielles, à savoir l'enseignement, la recherche et la participation à la société. Elle devrait être accessible d'un point de vue physique.

II.1.7. Durabilité et adaptation à l'environnement

Un établissement universitaire devrait veiller à ce que son architecture et son urbanisme soient en harmonie avec son environnement géographique et les conditions climatiques. Il devrait être exemplaire en matière d'environnement, de biodiversité et de durabilité.



Figure II. 4 Espace vert de l'Université de la Colombie-Britannique – Vancouver, Colombie-Britannique, Canada⁹

⁹ www.sphere-emotion.fr/

Il devrait utiliser des matériaux de construction et des solutions techniques conformes à cette politique, et avoir recours à des mécanismes, qui utilisent des sources d'énergie renouvelables et respectueux de l'environnement.

II.1.8. Mémoire et avant-gardisme

Un campus universitaire devrait honorer la mémoire des théories de planification et architecturales héritées des « lieux d'apprentissage » traditionnels, car elles sont des sources précieuses de concepts qui nourrissent les conceptions contemporaines.

Les nouveaux projets, qui bénéficient d'une liberté considérable en matière d'expérimentation des formes, ainsi que les plans visant à réaménager les bâtiments existants, devraient être des exemples de modernité et d'avant-gardisme en matière de conception, afin de renforcer l'identité intellectuelle du monde universitaire.



Figure II. 5 UBO (l'Université de Bretagne Occidentale), France¹⁰

Avec son style avant-gardiste, Son extérieur est résolument futuriste et la vue depuis les salles de cours est à couper le souffle.

¹⁰ www.oecd.org/fr/edu/innovation-education/.../45566842.pdf

II.1.9. La relation université/ville

L'université et la ville devraient travailler en collaboration, créer des synergies et encourager activement la présence d'universitaires et de lieux pédagogiques dans les contextes sociaux et urbains.

C'est un moyen pour ces deux entités de se soutenir mutuellement dans leurs efforts d'innovation. Elles peuvent également s'assurer le concours d'autres institutions, afin de donner vie à des projets sociaux et culturels universels.

II.1.10. Des modalités d'enseignement et d'apprentissage innovantes

Une conception innovante peut être source d'inspiration et favoriser l'émergence de formes innovantes d'enseignement et d'apprentissage. Dans le cadre d'un projet éducatif global, les alternatives à l'amphithéâtre traditionnel devraient rendre obsolètes tous rôles passifs.

Ces alternatives devraient être des lieux « intelligents », qui encouragent la création et le transfert de connaissances, et favorisent des échanges sains d'idées entre enseignants et étudiants.

L'université est conditionnée par son contexte spatial, comme décrit précédemment. Le fondement de cette idée est que l'interaction, qui facilite la transmission du savoir, doit avoir lieu dans un environnement physique spécifique.

L'étendue des possibilités offertes par l'architecture et la planification constitue donc un élément clé en ce qui concerne la mission ultime de chaque établissement d'enseignement supérieur, à savoir l'éducation complète de ses étudiants.

Étant donné l'état du système universitaire congolais actuel, les principes du Campus éducatif pourraient être extrêmement utiles aux universités qui projettent de concevoir et de réaménager leurs campus, l'objectif étant d'atteindre l'excellence¹¹.

Bien qu'il soit nécessaire d'affiner certains détails au niveau local, le concept global peut être appliqué à tout type de scénario (déroulement programmé ou prévu d'une action).

Toute université quelle qu'elle soit peut développer une stratégie de planification : elle doit simplement analyser soigneusement les dix principes énoncés et les appliquer en fonction des caractéristiques du campus en question et de son contexte social et urbain.

II.2. CLASSEMENT DES UNIVERSITES

Le palmarès des Universités publié par les media permet de se faire une idée de la place des établissements congolais en Afrique et dans le monde. Ce classement constitue un facteur susceptible de pousser les acteurs politiques congolais d'investir plus dans l'enseignement.

L'objectif de cette note est de nous tenir informer sur ce qui se passe ailleurs, l'ignorance est certes, l'un des facteurs qui freinent le développement des universités en RDC. Elle doit-être évitée à tout prix.

II.2.1. Au niveau mondial

Dans le domaine des études supérieures, les universités et collèges sont classés par diverses institutions et publications. Un classement académique classe des institutions universitaires selon un nombre restreint d'indicateurs quantitatifs.

Ceci pour établir une hiérarchie selon le modèle d'une ligue des champions. Derrière ces classements en apparence simple se cachent souvent des calculs sophistiqués pour permettre de tenir compte avec objectivité d'une réalité complexe et diversifiée.

On peut distinguer deux types de classements :

¹¹ « *Le campus sert l'établissement non seulement en répondant à des besoins physiques, mais aussi en mettant en avant et en renforçant ces idéaux ou objectifs* ». (Paul Venable Turner, 1984)

- les classements de réputation fondés par exemple sur les taux de satisfaction des employeurs de diplômés ou celle des étudiants ;
- les classements de performance où l'on compte les résultats scientifiques obtenus par les universités, nombre de publications et leur impact, doctorats, brevets, etc.

Généralement, les classements pondèrent ces critères, penchant tantôt du côté de la réputation, tantôt du côté de la performance. Ces différences de critères peuvent produire des classements tout à fait hétéroclites et donner ainsi lieu à diverses critiques.

Les trois classements internationaux qui captent le plus l'attention des médias sont le *Times Higher Education World University Rankings*, le *classement mondial des universités QS* et le *classement académique des universités mondiales par l'université Jiao Tong de Shanghai*.

1. CLASSEMENT SHANGAI

Le classement des universités de Shanghai est probablement le plus scruté et respecté des palmarès. A l'aide de plusieurs critères comme *le nombre de prix Nobel parmi les anciens élèves ou le nombre de publications*, il établit le classement de meilleures universités du monde.

Publié par l'Université de Jiao Tong de Shanghai en Chine. Les universités sont classées selon six critères :

- Le nombre de prix Nobel et médailles Fields parmi les anciens élèves et parmi les professeurs,
- Le nombre de chercheurs les plus cités dans leur discipline,
- Le nombre de publications dans les revues scientifiques Nature et Science,
- Le nombre de chercheurs répertoriés dans le *Science Citation Index-Expanded* (SCIE) et le *Social Science Citation Index* (SSCI).
- La performance moyenne des professeurs.

2. CLASSEMENT TIMES HIGHER EDUCATION

Le magazine londonien Times Higher Education publie chaque année depuis 2004 un classement mondial des universités. Il le définit comme le seul à prendre en compte les principales missions de l'université que sont :

L'enseignement, la recherche, le transfert des connaissances et le rayonnement international.

Pour cela, 13 indicateurs pondérés sont utilisés regroupés en cinq catégories :

- Le cadre de travail (30%),
- Le nombre et la portée des recherches (30%),
- L'influence de ces recherches (30%),
- La renommée à l'international des professeurs (7,5%), étudiants et chercheurs,
- Les connexions avec les entreprises (2,5%).

3. CLASSEMENT QS

Est publié chaque année par QUACQUARELLI SYMONDS

Ce classement se base sur six critères pondérés :

- La réputation académique (40%),
- La réputation auprès des recruteurs (10%),
- Le ratio enseignants-étudiants (20%),
- Le nombre de citations par enseignant-chercheur (20%),
- Le ratio d'enseignants internationaux (5%),
- Le ratio d'étudiants internationaux (5%).

II.2.2. En Afrique

Le classement annuel des universités par UNIVERSITY WEB RANKINGS. L'Egypte et l'Afrique du Sud trustent les 11 premières places. Les classements sont établis selon une série de critères, notamment :

- *La quantité et la qualité des publications* ou encore
- *La présence sur les moteurs de recherche.*

II.2.3. Au niveau national

Les critères de classification des universités en RDC sont les suivants :

- L'établissement d'enseignement supérieur doit avoir son agrément officiellement reconnu, et accrédité par les ministères en charge de l'Education en tant qu'établissement d'enseignement supérieur ;
- L'établissement devrait être reconnu officiellement pour dispenser des programmes de formations diplômantes aussi bien au niveau D.E.S (Diplôme d'études supérieures équivalent à Bac + 4), qu'au niveau du cycle post-universitaire ;
- Disposer d'infrastructures et d'équipements scientifiques de bonne qualité, d'ouvrages d'enseignement performants, de programmes de formation et de cours validés pour le niveau supérieur et le post-universitaire ;
- Disposer d'un site web officiel, permettant de recueillir toutes les informations sur le contenu et la qualité des programmes et cours dispensés ;

Que ce soit au niveau mondial qu'au niveau du continent africain, les universités congolaises ne sont jamais classées car ne respectent pas les critères ci-haut détaillés.

II.3. CARACTERISTIQUE DES UNIVERSITES MODERNES

II.3.1. Structure

Les bâtiments universitaires doivent être les phares, les signaux, les symboles de la réconciliation de l'Université avec la ville. Les bâtiments universitaires doivent être compris comme des monuments.

Dans beaucoup de pays, et dans des pays où l'institution universitaire se porte plutôt bien, l'initiative et la décision des opérations de construction sont assurées de façon décentralisée.

Aux Etats-Unis, c'est le cas, les grandes universités ayant leur propre service d'architecture, et elles font appel, à leur initiative, à des auteurs de projets extérieurs. En Belgique, depuis les années 1960, il en est de même.

Importance de ce facteur :

Ainsi aux Etats-Unis les plus grands architectes interviennent constamment sur les campus. Tous les grands noms de l'architecture, depuis **Mies van der Rohe**, construisent sur les campus américains : **Mies, Kahn, Saarinen, Rudolph**, etc. et les étrangers : **Le Corbusier, Aalto**.

C'est dans la même optique que certains pays accompagnent leur organisation en Etat moderne, par des constructions dont l'architecture flagrante sera non seulement des instruments pratiques, mais aussi des symboles politiques puissants :

II.3.3. L'enseignement: un rôle central dans l'évolution de la société

Si on ne veut pas que l'Université devienne caduque aux yeux des nouvelles générations, le métier d'enseignant n'a d'autres choix que d'évoluer.

Les compétences de cette profession doivent se renouveler, intégrer la maîtrise des outils numériques, la créativité, savoir collaborer, animer des communautés d'apprentissage, avoir une ouverture d'esprit vers le monde de l'entreprise, les associations...

L'adaptabilité et la formation tout au long de la vie deviennent des éléments fondamentaux. Donner aux étudiants les compétences attendues au 21^{ème} siècle, nécessite de repenser le métier d'enseignant.

L'enseignement est une activité très complexe qui nécessite de multiples compétences, impliquant de :

- Préparer des cours,
- Créer et organiser des activités,
- Elaborer différentes formes d'évaluation,
- Construire des partenariats,
- Développer des projets éducatifs,

Travailler en équipe,
Se situer dans les institutions ; mais également de

Gérer son auditoire,
Maintenir un climat propice aux apprentissages,
Développer la confiance des étudiants,
De rentrer en relation avec eux,
Favoriser leurs apprentissages,
Développer leurs compétences,
Résoudre les problèmes rencontrés,
Tenir compte de leurs aspects culturels.

Du Primaire à l'enseignement supérieur, les métiers de l'éducation ont beaucoup évolué. Les élèves et étudiants sont plus difficiles, plus exigeants, de capacités et de culture très diverses. L'enseignant devient leader-manager, capable de guider, d'inspirer, de favoriser l'engagement des élèves et étudiants.

DEUXIEME PARTIE : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT

CHAPITRE III. CONCEPTION

La conception de l'ouvrage a été réalisée conformément aux normes de l'architecture d'établissements d'enseignement supérieur et universitaire. Des documents traitant de l'architecture ont été consultés.

Le but de ce chapitre est la description de différents plans architecturaux pouvant permettre aux lecteurs de comprendre correctement le projet. C'est la raison pour laquelle, cette partie du travail comprend plus des figures que des écrits.

L'ouvrage sera implanté à MUGUNGA, néanmoins la configuration et l'étude topographique de ce site¹² n'ont pas été reprises dans ce travail. Elles ont déjà été faites par d'autres chercheurs figurant dans la note sur les références bibliographiques.

Voici en peu de mots, les principaux aménagements à considérer pendant la conception d'un établissement d'enseignement universitaire¹³.

III.1. AMENAGEMENTS CENTRAUX

- Grand amphithéâtre, salle des fêtes, administration, maison de l'étudiant, bibliothèques, restaurants universitaires, installations sportives, résidences universitaires, parkings.
- Installations techniques et distribution centrale : chaufferie, distribution technique

III.2. AMENAGEMENTS DE BASE

Pour toutes les disciplines il faut :

¹² MATHE BASEHAYE Irénée, *Etude structurale d'une coque de révolution en BA imitant la forme du volcan Nyiragongo: avant-projet d'un musée à Goma*, Université Libre des Pays des Grands Lacs, Goma, 2014-2015

¹³ Ernest NEUFERT, *les éléments de projet de construction*, 8^{ème} édition, paris, 2002, p. 646

- Amphithéâtre pour les cours théoriques magistraux, et les cours spécifiques, salles de séminaires et de travaux pratiques, salles informatiques.
- Bibliothèques spécialisées, locaux de service du personnel scientifique, salles de conférence et d'examens.

