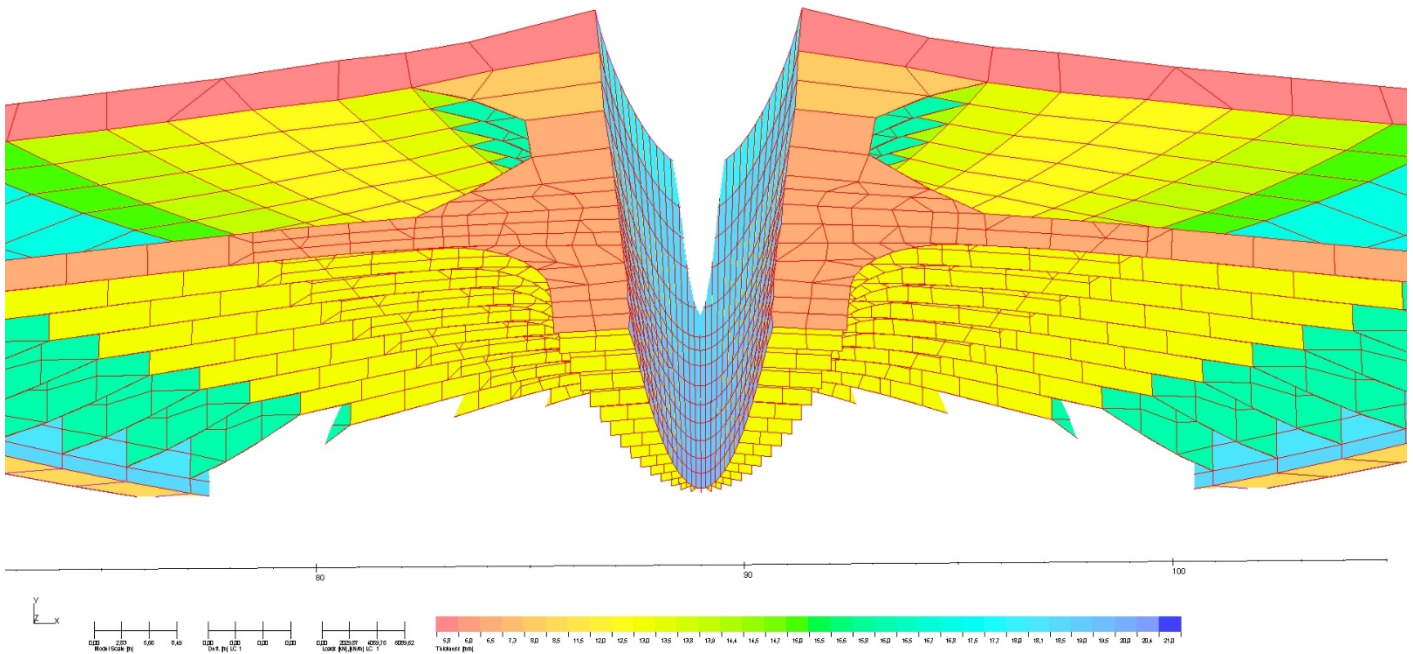


COMPTE-RENDU DU BUREAU D'ETUDES

DIMENSIONNEMENT ET ANALYSE DE LA STRUCTURE D'UN PETROLIER



Mathieu VENOT

Sebastien LOUBEYRE

L'objectif de ce BE structures navales est d'étudier la réponse structurelle d'une poutre navire d'un pétrolier soumis à un état de mer ainsi qu'à des contraintes de cargaison. Le logiciel d'analyse et de modélisation structurelle utilisé pour ce BE est celui de la société de classification DNV GL, POSEIDON.

Présentation du logiciel de calcul structurel POSEIDON

Introduction a POSEIDON

POSEIDON permet la modélisation et l'analyse de la structure du navire. Suite à la modélisation des éléments de structure du bateau, il est possible de réaliser une étude des contraintes et déformations subies par la structure dans des cas de fonctionnement. Il a notamment deux fonctionnalités clés :

- Vérification des critères de classification
La structure est soumise à une étude structurelle de manière à vérifier le respect des critères définis dans la classification garantissant une structure pérenne et suffisamment résistante.
- Calcul des déformations et contraintes subies par la structure en fonctionnement
Suite à la définition de la structure du navire ainsi que d'un cas de chargement et contraintes, une analyse FEM est effectuée par POSEIDON. Cela permet de visualiser les efforts et déformations subies par la structure dans le cas de chargement considéré.

Ce logiciel est donc adapté lors de la phase de définition, d'analyse et de dimensionnement de la structure au sein de la boucle navire.