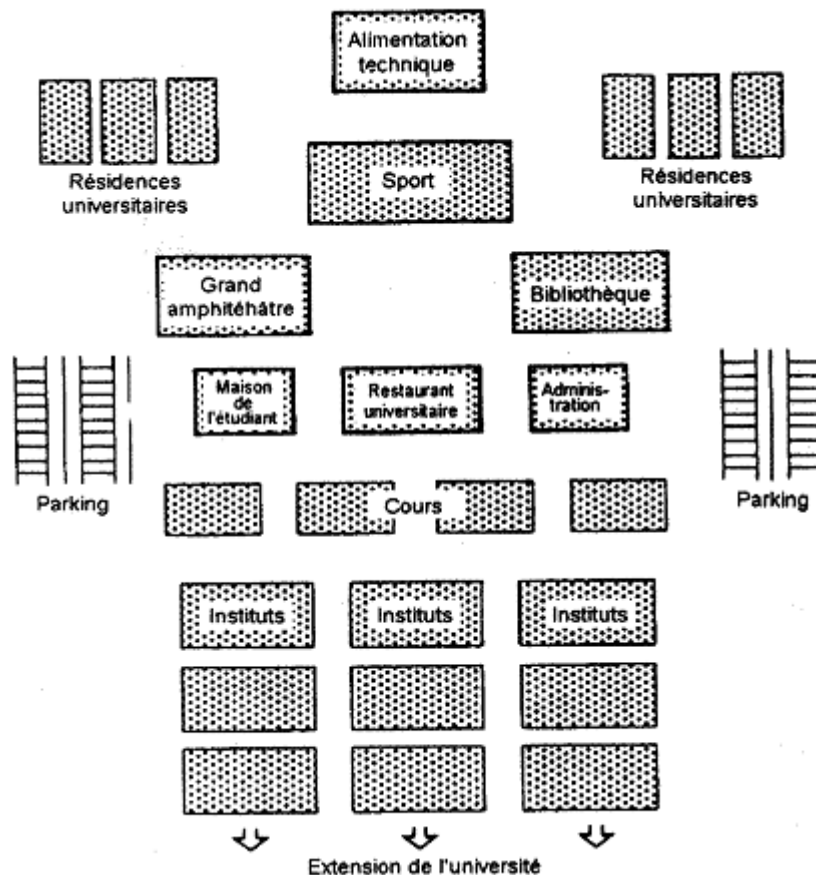


Figure III. 1 Schéma d'installation pour enseignements supérieur et universitaire

Connaissant l'emplacement de chaque bâtiment suivant la figure ci-dessous, la conception se focalise sur le bâtiment considéré comme le principal, où se passent les cours.

III.3. BESOIN EN ESPACE SPECIFIQUE POUR CHAQUE DISCIPLINE

- *Sciences humaines* : Pas d'exigences particulières
- *Disciplines artistiques* (architecture, arts plastiques, musique...) : Salles de dessin, ateliers, salle de répétition, et salle de rangement du matériel.

- *Disciplines techniques et scientifiques* (Ingénierie, physique, construction des machines, électronique...) : Salles de dessin, laboratoires et ateliers, etc.
- *Disciplines telles les sciences de la vie et de la nature* (chimie, biologie, anatomie, physiologie, hygiène, pathologie...) : Laboratoires, ateliers scientifiques, salles d'expériences et des travaux pratiques, etc.

La discipline cible est la discipline technique, les plans qui suivent ont été conçu selon les normes liées à cette discipline.

III.4. LES VUES EN PLAN

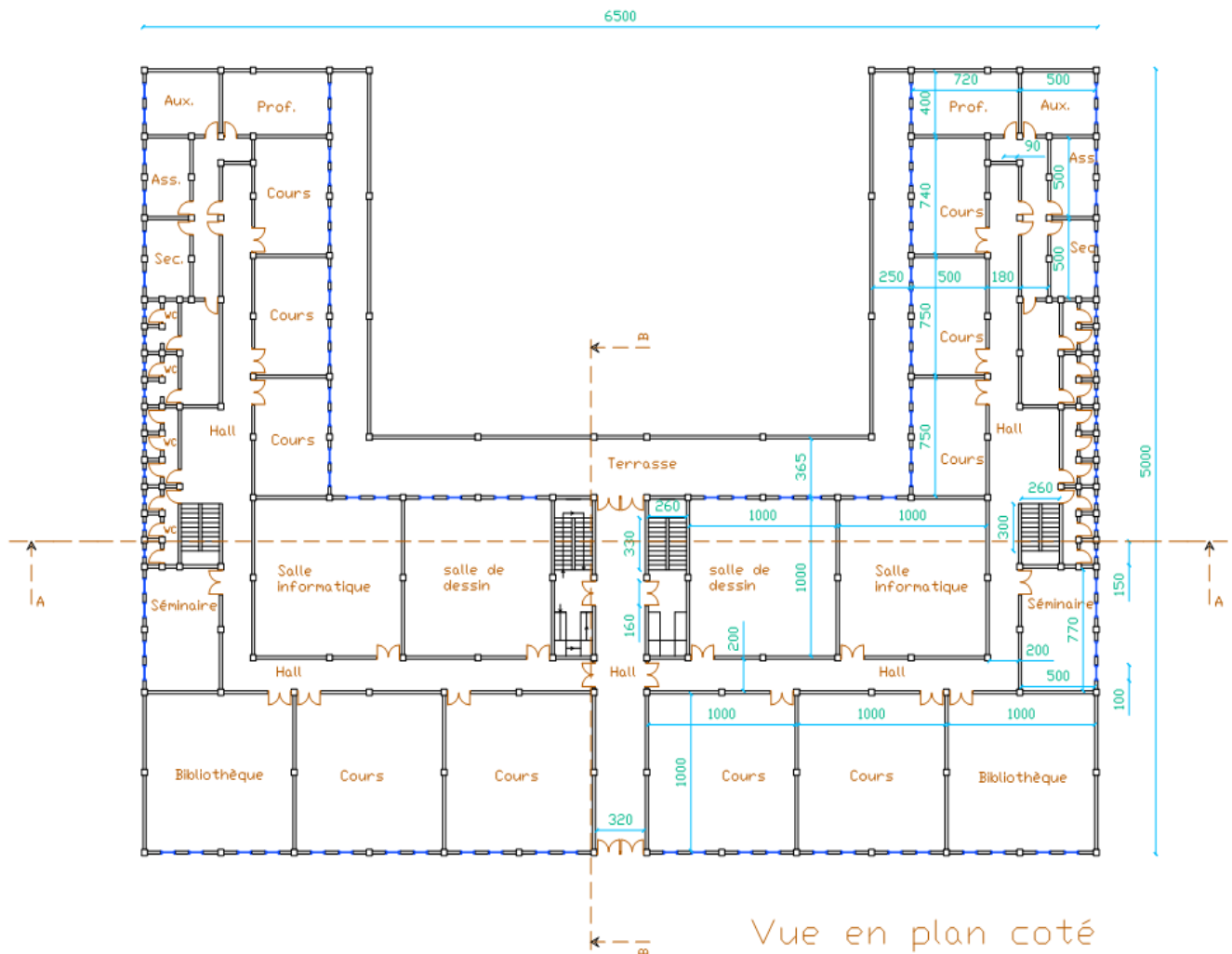


Figure III. 2 Plan annoté 1 ; Echelle 1/500

Le plan est symétrique : du Rez-de-chaussée jusqu'au troisième étage, le plan reste le même, et est coté en cm.

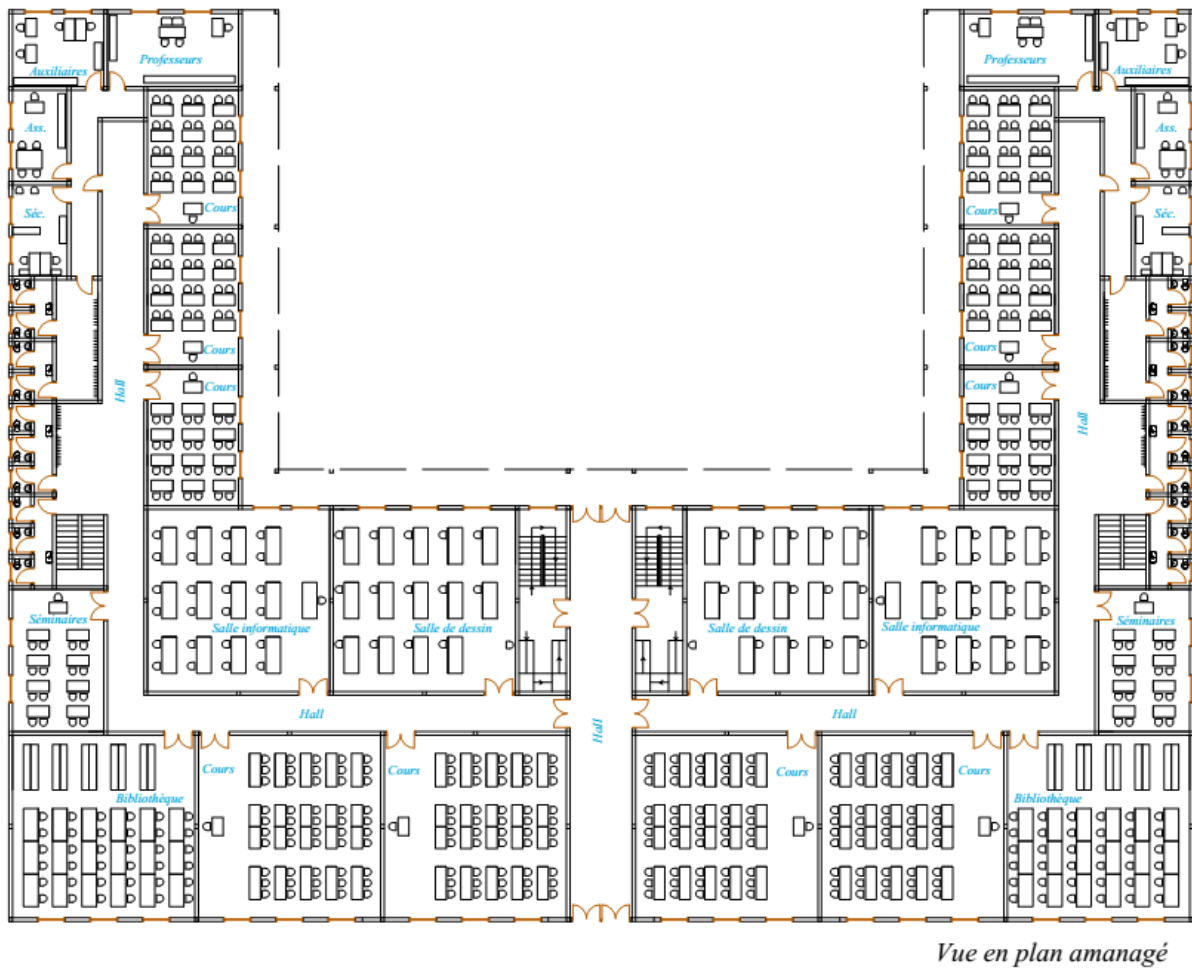


Figure III. 3 Plan annoté 2 ; Echelle 1/500

III.5. LES FAÇADES ET PERSPECTIVE



Figure III. 4 Façade principale, Echelle 1/500

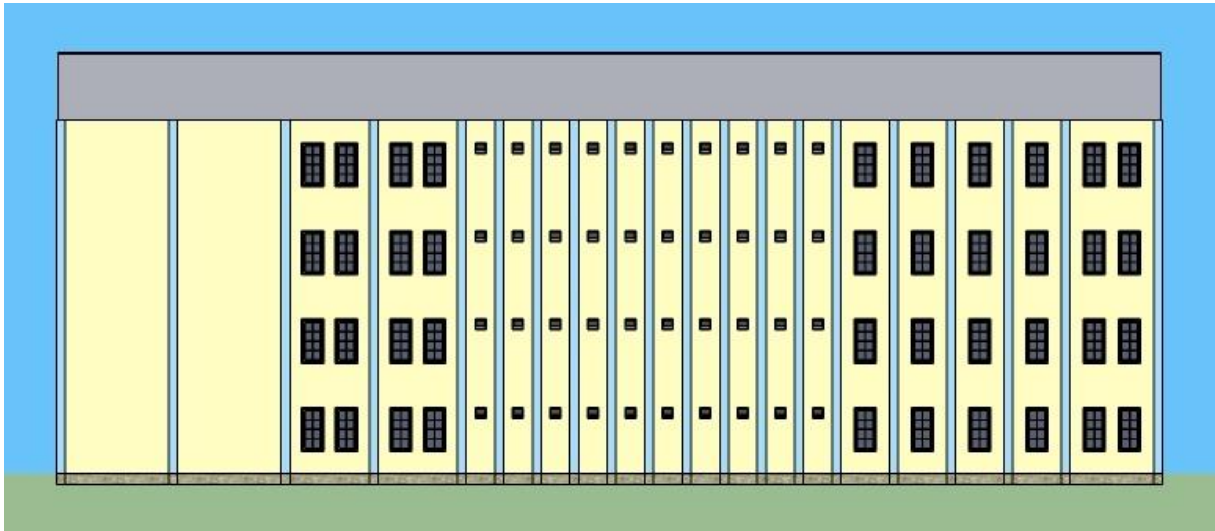


Figure III. 5 Façade latérale gauche, Echelle 1/500



Figure III. 6 Façade postérieure, Echelle 1/500



Figure III. 7 Façade Latérale droite, Echelle 1/500

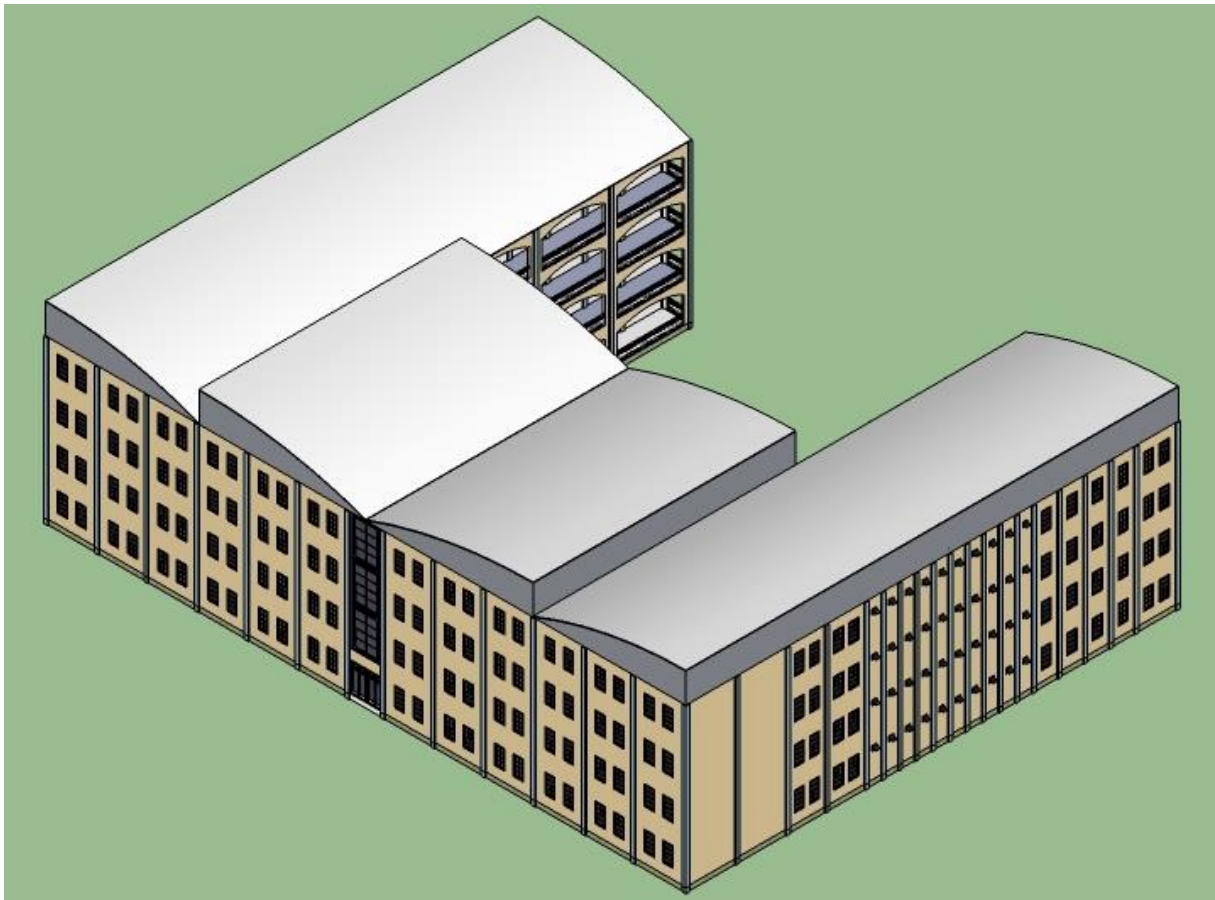


Figure III. 8 Perspective

III.6. LES COUPES

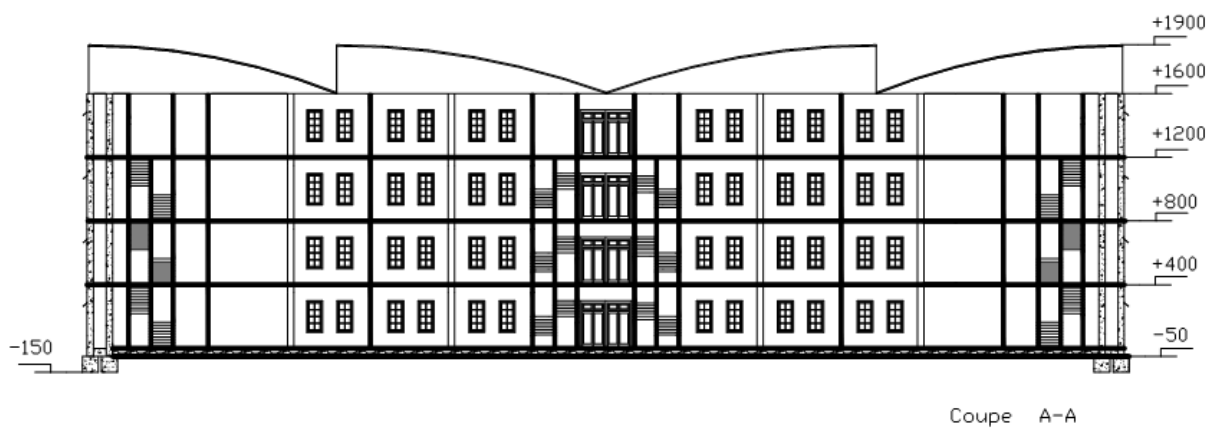


Figure III. 9 Coupe longitudinale, Echelle 1/500

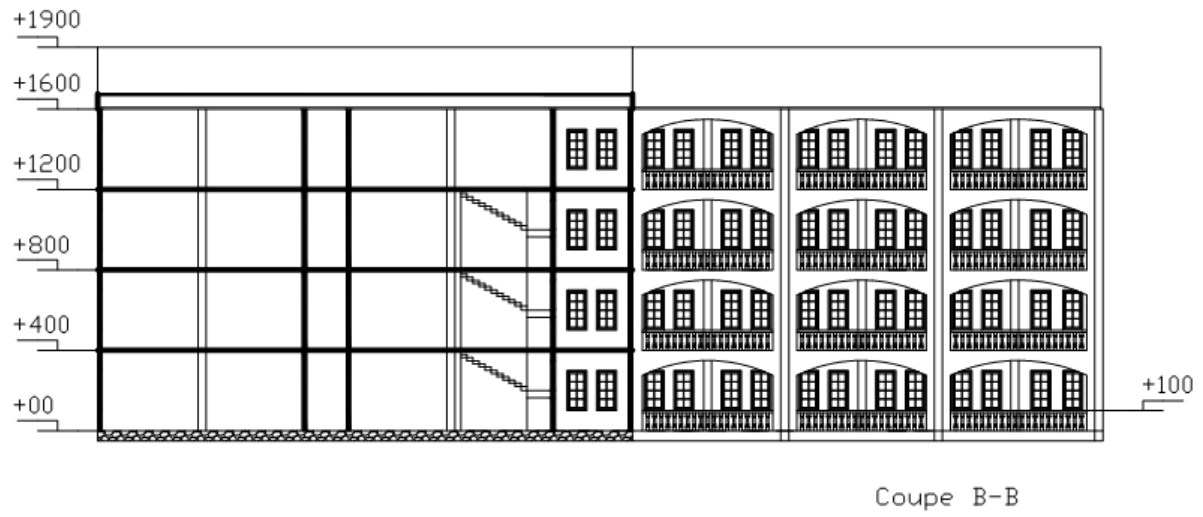


Figure III. 10 Coupe transversale, Echelle 1/500

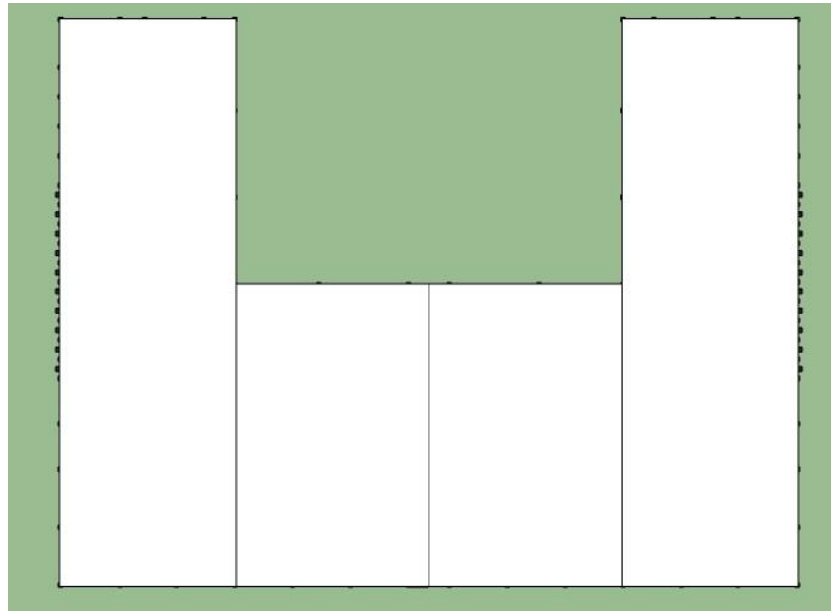


Figure III. 11 Vue de dessus

CHAPITRE IV. DIMENSIONNEMENT

Après conception du bâtiment universitaire, un dimensionnement de la toiture doit être fait en vue de vérifier dans quelle mesure, cette structure pourra résister aux actions et sollicitations auxquelles elle est soumise.

Les autres structures telles que : Poutres, Poteaux, Planchers et semelles de fondations sont calculées par des méthodes simples sur base de la force exercée par la toiture et autres charges variables et permanentes connues.

C'est ainsi que leur calcul ne fera pas partie de ce présent travail, mais pourra être effectué plus tard pour connaître le coût total du projet.

L'analyse de la coque a été faite à l'aide d'un logiciel de calcul appelé Robot Structural Analysis Professional (RSAP) qui utilise la méthode des éléments finis¹⁴.

Pour commencer, voici un résumé succinct sur les méthodes d'analyse des coques :

IV.1. METHODES D'ANALYSE STRUCTURALE DES COQUES MINCES

IV.1.1. Méthodes théoriques

1. HYPOTHESES DE CALCUL

- Hypothèse de linéarisation

On se place dans le cadre usuel de l'analyse linéaire des structures, acceptant

- *L'hypothèse de linéarisation géométrique* : les déplacements et déformations de la coque sous une charge donnée sont suffisamment petits pour que les changements dans la géométrie de la coque puissent affecter l'équilibre statique du système.

¹⁴ Antoine LEGAYS, *Calcul des structures par les éléments finis*, Cnam Paris, 2012.

Pratiquement, les dilatations et, surtout, les rotations doivent rester petites.

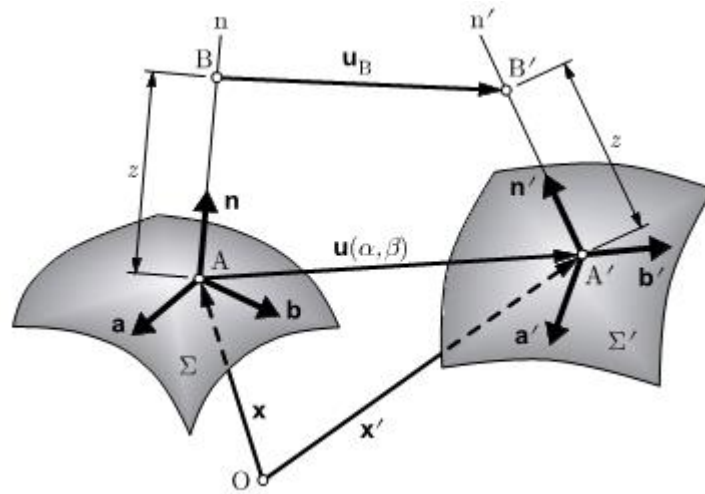


Figure IV. 1 Déplacement

- **L'hypothèse de linéarisation matérielle** : le matériau obéit à la loi de Hooke.
- la coque est constituée d'un seul matériau isotrope homogène.

- **Hypothèse des structures minces**

- les normales à la surface moyenne de la coque non déformée restent des normales à la surface moyenne de la coque déformée et elles ne changent pas de longueur.

Cette hypothèse est purement cinématique et s'appelle loi de *conservation des normales*. Il en résulte d'abord que les glissements sont nuls dans tous les plans normaux à la surface moyenne.

$$\gamma_{\alpha z} = 0 \quad Et \quad \gamma_{\beta z} = 0 \quad (IV.1)$$

Et ensuite que la dilatation perpendiculaire à la surface moyenne est nulle.

$$\varepsilon_z = 0 \quad (IV.2)$$

- La contrainte normale transversale est négligeable : c'est une hypothèse statique qui permet d'ignorer les effets qui se manifestent à travers l'épaisseur et s'écrit :

$$\sigma_z \cong 0 \quad (IV.3)$$

- **Hypothèse de faible Epaisseur**¹⁵

- l'épaisseur t de la coque est petite vis-à-vis du rayon de courbure minimal r_{min} de la surface moyenne, soit

$$\frac{t}{r_{min}} \ll 1 \quad \text{ou} \quad \frac{t}{r_{min}} < \frac{1}{10} \quad (IV.4)$$

2. THEORIE MEMBRANAIRE

Dans certains cas de coques, les efforts intérieurs flexionnels sont nuls, ou si petits, qu'ils peuvent être négligés. On est donc amené à poser, éventuellement sous forme d'hypothèse,

$$M_\alpha = M_\beta = M_{\alpha\beta} = V_\alpha = V_\beta = 0 \quad (IV.5)$$

Ce qui conduit à ce qu'on appelle la *théorie membranaire*, car la coque ne résiste plus aux charges extérieures que par le seul jeu des trois efforts intérieurs membranaires :

N_α, N_β et $N_{\alpha\beta}$



3. THEORIE FLEXIONNELLE

C'est la théorie la plus exacte mais assez complexe. Elle tient compte de la variation des contraintes sur l'épaisseur de la coque par conséquent, elle associe aux efforts de membrane, des moments de flexion et de torsion.

¹⁵ MUTONDO Rufin, *Calcul des structures II*, Tech 2, ULPGL, Goma, 2015- 2016, inédit.

4. COQUES CYLINDRIQUES FACE AUX METHODES THEORIQUES

Les insuffisances de la théorie membranaire ont obligé les ingénieurs à se tourner vers la théorie flexionnelle. L'intérêt de cette théorie est flagrant face à l'emploi considérable de ce type de coques en structures (couvertures et toitures ; conduites et réservoirs ; fuselages ; coques de navires et sous-marins ; etc.).

Aujourd'hui toutefois, ces développements théoriques ont perdu quasiment tout intérêt. Les méthodes numériques générales ont supplanté les théories particulières.

IV.1.2. Méthodes numériques

1. METHODE D'ELEMENTS FINIS

La méthode des éléments finis joue un rôle phare dans l'analyse des structures tridimensionnelles à parois minces, puisqu'elle seule aujourd'hui est capable de résoudre le problème de coque en toute généralité.

Les techniques de calcul des structures ont connu un développement considérable. Ce développement est motivé par les besoins des industries et soutenu par les progrès effectués dans le domaine informatique.

Ainsi, la M.E.F est communément utilisée aujourd'hui pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie.

- Modélisation et discrétisation

La méthode des éléments finis est donc une procédure générale de discrétisation pour la résolution des problèmes des milieux continus.