Avantages et inconvénients de POSEIDON

- + Logiciel métier. Il a donc certaines fonctions permettant une simplification de son fonctionnement, le rendant plus intuitif
- + La définition des éléments est assez intuitive et permet une définition rapide de la structure d'un navire
- + Module de définition de structure, de vérification des critères de classification et d'analyse de FEM couplés permettant une interaction forte entre les différents modules
- Logiciel métier. Certaines fonctions « automatiques » fonctionnent malgré des erreurs de définition dans la structure. Fonctionnement en « boîte noire » sur les étapes de calcul
- Ergonomie
- Léger manque de robustesse
- Fiabilité des résultats parfois aléatoire

Comparaison avec les logiciels existants (MARS, ABAQUS...)

Comparé à d'autres logiciels plus généraux de calcul par éléments finis, POSEIDON à l'avantage d'être un logiciel métier conçu particulièrement pour la structure navale. Cela permet un gain de temps dans la définition et l'analyse de la structure (à l'aide du wizard notamment).

Par rapport à MARS, il permet une modélisation 3D complète, ainsi que l'intégration d'outils d'analyses FEA. Cependant, le niveau de précision en maillage et en calcul semble être moins capable qu'ABAQUS par exemple.

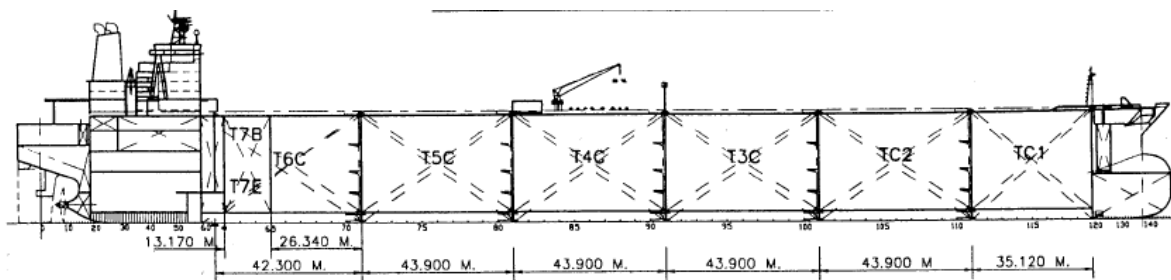
Feuille de calcul structurel

Présentation du bateau et du modèle d'étude

Le navire dont la structure est étudiée dans ce bureau d'étude est un pétrolier. Le dimensionnement de la structure sera fait à l'aide de vérifications réglementaires et d'analyses par la méthode des éléments finis sous différents cas de chargements et contraintes inhérents à son fonctionnement.

Le pétrolier étudié a les caractéristiques suivantes :

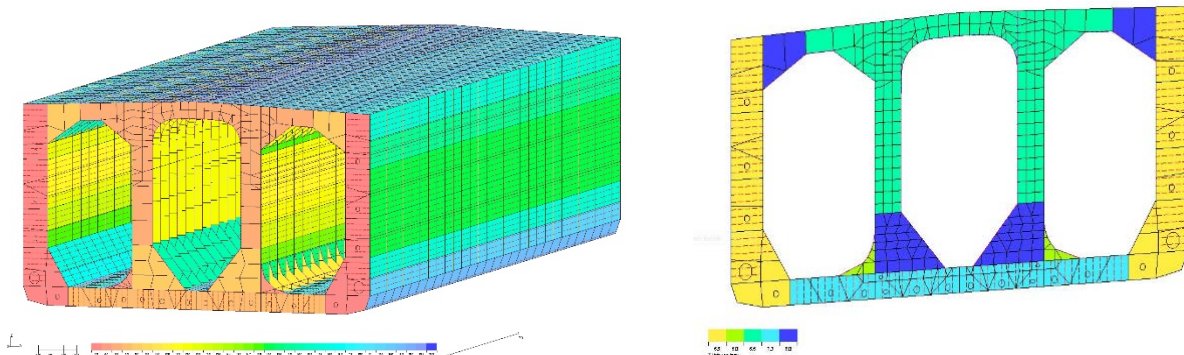
Caractéristiques	Valeurs
Spécificités	Double coque
Capacité de stockage	2,1 millions de barils
Longueur	L = 323 m
Largeur	B = 57 m
Hauteur	H = 31,5 m
Tirant d'eau	T = 22,2 m
Coefficient de Bloc	Cb = 0,836