Pour avoir une analyse numérique qui simulera au mieux un problème, il faut effectuer deux opérations essentielles la *modélisation* et la *discrétisation*, ces opérations portent sur les deux aspects principaux du problème pratique :

- Représentation de la géométrie, des charges, des conditions aux limites ;
- Choix des éléments finis et du maillage.

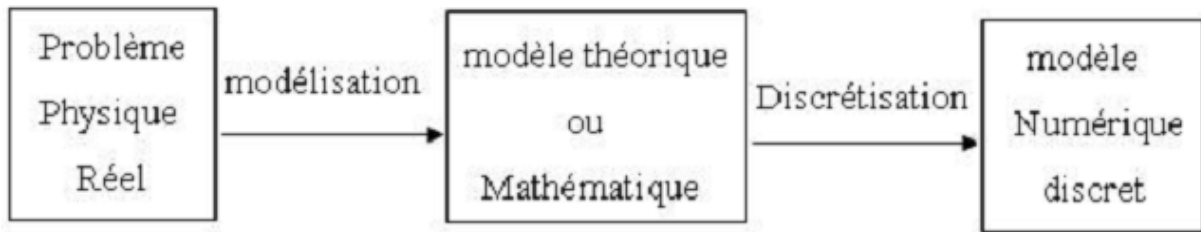


Figure IV. 3 Etape de l'analyse d'un problème aux limites

- Principe de la M.E.F

Le principal de base de la M.E.F est la subdivision du modèle mathématique en des composants disjoints de géométrie simple appelés (Éléments finis). Le comportement de chaque élément est exprimé en termes d'un nombre fini de degrés de liberté.

Le comportement (réponse) du modèle mathématique est considéré, approximativement, celui du modèle discret obtenu par connexion ou assemblage des éléments.

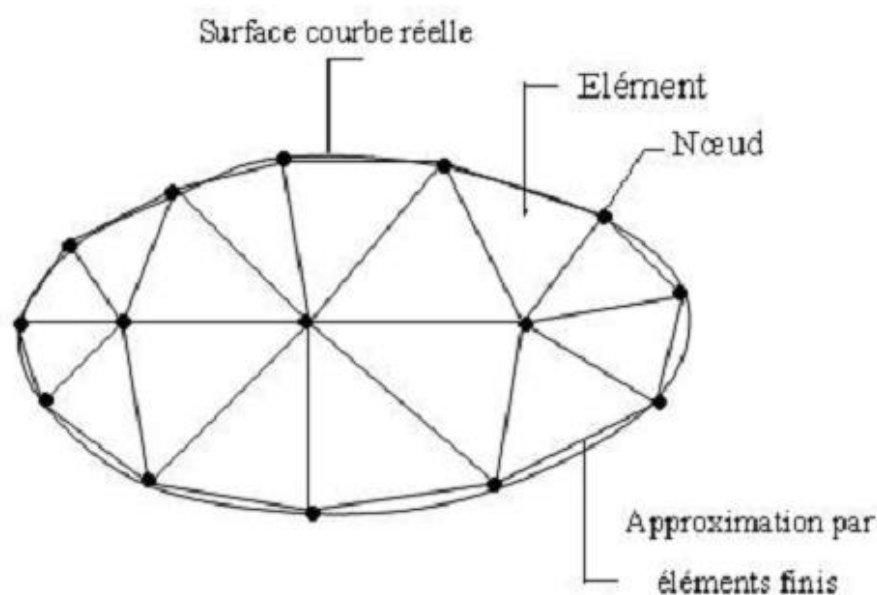


Figure IV. 4 Maillage du domaine en triangles à trois nœuds

Pour simplifier le problème et minimiser les erreurs, l'analyse a été faite au moyen du Logiciel RSAP. Toutefois, l'étude dynamique qui implique l'action du vent et du Séisme n'a pas été faite dans cet avant-projet, s'il se trouve qu'on envisage le réaliser, il faudra y revenir.

- **Présentation du logiciel RSAP**

Le logiciel *ROBOT* a été conçu pour analyser des structures en béton armé, des charpentes métalliques ou en bois, des pièces mécaniques.

- **Mode opératoire**

Le mode opératoire du logiciel ROBOT peut être divisé en trois étapes :

- Définition du modèle de calcul de la structure, calculs (statiques, non linéaires ou dynamiques) ;
- Dimensionnement des éléments de la structure à partir des résultats de calculs obtenus et des normes disponibles.

Le schéma ci-dessous présente:

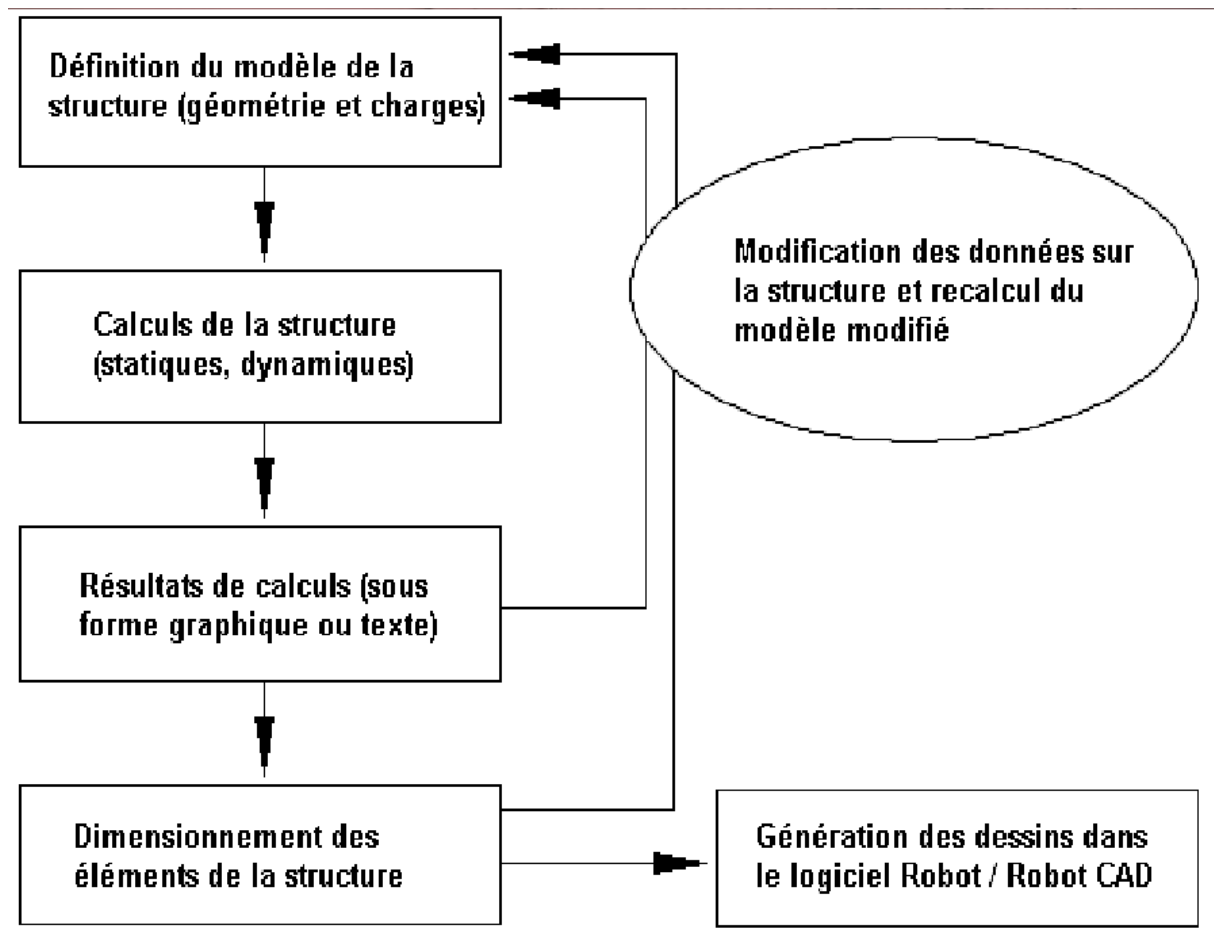


Figure IV. 5 le mode opératoire standard dans le logiciel

IV.2. PREDIMENSIONNEMENT

IV.2.1. Choix de matériau

Tableau IV. 1 Matériaux utilisés¹⁶

Beton25		
$f_{c28} = 25MPa$	$\gamma_b = 1.5$	$E_b = 35\,000MPa$
Acier : FeE500 Barre à haute adhérence HA		
$f_e = 500MPa$	$\gamma_s = 1.15$	$E_s = 210\,000MPa$

f_{c28} Résistance caractéristique à la compression du béton âgé de 28jours

γ_b Coefficient partiel de sécurité du béton

E_b Module d'élasticité du Béton

f_e Limite élastique de l'acier

γ_s Coefficient partiel de sécurité de l'acier

E_s Module d'élasticité ou module de Young de l'acier

IV.2.2. Choix de section

- Les poutres et les poteaux sont en béton armé et ont une section carrée de $40 * 40cm^2$
- L'ouvrage comprend trois dalles de mêmes caractéristiques :

Epaisseur : 15cm

- La coque est également en béton armé, elle a les caractéristiques suivantes :
 - Portée $L = 50m$
 - Epaisseur $t = 8cm$
 - Rayon de courbure $r = 3m$

$$\frac{t}{r} = \frac{8cm}{300cm} = 0.027 < 0.1 \text{ Il s'agit bien d'une coque mince.}$$

¹⁶ Jean PERCHAT et Jean ROUX, *pratique du bael 91*, 2^{ème} édition, Eyrolles, paris, 1998.

Remarque : les caractéristiques de la coque sont fixées de façon à respecter les hypothèses de calcul dont notamment l'hypothèse de linéarisation, l'hypothèse des structures minces et l'hypothèse de faible épaisseur.

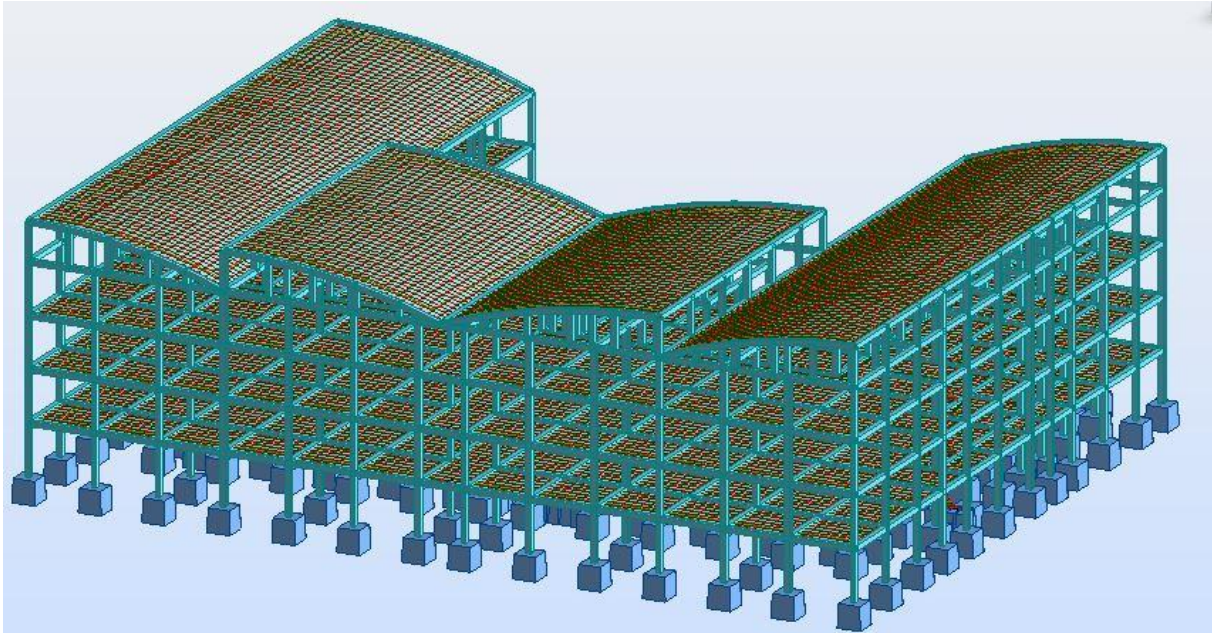


Figure IV. 6 Modélisation

IV.3. CHARGEMENT DE LA STRUCTURE

IV.3.1. Base de calcul

Les charges et règlements de calcul adoptés pour ce travail sont ceux relatifs aux normes Européennes et aux règles du BAEL 91 modifié 99 qui fixent les actions à considérer pour le calcul de différentes structures en BA¹⁷.

Eurocode 1 : Actions sur les structures

Eurocode 2 : Calcul des structures en Béton.

IV.3.2. Evaluation des charges¹⁸

L'évaluation des charges porte sur tout l'ouvrage : toiture, poutres, poteaux et planchers

¹⁷ Jean-Pierre MOUGIN, *béton armé : bael 91 modifié 99 et DTU associés*, 2^{ème} édition, Eyrolles, Paris, 2000.

¹⁸ EUROCODE 1 : bases de Calcul et Actions sur les structures

1. CHARGES PERMANENTES

Notées G, elles comprennent

- les poids propres des structures en Béton armé¹⁹ (PERM1) avec $\gamma_{ba} = 25kN/m^3$
Pris en compte par le logiciel après avoir déterminé la géométrie de la structure et le type de matériau qui la compose.

- le poids propre des murs en maçonnerie (PERM2) :

$$\gamma_m = 13.5kN/m^3$$

Les murs sont identiques et ont les caractères suivants :

Epaisseur : 0.2m

Hauteur : 4m

$$G_m = \frac{13.5kN}{m^3} * 0.2m * 4m = 10.80kN/m$$

- le poids propre du verre (PERM3)

$$\gamma_v = 25kN/m^3$$

Epaisseur : 2cm = 0.02m

Hauteur : 3m

$$G_v = \frac{25kN}{m^3} * 0.02m * 3m = 1.5kN/m$$

- Le poids propre du revêtement (PERM4)

Le revêtement comprend la chape d'étanchéité, le carrelage et le mortier de pose sur plancher et escalier.

- Chape d'étanchéité : 0.2 kN/m²/cm d'épaisseur,

$$\text{Soit } \frac{0.2kN}{m^2} * 5 = \frac{1kN}{m^2} \text{ pour une épaisseur de 5cm}$$

- Carrelage et mortier de pose : 0.6kN/m²

¹⁹ EUROCODE 2 : calcul des structures en béton.

$$G_{rev} = \frac{1kN}{m^2} + \frac{0.6kN}{m^2} = 1.6kN/m^2$$

2. CHARGES D'EXPLOITATION

Notées **Q** : il s'agit de :

- Charge d'exploitation appliquée aux planchers (EXPL1)

$$Q_{plancher} = 2kN/m^2.$$

- Charge d'exploitation appliquée aux escaliers (EXPL2)

$$Q_{escalier} = 2.5kN/m^2.$$

- Charge d'exploitation appliquée à la toiture (EXPL3)

La toiture n'étant pas admissible, la seule charge considérée est la charge d'entretien, selon les normes, il s'agit d'une charge surfacique qui dépend de la pente de la toiture. Pour le cas de cet ouvrage, elle est prise égale à 1kN/m².

$$Q_{toiture} = 1kN/m^2$$

Tableau IV. 2 Tableau récapitulatif des charges appliquées à la structure

Cas	Type de charge	Valeurs de la charge
1:PERM1	poids propre	PZ Moins Coef=1,00
3:PERM2	charge uniforme	PZ=-10,40[kN/m]
4:PERM3	charge uniforme	PZ=-1,13[kN/m]
5:EXPL2	(EF) surfacique uniforme	PZ=-2,50[kN/m²]
2:EXPL1	(EF) surfacique uniforme	PZ=-2,00[kN/m²]
6:EXPL3	(EF) surfacique uniforme	PZ=-1,00[kN/m²]
8:PERM4	(EF) surfacique uniforme	PZ=-1,60[kN/m²]

N.B : les charges appliquées sur la structure sont négatives car elles sont orientées dans le sens contraire de Z.

IV.3.3. Combinaison des charges

Les charges ont été combinées à deux états limites :

1. A l'ELU

$$\text{COMB1} = 1.35(G) + 1.5 (Q)$$

Le dépassement de cet état équivaut à la ruine de la structure.

2. A l'ELS

$$\text{COMB2} = 1 (G) + 1(Q)$$

Le non-respect de cet état compromet la durabilité de l'ouvrage ou contrarie les conditions d'exploitations habituelles.

Tableau IV. 3 Combinaison d'actions

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Type de combinaison	Définition
9 (C)	COMB1	Combinaison linéaire	ELU	$(1+3+4+8)*1.35+ (2+5+6)*1.50$
10 (C)	COMB2	Combinaison linéaire	ELS	$(1+2+3+4+5+6+8+9)*1.00$

IV.3.4. Caractéristiques de l'analyse

Tableau IV. 4 Description de la structure

Type de structure	Coque
Masse	3 116 815.487kg
Nombre d'équations = Nombre de degré de liberté	164 844
Nombre d'éléments	32 132
Nombre des noeuds	27 569
Nombre des barres	433
Combinaisons	ELU, ELS
Coordonnées du Centre géométrique de la structure:	
X	16.2m
Y	24.9m
Z	9.5m

Coordonnées du Centre de gravité de la structure	
X	13.415m
Y	21.418m
Z	9.335m

IV.4. PRESENTATION DES REULTATS DE L'ANALYSE STATIQUE DE LA TOITURE EN COQUE

Pour avoir l'idée générale de l'avant-projet, toutes les structures de l'ouvrage ont été predimensionnées et chargées dans les parties précédentes. Dans cette partie, seule la coque sera analysée, c'est ce qui constitue la clé même de ce travail.

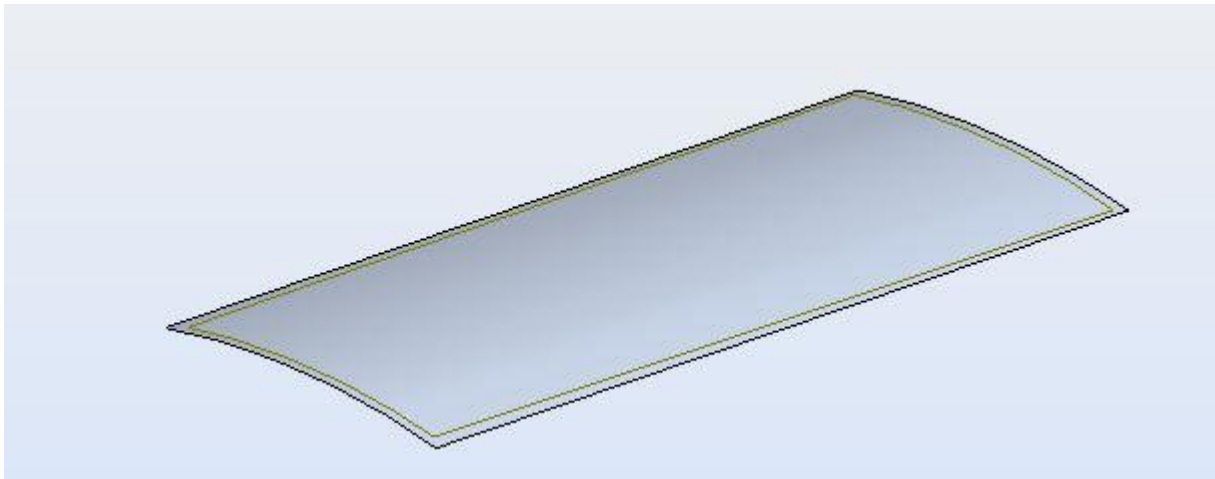


Figure IV. 7 Modélisation de la toiture

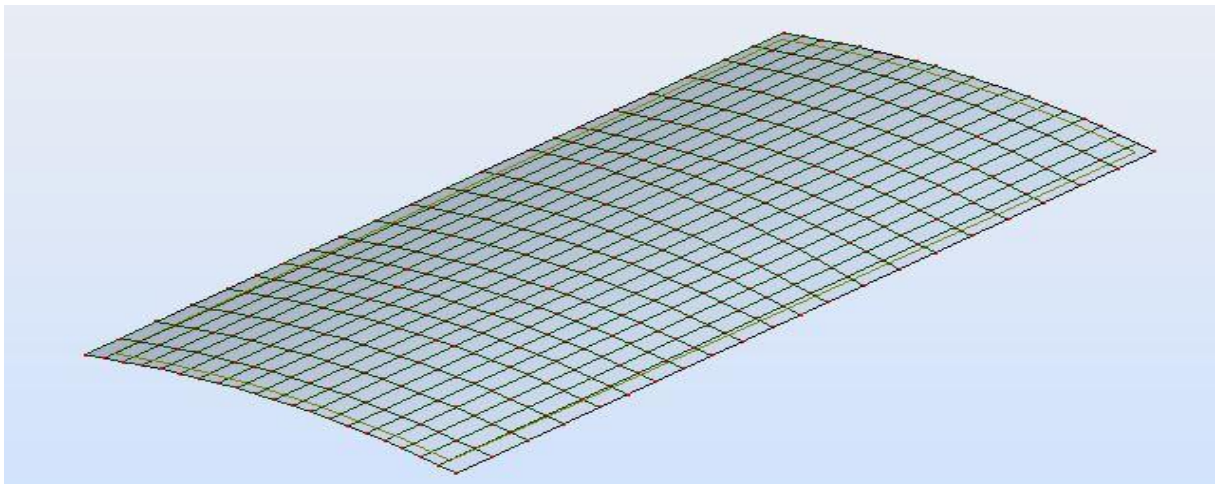


Figure IV. 8 Maillage de la coque

IV.4.1. Sollicitations dans la coque

Le résultat se présente ici sous forme de cartographie indiquant les zones pour différentes valeurs des sollicitations agissantes dans la coque²⁰, elles sont calculées par mètre linéaire et sont classées en catégories ; on distingue :

1. LES EFFORTS INTERIEURS M, N, Q

- les moments M

- M_{xx} c'est le moment suivant la directrice qui à son tour suit la direction x

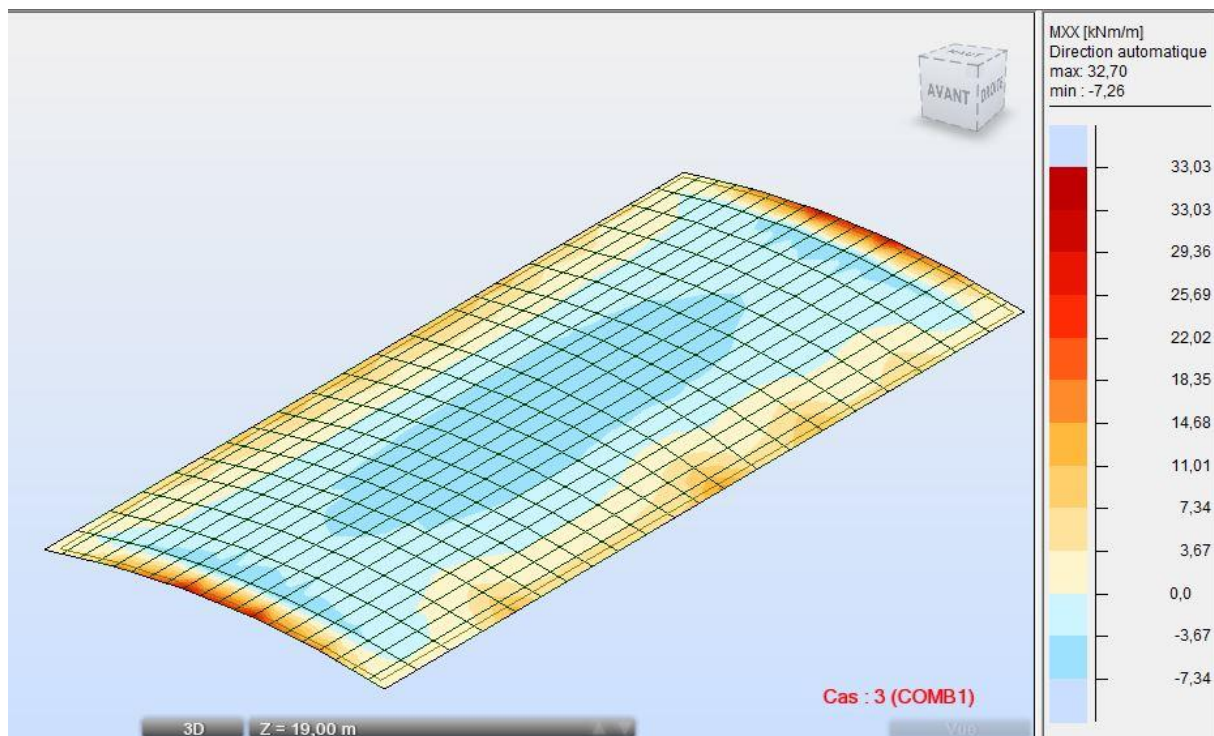


Figure IV. 9 Moment suivant la direction x

Tableau IV. 5 Moment maximal suivant x, c'est le moment fléchissant

Moment max positif [kNm]	32.70
Moment max négatif [kNm]	-7.26

²⁰ www.civilmania.com

Il se remarque que :

Le moment max positif se situe au niveau de deux directrices formant le bord.

Tandis que le moment max négatif : -7.26kNm est localisé au centre de la coque.

- M_{yy} c'est le moment suivant la génératrice, qui à son tour suit la direction y.

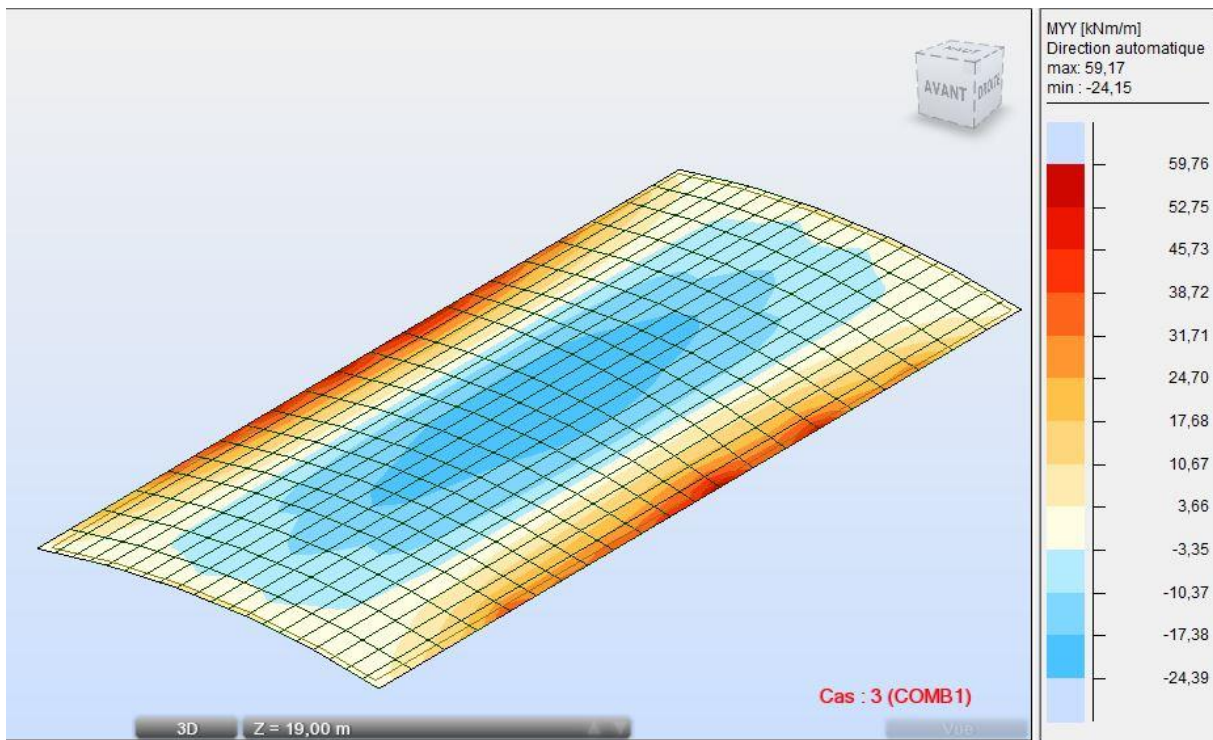


Figure IV. 10 Moment suivant la direction y

Tableau IV. 6 Moment maximal suivant y : c'est le moment fléchissant

Moment max positif [kNm]	59.17
Moment max négatif [kNm]	-24.15

Le moment max positif se situe au niveau de deux génératrices formant le bord ;

Le moment max négatif est localisé au centre de la coque.