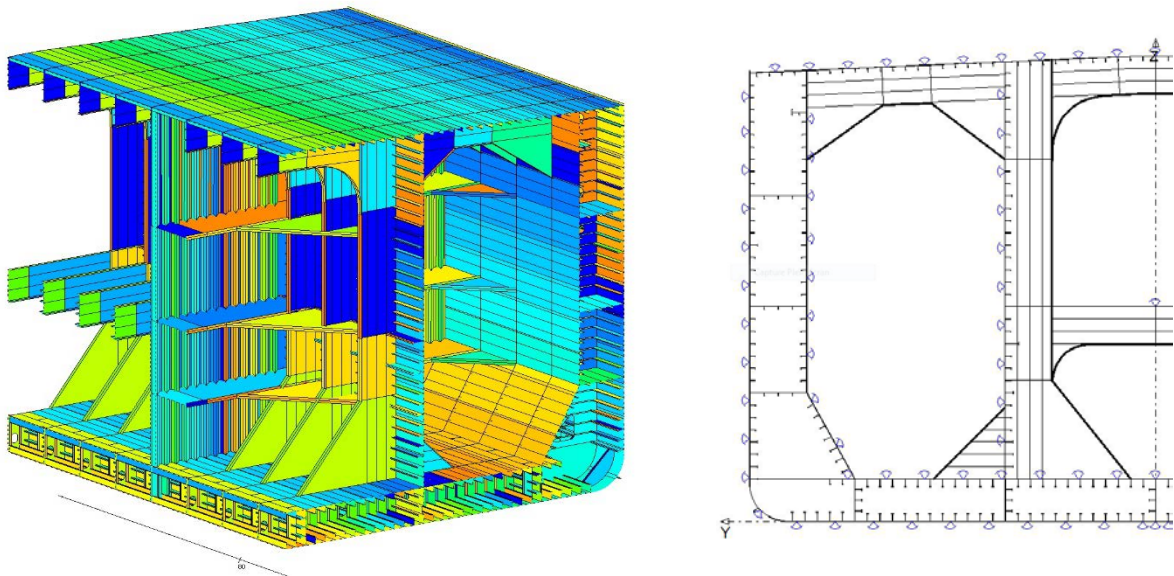
La modélisation de la structure du pétrolier sera faite sur les trois cloisons centrales (T3C, T4C, T5C) entre les couples 71 et 101. Ce sont les cales centrales qui subissent les efforts les plus importants. Ce sont donc des parties structurales dimensionnantes et leur étude suffit à vérifier la pérennité de la structure poutre navire.

La modélisation de la structure sur ces 3 cales a été faite par étapes successives :

- Modélisation la structure sans renforcement et dimensionnement des raidisseurs longitudinaux
- Modélisation des raidisseurs transverses et des cloisons renforcées pour lutter contre le flambement de la cloison centrale



- Modélisation de la poutre transversale et parois étanches aux extrémités des cales aux couples 81 et 91



L'ensemble de la structure a été modélisée en suivant les plans fournis. Quelques simplifications géométriques (simplification de formes et du raidissage) ont été faites dû aux contraintes logiciel imposées par POSEIDON mais celles-ci n'affectent pas l'intégrité structurelle du navire.

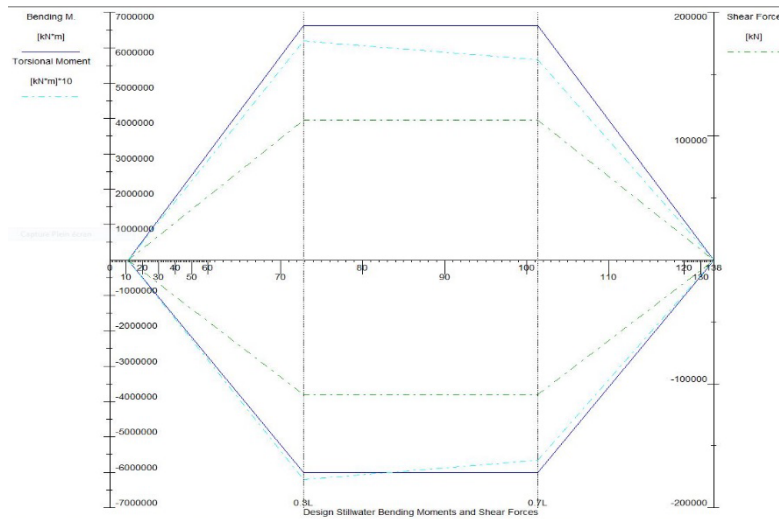
Pour assurer un comportement fidèle des trois cales centrales modélisées lors des analyses structurales, les contraintes de mouvement et les charges appliquées aux extrémités (en 71 et 101) tiendront compte du reste du navire non modélisé.