- M_{xy}

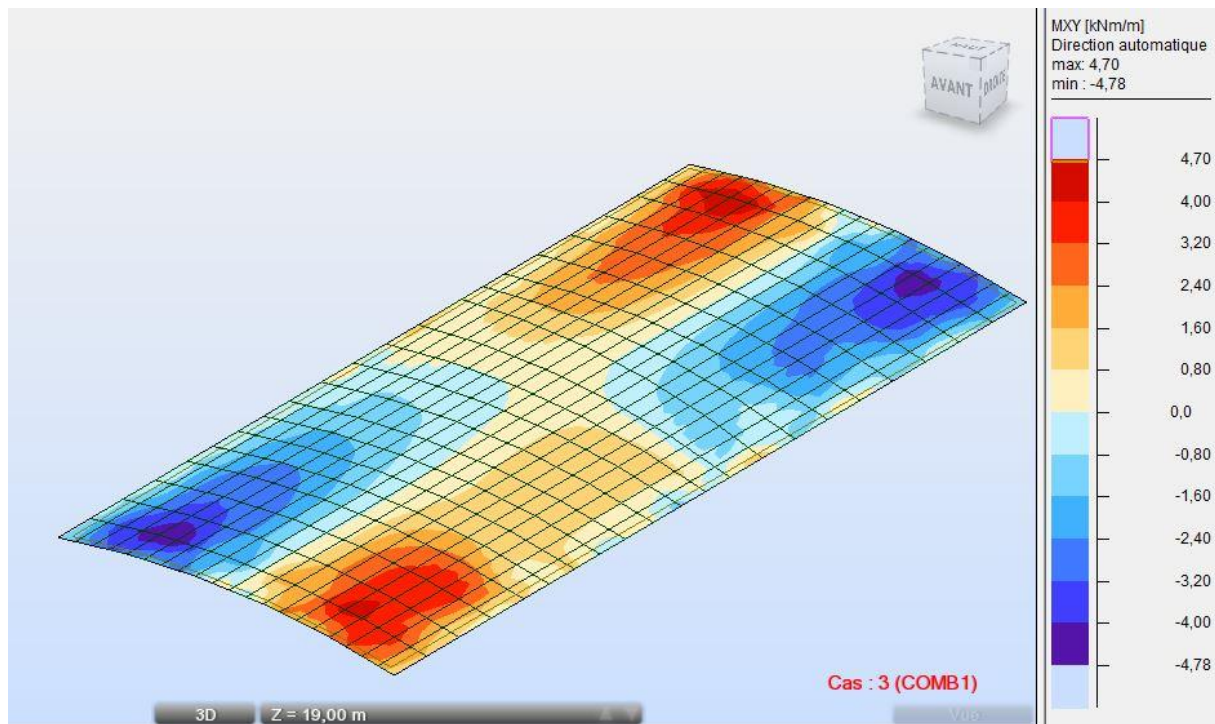


Figure IV. 11 Moment de torsion

Tableau IV. 7 Moment de torsion

Moment max positif [kNm]	4.70
Moment max négatif [kNm]	-4.78

NB : M_{xx} Et M_{yy} sont les moments fléchissants, M_{xy} Est le moment de torsion

- Les efforts membranaires N

- N_{xx}

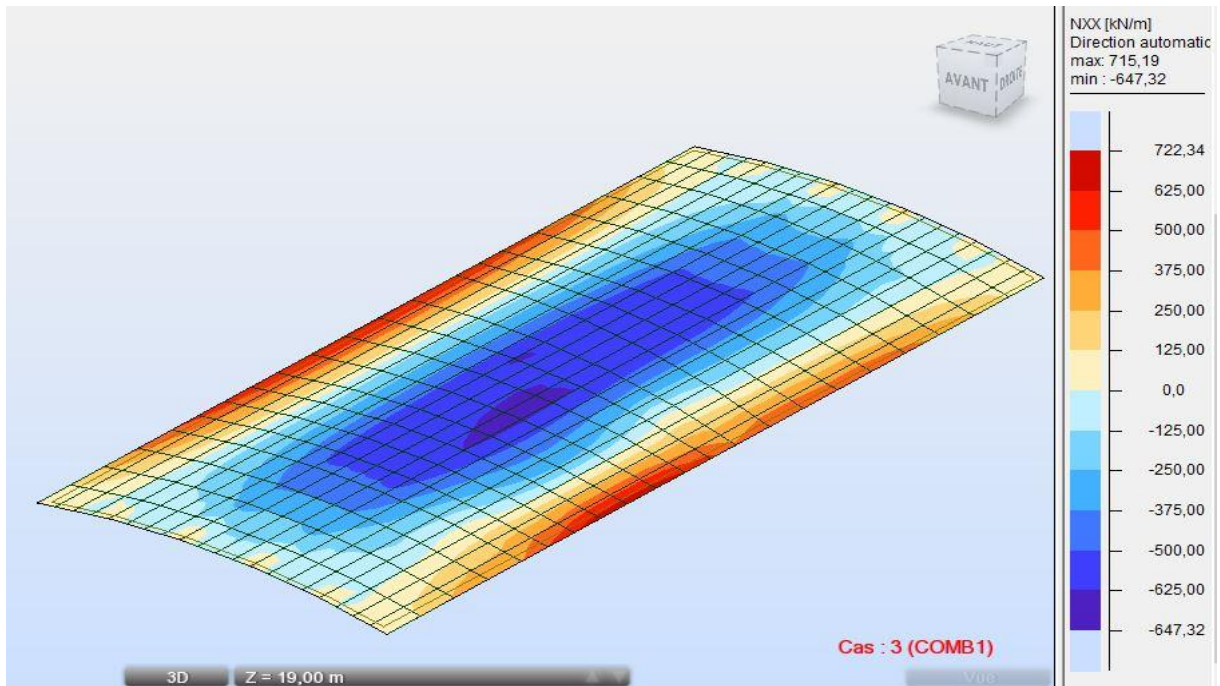


Figure IV. 12 Effort membranaire suivant x

- N_{yy}

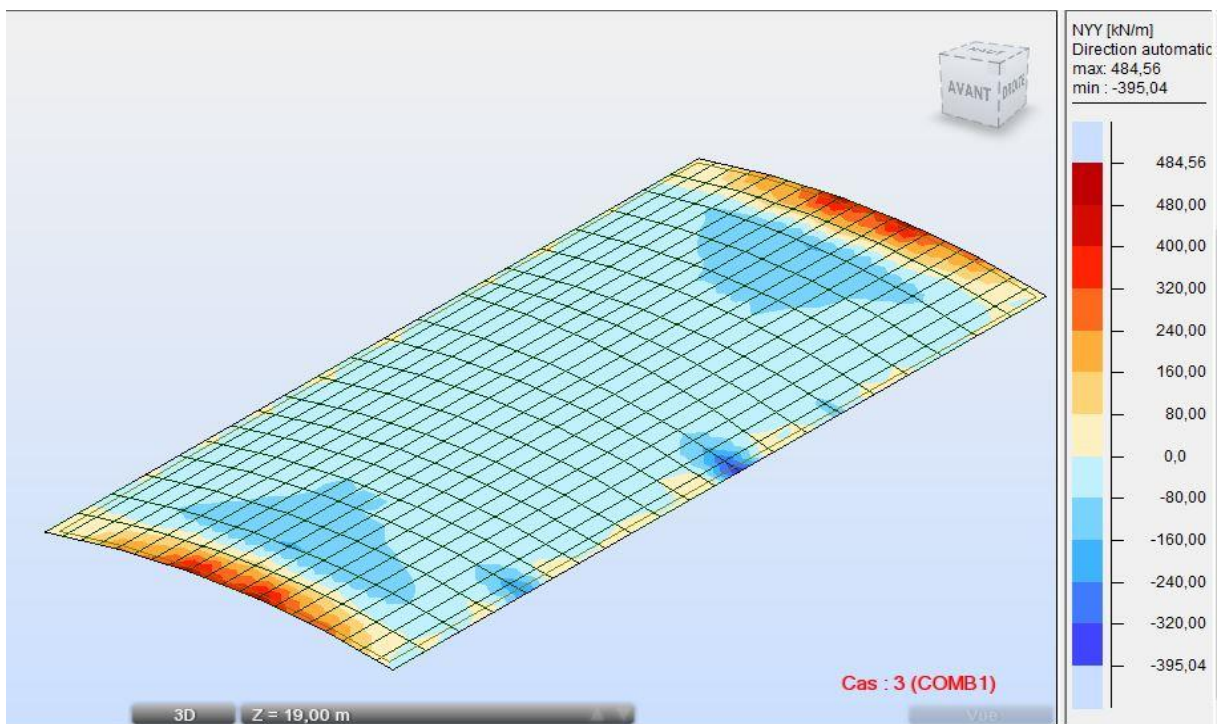


Figure IV. 13 Effort membranaire suivant y

- N_{xy} : La résultante des efforts membranaires : elle se présente de la manière ci-après :

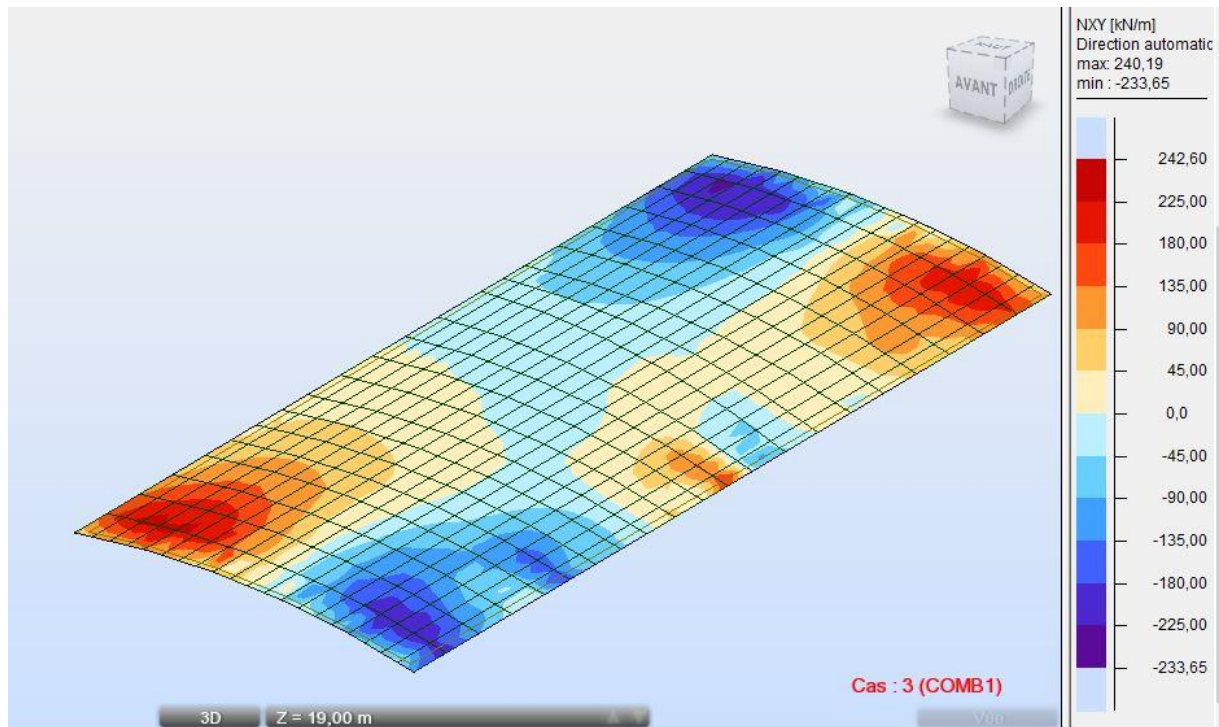


Figure IV. 14 Effort membranaire résultant

Tableau IV. 8 valeurs maximales des efforts membranaires

Effort membranaire suivant x	
Effort max positif	715.19kN
Effort max négatif	-647.32kN
Effort membranaire suivant y	
Effort max positif	484.56kN
Effort max négatif	-395.04kN
Effort membranaire résultant	
Effort max positif	240.19kN
Effort max négatif	-233.65kN

NB : N_{xx} Et N_{yy} sont les efforts normaux, N_{xy} Est l'effort tangentiel

- *Les efforts tranchants Q*

- Q_{xx}

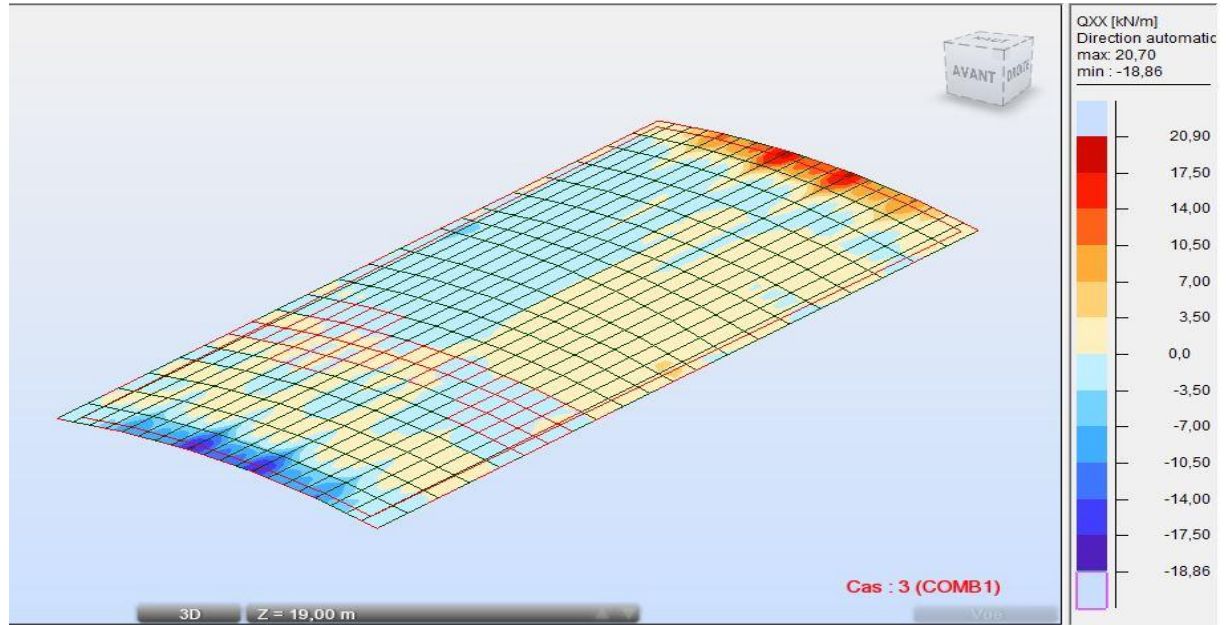


Figure IV. 15 Efforts tranchants suivant l'axe x.

Max : 20.70kN, min : -18.86kN

- Q_{yy}

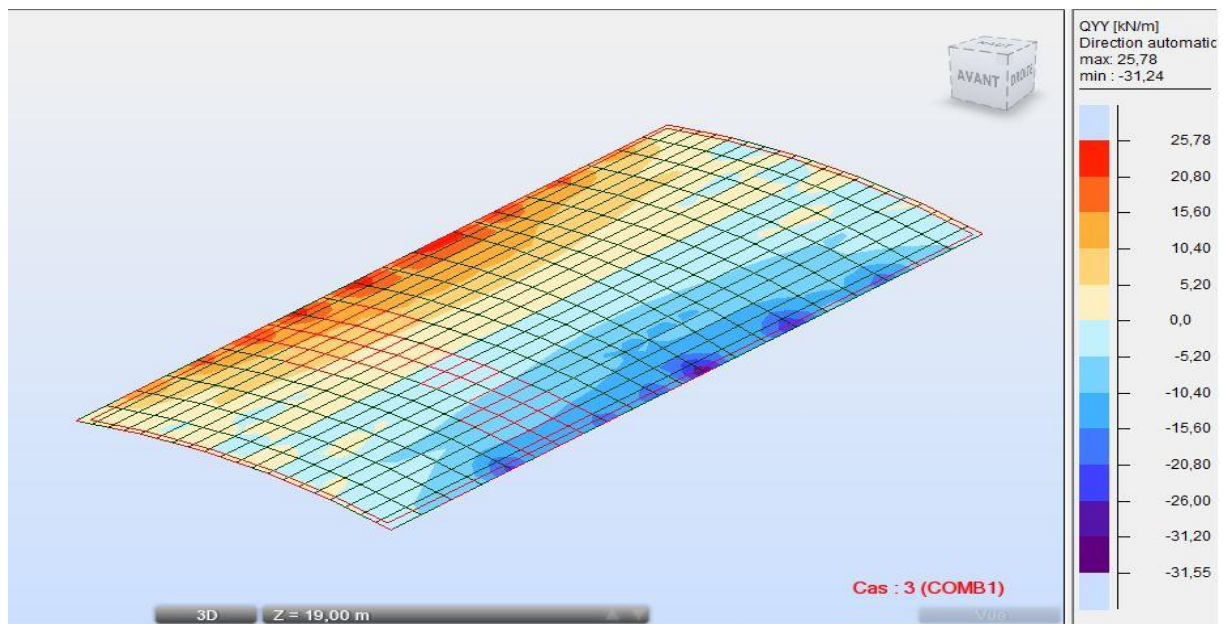


Figure IV. 16 Efforts tranchants suivant l'axe y

Max : 25.78kN, min : -31.24kN

2. LES DEPLACEMENTS

Trois sortes de déplacement sont analysées dans le cas des coques :

Le déplacement selon x noté U_{xx} , le déplacement selon y noté U_{yy} et le déplacement selon z noté W_{Normal} et appelé en d'autres termes « flèche ».

Après modélisation, chargement et calcul par RSAP; les résultats suivants ont été obtenus :

- U_{xx}

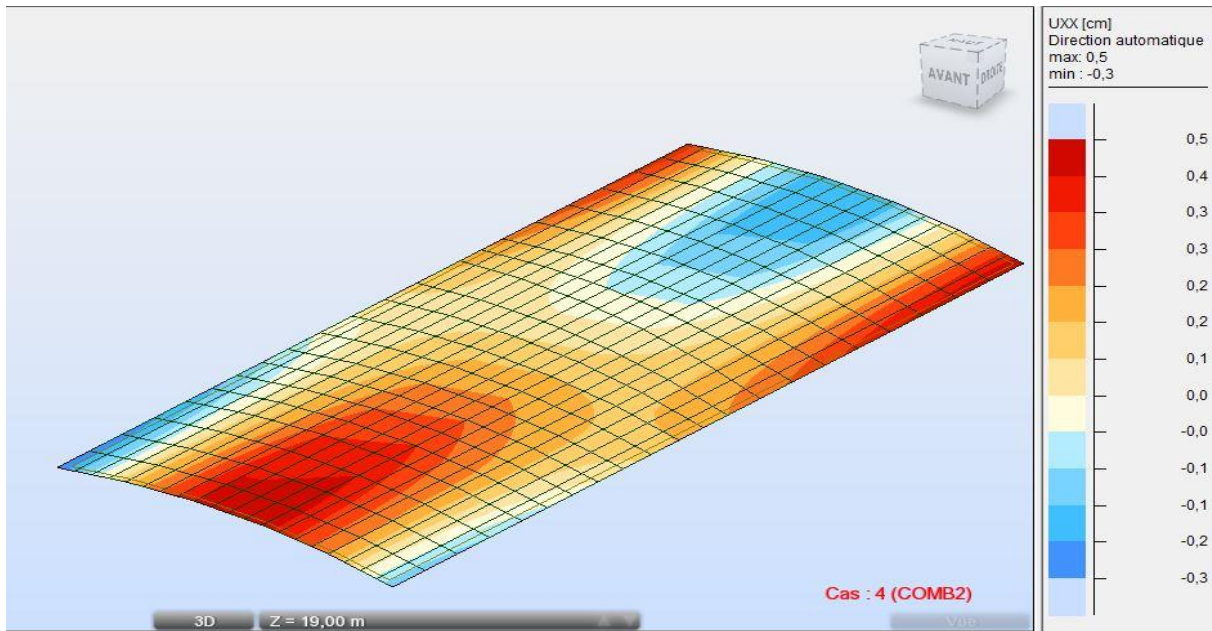


Figure IV. 17 Déplacement suivant l'axe x

- U_{yy}

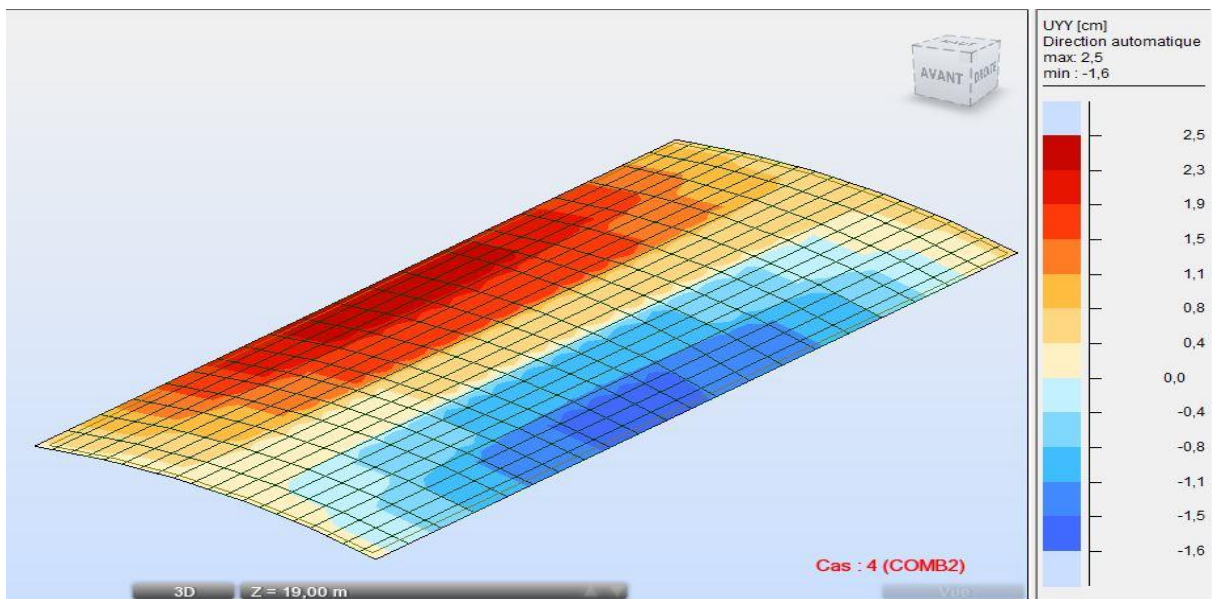


Figure IV. 18 Déplacement suivant l'axe y

- W_{Normal}

La valeur trouvée ne doit pas dépasser la flèche admissible, déterminée par la relation :

$$flèche_{admissible} = \frac{Portée L(cm)}{250} = \frac{5000cm}{250} = 20cm$$

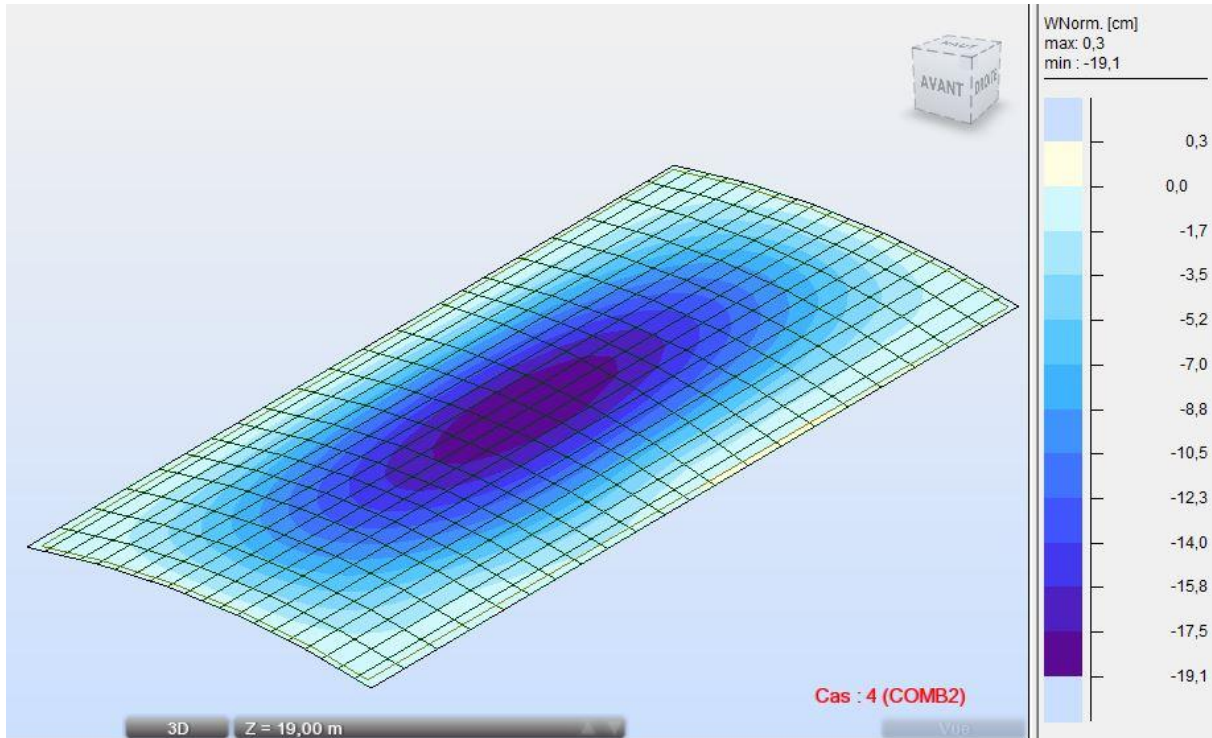


Figure IV. 19 Déplacement suivant l'axe Z

Telle qu'on le voit sur la figure, la flèche max est située au centre de la coque

Tableau IV. 9 valeurs max des déplacements

Déplacement suivant x	
Déplacement max positif	0.5m
Déplacement max négatif	-0.3cm
Déplacement suivant y	
Déplacement max positif	2.5cm
Déplacement max négatif	-1.6cm
flèche	
flèche max positive	0.3cm
Flèche max négative	-19.1cm

$|flèche_{max}| = 19.1cm < flèche_{admissible} = 20cm$: Relation vérifiée.