Les cas de chargements qui sont étudiés dans ce rapport sont les suivants :

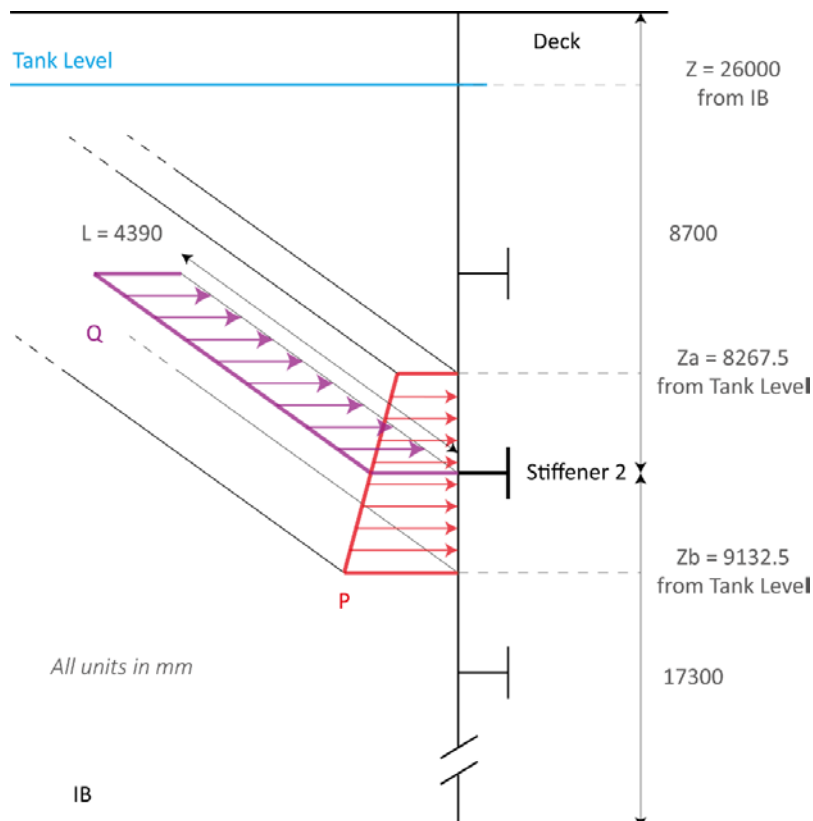
- « Stillwater » : Navire léger soumis à l'action de l'eau sur sa coque. L'analyse se concentre sur le moment de flexion engendré sur la poutre navire par l'effet hydrostatique. Les efforts de cisaillement sont négligés.
- « Central tank loads » : Navire cales pleines de pétrole soumis à l'action de l'eau sur sa coque. L'analyse prend alors en compte à la fois le moment fléchissant et les efforts tranchants s'appliquant sur la structure. Les sources d'efforts sont ici à la fois les efforts hydrostatiques s'appliquant sur la structure mais aussi les efforts engendrés par le pétrole contenu dans les cales.

UV 5.5 _ STRUCTURES NAVALES COMPTE-RENDU DU BUREAU D'ETUDE

Un moment fléchissant s'applique sur la structure et prend la forme décrite ci-dessous. Les valeurs maximales atteintes sont les suivantes :



Méthode de dimensionnement d'un raidisseur



UV 5.5 _ STRUCTURES NAVALES
COMPTE-RENDU DU BUREAU D'ETUDE

Raidisseur	Raidisseur 2
Longueur du raidisseur	4,390 m
Cas de chargement	Cuve latérale remplie – jusqu'à H = 26 depuis le fond de cuve (IB)
Masse volumique du fuel	760 kg/m ³
Condition limites du raidisseur	Raidisseur considéré comme encastré aux deux extrémités

La charge locale subie par le raidisseur est l'effort de pression exercé par le fluide stocké (fuel) dans la cuve. Celle-ci est exprimée par :

$$p = \rho \cdot g \cdot z$$

On calcule donc la charge linéique homogène subie par le raidisseur sur sa longueur en intégrant sur la hauteur la pression subie par la surface soutenue par le raidisseur :

$$Q = \int_{z_A}^{z_B} \rho \cdot g \cdot z \cdot dz = \int_{9.1325}^{8.2675} \rho \cdot g \cdot z \cdot dz = \frac{1}{2} \rho g [z_B^2 - z_A^2]$$

$$Q = 56,107 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

De plus, à la vue des conditions limites du raidisseur – encastrement – on peut en déduire le moment de flexion maximum subit :

$$M_{max} = \frac{Q \cdot L^2}{12} = 90,108 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Le raidisseur est un profile HP 430x17. A partir de Poséidon, les données structurales du raidisseur sont également disponibles :

Profile	Area (cm ²)	e (mm)	W (cm ³)	I (cm ⁴)
HP 430x17	102,5	269,2	1971,7	60832

En utilisant ces valeurs on peut calculer le moment d'inertie ainsi que les modules de sections au niveau de la tôle (d'épaisseur 19 mm et de longueur 865 mm) ainsi qu'au niveau du haut du raidisseur comme suit :