3. LES CONTRAINTES

Pour des raisons de sécurité, les valeurs des contraintes trouvées après calcul ne doivent pas dépassées la contrainte limite du béton.

$$f_{bu} = \frac{0.85 * f_{c28}}{1.5} = \frac{0.85 * 25MPa}{1.5} = 14.1667MPa$$

- S_{xx}

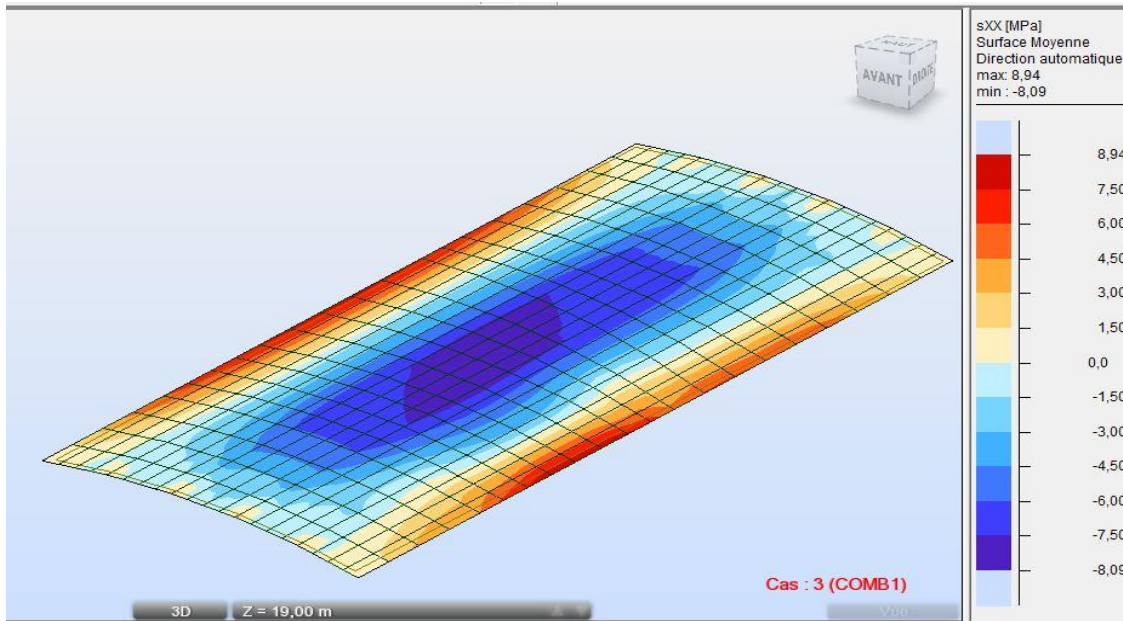


Figure IV. 20 Contraintes suivant la directrice

- S_{yy}

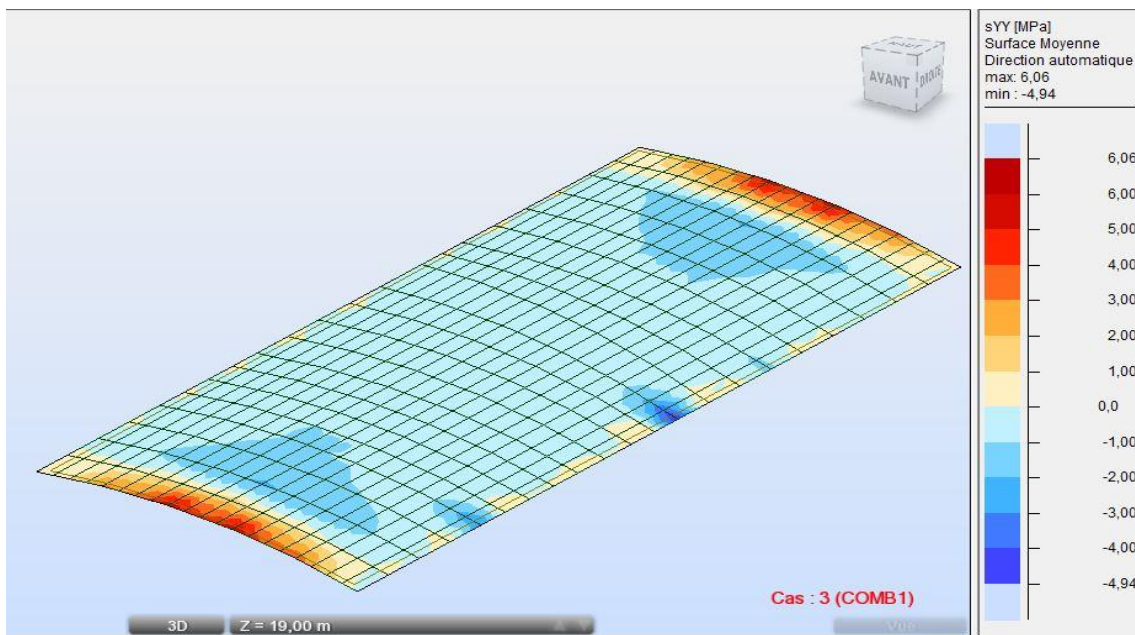


Figure IV. 21 Contraintes suivant la génératrice

- s_{xy}

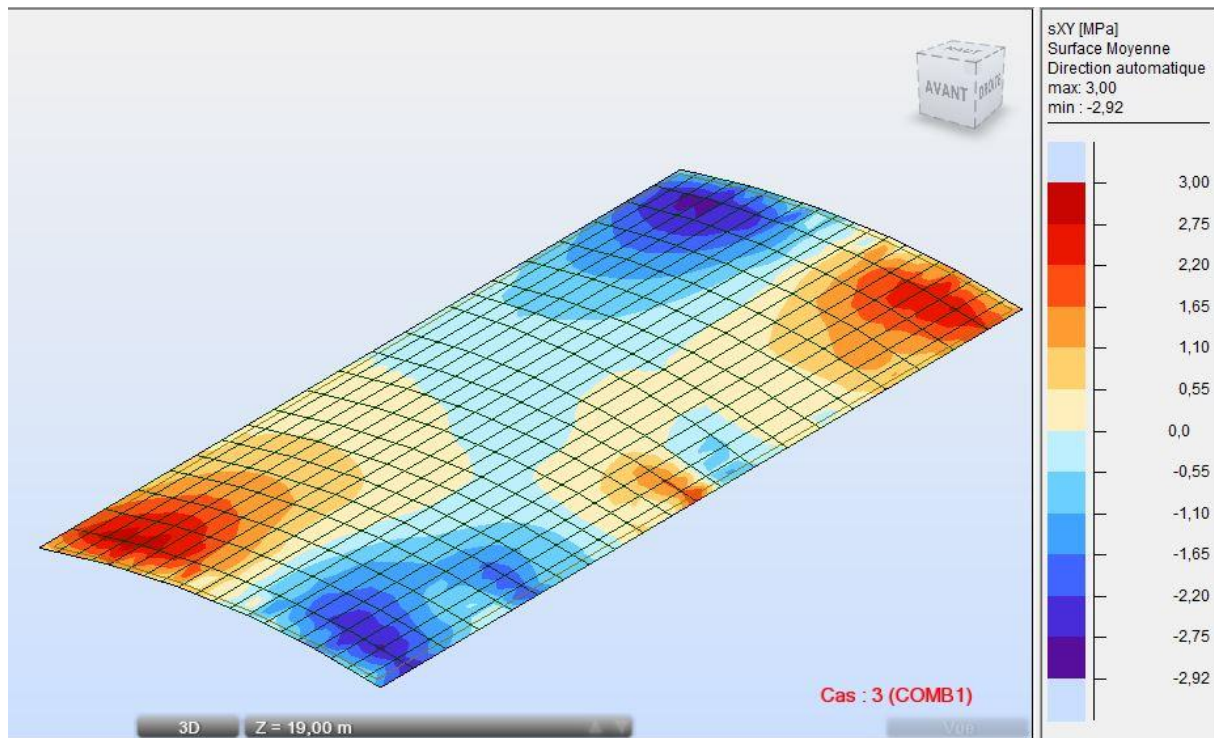


Figure IV. 22 Contraintes tangentielles

Tableau IV. 10 Valeurs max des contraintes

Contraintes suivant x	
Contrainte max positive	8.9MPa
Contrainte max négative	-8.09MPa
contraintes suivant y	
Contrainte max positive	6.06MPa
Contrainte max négative	-4.94MPa
Contraintes tangentielles	
Contrainte max positive	3MPa
Contrainte max négative	-2.92MPa

Aucune des valeurs reprises dans le tableau ci- dessus ne dépasse la contrainte limite du béton, la sécurité est donc assurée.

IV.4.2. Calcul des armatures dans la coque

Avant de reproduire les tableaux des armatures théoriques par mètre linéaire, voici en premier lieu, les paramètres pris en compte dans le calcul :

Tableau IV. 11 Paramètres des coques BA - ferrailage théorique

Norme	BAEL 91 modifié 99
Direction du ferrailage :	suitant l'axe X
Matériaux	
Béton :	BETON, résistance caractéristique 25,00(MPa)
Acier :	HA 500, résistance caractéristique 500,00(MPa)
Paramètres ELS	
Valeurs admissibles	
Flèche :	$f < 20,0$ cm
Lit supérieur	
Fissuration :	préjudiciable
Lit inférieur	
Fissuration :	préjudiciable
Ferrailage	
Diamètres des armatures inférieures :	$d1 = 12$, $d2 = 12$
Diamètres des armatures supérieures :	$d1' = 12$, $d2' = 12$
Enrobage :	inférieur $c1 = 3,00$ (cm), supérieur $c2 = 3,00$ (cm),
Distribution des armatures:	Dans deux directions

La coque sera ferrillée suivant la figure ci-dessous :

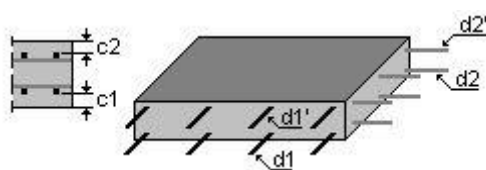


Figure IV. 23 Modèle de ferrailage de la coque²¹

Tableau IV. 12 Section théorique des armatures

	$[-]A_x$ Principal [cm ² /m]	$[-]A_y$ Perpendiculaire [cm ² /m]	$[+]A_x$ Principal [cm ² /m]	$[+]A_y$ Perpendiculaire [cm ² /m]
MAX	6,11	8,7	6,11	8,7

²¹ François NGAPGUE, *Béton armé I*, Tech1, ULPGL, Goma, 2014-2015, inédit.

IV.5. INTERPRETATION DES RESULTATS

La structure comprend 4 coques, deux à deux identiques, ce qui veut dire qu'elle ne comprend que 2 dont l'une a une portée plus grande que l'autre, les calculs ont porté sur la plus grande et seront ensuite étendus à la deuxième.

Les résultats précédemment présentés montrent que les coques seront capables de supporter les actions auxquelles elles sont soumises dans le respect des normes préétablies.

En définitive, la vérification effectuée, conduit à maintenir les dimensions suivantes

Coque en BA

Epaisseur : 8cm

Portée et surface

Panneau 1 : 50m et 781.13m²

Panneau 2 : 26.65m et 461.43m²

Rayon de courbure : 3m

Les deux panneaux restent sans appuis intermédiaires, sans raidisseurs ni diaphragmes.

IV.6. COUT ESTIMATIF

Tableau IV. 13 Coût de la toiture en coque

N ^o	DESIGNATION	QUANTITE	UNITE	PRIX UNITAIRE [\$]	PRIX TOTALE [\$]
1	Panneau 1	125	m ³	500	62 500
2	Panneau 2	74	m ³	500	37 500
TOTAL					100 000

La réalisation de cette toiture nécessite 100 000\$ qui comprend le prix des matériaux, mains d'œuvre, transport et imprévus.

CONCLUSION

Le sujet de recherche abordé dans ce travail de fin de second cycle, est un avant-projet dont la réalisation s'avère d'une importance capitale dans le cadre de développement du point de vue scientifique, économique et social.

Il contribue d'une part à l'amélioration des conditions d'étude à Goma. D'une autre part, à l'accroissement du trésor public et au maintien des liens sociaux. Cependant, pour y arriver, à cet aspect architectural, il faut ajouter un aspect purement pédagogique.

Tel qu'il se présente, c'est une étude vaste, qui peut être subdivisée en plusieurs parties interdépendantes. Certaines de ces nombreuses parties ont été abordées ici, à titre de rappel, il s'agit de :

Notions générales à savoir pour pouvoir concevoir un ouvrage dans le respect des normes.

L'analyse statique de la couverture en coque et du coût estimatif qui en découle.

La couverture étudiée est une coque mince en BA, sa modélisation et son calcul dans RSAP, a permis de comprendre comment manipuler ce genre de structure soumise à des actions variées. Son coût estimatif s'élève à : 100 000\$

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

1. François Frey, *Traité de génies-civil Volume 5, Analyse des structures en milieux continus*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires Romandes, 2013.
2. Ernest NEUFERT, *les éléments de projet de construction*, 8^{ème} édition, paris, 2002.
3. Jean-Pierre MOUGIN, *béton armé : bael 91 modifié 99 et DTU associés*, 2^{ème} édition, Eyrolles, Paris, 2000.
4. Jean PERCHAT et Jean ROUX, *pratique du bael 91*, 2^{ème} édition, Eyrolles, paris, 1998.
5. Antoine LEGAYS, *Calcul des structures par les éléments finis*, Cnam Paris, 2012.

MEMOIRES

1. ABDELKADER NDIAYE, *conception d'une toiture autoportante en béton armé destiné à la couverture d'un hall omnisport*, université CHEIKH ANTA DIOP, Thiès, 1986.
2. Martial MISSIHOUN, *Calcul et Technologie des voiles minces*, Université CHEIKH ANTA DIOP, Thiès, 1992.
3. MATHE BASEHAYE Irénée, *Etude structurale d'une coque de révolution en BA imitant la forme du volcan Nyiragongo: avant-projet d'un musée à Goma*, Université Libre des Pays des Grands Lacs, Goma, 2014-2015.

COURS

1. MUTONDO Rufin, *Calcul des structures II*, Tech 2, ULPGL, Goma, 2015- 2016, inédit.
2. François NGAPGUE, *Béton armé I*, Tech1, ULPGL, Goma, 2014-2015, inédit.

NORMES

1. EUROCODE 1 : bases de Calcul et Actions sur les structures
2. EUROCODE 2 : Construction des structures en béton armé

WEB SITE

1. www.civilmania.com
2. <https://www.erasmusworld.org/>
3. <https://www.buzzfeed.com/.../les-25-plus-beaux-campus-universitaires-du-monde>
4. www.sphere-emotion.fr/
5. www.oecd.org/fr/edu/innovation-education/.../45566842.pdf