	A (cm ²)	z (cm)	Az (cm ³)	Az ² (cm ⁴)	I _{leg} (cm ⁴)
Raidisseur	102,50	28,82	2954,05	85135,72	60832,00
Tôle	164,35	0,95	156,13	148,33	49,44
SUM	266,85		3110,18	85284,05	60881,44
e (cm)	11,66 (= A/Az)				
I _{base} (cm ⁴)	146165,49 (= Az ² +I _{leg})				
I (cm ⁴)	109915,78 (= I _{base} – Ae ²)				
Y _{tôle wrt e} (cm)	11,66 (= I/Y _{raidisseur})				
W _{plaque} (cm ³)	9430,64 (= I/Y _{tôle})				
Y _{raid. wrt e} (cm)	33,24 (= Ltôle + Lraidisseur - e = 1,9+43 – e)				
W _{raidisseur} (cm ³)	3306,25 (= I/Y _{raidisseur})				

A partir de ces valeurs on peut calculer la contrainte maximale subie par le raidisseur au niveau de la tôle et de la semelle, exprimées comme suit :

$$\sigma_{max,tôle} = \frac{M_{max} y_{tôle \text{ wrt } e}}{I} = \frac{M_{max}}{W_{tôle}} = \frac{90,108.10^3}{9,431.10^{-3}} = 9.55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max,semelle} = \frac{M_{max} \cdot y_{semelle \text{ wrt } e}}{I} = \frac{M_{max}}{W_{semelle}} = \frac{90,108.10^3}{3,306.10^{-3}} = 27,26 \text{ MPa}$$

Ces valeurs sont uniquement dues aux efforts locaux s'appliquant sur la plaque et le raidisseur. Cependant, des efforts globaux sont à considérer dans une vision globale des efforts s'appliquant à cet endroit, notamment :

- Prise en compte de la flexion de la poutre navire
- Prise en compte du flambement
- Prise en compte des variations de chargements dans les cales et des efforts induits

Calcul règlementaire de l'épaisseur de tôle :

Tôle considérée	Carlingue centrale de la double coque (LG00,pl1)
Epaisseur minimale de la tôle selon Poséidon	t = 16.395 mm

La réglementation fournie par le DNV GL inclut des méthodes de calcul qui permettent de calculer les épaisseurs de tôle minimales à respecter selon leur usage – coque, varangue, carlingue, pont ou autre. Ici, la plaque étudiée est la carlingue centrale de la double coque du navire. Cela correspond au « Double bottom : center girder ».

Voici l'application de la méthode de calcul permettant le dimensionnement de l'épaisseur de tôle minimale à respecter :

$$t_m = \frac{h}{h_a} \left(\frac{h}{120} + 3.0 \right) \sqrt{k} \quad \text{si } h \geq 1200 \text{ mm}$$

$$t_m = \frac{h}{h_a} \left(\frac{h}{100} + 1.0 \right) \sqrt{k} \quad \text{si } h \leq 1200 \text{ mm}$$

Avec h_a profondeur de la carlingue telle que construite, h profondeur de la carlingue définie par la réglementation, et k la constante liée au matériau de construction.

Ici l'acier utilisé est tel que $R_{eH} = 315 \text{ N.mm}^{-2}$ donc $k = 0.78$ et $h = 2980 \text{ mm}$ donc la première formule sera appliquée.

De plus h est définie telle que :

$$h = 350 + 45l$$

Avec l la portée non supportée des plaques du double fond. Ici $l = 0.8B$. Donc :

$$l = 0.8B = 0.8 \times 57 = 45,6 \text{ m}$$

UV 5.5 _ STRUCTURES NAVALES
COMPTE-RENDU DU BUREAU D'ETUDE

$$h = 350 + 45 * 45.6 = 2400 \text{ mm}$$

Donc

$$t_m = \frac{h}{h_a} \left(\frac{h}{120} + 3.0 \right) \sqrt{k} = 16.36 \text{ mm}$$

Cela correspond à la valeur calculée par Poséidon qui utilise la réglementation DNV GL comme base de calcul et comme outil de dimensionnement des structures.

Analyse par éléments finis

Des calculs éléments finis ont été réalisés pour valider le dimensionnement de la structure, en modélisant un modèle 3 cales, du couple 71 au couple 101.

2 modèles ont été modélisés, sans puis avec la poutre de la cuve centrale (central girder).

3 cas de chargement ont été étudiés :

- Aucun chargement en Stillwater (sans central girder)
- Aucun chargement en Waves (sans central girder)
- Chargement du tank central en Waves (sans puis avec central girder) avec considération des efforts tranchants appliqués sur la structure.

Les conditions aux limites ont été définies comme suit :

Kind of Section	Location of Section					Support Condition						Boundary Value
	X-Start	X-End	Y-Z Start	Y-Z End	Sym	X	Y	Z	XX	YY	ZZ	
y-z-plane	71					0	0	0	0	2	0	1,00000e+008
y-z-plane	101					0	0	0	0	2	0	1,00000e+008
x-z-plane			0,0 mm			0	9	0	9	0	9	1,00000e+008
IH	71	71	STR01	STR01	P+S	9	9	9	0	0	0	1,00000e+008
IH	101	101	STR01	STR01	P+S	0	0	9	0	0	0	1,00000e+008
IH	101	101	STR03	STR03	P+S	0	9	0	0	0	0	1,00000e+008
*IH	101	101	STR03	STR03	P+S	0	9	0	0	0	0	1,00000e+008

Ces conditions permettent de représenter de manière adéquate les contraintes subies par la structure au centre du navire. En effet celle-ci étant lié à l'avant et à l'arrière, il est nécessaire de simuler des conditions limites permettant d'aboutir à des résultats les plus fidèles possible à la réalité.

Concernant la modélisation, plusieurs hypothèses ont été effectuées :

- Le modèle est maillé que d'un seul côté pour des raisons évidentes de symétrie afin de réduire le temps de calcul nécessaire.
- Les raidisseurs sont représentés par une augmentation de raideur de la tôle (mode 2) à proximité dans le cas du modèle sans STR_H.
- Les raidisseurs sont représentés par des éléments poutres (mode 3) dans le cas du modèle avec STR_H.

Plusieurs niveaux de maillage ont été utilisés, notamment pour avoir une précision suffisante aux zones de fortes sollicitations. Cette étape de maillage a été relativement longue pour trouver de bons paramètres et un modèle correctement maillé, sans éléments manquants ou imperfections.

UV 5.5 _ STRUCTURES NAVALES COMPTE-RENDU DU BUREAU D'ETUDE

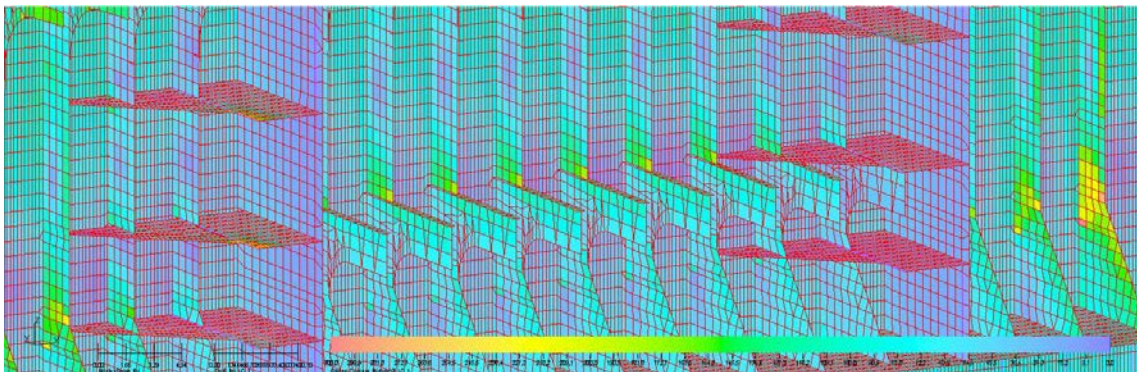
- Maillage 1 (grossier) :
4 025 Nœuds, 1 178 Barres, 5 516 Plaques

NO. OF NODAL POINTS	:	4025
NO. OF BEAM ELEMENTS	:	1178
NO. OF PLANE STRESS ELEMENTS	:	5516
NO. OF BOUNDARY ELEMENTS	:	0
NO. OF P.S.E. MATERIAL	:	6
NUMBER OF EQUATIONS	:	23682

- Maillage 2 (raffiné) :
12 174 Nœuds, 1 535 Barres, 14 514 Plaques

NO. OF NODAL POINTS	:	12174
NO. OF BEAM ELEMENTS	:	1535
NO. OF PLANE STRESS ELEMENTS	:	14514
NO. OF BOUNDARY ELEMENTS	:	0
NO. OF P.S.E. MATERIAL	:	6
NUMBER OF EQUATIONS	:	71691

Le maillage utilise plusieurs niveaux de précision, avec une partie globale maillé assez grossièrement, puis des raffinages locaux dans la cuve milieu qui nous intéresse.



1 : Exemple de maillage avec raffinement

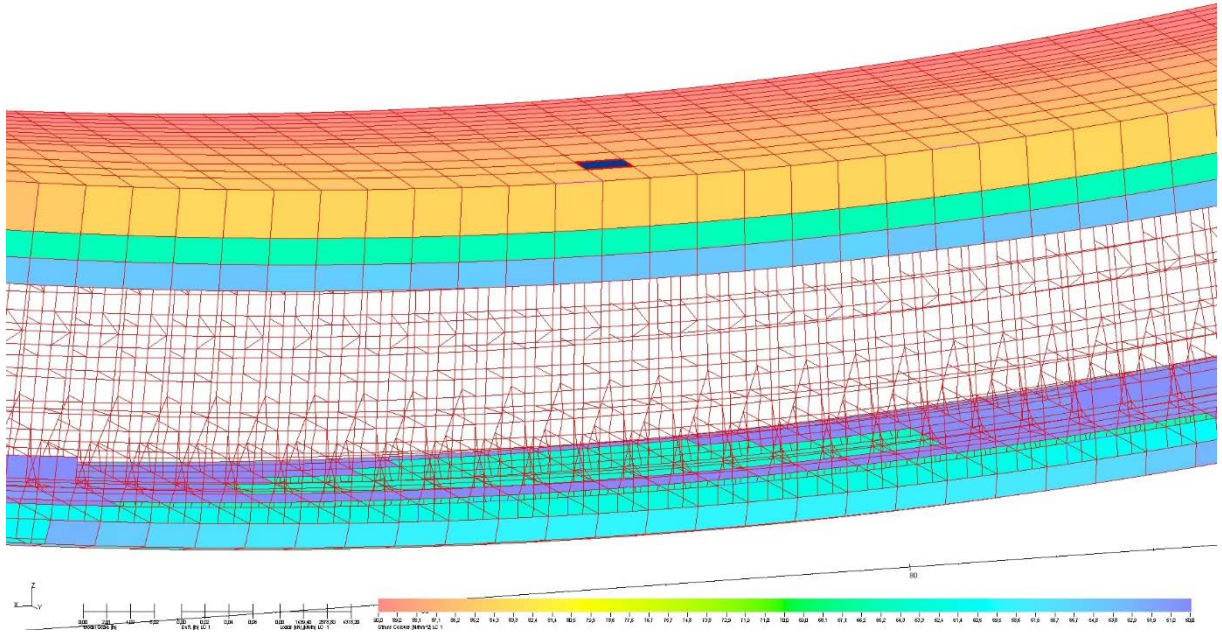
Finalement, les résultats observés ont été successivement :

- Sans chargement en Stillwater :

On observe une répartition des contraintes conforme à la théorie de la poutre navire – compression dans les ponts et traction dans les fonds pour une poutre en contre arc (sagging) – et une position de la fibre neutre aux environs de 0.4D – correspondant à la zone d'effort minimale. Cette flexion dans le sens longitudinal explique les faibles contraintes dans les éléments transverses, due au seul moment fléchissant, donc à l'absence d'effort de cisaillement.

On remarque également de faibles réactions aux appuis qui confortent notre choix des conditions aux limites (forces nulles, et moments faibles). Les déplacements sont de l'ordre de :

	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Déplacements	6	3	5



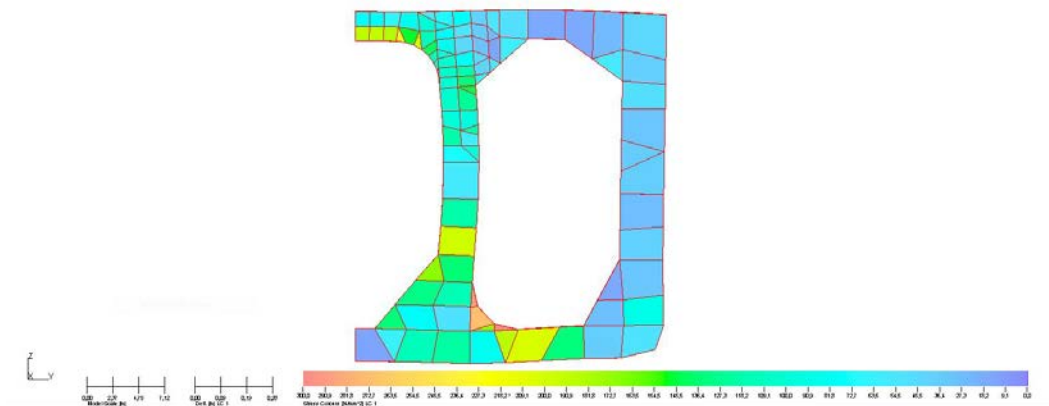
2 : Déformation de la poutre navire sans chargement en Stillwater

Ces résultats nous permettent de vérifier qu'en situation « Stillwater », sans chargement, la tenue structurale du navire est assurée par les profils utilisés pour les raidisseurs.

- Sans chargement en Waves :

On observe la même répartition des charges, mais surtout une déformation plus importante avec un flambement du vertical web qui sépare longitudinalement les cuves. Les déplacements sont cette fois de l'ordre de :

	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Déplacements	8	4	15



3 : Déformation du vertical web sans chargement en Waves

- Tank central chargé en Waves sans raidissage central :

UV 5.5 _ STRUCTURES NAVALES COMPTE-RENDU DU BUREAU D'ETUDE

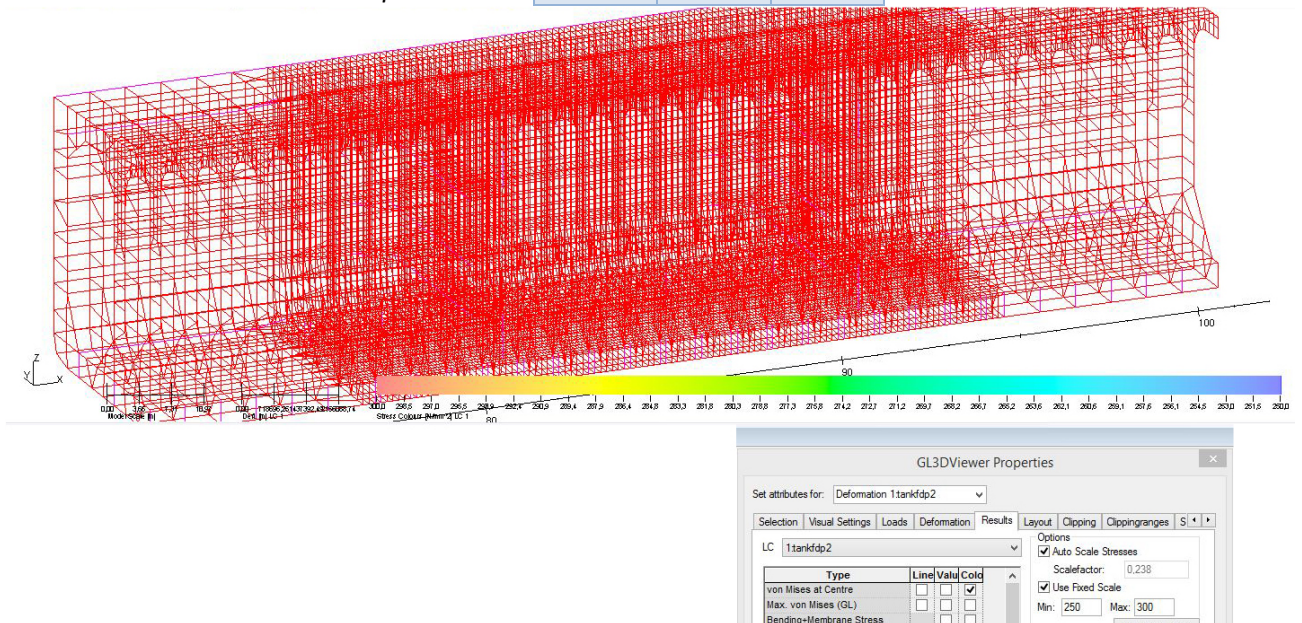
On observe le même cas de figure que le cas précédent mais déformation et flambement plus importants. Les déplacements maximums se situent aux niveaux des vertical web qui séparent les cuves longitudinalement, à cause de leur flambement.

Ces résultats montrent une plastification du vertical web de la cuve centrale. Il sera donc nécessaire d'ajouter une poutre centrale afin de réduire ce flambement et éviter l'apparition de déformation plastique.

- Tank central chargé en Waves avec le central girder :

On observe une nette amélioration en réduisant la déformée due au flambement. De plus, on valide nos résultats en isolant les éléments subissant une contrainte supérieure à 250 MPa et on remarque qu'aucun de nos éléments ne dépassent cette valeur. On valide donc notre structure, car nous restons bien en dessous des 300 MPa de contrainte admissible. Les déplacements maximums dans cette configuration sont les suivants :

	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Déplacements	5	3	10



4 : Vérification des contraintes max avec chargement en Waves

Les changements effectués ont été de renforcer le vertical web par un central girder afin de limiter le flambement de ce premier, ajouter le raidissage des cloisons étanches, puis les cornières horizontales sur ces dernières.

Conclusion

L'étude structurelle des cuves centrales de ce navire pétrolier a permis de mettre en évidence les efforts subis par la structure sous l'effet de son propre poids, de sa cargaison, et d'un potentiel état de mer.

Ces sollicitations ont un impact direct sur la structure du navire. En quantifiant ceux-ci, il a été possible de dimensionner et d'ajuster la structure de manière à valider des critères de solidité définis par la réglementation établie par la société DNV-GL.

Le dimensionnement de la structure s'est fait en 3 parties principales :

1. Dimensionnement des raidisseurs longitudinaux et transverses
2. Traitement du problème de flambement rencontré au niveau des cloisons centrales par l'ajout d'une poutre de raidissage transverse
3. Vérification et validation de la structure selon les critères imposés par la réglementation

Finalement, cette étude a permis de conduire une analyse détaillée des contraintes subies par la structure et d'adapter celle-ci en conséquence pour garantir une sécurité et une solidité satisfaisante de la structure.